

การพัฒนาผลิตภัณฑ์มะตูมผงสำเร็จรูปด้วยการทำแห้งแบบฟุ้งฝอย



นางสาวศิริพร สอนสมบูรณ์สุข

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2561

**DEVELOPMENT OF INSTANT BAEI POWDER
PRODUCT BY SPRAY DRYING**

Siriporn Sornsomboonsuk



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for
the Degree of Master of Engineering Program in Mechanical and**

Process System Engineering

Suranaree University of Technology

Academic Year 2018

การพัฒนาผลิตภัณฑ์มะตูมผงสำเร็จรูปด้วยการทำแห้งแบบพ่นฝอย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผศ. ดร.สุภกิตต์ สายสุนทร)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร.ชิราพร จุลยูเสน)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ผศ. ดร.เทวรัตน์ ตริอำนาจ)

กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



(ศ. ดร.สันติ แม้นศิริ)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ข่านิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ศิริพร สอนสมบุญสุข : การพัฒนาผลิตภัณฑ์มะตูมผงสำเร็จรูปด้วยการทำแห้งแบบพ่น
ฝอย (DEVELOPMENT OF INSTANT BAEI POWDER PRODUCT BY SPRAY
DRYING) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชีราพร จุลยุเสณ, 87 หน้า.

มอลทิทอลเป็นสารให้ความหวานที่มีความหวานใกล้เคียงกับน้ำตาลทราย แต่ให้พลังงานต่ำ การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการใช้มอลทิทอลทดแทนน้ำตาลทรายต่อการเปลี่ยนแปลงทางสมบัติทางเคมี กายภาพ และการทดสอบทางประสาทสัมผัสด้านการยอมรับของผู้บริโภคของมะตูมผงสำเร็จรูป ส่วนผสมที่เหมาะสมก่อนการทำแห้งคือ น้ำมะตูม สารให้ความหวาน มอลโตเดคทรีนซ์ และฟรุกโทโอลิโกแซคคาไรด์ เท่ากับ 68% 15% 15% และ 2% ตามลำดับ โดยสูตร 1C, 2C และ 3C มีปริมาณน้ำตาลทรายและมอลทิทอลเท่ากับ 15% และ 0%, 7.5% และ 7.5%, และ 0% และ 15% ของน้ำหนักส่วนผสมทั้งหมด ตามลำดับ สภาวะในการทำแห้งที่เหมาะสมคืออุณหภูมิลมร้อนขาเข้าและลมร้อนขาออกของเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยที่ 120°C และ 70°C ตามลำดับ อัตราการป้อนอยู่ช่วง 17-18 มิลลิลิตรต่อนาที (10 รอบต่อนาที) จากผลการทดลองพบว่า ผลิตภัณฑ์ทั้ง 3 สูตร (1C, 2C และ 3C) มีค่าความชื้นและ water activity (a_w) ต่ำกว่า 5% และ 0.6 ตามลำดับ บ่งชี้ว่าผลิตภัณฑ์มะตูมผงสำเร็จรูปนี้สามารถเก็บรักษาได้นานและมีความปลอดภัยทางด้านจุลินทรีย์ สูตร 2C มี yield และ solid recovery สูงสุด เท่ากับ 27.34% และ 79.26% ตามลำดับ ค่าความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ ABTS ปริมาณวิตามินซี และอนุมูลอิสระกลายแก้ว สูงกว่าสูตร 1C และ 3C แต่ความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ DPPH ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ขนาดของอนุภาคผงเฉลี่ย และลักษณะพื้นผิวของอนุภาคผงมีความขรุขระไม่แตกต่างกัน การเติมมอลทิทอลเพื่อทดแทนน้ำตาลทรายทำให้ค่าพลังงานลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) นอกจากนี้มอลทิทอลทำให้มะตูมผงสำเร็จรูปมีความหนาแน่นปรากฏและความสามารถในการดูดซับความชื้นกลับเพิ่มขึ้น แต่ความสามารถในการละลายลดลงเมื่อเติมมอลทิทอลทดแทนน้ำตาลทราย 100% (สูตร 3C) มะตูมผงสำเร็จรูปสูตร 2C ที่ได้รับการยอมรับจากผู้ทดสอบ และมีคุณภาพโดยรวมสูงกว่าสูตร 1C และ 3C การศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของสูตร 2C ระหว่างการเก็บรักษา 0-8 สัปดาห์ พบว่า การเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C และ 35°C นานกว่า 2 สัปดาห์ มีผลทำให้ความชื้นของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น อุณหภูมิการเก็บรักษา 35°C 45°C และ 55°C มีผลทำให้ค่าความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ DPPH และความสามารถในการละลายลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

สาขาวิชา วิศวกรรมเกษตร
ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนักศึกษา ศิริพร สอนสมบุญสุข
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา Dr. Chiraporn Julsuksan

SIRIPORN SORNSOMBOONSUK : DEVELOPMENT OF INSTANT BAEI
POWDER PRODUCT BY SPRAY DRYING. THESIS ADVISOR : ASST.
PROF. TIRAPORN JUNYUSEN, Ph.D., 87 PP.

INSTANT BAEI POWDER/MALTITOL/SPRAY DRYING/PHYSICOCHEMICAL
PROPERTIES/STORAGE

Maltitol is a sugar alcohol (polyol) with sweetness similar to that of sucrose but having a low calorific value of 2.1 kcal/g. The objectives of this study was to investigate the effects of replacement of sucrose by maltitol on the changes of physicochemical properties and sensory evaluation of instant bael powder. The optimal mixture was bael juice, sweetener, maltodextrin, and fructooligosaccharides of 68%, 15%, 15%, and 2%, respectively. Variations of sweeteners in the mixture with 15% sucrose (1C), with 7.5% sucrose and 7.5% maltitol (2C), and with 15% maltitol (3C) were tested. The optimal condition of spray drying was inlet and outlet temperature of 120°C and 70°C, and feed rate of 17-18 mL/ min (10 rpm). The results showed that moisture content and water activity (a_w) of samples (1C, 2C, and 3C) were lower than 5% and 0.6, respectively, indicating shelf-stable and microbiologically safe. Yield and solid recovery of 2C were significantly higher than those of 3C ($p < 0.05$). ABTS radical scavenging, vitamin C content, and glass transition temperature (T_g) of 2C were also significantly higher than those of 1C and 3C ($p < 0.05$). However, DPPH radical scavenging, total phenolics, particle size, and globular shape with rough surface of samples (1C, 2C, and 3C) were not affected by the variations of sweeteners. Replacing sucrose with maltitol (2C and 3C) significantly reduced the energy value ($p < 0.05$). In addition, maltitol significantly

increased the bulk density and hygroscopicity of the powders ($p < 0.05$), but the solubility was reduced when fully replacing sucrose with maltitol (3C). Overall acceptance by the panelists and quality of 2C were high. Thus, 2C was further evaluated the changes of quality during 0-8 weeks of 25, 35, 45, and 55°C storage. Moisture content of 2C was significantly increased after 2 weeks of storage at 25 and 35°C ($p < 0.05$). Elevated storage temperatures (35, 45, and 55°C) significantly reduced the DPPH radical scavenging and solubility of the powder ($p < 0.05$).



School of Agricultural Engineering

Academic Year 2018

Student's Signature Siriporn Sansombonsuk

Advisor's Signature [Signature]

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ทุกประการ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคล และกลุ่มบุคคลต่อไปนี้ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีราพร จุลยุเสน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่เมตตาให้โอกาสทางการศึกษา ให้การอบรม สั่งสอน ให้ความรู้ ชี้แนะ ช่วยเหลือในการทำการศึกษาวิจัยทุกสิ่งทุกอย่าง และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งให้คำแนะนำในการเขียนและตรวจแก้ไข วิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เทวรัตน์ ตรีอำนาจ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภกิตต์ สายสุนทร กรรมการสอบโครงร่างวิทยานิพนธ์ และกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้คำปรึกษาด้านวิชาการอันเป็นประโยชน์

คณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่านที่กรุณาให้คำปรึกษาและแนะนำการทำวิจัย คุณณกรณ์การ ประเสริฐสังข์ และคุณชนากร แนวกลาง ที่ให้คำปรึกษาและช่วยอำนวยความสะดวกในด้านเอกสารตลอดการวิจัยนี้ รวมถึงพี่น้องบัณฑิตทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ คำปรึกษาและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด

เจ้าหน้าที่บุคลากรประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่านที่ช่วยอำนวยความสะดวกทางด้านเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ตลอดการทำวิจัย

ท้ายนี้สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้แก่ครอบครัว และคณาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดี ให้แก่ผู้วิจัยตลอดมาจนทำให้ประสบความสำเร็จในชีวิต

ศิริพร สอนสมบูรณ์สุข

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป.....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
2 ปรีทศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 มะตูม (bael fruit)	3
2.2 การทำแห้ง (Drying).....	7
2.2.1 การทำแห้งแบบพ่นฝอย (Spray drying).....	7
2.2.2 การทำแห้งแบบสุญญากาศ (vacuum drying)	11
2.2.3 การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze drying)	12
2.2.4 การเคี้ยว	12
2.3 สารให้ความหวาน	13
2.3.1 น้ำตาลทราย (sucrose).....	13
2.3.2 มอลทิทอล (maltitol)	14
2.3.3 ฟรุคโทโอลิโกแซคคาไรด์ (Fructo oligosaccharide)	16
2.3.4 มอลโทเดกซ์ทริน (maltodextrin)	17

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	18
2.4.1	การทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบพ่นกระจายและไมโครเวฟ สุญญากาศ.....	18
2.4.2	การทำแห้งแบบพ่นฝอย	19
2.4.3	การศึกษาอายุการเก็บรักษา	21
3	วิธีการดำเนินการวิจัย.....	22
3.1	วัตถุประสงค์และเครื่องทำแห้ง	22
3.2	การเตรียมวัตถุดิบ	23
3.2.1	ขั้นตอนการเตรียมน้ำมะตูม.....	23
3.2.2	ขั้นตอนการทำแห้งแบบพ่นฝอย	24
3.3	การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี	28
3.3.1	การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น	28
3.3.2	การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า.....	29
3.3.3	การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน, ไขมัน, เยื่อใย.....	30
3.3.4	การวิเคราะห์ปริมาณคาร์โบไฮเดรต.....	30
3.3.5	การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด	30
3.3.6	การวิเคราะห์ค่าพลังงานของอาหาร	30
3.4	การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพ.....	30
3.4.1	วิเคราะห์ค่า yield และ solid recovery.....	30
3.4.2	การวิเคราะห์ปริมาณน้ำอิสระ, ความหนาแน่นรวม (bulk density), tapped density และ ความสามารถในการดูดความชื้นกลับ (hygroscopicity)	31
3.4.3	วิเคราะห์หาค่าการละลาย และค่า pH.....	33
3.4.4	การวิเคราะห์ค่าการกระจาย (dispersibility).....	33
3.4.5	การวิเคราะห์ขนาดอนุภาค	33
3.4.6	การวิเคราะห์ระดับโครงสร้างระดับจุลภาค	34
3.4.7	การวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อน.....	35

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4.8	การวิเคราะห์หาค่าสี	36
3.4.9	การวิเคราะห์หาปริมาณวิตามินซี	37
3.4.10	การวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ	39
3.4.11	การตรวจนับเชื้อจุลินทรีย์	40
3.4.12	การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผงมะตูมสำเร็จรูป	40
3.4	การวิเคราะห์ผลทางสถิติ	41
4	ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล	42
4.1	การศึกษาอัตราส่วนของส่วนผสมและสภาวะการทำแห้งแบบพ่นฝอย ของการผลิตมะตูมผงสำเร็จรูป	42
4.1.1	การศึกษาปริมาณมอลโทเดกทรีนซ์ต่อคุณภาพของมะตูมผงสำเร็จรูป ...	42
4.1.2	การศึกษาอุณหภูมิลมร้อนขาเข้าของเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย ต่อคุณภาพของมะตูมผงสำเร็จรูป	46
4.2	การศึกษาชนิดสารให้ความหวานต่อคุณภาพของมะตูมผงสำเร็จรูป	49
4.2.1	ผลของชนิดสารให้ความหวานต่อสมบัติทางเคมีกายภาพ ของมะตูมผงสำเร็จรูป	59
4.2.2	การวิเคราะห์ทางด้านจุลินทรีย์ของมะตูมผงสำเร็จรูป	59
4.2.3	การทดสอบทางประสาทสัมผัสของมะตูมผงสำเร็จรูป	59
4.3	การศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของมะตูมผงสำเร็จ รูประหว่างการเก็บรักษา	60
4.3.1	การวิเคราะห์ทางสมบัติทางเคมีกายภาพของมะตูมผงสำเร็จรูป ระหว่างการเก็บรักษา	61
4.3.2	การวิเคราะห์ทางด้านจุลินทรีย์ของมะตูมผงสำเร็จรูป ระหว่างการเก็บรักษา	68
5	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	70
5.1	สรุปผลการทดลอง	70

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.1.1	การศึกษาอัตราส่วนของส่วนผสมและสภาวะการทำแห้งแบบพ่นฝอย ของการผลิตมะตูมผงสำเร็จรูป	70
5.1.2	การศึกษาชนิดสารให้ความหวานต่อคุณภาพของมะตูมผงสำเร็จรูป.....	70
5.1.3	การศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของมะตูมผงสำเร็จรูป ระหว่างการเก็บรักษา.....	71
5.2	ข้อเสนอแนะ	72
5.2.1	การศึกษาอัตราส่วนของส่วนผสมและสภาวะการทำแห้งแบบพ่นฝอย ของการผลิตมะตูมผงสำเร็จรูป	72
5.2.2	การศึกษาชนิดสารให้ความหวานต่อคุณภาพของมะตูมผงสำเร็จรูป.....	72
5.2.3	การศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของมะตูมผงสำเร็จรูป ระหว่างการเก็บรักษา.....	72
รายการอ้างอิง		
ภาคผนวก		
ภาคผนวก ก	ผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพ.....	78
ภาคผนวก ข	บทความทางวิชาการที่ได้รับ การตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา.....	84
ประวัติผู้เขียน		

สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

2.1	องค์ประกอบทางเคมีและคุณภาพของมะตูมจากแหล่งต่างๆ ในประเทศอินเดีย	7
2.2	คุณค่าทางโภชนาการของมะตูมต่อส่วนที่รับประทานได้ 65-77 กรัม	7
2.3	การเปรียบเทียบสมบัติของมอลทิทอลและน้ำตาลทราย	16
3.1	ปริมาณมอลโทเดทรีนซ์ในการผลิตมะตูมผงสำเร็จรูป	26
3.2	อุณหภูมิขาเข้าที่ใช้ในการทำแห้งแบบพ่นฝอยมะตูมผงสำเร็จรูป	26
3.3	ปริมาณน้ำตาลในมะตูมผงสำเร็จรูป	27
4.1	ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดและค่าความเป็นกรดต่างของ น้ำมะตูมที่มีปริมาณมอล โดเดทรีนซ์ต่างกันก่อนการทำแห้งแบบพ่นฝอย	43
4.2	ผลของปริมาณมอลโทเดทรีนซ์ต่อคุณภาพของมะตูมผงสำเร็จรูป	45
4.3	ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดและค่าความเป็นกรดต่างของ น้ำมะตูมก่อนการทำแห้งแบบพ่นฝอยโดยใช้อุณหภูมิต่อของเครื่องต่างกัน	48
4.4	ผลของอุณหภูมิต่อของเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย ต่อคุณภาพของมะตูมผงสำเร็จรูป	49
4.5	ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดและค่าความเป็นกรดต่างของน้ำมะตูม ก่อนการทำแห้งแบบพ่นฝอย	51
4.6	ผลของชนิดสารให้ความหวานต่อคุณภาพของมะตูมผงสำเร็จรูป	52
4.7	องค์ประกอบทางเคมีของมะตูมผงสำเร็จรูป	54
4.8	สีของมะตูมผงสำเร็จรูป	56
4.9	ความหนาแน่นปรากฏ (bulk density) ความหนาแน่นจำเพาะ (tapped density) ความสามารถในการละลาย (solubility) การกระจาย (dispersibility) และความสามารถในการดูดความชื้นกลับ (hygroscopicity) ของมะตูมผงสำเร็จรูป	57
4.10	คุณลักษณะทางด้านจุลินทรีย์ของมะตูมผงสำเร็จรูป	60

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	วงจรการเจริญพันธุ์และผลของมะตูมในประเทศไทย5
2.2	องค์ประกอบภายในผลมะตูม6
2.3	เครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย9
2.4	หัวฉีดแบบ Rotary Atomizer10
2.5	หัวฉีดแบบ Pressure Nozzle11
2.6	หัวฉีดแบบ Two-Fluid Nozzle11
2.7	การทำแห้งแบบสุญญากาศ (vacuum drier)12
2.8	แผนผังเครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง13
2.9	การเลี้ยวมะตูมผงสำเร็จรูป13
2.10	โครงสร้างของน้ำตาล sucrose14
2.11	การเปรียบเทียบความสามารถในการละลายของสารใช้แทนความหวานกับน้ำตาลทราย...15
2.12	โครงสร้างของมอลทิทอล16
2.13	โครงสร้างของฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์ ของพอลิแซ็กคาไรด์17
2.14	มอลโทเดกซ์ทริน18
3.1	เครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย รุ่น Niro A/S-gladsaxevej 305 และถุงอลูมิเนียมฟอยล์ใช้บรรจุผงมะตูมสำเร็จรูป24
3.2	ขั้นตอนการเตรียมน้ำมะตูม25
3.3	การศึกษาและขั้นตอนโดยรวมในการดำเนินงานวิจัย28
3.4	การวิเคราะห์สมบัติทางเคมี กายภาพ จุลินทรีย์ และการทดสอบทางประสัมพัทธ์ ของมะตูมผงสำเร็จรูป29
3.5	เครื่อง water activity33
3.6	เครื่อง Particle size distribution analyzer35
3.7	เครื่อง scanning electron microscope (SEM)36
3.8	เครื่อง differential scanning colorimeter37

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.9 เครื่องวัดสี	37
3.10 การทดสอบทางประสาทสัมผัสของมะตูมผงสำเร็จรูปทั้ง 3 สูตร.....	42
4.1 SEM images of 1C, 2C, and 3C, respectively, denote 15% sucrose and 0% maltitol, 7.5% sucrose and 7.5% maltitol, and 0% sucrose and 15% maltitol in the mixtures.....	59
4.2 Sensory evaluation of 1C, 2C, and 3C, respectively, denote 15% sucrose and 0% maltitol, 7.5% sucrose and 7.5% maltitol, and 0% sucrose and 15% maltitol in the mixtures.	61
4.3 Moisture content of spray dried bael fruit powder (2C) as affected by storage temperature and time.....	64
4.4 Water activity (aw) of spray dried bael fruit powder (2C) as affected by storage temperature and time.....	65
4.5 Color value (L*, a*, and b*) and color difference (ΔE) of spray dried bael fruit powder (2C) as affected by storage temperature and time.....	66
4.6 DPPH and ABTS scavenging properties of spray dried bael fruit powder (2C) as affected by storage temperature and time.....	67
4.7 Bulk and tapped density and solubility of spray dried bael fruit powder (2C) as affected by storage temperature and time.....	69
4.8 Solubility and hygroscopicity of spray dried bael fruit powder (2C) as affected by storage temperature and time.....	70

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

1A	=	ปริมาณมอลโทเดทรีนซ์ 12% ของน้ำหนักส่วนผสมทั้งหมด
2A	=	ปริมาณมอลโทเดทรีนซ์ 15% ของน้ำหนักส่วนผสมทั้งหมด
3A	=	ปริมาณมอลโทเดทรีนซ์ 18% ของน้ำหนักส่วนผสมทั้งหมด
1B	=	อุณหภูมิร้อนขาเข้าของเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย 110°C
2B	=	อุณหภูมิร้อนขาเข้าของเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย 120°C
3B	=	อุณหภูมิร้อนขาเข้าของเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย 130°C
1C	=	ปริมาณน้ำตาลทราย 15%ของน้ำหนักวัตถุดิบทั้งหมด
2C	=	ปริมาณน้ำตาลทรายและมอลทิทอลอย่างละ 7.5% ของน้ำหนักวัตถุดิบทั้งหมด
3C	=	ปริมาณมอลทิทอล 15%ของน้ำหนักวัตถุดิบทั้งหมด
JECFA	=	Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives
GI	=	Glycemic Index
FOS	=	Fructo oligosaccharide
DE	=	Dextrose equivalen
D ₅₀	=	Median size
SEM	=	Scanning electron microscope
DSC	=	Differential scanning calorimeter
T _g	=	Glass transition temperature
PCA	=	Plate count agar
PDA	=	Potato dextrose agar
CRD	=	Complete Randomized Design
HSD	=	Tukey's honestly significant different

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันผู้บริโภคให้ความสำคัญต่อการดูแลสุขภาพมากขึ้น นอกจากการออกกำลังกายแล้ว การเลือกรับประทานอาหารที่มีประโยชน์ต่อร่างกายยังเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ได้รับนิยมนิยมเป็นอย่างมาก ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพหลายชนิดวางจำหน่าย เช่น อาหารสำเร็จรูป อาหารกึ่งสำเร็จรูป และเครื่องดื่มสำเร็จรูป เป็นต้น มะตูม (bael fruit) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Aegle marmelos* เป็นไม้ผลยืนต้น สามารถพบได้ในทุกภาคของประเทศไทย โดยลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของต้นมะตูมประกอบด้วย ลำต้นเป็นไม้เนื้อแข็ง ใบมีรูปทรงรูปไข่หรือรูปหอก ขอบใบหยัก มีสรรพคุณช่วยแก้อาการอ่อนเพลียและรักษาโรคเกี่ยวกับทางเดินอาหาร ส่วนรากมะตูมมีสรรพคุณแก้อาการอักเสบและแผลในกระเพาะอาหาร สำหรับผลมะตูมนั้นมีลักษณะทรงกลมรี มีผิวเรียบ ผลอ่อนเปลือกจะมีสีเขียว ผลแก่มีสีเขียวอมเหลือง ผลมะตูมดิบมีการนำมาแปรรูปเป็น น้ำมะตูม มะตูมเชื่อมและมะตูมผง มีคุณค่าทางอาหารและสรรพคุณทางยา ช่วยบำรุงกำลัง ลดการกระจาย ผลดิบที่นำมาทำแห้งและบดเป็นผงมีสรรพคุณใช้ในการบำบัดโรคเบาหวาน แก้อาเจียนและอาการกระหาย ช่วยระบายท้องและกระตุ้นการกระตุ้นการกระตุ้นการดูดซึมสารอาหารในร่างกาย นอกจากนี้ยังมีสารแทนนินปริมาณสูง สามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรียและช่วยบรรเทาอาการท้องร่วง วิตามินที่พบมากคือวิตามินซี (ascorbic acid) พบในปริมาณสูงถึง 66 มิลลิกรัม ต่อ 100 กรัม (ธีรพร กงบังเกิด และ ขนิษฐา มาน้อย, 2545) การแปรรูปผลมะตูมนอกจากจะช่วยทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพใหม่ๆ แล้ว ยังช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับมะตูมได้อีกด้วย การแปรรูปผลมะตูมให้เป็นผงมะตูมสำเร็จรูปนั้นเป็นผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มเพื่อสุขภาพที่น่าสนใจ วิธีการแปรรูปที่เหมาะสมโดยเฉพาะขั้นตอนการทำแห้งมีความสำคัญต่อผลิตภัณฑ์มะตูมผงสำเร็จรูปที่ได้ทั้งในด้านการคงคุณค่าทางอาหาร กลิ่นรส และการยอมรับของผู้บริโภค รวมทั้งด้านค่าใช้จ่ายในการแปรรูปผลิตภัณฑ์อีกด้วย การทำแห้งแบบพ่นฝอย (spray drying) เป็นเทคโนโลยีการทำแห้ง โดยให้ตัวอย่างเหลวผ่านเครื่องพ่นละออง (atomizer) จากนั้นระเหยน้ำออกด้วยการใช้ลมร้อนที่อุณหภูมิสูงระหว่าง 110-180°C ในเวลาอันรวดเร็ว เช่น ภายใน 3-5 วินาที ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้ออกมาอยู่ในรูปแบบผง (Sangeeta, Nikhil, & Charu, 2014) การทำแห้งด้วยวิธีนี้จะช่วยประหยัดเวลา ลดการสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการและสารออกฤทธิ์ทางยาของผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ยังมีปริมาณความชื้นและ a_w ต่ำ ซึ่งมีผลต่อการยืดอายุการเก็บรักษาให้นานขึ้น (Sangeeta et al., 2014)

อย่างไรก็ตามมะตูมผงสำเร็จรูปที่มีจำหน่ายในปัจจุบัน ส่วนใหญ่เป็นมะตูมผงสำเร็จรูปที่ได้จากการเคี้ยวจนแห้งและมีปริมาณน้ำตาลทรายสูงมาก (30% ของน้ำหนักทั้งหมด) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์มะตูมผงสำเร็จรูปที่มีประโยชน์ต่อสุขภาพ โดยการใช้วิธีทำแห้งแบบพ่นฝอย การลดปริมาณน้ำตาลทราย และการเพิ่มปริมาณเส้นใยอาหารในผลิตภัณฑ์ งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีกายภาพระหว่างการเก็บรักษาของมะตูมผงสำเร็จรูป รวมทั้งการทดสอบทางประสาทสัมผัสต่อการยอมรับของผู้บริโภค

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาวิธีการทำแห้งมะตูมผงสำเร็จรูปน้ำตาลน้อย ด้วยการทำแห้งแบบพ่นฝอย
- 1.2.2 เพื่อศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพของผลิตภัณฑ์มะตูมผงสำเร็จรูปน้ำตาลน้อย
- 1.2.3 เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีกายภาพของผลิตภัณฑ์มะตูมผงสำเร็จรูปน้ำตาลน้อยระหว่างการเก็บรักษา
- 1.2.4 เพื่อทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสต่อการยอมรับของผู้บริโภค

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการวิจัยคือ มะตูมอบแห้งจากโครงการอนุรักษ์พันธุกรรมพืชอันเนื่องมาจากพระราชดำริ สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี (อพ.สธ.) ตำบลคลองไผ่ อำเภอสี่คิ้ว จังหวัดนครราชสีมา
- 1.3.2 สารให้ความหวานที่ใช้แทนน้ำตาลทราย คือ มอลทิทอล
- 1.3.3 เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยรุ่น Niro A/S-gladsaxevej 305, Denmark
- 1.3.4 อุณหภูมิที่ใช้ในการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์มะตูมผงสำเร็จรูปน้ำตาลน้อยคือ 35°C 45°C และ 55°C
- 1.3.5 งานวิจัยนี้จะถูกดำเนินการในระดับห้องปฏิบัติการ (laboratory scale) เท่านั้น

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถหาสภาวะการทำแห้งแบบพ่นฝอยและสัดส่วนของผสมเหมาะสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์มะตูมผงสำเร็จรูป เพื่อลดการสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการระหว่างการทำแห้ง นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้เป็นอาหารเพื่อสุขภาพ (functional food) ซึ่งเป็นทางเลือกให้กับผู้บริโภคได้

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้กล่าวถึงรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาวิธีการพัฒนาผลิตภัณฑ์มะตูมผงสำเร็จรูปด้วยการทำแห้งแบบพ่นฝอย ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับลักษณะทางเคมีกายภาพของมะตูม วิธีการทำแห้ง สารให้ความหวานในผลิตภัณฑ์ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.1 มะตูม (bael fruit)

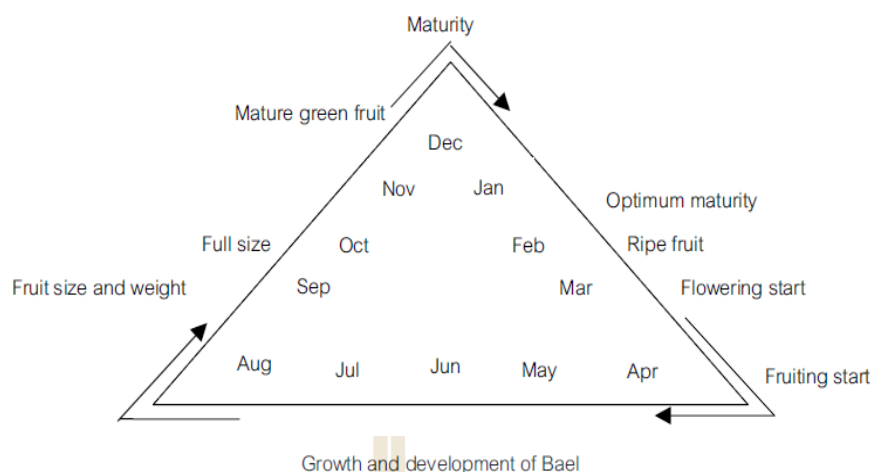
มะตูม (bael fruit) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Aegle marmelos* แต่ละภาคของประเทศไทยมีชื่อเรียกแตกต่างกัน ภาคเหนือเรียกว่า มะปิ่น ภาคใต้เรียกว่า กะทันตาเถร ตูม และตุ้มตัง ภาคอีสานเรียกว่า หมากตูม ภาษาเขมรเรียกว่า พะ โนงค์ ชาวกะเหรี่ยงเรียกว่า มะปี่สำ มีถิ่นกำเนิดอยู่ในสภาพป่าแล้งในคาบสมุทรอินเดีย ศรีลังกา บังคลาเทศและปากีสถาน แพร่กระจายพันธุ์มาสู่บริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ อินโดจีนและไทย (สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2554) โดยบริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ พบว่ามะตูมทนต่อสภาพอากาศที่อุณหภูมิแตกต่างกันมากและพื้นที่กั้นการ การเจริญเติบโตของผลมะตูมในประเทศอินเดีย สามารถแบ่งเป็น 3 ระยะ คือ

ระยะที่หนึ่งเป็นการเจริญเติบโตแบบช้าๆ (พฤษภาคมถึงมิถุนายน)

ระยะที่สองผลมีขนาดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (กรกฎาคมถึงกันยายน)

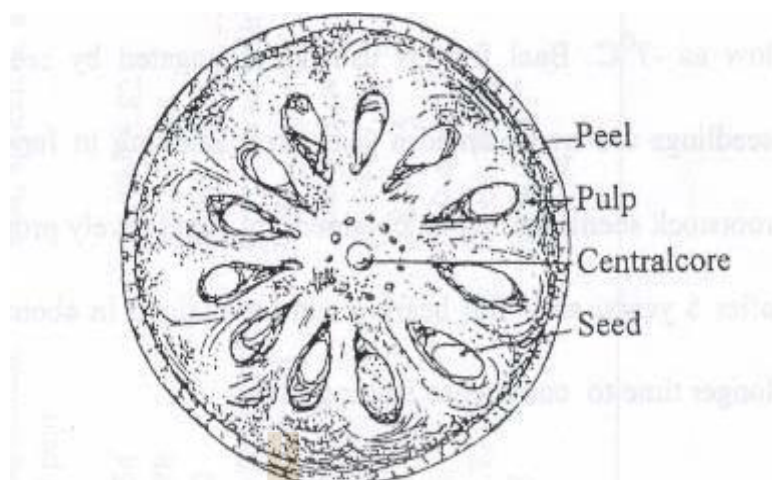
ระยะที่สามขนาดของผลไม่มีการเปลี่ยนแปลงจนถึงเวลาเก็บเกี่ยว (ตุลาคมถึงเมษายน)

ในประเทศไทยมะตูมจะเริ่มออกดอก ช่วงเดือนมีนาคม เปลี่ยนเป็นผลมะตูมในเดือนเมษายนโดยใช้เวลา 9 เดือนผลจึงแก่เต็มที่ และจะเริ่มเป็นผลสุกในช่วงเดือน มกราคมหรือ กุมภาพันธ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 วงจรการเจริญพันธุ์และผลของมะตูมในประเทศไทย
(ธีรพร กงบังเกิด และ ขนิษฐา มาน้อย, 2545)

มะตูมเป็นไม้ต้นผลัดใบขนาดเล็ก สูง 10-15 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลางลำต้น 20-25 เซนติเมตร มีหนามขนาด 1-2 เซนติเมตร บริเวณกิ่ง มีใบย่อยสามใบ ดอกออกรวมกันเป็นช่อสั้นๆ ผลค่อนข้างกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5-12.5 เซนติเมตร บริเวณเปลือกนอกมีลักษณะแข็ง ภายในผลแบ่งออกเป็นช่อง 8-16 ช่อง มีหลายเมล็ด 6-10 เมล็ด แสดงดังรูปที่ 2.2 และองค์ประกอบทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 2.1 และ คุณค่าทางโภชนาการของมะตูมต่อส่วนที่รับประทานได้แสดงในตารางที่ 2.2 เนื้อผลลักษณะใสเหนียวสามารถรับประทานได้ ในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ มะตูมจะออกดอกและติดผลในช่วงแล้งเป็นพืชสมุนไพรที่สามารถพบได้ในทุกภาคของประเทศไทย



รูปที่ 2.2 องค์ประกอบภายในผลมะตูม (ธีรพร กงบังเกิด และ ขนิษฐา มาน้อย, 2545)

สหรัฐอเมริกาได้จัดการคัดเลือกพันธุ์มะตูมที่ดีโดยพิจารณาตามปริมาณผลผลิตและคุณภาพของผล ได้ชื่อสายพันธุ์ดังนี้

สายพันธุ์ NB5 ผลมีขนาดกลางและกลม ผิวเปลือกเรียบ มีสารเมือก (mucilage) ต่ำ ปริมาณไฟเบอร์ปานกลาง เนื้อผลนุ่ม รสชาติดีมาก

สายพันธุ์ NB6 ผลมีขนาดกลางและกลม ผิวเปลือกเรียบและบาง มีสารเมือก (mucilage) ต่ำ มีเม็ดและความเป็นกรดเล็กน้อย ปริมาณไฟเบอร์ปานกลาง เนื้อผลนุ่ม

สายพันธุ์ Plant Shivani ออกผลกลางฤดู ผลมีลักษณะรูปไข่ เนื้อผลมีสีเหลืองสดใสรสชาติและกลิ่นดี มีสารเมือก (mucilage) และปริมาณไฟเบอร์ปานกลาง

สายพันธุ์ Plant Aparna ออกผลปลายฤดู ผลมีลักษณะกลมเล็ก เนื้อผลมีสีเหลือง รสชาติและกลิ่นดี ความเป็นกรดต่ำ มีสารเมือก (mucilage) และปริมาณไฟเบอร์ต่ำ เปลือกมีความหนาปานกลาง

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีและคุณภาพของมะตูมจากแหล่งต่างๆ ในประเทศอินเดีย

Particulars	Cultivars of different locations			
	Calcutta	Varanasi	Agra	Delhi
Moisture (%)	59.64-62.19	59.40-6.70	60.0-62.05	59.37-61.83
Total soluble solids (%)	31.50-35.50	31.0-34.50	31.5-34.00	32.50-35.00
Reducing sugars (%)	2.50-5.53	2.35-5.68	2.08-3.72	2.15-3.24
Nonreducing sugars (%)	11.11-12.38	12.58-14.72	9.56-12.32	10.15-11.70
Total sugars (%)	13.90-16.70	13.65-17.92	12.92-15.88	12.5-14.70
Mucilage (%)	13.33-19.57	12.7-18.92	13.73-19.18	16.93-19.7
Acidity (%)	0.31-0.40	0.33-0.39	0.33-0.42	0.32-0.36
pH	5.10-5.30	5.15-5.30	5.00-5.25	5.20-5.30
Ascorbic acid (mg/100 g)	8.98-17.51	14.40-18.01	12.80-18.20	7.68-10.73
Crude protein (%)	2.28-3.18	2.32-3.28	2.75-3.22	2.26-2.29
Total phenolics (mg/100 g)	1755-2473	1777-2375	1852-2650	2210-3000

ตัดแปลงจาก : ซีรพร กงบังเกิด และ ขนิษฐา มาน้อย (2545)

ตารางที่ 2.2 คุณค่าทางโภชนาการของมะตูมต่อส่วนที่รับประทานได้ 65-77 กรัม

	ปริมาณ
น้ำ	61.5 กรัม
โปรตีน	1.8 กรัม
ไขมัน	0.39 กรัม
คาร์โบไฮเดรต	31.8 กรัม
ใย	1.7 กรัม
แคลโรทีน	55 มิลลิกรัม
โซอามิน	0.13 มิลลิกรัม
ไรโบเฟลวิน	1.19 มิลลิกรัม
ไนอาซิน	1.1 มิลลิกรัม
วิตามินซี	8 มิลลิกรัม
เปลือกพบแทนนิน	20%

แหล่งที่มา : กองโภชนาการ กรมอนามัยกระทรวงสาธารณสุข (2530)

มะตูมมีคุณค่าทางโภชนาการและสรรพคุณทางยา สามารถรับประทานได้ทั้งผลอ่อนและผลสุก โดยผลอ่อนและเปลือก ช่วยบรรเทาอาการท้องร่วง ท้องเสีย โรคบิด โรคกระเพาะอาหาร ขับผายลม บำรุงกำลัง ช่วยให้เจริญอาหาร ช่วยในการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย เนื่องจากมีฤทธิ์เป็นกรด ส่วนผลแก่ บำรุงกำลัง แก้เสมหะและลม และช่วยในการย่อยอาหาร ผลสุกช่วยเรื่อง ระบบการย่อยอาหาร เพิ่มการทำงานของลำไส้ แก้อาการจุกเสียดแน่นท้อง แก้อาการอ่อนเพลีย ทำให้ร่างกาย สดชื่น ในมะตูมพบสาร imperatorin เป็นสารที่สามารถยับยั้งสารก่อมะเร็ง และสารก่อการกลายพันธุ์ โดยผลมะตูมสุกจะมีปริมาณสาร imperatorin น้อยที่สุด เนื่องจากปริมาณสารจะเพิ่มขึ้นตามระดับความแก่ซึ่งเกิดหลังจากผ่านระยะสุกมาแล้ว (ระยะแก่) และมีสารแทนนินช่วยรักษาอาการ โรคเบาหวาน ได้น้ำตาลที่พบในมะตูม โดยปริมาณอาจขึ้นอยู่กับระดับความสุกของมะตูม ซึ่งมีการเพิ่มขึ้นของ น้ำตาลรีดิวซ์ (reducing sugar) ได้แก่ กลูโคส (glucose) อะราบีโนส (arabinose) และกาแลคโตส (galactose) และน้ำตาลนอนรีดิวซ์ (non-reducing sugar) ได้แก่ ซูโครส (sucrose) วิตามินที่พบ ได้แก่ ไธอามิน (thaimin) ไรโบเฟลวิน (riboflavin) ไนอาซิน (niacin) และวิตามินซี (ascorbic acid) โดยวิตามินที่พบมากที่สุดคือ วิตามินซี ทั้งนี้ปริมาณวิตามินขึ้นอยู่กับระดับความแก่ของผลมะตูม

ในอดีตนำผลมะตูมสุกผสมกับนม โยเกิร์ตและน้ำตาลเรียกว่า sherbet และนำเนื้อของมะตูมมาผสมกับน้ำมะขาม ทำให้ผู้ดื่มรู้สึกสดชื่น ผลมะตูมแก่แต่ยังไม่สุกนำส่วนของเนื้อมาผลิตแยม (jam) วุ้นชนิดแข็ง (firm jelly) มาร์มาเลด (marmalade) เมื่อรับประทานช่วยทำให้แก้อาการทางเดินอาหาร และโรคท้องเสียได้ การผลิตเครื่องดื่มนชนิดผง โดยการนำเนื้อมะตูมที่ผ่านการกรองหลังจากแช่น้ำนำไปเก็บรักษาด้วยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ความเข้มข้น 350 ppm. จากนั้นนำมาผสมกับน้ำตาล ใช้เวลาทำแห้ง 15 ชั่วโมง อุณหภูมิ 48.89°C สามารถเก็บรักษาได้ประมาณ 3 เดือน โดยผงมะตูมที่ได้จากกระบวนการนี้มีปริมาณ วิตามินซีสูงถึง 66 มิลลิกรัมใน 100 กรัมผงมะตูม

2.2 การทำแห้ง (Drying)

การทำแห้งมีหลายวิธี

2.2.1 การทำแห้งแบบพ่นฝอย (Spray drying)

การทำแห้งแบบพ่นฝอย เป็นวิธีในการทำแห้งผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นสูง โดยใช้ อุณหภูมิสูงระยะเวลาสั้น มีขั้นตอนที่สำคัญ 4 ขั้นตอน คือ 1 ขั้นตอนการทำให้เกิดละออง (atomization) 2 ขั้นตอนการผสมระหว่างละอองกับอากาศ (droplet air mixing) 3 ขั้นตอนการระเหย น้ำออก (evaporation) 4 ปริมาณผลผลิตที่ได้จากการทำแห้งแบบพ่นฝอย (recovery of dried product) (Shri K. Sharma, Steven J. Mulvaney, Syed S. H. Rizvi, 2000) ในการทำแห้งแบบพ่นฝอย ขั้นตอนที่ 1 หัวฉีดเป็นตัวป้อนผลิตภัณฑ์เข้าสู่ห้องอบอาศัยการทำงานของ อะตอมไมเซชัน

ในการควบคุมการไหลขนาดและหยดที่ถูกฉีดออกไปทำให้ขนาดอนุภาคผงมีขนาดที่ใกล้เคียงกัน ขั้นตอนที่ 2 ละอองที่ออกมาจะกระทบลมร้อนขั้นตอนที่ 3 น้ำถูกระเหยออกไปจากตัวอย่าง และส่วนที่เป็นผงจะถูกดูดออกจากห้องอบในขั้นตอนที่ 4 การทำแห้งแบบพ่นฝอย อะตอมไมเซชันมีหน้าที่ทำให้ของเหลวถูกพ่นออกมาเป็นละอองหยดเล็กๆ ทำให้มีพื้นผิวจำนวนมากในการระเหย ความชื้นออกจากตัวอย่าง และเป็นตัวควบคุมขนาดของหยดละอองรวมถึงอัตราการไหลเพื่อให้ผงที่ได้มีขนาดอนุภาคตามต้องการ เครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยดังแสดงในรูปที่ 2.3 การทำแห้งแบบพ่นฝอยมี ข้อดีของการทำแห้งแบบพ่นฝอย คือ ช่วยเพิ่มอายุการเก็บรักษา ใช้เวลารวดเร็วในการทำแห้ง ที่อุณหภูมิสูง ผงที่ได้หลังจากการอบแห้ง ละลายได้ดี สูญเสียคุณค่าทางโภชนาการน้อย ค่า a_w ต่ำ สะดวกในการขนส่งและจัดเก็บที่อุณหภูมิห้องและประหยัดค่าขนส่งเมื่อเทียบกับการขนส่งผัก ผลไม้สด ข้อเสีย เพิ่มอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass Transition Temperature, T_g) ต่ำ และมีปัญหาเกี่ยวกับการไหลและการยึดติดกันของผง (Saikia, Mahnot, & Mahanta, 2015)



รูปที่ 2.3 เครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย

หน้าที่ของการอะตอมไมเซชัน คือ การทำให้เกิดละอองที่มีพื้นผิวสำหรับการระเหยน้ำที่อยู่ภายใน และเป็นตัวควบคุมอัตราการไหลของของเหลวไปยังห้องอบแห้งโดยควบคุมให้ของเหลวที่ส่งไปยังกระแสนอากาศมีความสม่ำเสมอ ขนาดของละอองที่เหมาะสมทำให้ได้อนุภาคผงหลังจากการทำแห้งแบบพ่นฝอยได้ตามต้องการ (รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์นามิต, 2553) การเลือกใช้ อะตอมไมเซชันที่เหมาะสมกับของเหลวที่ต้องการทำแห้งเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่ออนุภาคที่ได้จากการทำแห้งแบบพ่นฝอย โดยแบ่งหัวฉีดที่ใช้มีอยู่ 3 ชนิด คือ 1) Rotary Atomizer 2) Pressure Nozzle

และ3) Two-Fluid Nozzle (จันทิรา และอชเลีย, 2547) หัวฉีดแบบ Rotary Atomizer ใช้หลักการเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ดังแสดงในรูปที่ 2.4 หัวฉีดชนิดนี้ใช้แรงเหวี่ยง ทำให้ของเหลวแตกออกเป็นหยดละออง ออกจากเส้นรอบวงหรือจานหมุนของหัวฉีด โดยสามารถกำหนดอัตราเร็วที่ขอบของใบพัดได้ถึง 300 m/s และความเร็วในการพ่นของเหลวจะไม่เกี่ยวข้องกับความเร็วของหัวฉีด หัวฉีดแบบนี้สามารถกำหนดขนาดความละเอียดของละอองในการทำแห้งได้ ข้อดีในการใช้หัวฉีดแบบ rotary atomizer คือ ง่ายต่อการดูแลรักษา สามารถใช้อัตราการป้อนของเหลวสูง ใช้งานง่ายแม้ว่าอัตราการป้อนไม่สม่ำเสมอ ควบคุมขนาดอนุภาคในการอบแห้งได้ โดยเฉลี่ยประมาณ 20-150 μm ในการทำแห้งแบบพ่นฝอยเมื่อต้องการอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ จะต้องพิจารณาขนาดของถังอบแห้ง (drying chamber) ร่วมด้วย การคำนวณขนาดของอนุภาคเฉลี่ยของทำแห้งแบบพ่นฝอย เป็นสัดส่วนกับอัตราการป้อน ความหนืดของวัตถุดิบ และเป็นส่วนกลับของอัตราเร็วและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจานหมุน



รูปที่ 2.4 หัวฉีดแบบ Rotary Atomizer

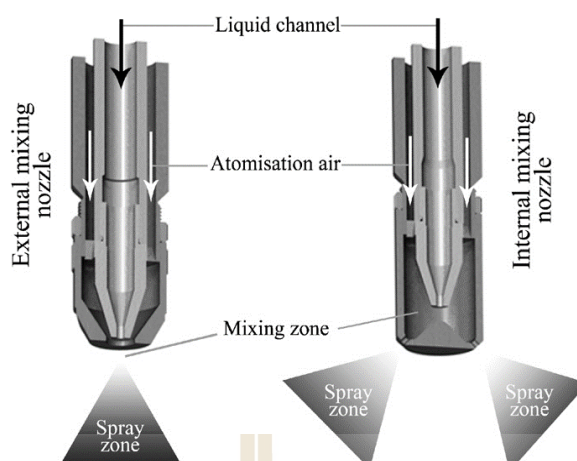
หัวฉีดแบบ pressure nozzle ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ใช้แรงดันเป็นพลังงานในการป้อนของเหลวโดยพลังงานที่ได้จากแรงดันจะเปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์ถูกส่งผ่านช่องแคบของหัวฉีด มีลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มมีความเร็วสูง ทำของเหลวให้เกิดการกระจายเป็นละออง เหมาะกับของเหลวที่ใช้อัตราการป้อนสูง จะมีการไหลเป็นอิสระได้ดี ถ้าความหนืดของของเหลวสูงจะต้องใช้ความดันในการป้อนสูง ขนาดอนุภาคแปรผันตรงกับอัตราการป้อนและความหนืด แต่จะแปรผกผันกับความดันในการป้อน ผงที่ได้จากการทำแห้งมีขนาดหยาบโดยเฉลี่ย 120-130 μm การปรับขนาด

อนุภาคในการพ่นละอองสามารถปรับอัตราการป้อนของเหลวผ่านหัวฉีดและพิจารณาชนิดของของเหลวที่ใช้ด้วย



รูปที่ 2.5 หัวฉีดแบบ Pressure Nozzle

หัวฉีดแบบ two-fluid nozzle ดังแสดงในรูปที่ 2.6 หลักการทำงานของหัวฉีด ใช้กระแสอากาศที่มีความเร็วสูงไปกระทบกับของเหลวที่มีความเร็วต่ำ โดยอัตราเร็วของอากาศจะถูกสร้างขึ้นภายในหัวฉีดเพื่อดันให้ของเหลวออกมาและแตกตัวออกเป็นละอองขนาดเล็ก ระบบของหัวฉีด



รูปที่ 2.6 หัวฉีดแบบ Two-Fluid Nozzle (Peter Dybdahl, Poul, & Anker D., 2008)

ประกอบด้วยปั๊มความดันต่ำ ซึ่งอัตราการป้อนของเหลวและการดูดเนื่องจากการไหลเข้าของอากาศทำได้เพียงดูดของเหลวไปยังหัวฉีดเท่านั้น ข้อดีของการใช้หัวฉีดแบบ two-fluid nozzle คือสามารถใช้กับของเหลวที่มีความหนืดสูงในการทำแห้งแบบพ่นฝอย

2.2.2 การทำแห้งแบบสุญญากาศ (vacuum drying)



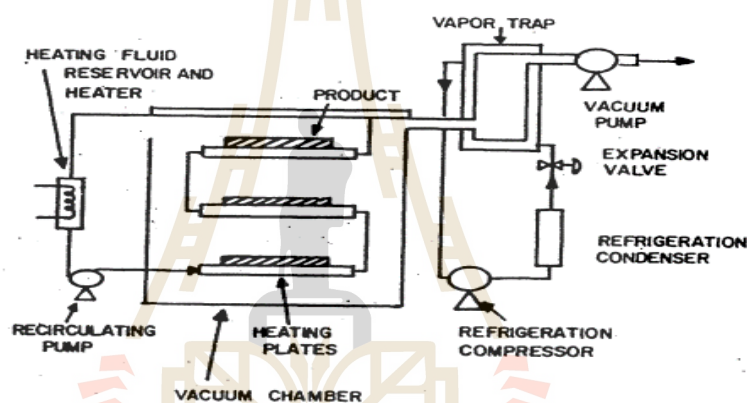
รูปที่ 2.7 การทำแห้งแบบสุญญากาศ (vacuum drier)

เป็นการทำแห้งที่ความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศ ทำให้น้ำที่อยู่ภายในอาหารสามารถระเหยได้ที่อุณหภูมิต่ำลง (พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และ นิธิชา รัตนานนท์, 2561) โดยจุดเดือดของน้ำในอาหารจะแปรผกผันกับระดับความเป็นสุญญากาศ การทำแห้งวิธีนี้เหมาะกับอาหาร

ที่ไม่ต้องการลดคุณค่าทางโภชนาหรือคุณค่าทางอาหารให้ใกล้เคียงกับอาหารสด และเหมาะสมกับอาหารที่ไวต่อความร้อน โดยใช้ปั๊มสุญญากาศสูบล้ออากาศออกภายในห้องอบแห้งมีสถานะสุญญากาศ (พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และ นิธิยา รัตนานนท์, 2561) ดังแสดงในรูปที่ 2.7

2.2.3 การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze drying)

เป็นการทำให้น้ำในสถานะแช่แข็งระเหิดกลายเป็นไอที่ความดันต่ำ ผลิตภัณฑ์จะผ่านการแช่แข็งก่อนการให้ความร้อนผ่านแผ่นให้ความร้อนไปยังบริเวณผิวอาหาร เป็นพลังงานความร้อนของการกลายเป็นไอ เมื่อน้ำระเหิดจะถูกดูดออกอย่างรวดเร็ว การทำแห้งจะต้องรักษาความดันสัมบูรณ์ภายในห้องอบแห้งอย่างน้อย 620 kPa จึงจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ออกมามีคุณภาพ (ภัทรพร สุวรรณกิจบริหาร, 2541) รูปที่ 2.8 แสดงแผนผังเครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง



รูปที่ 2.8 แผนผังเครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง

2.2.4 การเคี้ยว

กระบวนการโดยใช้ของเหลวที่ได้จากการสกัด ผ่านการกรองเพื่อกำจัดสิ่งแปลกปลอมออก ให้ความร้อนปานกลาง ใช้น้ำตาลเติมลงไปเป็นส่วนผสมเพื่อทำให้ผลิตภัณฑ์ หลังจากการเคี้ยวเป็นเม็ดค้ำยน้ำตาลทราย ข้อดี คือเป็นวิธีที่ประหยัดและสะดวก ข้อเสีย คือคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์ลดลงมากเนื่องจากการใช้เวลาในการทำแห้งนาน รูปที่ 2.9 แสดงการเคี้ยวมะตูมผงสำเร็จรูป

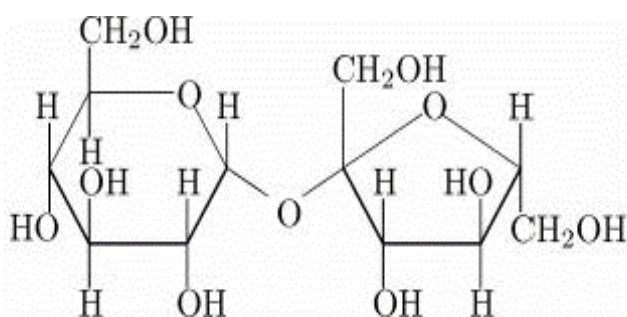


รูปที่ 2.9 การเคี่ยวมะตุมผงสำเร็จรูป (ศิริพร กงบังเกิด และ ขนิษฐา มาน้อย, 2545)

2.3 สารให้ความหวาน

2.3.1 น้ำตาลทราย (sucrose)

น้ำตาลทราย คือ น้ำตาลซูโครส (sucrose) หรือน้ำตาลทรายใช้เป็นสารให้ความหวาน พบอยู่ในพืชและผลไม้หลายชนิด เช่น อ้อย น้ำตาลซูโครสเป็นน้ำตาลโมเลกุลคู่ ซึ่งประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว 2 ชนิด คือ น้ำตาลฟรุกโทส และน้ำตาลกลูโคส เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ มีสูตรโมเลกุล คือ $C_{12}H_{22}O_{11}$ น้ำตาลซูโครสจัดเป็น non reduction sugar เพราะหมู่แอลดีไฮด์ (aldehyde) และหรือคีโตน (ketone) ที่อยู่ในโมเลกุลไม่เป็นอิสระ องค์ประกอบของซูโครสประกอบด้วยโมเลกุลของ กลูโคส (glucose) 1 โมเลกุล เชื่อมต่อกับโมเลกุลของฟรุกโทส (fructose) 1 โมเลกุล ด้วยพันธะโคเวเลนต์ที่ชื่อว่าพันธะไกลโคซิดิก (glycosidic bond) ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของน้ำตาล sucrose (พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และ นิธิยา รัตนานนท์, 2561)

2.3.2 มอลทิทอล (maltitol)

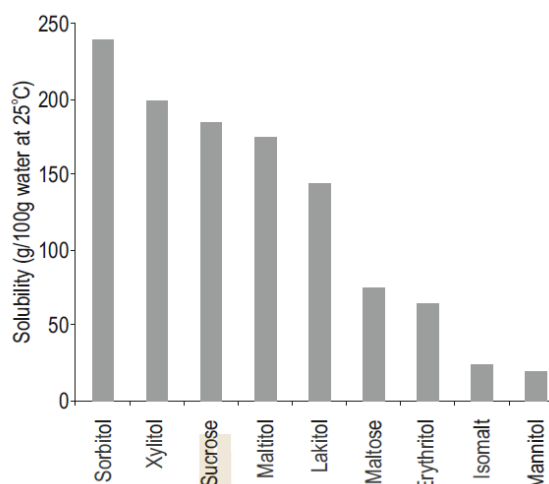
มอลทิทอล (maltitol) มีชื่อเรียกว่า hydrogenated high maltose glucose syrup หรือ hydrogenated glucose syrup มีสีขาวเป็นน้ำตาลธรรมชาติใช้เป็นสารเจือปนอาหารในการค้ำมี 2 ชนิดคือชนิดที่เป็นของแข็ง (maltitol crystalline) และไซรัป (maltitol syrup) รหัส E965 (Dobrev et al., 2013) อยู่ในกลุ่มแอลกอฮอล์ (sugar alcohol หรือ polyol) เป็นอนุพันธ์ของน้ำตาลได้จากการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของน้ำตาลอิสระในหมู่หมู่คาร์บอกซาลดีไฮด์ ถูกแทนที่ด้วย $-CH_2OH$ สูตรโมเลกุล คือ $C_{12}H_{24}O_{12}$ ในกระบวนการเติมไฮโดรเจน (hydrogenation) ทำให้เกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูง $100-150^{\circ}C$ และความดันสูง $100-150$ บาร์ โดยใช้โลหะหนักเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ นิกเกิลแบบพรุน (raney Nickel), นิกเกิลชนิดที่มีตัวรองรับ (supported nickel), แพลเลเดียมและแพลตตินัม โดยการทดสอบด้านพิษวิทยาแสดงให้เห็นว่า มอลทิทอลปลอดภัยต่อผู้บริโภค และคณะกรรมการผู้เชี่ยวชาญด้านวัตถุเจือปนอาหาร (JECFA) ได้ให้การยอมรับการบริโภคโดยไม่กำหนดปริมาณการบริโภคในหนึ่งวันตาม ADI (FAO / WHO 1980; FAO / WHO 1985; SCF 1985) ทั้งนี้มอลทิทอลไม่ทำให้เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลเมื่อได้รับความร้อนสูง (maillard browning reaction) และทนต่อสภาวะความเป็นกรดในขั้นตอนการประกอบอาหาร มีดัชนีน้ำตาลในเลือดต่ำ (GI) เหมาะกับผู้ที่ต้องการควบคุมน้ำหนัก ผู้ป่วยโรคเบาหวาน สามารถลดการเกิดฟันผุเนื่องจากการสะสมของคราบพลัค (ฟันคิรี ทิพย์เนตร, พัชรี เสริมทรัพย์, สนิท จันทร์แก้ว และ ฌปภา หอมหวล, 2554) ใช้เป็นสารให้ความหวานแทนน้ำตาลทราย (sucrose) มีความหวานน้อยประมาณ 90% ของน้ำตาลทราย ให้พลังงาน 2.1 กิโลแคลอรีต่อกรัม ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ในลำไส้เล็กได้ช้าทำให้การดูดซึมเข้าสู่ร่างกายช้า ส่งผลต่อการหลั่งฮอร์โมนอินซูลินได้ช้ามีผลต่อระดับน้ำตาลในเลือดน้อย ทำให้เมื่อย่อยสลายได้พลังงานออกมาน้อย สำหรับผลิตภัณฑ์ในประเทศอเมริกา กำหนดให้ใช้ มอลทิทอลเป็นสารทดแทนน้ำตาลทรายได้ไม่เกิน 25% ในผลิตภัณฑ์ลดพลังงาน (reduced calorie) ช่วยเพิ่มคุณค่าทางอาหาร เช่น ทำให้อาหารมีความหนืดเพิ่มขึ้น ป้องกันการเกิดผลึกของน้ำตาล ช่วยลด

ความสามารถในการดูดความชื้นกลับได้มากกว่าน้ำตาลทราย สามารถเปรียบเทียบการละลายของสารใช้แทนความหวานแต่ละชนิดกับน้ำตาลทรายดังแสดงในรูปที่ 2.11 รสชาติอาหารไม่เปลี่ยนแปลง และมีเปรียบเทียบสมบัติต่างๆของมอลทิทอลและน้ำตาลทราย ดังแสดงในตารางที่ 2.3 (Malcolm W et al., 2012) ระหว่างการเลือกใช้มอลทิทอลในกระบวนการผลิต เป็นที่น่าสนใจสำหรับผู้ผลิตอาหารต้องการเพิ่มยอดขายและความได้เปรียบทางการค้าในการผลิตอาหาร (Malcolm W et al., 2012) โครงสร้างของมอลทิทอล ดังแสดงในรูปที่ 2.11

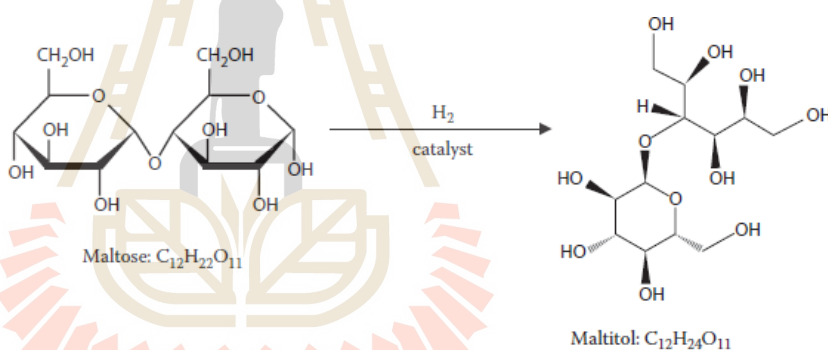
ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบสมบัติของมอลทิทอลและน้ำตาลทราย

	Sucrose	Maltitol
Molecular weight	342	344
Sweetness	1	0.9
Solubility @ 22°C	67%	65%
Melting Point (°C)	168-170	144-152
Heat of solution (cal/g)	4.3	-5.5
ERH for water uptake (20°C)	84%	89%
Calories (kcal/g)	4	2.4 (EU) 2.1 (USA) 2.0 (Japan)

ERH is Equilibrium Relative humidity



รูปที่ 2.11 การเปรียบเทียบความสามารถในการละลายของสารใช้แทนความหวานกับน้ำตาลทราย (Dobrev et al., 2013)

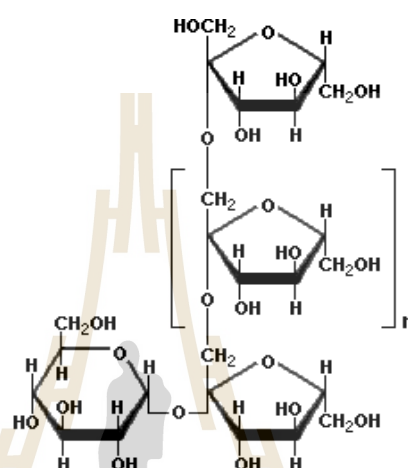


รูปที่ 2.12 โครงสร้างของมอลทิทอล (Malcolm W et al., 2012)

2.3.3 ฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์ (Fructo oligosaccharide)

เป็นกลุ่มน้ำตาลฟรุคโทสหรือ oligofructose (โอลิโกฟรุคโทส) มีโมเลกุลขนาดกลาง เรียกว่า oligosaccharides มี 3-9 โมเลกุล ให้พลังงานต่ำ 1-1.5 กิโลแคลอรีต่อกรัม รสชาติหวานเล็กน้อย มีความหวาน 30% เมื่อเทียบกับน้ำตาลทราย มีกลิ่นหอมหวาน มีคุณสมบัติคล้ายใยอาหารที่ละลายน้ำได้แต่ไม่มีความหนืด พบได้ใน หัวหอม หน่อไม้ฝรั่ง อาหารประเภทข้าวสาลี ข้าวไรย์ มะเขือเทศ ถั่วเหลือง และพืชประเภทหัว ฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์ในท้องตลาดส่วนใหญ่ผลิตจาก หัวซิดอริ หรือผลิตจากน้ำตาลทรายโดยใช้เอนไซม์ fructosyltransferase ฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์ร่างกายไม่สามารถย่อยได้แต่จะถูกย่อยด้วยแบคทีเรียในลำไส้ใหญ่ หลังจากถูกแบคทีเรียย่อยแล้วได้กรดไขมันสายสั้น (short chain fatty acid) ที่มีผลดีต่อร่างกาย จัดว่าเป็นพรีไบโอติก

(perbiotic) ช่วยในการกระตุ้นการเจริญเติบโตของเนื้อเยื่อในลำไส้ เสริมการเจริญเติบโตของ จุลินทรีย์ที่มีประโยชน์และยับยั้งจุลินทรีย์ก่อให้เกิดโรค เป็นแหล่งพลังงานให้แก่ร่างกาย ในผู้ป่วยที่มีอาการท้องเสียการรับประทานอาหารที่มีส่วนผสมของฟรุกโทโอลิโกแซคคาไรด์ จะช่วยในการดูดซึมกลับของน้ำและโซเดียม ฟรุกโทโอลิโกแซคคาไรด์ และอาจมีประโยชน์ในการควบคุม ปริมาณกลูโคสและระดับน้ำตาลในเลือด ที่โครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.13

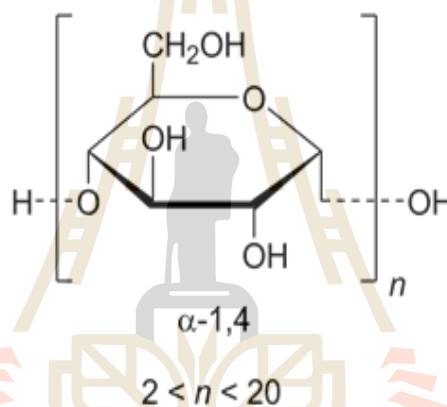


รูปที่ 2.13 โครงสร้างของฟรุกโทโอลิโกแซคคาไรด์
(พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และ นิธิยา รัตนานนท์, 2561)

2.3.4 มอลโทเดกซ์ทริน (maltodextrin)

มีสูตรโมเลกุล คือ $(C_6H_{12}O_6) \cdot H_2O$ เป็นคาร์โบไฮเดรตประเภท polysaccharide ที่ได้จากการย่อยโมเลกุลของสตาร์ชบางส่วนให้เป็นสายสั้นๆ ของน้ำตาลกลูโคส เช่น มอลโทเพนทาโอส (maltopentaose) มอลโทเทตราโอส (maltotetraose) มอลโทไตรเอส (maltotrose) เป็นต้น มอลโทเดกซ์ทรินจัดเป็นผลิตภัณฑ์น้ำเชื่อมกลูโคสมีค่า DE น้อยกว่า 20 มีลักษณะเป็นผงสีขาว ไม่มีกลิ่น ไม่มีรสหวานและละลายน้ำได้ดี (กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546) มีลักษณะเป็นผงแห้งไหลได้ดีเนื่องจากโครงสร้างมีปริมาณมีน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวน้อย เมื่อได้รับความร้อนจะมีความหนืดเปลี่ยนไปขึ้นอยู่กับค่าสมมูลเดกซ์โทรส ถ้าค่าสมมูลเดกซ์โทรสสูงจะส่งผลทำให้ค่าความหนืดที่ลดลง ดังนั้นจึงทำให้ค่าการละลายได้ดีเมื่อมีค่าค่าสมมูลเดกซ์โทรสสูง และสามารถเกิดแผ่นฟิล์ม ที่มีลักษณะมันวาวช่วยป้องกันการเกิดผลึกของน้ำตาลที่มีอยู่ในส่วนผสม มีสมบัติในการป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เป็นสารตัวกลางช่วยเก็บกักและลดการสูญเสีย กลิ่นรส และเป็นสารเพิ่มปริมาณของแข็งในกระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอย เป็นสารให้ความ

หวานสังเคราะห์มีรสหวานเล็กน้อย ให้พลังงาน 3.8 กิโลแคลอรีสามารถละลายในน้ำได้ดี ความสามารถในการดูดความชื้นต่ำ 3-5% ความหนาแน่น (bulk density) อยู่ในช่วง 0.30-0.61 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (หนูเดือน สาระบุตร, กรรณิการ์ ห้วยแสน, พนอจิต นิตินุช, และ อนันต์ พันธุ์พิบูลย์, 2556) การใช้มอลโทเดกซ์ทรินในผลิตภัณฑ์อาหาร เช่น ใช้ในอาหาร เพื่อสุขภาพ เป็นสารให้ความหวาน เป็นสารทดแทนไขมัน ในผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ ไอศกรีม ป้องกันการ เกาะเป็นก้อน เพิ่มปริมาณของแข็งในการทำแห้งของ เครื่องดื่มชนิดผง อาหารผง และห่อหุ้มสารให้กลิ่นรส (พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และ นิธิยา รัตนานนท์, 2561) นอกจากนี้มอลคโทเดกซ์ทรินยังทำให้ ค่าอุณหภูมิ กลาสทรานสิชัน (glass transition temperature : T_g) สูง ส่งผลดีต่อการนำมาเป็นสารตัวพาในการทำแห้ง ผลิตภัณฑ์ผงสำเร็จรูป (Bindu & Pradyuman, 2016) มีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 มอลโทเดกซ์ทริน (พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และ นิธิยา รัตนานนท์, 2561)

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.4.1 การทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบพ่นกระจายและไมโครเวฟสุญญากาศ

พรรณจิรา วงศ์สวัสดิ์ และคณะ (2545) ศึกษากระบวนการผลิตน้ำผลไม้ผง โดยหาสถานะที่เหมาะสมในการอบแห้ง 2 กระบวนการคือ การอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบพ่นกระจาย และไมโครเวฟสุญญากาศโดยศึกษาผลของปริมาณมอลโทเดกซ์ทรินที่ระดับ 13, 16, และ 19% โดยน้ำหนัก ทั้งสองกระบวนการทำแห้ง สำหรับการทำแห้งแบบพ่นฝอย ศึกษาผลของอุณหภูมิเข้าที่ระดับ 100, 110 และ 120 °C และสำหรับกระบวนการทำแห้งด้วยไมโครเวฟสุญญากาศ กำหนดความดัน 160 ทอร์ กำลังไฟ 210 วัตต์ พบว่าปริมาณมอลโทเดกซ์ทริน 16% โดยน้ำหนักทำให้ผลิตภัณฑ์ผงมีลักษณะทางเคมีกายภาพ คือ ความหนาแน่นปรากฏ ปริมาณความชื้น ปริมาณวิตามิน ซี ดี และประสาทสัมผัสที่ดีที่สุดทั้งสองกระบวนการทำแห้ง และ นำสถานะที่เหมาะสมของการทำ

แห่งทั้งสองกระบวนการ มาศึกษาการเพิ่มความสามารถในการละลาย โดยใช้เทคนิคการอบแห้งแบบพ่นกระจายโพลีเมอร์ และเทคนิคการรวมกลุ่มอนุภาคผง เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการละลายและการกระจายหลังจากการใช้เทคนิคทั้งสองเทียบกับผงที่ไม่ผ่านการใช้เทคนิคการเพิ่มความสามารถในการละลายพบว่า มีค่าสูงขึ้นและมีค่าความหนาแน่นปรากฏลดลง

2.4.2 การทำแห้งแบบพ่นฝอย

Sangeeta et al. (2014) ศึกษาผลของการทำแห้งแบบพ่นฝอยของน้ำผลไม้ 4 ชนิด ได้แก่ ส้มพันธุ์แมนดาริน แดงโม มะเฟือง และ สับปะรด ต่อสมบัติทางเคมีกายภาพ, สารพฤกษเคมี และสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระ โดยใช้ปริมาณมอลโทเดกซ์ทริน เป็นสารเพิ่มความหนืดให้กับตัวอย่าง 20% หลังจากผสมแล้วมีค่า °Brix อยู่ระหว่าง 21-28 °Brix ถูกนำมาปรับให้เหลือปริมาณ °Brix เท่ากับ 10 °Brix ด้วยน้ำก่อนเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย ค่าความชื้นอยู่ระหว่าง 3.14 ถึง 5.47% มะเฟืองมีค่า pH และ ปริมาณกรดที่ใช้ไทเทรตมากที่สุด การละลายอยู่ในช่วง 57.57 ถึง 76.75 % ค่าการดูดความชื้นในช่วง 11.63 ถึง 11.99 % ใน 100 กรัมตัวอย่าง ค่าการเปลี่ยนแปลงสี (ΔE) หลังจากการทำแห้งแบบพ่นฝอย ส้มพันธุ์แมนดาริน มีค่ามากที่สุด ขนาดอนุภาคใหญ่มีผลต่อช่องว่างระหว่างผงน้ำผลไม้หลังจากอบแห้งมากไปด้วยความหนืดที่น้อยทำให้การก่อตัวเป็นอนุภาคผงมีขนาดเล็กค่า Hausner's ratio บ่งบอกความสามารถในการยึดติดหรือความเหนียว และค่า Carr index แสดงถึงความสามารถในการไหลโดยแดงโมและมะเฟืองผง มีค่าสูงกว่าส้มพันธุ์แมนดารินและสับปะรด จึงมีระยะห่างระหว่างอนุภาคผงและการไหลที่ดีกว่า ภาพถ่ายจากเครื่อง SEM แสดงให้เห็นลักษณะพื้นฐานของผงตัวอย่าง ผงส้มและสับปะรดมีลักษณะยึดติดกัน มะเฟืองมีอนุภาคขนาดต่างกันรวมอยู่และผงแดงโมมีการกระจายตัวระยะห่างระหว่างอนุภาคมาก ผลของสมบัติต้านอนุมูลอิสระระหว่างน้ำผลไม้อบแห้งและน้ำผลไม้สด แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมดมีค่าเพิ่มขึ้น เฟอร์ริกมีความเป็นไปได้ในการลดความสามารถของการต้านอนุมูลอิสระ และวิธี DPPH ส้มพันธุ์แมนดารินมีปริมาณการต้านอนุมูลอิสระมากที่สุด

Liang et al. (2018) ศึกษาผลของความสมบูรณ์ของไซโลโอลิโกแซ็กคาไรด์ในกระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอยโดยศึกษาอิทธิพลที่มีผลต่อ คุณภาพและโครงสร้างทางจุลภาคของไซโลโอลิโกแซ็กคาไรด์ด้านการเป็นพรีไบโอติก และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง T_g กับ ความคงทน ปริมาณความชื้น yield ของผลิตภัณฑ์ โดยพิจารณา ความแตกต่างของ อุณหภูมิเข้าและปริมาณมอลโทเดกซ์ทริน กิจกรรมในการกักเก็บสารต้านอนุมูลอิสระ การดูดความชื้น คุณลักษณะของสี ลักษณะพื้นผิว หมู่ฟังก์ชันและสารประกอบอินทรีย์ ใช้ในการประมวลผลไซโลโอลิโกแซ็กคาไรด์ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอย เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเข้า ส่งผลให้ปริมาณความชื้นลดลง ทำให้ T_g มีค่าเพิ่มขึ้น และเช่นเดียวกับความเข้มข้น

ของมอลโทเดกทรินสูงสุด และเป็นสาเหตุทำให้มวลโมเลกุลเพิ่มขึ้น มีแนวโน้มการสะสมตัวเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของตัวอย่างเกินค่า T_g ทำให้ yield ลดลง อุณหภูมิสูงไซโลโอลิโกแซ็กคาไรด์เกิดการสลายตัว เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว อัตราการสร้างตัวเคลือบเม็ดคอนภาคและความเหนียว เป็นผลมาจากค่า T_g ดังนั้นจึงศึกษาอิทธิพลที่มีผลต่อลักษณะพื้นผิว ความคงทนของสารต้านอนุมูลอิสระของไซโลโอลิโกแซ็กคาไรด์ ซึ่งขึ้นอยู่กับความเข้มข้น การดูความชื้นลดลงของอุณหภูมิเข้าที่ลดลง และปริมาณความเข้มข้นของมอลโทเดกซ์ทรินสูง สอดคล้องกับ ลักษณะสีซีด ความเป็นผลึกมีความเป็นอสัณฐาน และลักษณะพื้นผิวมีแนวโน้มเป็นทรงกลมอยู่ห่างกันเมื่อเติมมอลโทเดกทรินลดลงไป และ การวิเคราะห์ด้วย FT-IR แสดงให้เห็นว่าไม่มีการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างไซโลโอลิโกแซ็กคาไรด์กับสารตัวแทน แสดงให้เห็นว่ามอลโทเดกทริน มีแนวโน้มในการรวมตัวกันเป็นผลิตภัณฑ์ไบโอเอกทิฟของผงไซโลโอลิโกแซ็กคาไรด์ได้

Mishra, Rai, and Mahanta (2015) ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิเข้าของการทำแห้งแบบพ่นฝอยที่ 125 150 175 และ 200°C และปริมาณมอลโทเดกซ์ทริน 3 5 7 และ 9% ต่อสมบัติทางเคมีกายภาพ ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และสมบัติต้านอนุมูลอิสระ ของน้ำมะขามป้อมผง (amla juice power) จากผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิเข้าของการทำแห้งแบบพ่นฝอยและปริมาณมอลโทเดกซ์ทรินมีผลต่อค่าความชื้นและการดูความชื้นของตัวอย่าง ปริมาณมอลโทเดกซ์ทรินที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อค่าความหนาแน่นปรากฏและความสามารถในการละลาย แต่การเพิ่มอุณหภูมิเข้าให้สูงขึ้นและปริมาณมอลโทเดกซ์ทรินทำให้ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระลดลง นอกจากนี้การเพิ่มอุณหภูมิเข้าให้สูงขึ้นมีผลทำให้ขนาดของอนุภาคผงเล็กลง น้ำมะขามป้อมผงที่ผ่านอุณหภูมิเข้าของการทำแห้งแบบพ่นฝอยที่ 175°C และมีปริมาณมอลโทเดกซ์ทริน 7% มีค่าการดูความชื้นต่ำกว่า และได้รับการยอมรับด้านสีและการต้านอนุมูลอิสระ

Eroglu, Tontul, and Topuz (2018) ได้ใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) ในการศึกษาสภาวะการทำแห้งแบบพ่นฝอยของชากระเจี๊ยบแดง (*Hibiscus sabdariffa*) ผสมกุหลาบ (*Rosa canina* L.) โดยอุณหภูมิเข้าของการทำแห้งแบบพ่นฝอยระหว่าง 130 145 และ 160°C อุณหภูมิขาออกระหว่าง 65 75 และ 85°C และปริมาณมอลโทเดกซ์ทริน 0 15 และ 30 % พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิเข้ามีผลทำให้ปริมาณ yield ลดลง แต่การเพิ่มอุณหภูมิขาออกช่วยทำให้ปริมาณ yield เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิเข้าและขาออกไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณวิตามินซีและแอนโทไซยานิน การเพิ่มปริมาณมอลโทเดกซ์ทรินมีผลทำให้ปริมาณ yield เพิ่มขึ้นและลดการสูญเสียวิตามินซี โดยสภาวะที่เหมาะสมในการทำแห้งแบบพ่นฝอยคือ อุณหภูมิเข้าที่ 130°C อุณหภูมิขาออก 85°C และปริมาณมอลโทเดกซ์ทริน 18.4%

นอกจากนี้ Eroglu et al. (2018) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของ ปริมาณวิตามินซี และแอนโทไซยานิน ระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4°C และที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 0 10 30 60

และ 90 วัน พบว่า ปริมาณวิตามินซีและแอนโทไซยานินลดลงตามระยะเวลาการเก็บที่นานขึ้น เนื่องจากปริมาณความชื้นและ a_w เพิ่มขึ้น รวมทั้งการมีออกซิเจนและโลหะบางชนิดเร่งการเสื่อมสลายของวิตามินซี

Bindu and Pradyuman (2016) ได้เปรียบเทียบการเติมสารตัวพาไบโอพอลิเมอร์ที่ความเข้มข้นต่างกัน ต่อลักษณะโครงสร้างและสมบัติทางกายภาพของน้ำบีทรูทผงที่ผ่านการทำให้แห้งแบบพ่นฝอย สารไบโอพอลิเมอร์ที่ใช้ ได้แก่ มอลโทเดกซ์ทริน กัมอะราบิก เวย์โปรตีน โดยศึกษาปริมาณ yield การดูดความชื้น ความหนาแน่นปรากฏ ค่าสีแดง สัณฐานวิทยา ความเป็นผลึก และอุณหภูมิในการเกิดกลาสรานซิชั่น (T_g) พบว่า การเติมเวย์โปรตีนทำให้ yield ของผลิตภัณฑ์มีค่าสูงสุดอยู่ที่ 77.46 % ความหนาแน่นปรากฏมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อใช้สารตัวพาต่างชนิดกัน มอลโทเดกซ์ทริน กัมอะราบิก และเวย์โปรตีนความหนาแน่นปรากฏลดลงตามลำดับ ความเข้มข้นของ เวย์โปรตีน มีปริมาณ betalain เท่ากับ 249.41 mg/100 g d.m. การดูดความชื้นสูง และสามารถคงเป็นสีแดงของบีทรูทได้ดี การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยา การเติมมอลโทเดกซ์ทริน และกัมอะราบิก มีอนุภาคผงเป็นทรงกลม มีผิวเรียบ แต่การเติมเวย์โปรตีนทำให้โครงสร้างอนุภาคผงเกาะตัวกันมากขึ้น ผิวอนุภาคขรุขระ

2.4.3 การศึกษาอายุการเก็บรักษา

ธนกิจ ถาหมี, พิไลรัก อินธิปัญญา, และ ศุภฎี บุญธรรม (2560) ศึกษาอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ชาขงผลหม่อนและใบหม่อน บรรจุลงซองออลูมิเนียมฟอยล์ เคลือบ PET โดยวิธีสภาวะเร่ง (ASLT ; Q10) พบว่าการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิ 30 45 และ 55 °C เป็นเวลา 60 วัน นำตัวอย่างออกมาวิเคราะห์ทุกๆ 5 วัน โดยทำการตรวจสอบค่า TBA มีผลต่อการเหม็นหืนให้ไม่เกิน 1.6 mg MDA/kg หลังจากครบ 60 วัน ทำการตรวจสอบค่า TBA (thiobarbituric) จนกว่าจะมีค่าเกินกำหนด ที่อุณหภูมิ 30 45 และ 55 °C มีระยะเวลาการเก็บรักษา 342 121 52 วันตามลำดับ โดยการคำนวณอายุการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 °C สามารถเก็บรักษาได้นานถึง 2,304 วัน ดังนั้นอุณหภูมิมีผลต่อการเก็บรักษา ที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นทำให้ความชื้นและ ค่า a_w เพิ่มขึ้น เนื่องจากในผงชามีน้ำตาลเป็นส่วนประกอบ ที่อุณหภูมิการเก็บรักษาสูงเกิดการกระตุ้นการเกิด อันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลในผลิตภัณฑ์ จึงสามารถดูดความชื้นได้มากขึ้น (hygroscopy) และค่าความสว่างที่ลดลงเกิดจากน้ำตาลในผงชาเกิดปฏิกิริยา เมลลาร์ดมากขึ้น

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

ในบทนี้กล่าวถึงรายละเอียดของตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย อุปกรณ์และเครื่องมือ ซึ่งประกอบด้วย ชื่อรุ่น และเงื่อนไขของการใช้งาน (condition of equipment) รวมถึงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการพัฒนาผลิตภัณฑ์มะตูมผงสำเร็จรูปด้วยการทำแห้งแบบพ่นฝอย โดยสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

3.1 วัตถุดิบและเครื่องทำแห้ง

มะตูมอบแห้งได้รับจากโครงการอนุรักษ์พันธุกรรมพืชอันเนื่องมาจากพระราชดำริ สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี (อพ.สธ.) ตำบลคลองไผ่ อำเภอสีคิ้ว จังหวัดนครราชสีมา มอลโทเดกทรีนซ์ (maltodextrin DE10) สารให้ความหวานแทนน้ำตาล มอลทิทอล (maltitol) สารเพิ่มเส้นใยอาหาร ฟรุคโทโอลิโกแซคคาไรด์ (fructo oligosaccharide, FOS) ถุงอลูมิเนียมฟอยล์ (aluminum laminated polyethylene) การทำแห้งผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย (spray dryer, รุ่น Niro A/S-gldsaxevej 305, Denmark) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 และการศึกษาโดยภาพรวมของงานวิจัยนี้แสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.1 เครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย รุ่น Niro A/S-gldsaxevej 305 และถุงอลูมิเนียมฟอยล์
ใช้บรรจุผงมะตูมสำเร็จรูป

3.2 การเตรียมวัตถุดิบ

3.2.1 ขั้นตอนการเตรียมน้ำมะตูม

ขั้นตอนการเตรียมน้ำมะตูมแสดงในรูป 3.2 มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. นำมะตูมแห้งมาอบที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 10 นาที และทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องจากนั้นชั่งน้ำหนักมะตูมอบแห้ง

2. นำมะตูมมาต้มด้วยเตาแม่เหล็กไฟฟ้ากำลังไฟ 300 วัตต์ เป็นเวลา 45 นาที โดยมีอัตราส่วนน้ำหนักของมะตูมอบแห้งต่อน้ำสะอาดเท่ากับ 200 กรัม : 1,000 มิลลิลิตร จากนั้นกรองแยกส่วนกากออกจากส่วนน้ำมะตูมด้วยผ้าขาวบาง

3. ชั่งน้ำหนักส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 3.1 3.2 และ 3.3 โดยคนส่วนผสมให้ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน เก็บส่วนผสมในตู้เย็นอุณหภูมิ 4°C ไม่เกิน 24 ชั่วโมง เพื่อรอการทำแห้งแบบพ่นฝอยในขั้นตอนต่อไป



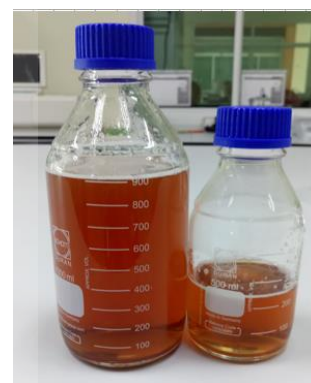
มะตูมแห้ง



มะตูมอบแห้งที่ 150°C 10 นาที ต้มน้ำมะตูมกำลังไฟ 300 วัตต์ 45 นาที

กรองแยกกากออก
จากน้ำมะตูม

ผสมส่วนผสมตามตาราง 3.1-3.3

น้ำมะตูมที่ได้เก็บที่
4°C ไม่เกิน 24 ชั่วโมง

รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการเตรียมน้ำมะตูม

3.2.2 ขั้นตอนการทำแห้งแบบพ่นฝอย

ขั้นตอนการทำแห้งแบบพ่นฝอยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. เปิดเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยเพื่อให้พร้อมในการทำงาน โดยตั้งอุณหภูมิเข้าระหว่าง 110-130°C (ตารางที่ 3.1) อัตราการป้อนอยู่ระหว่าง 8-12 รอบต่อนาที เพื่อให้อุณหภูมิออกอยู่ระหว่าง 70-75°C ความดันบริเวณหัวฉีด (atomizer) 2 บาร์

2. ชั่งตัวอย่างผงที่ได้ และเก็บตัวอย่างในถุงอลูมิเนียมฟอล์ย เพื่อรอการศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพต่อไป

3. คำนวณหาปริมาณผลผลิต (yield) ในหัวข้อ 3.4.1

ตารางที่ 3.1 ปริมาณมอลโทเดกทรีนซ์ในการผลิตมะตูมผงสำเร็จรูป

สูตร ¹	ส่วนประกอบ (%w/w)				
	อุณหภูมิขาเข้า (°C)	น้ำมะตูม	น้ำตาลทราย	มอลโทเดกทรีนซ์	FOS
1A	120	71	15	12	2
2A	120	68	15	15	2
3A	120	65	15	18	2

¹ 1A, 2A, and 3A, respectively, denote the 12, 15, and 18% maltodextrin contents in the mixtures.

² Different letters in each column represent significant differences between treatments ($p < 0.05$).

ตารางที่ 3.2 อุณหภูมิขาเข้าที่ใช้ในการทำแห้งแบบพ่นฝอยมะตูมผงสำเร็จรูป

สูตร ¹	อุณหภูมิขาเข้า (°C)	ส่วนประกอบ (%w/w)			FOS
		น้ำมะตูม	น้ำตาลทราย	มอลโทเดกทรีนซ์	
1B	110	68	15	15	2
2B	120	68	15	15	2
3B	130	68	15	15	2

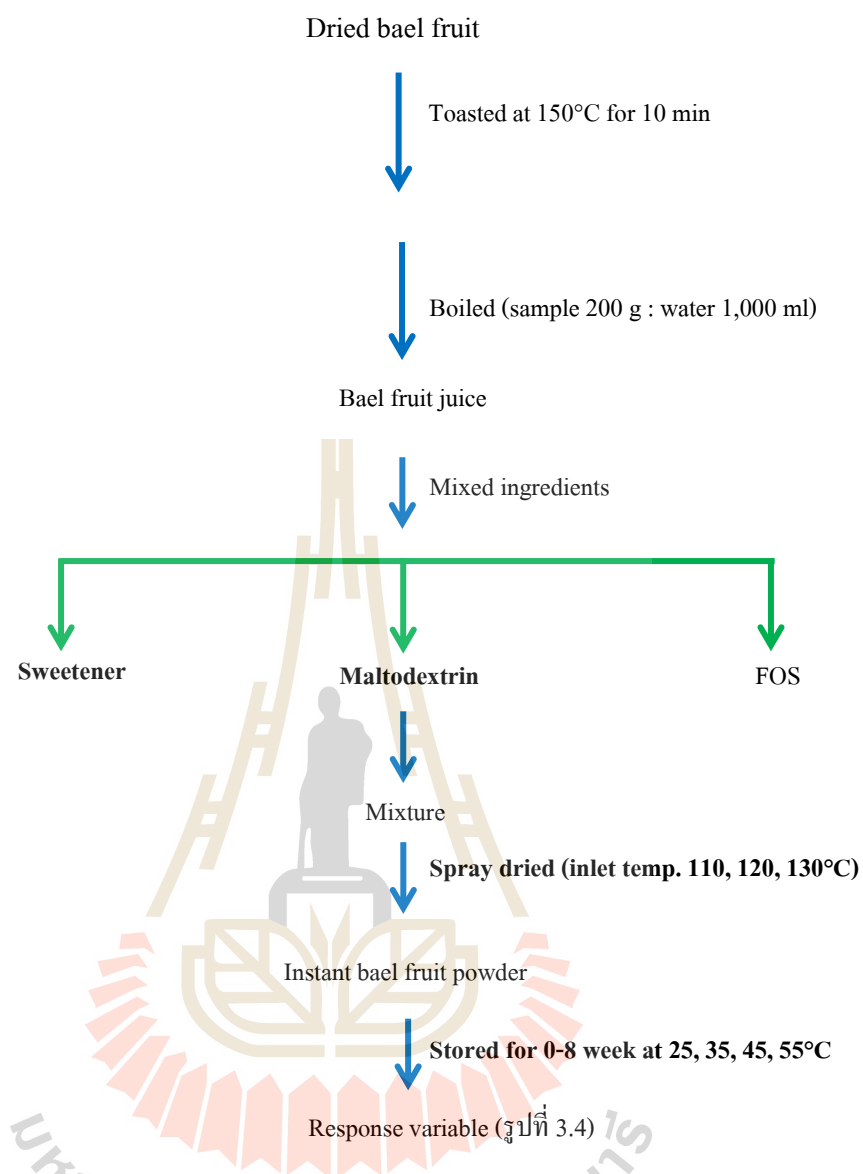
¹ 1B, 2B, and 3B, respectively, denote the inlet temperature of spray drying of 110, 120, and 130°C.

² The values are the mean of three replications \pm standard deviation.

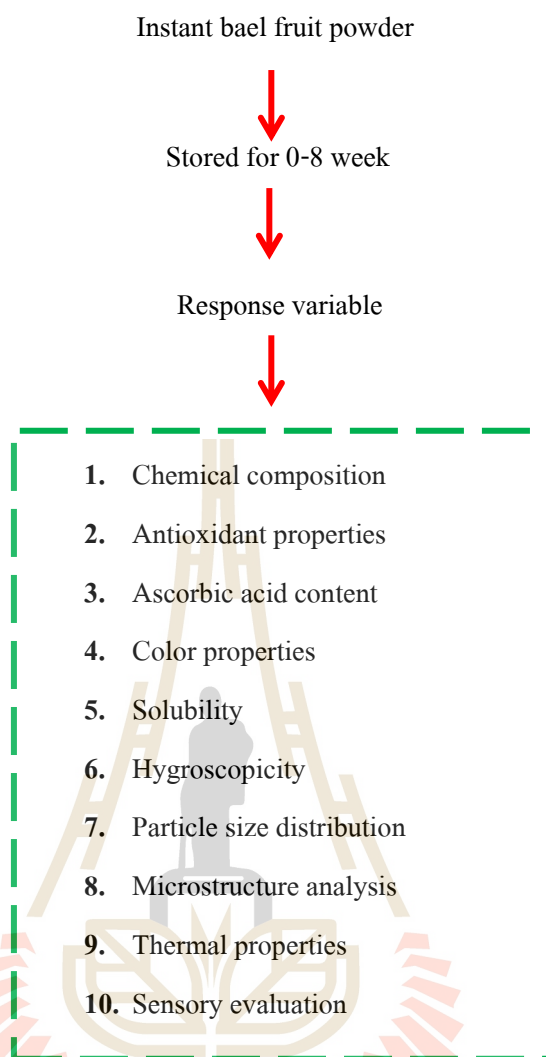
ตารางที่ 3.3 ปริมาณน้ำตาลในมะตูมผงสำเร็จรูป

สูตร ¹	ส่วนประกอบ (%w/w)					
	อุณหภูมิในการพ่น ฝอย (°C)	น้ำมะตูม	น้ำตาล ทราย	มอลทิทอล	มอลโทเดก ทรีนซ์	FOS
1C	อุณหภูมิจาเข้าที่ เหมาะสม	68	15	-	ปริมาณที่ เหมาะสม	2
2C	(หลังจากวิเคราะห์ ผล)	68	7.5	7.5	(หลังจากวิเคราะห์ ผล)	2
3C		68	-	15		2

¹1C, 2C, and 3C, respectively, denote 15% sucrose and 0% maltitol, 7.5% sucrose and 7.5% maltitol, and 0% sucrose and 15% maltitol in the mixtures. The values are the mean of three replications \pm standard deviation.



รูปที่ 3.3 การศึกษาและขั้นตอนโดยรวมในการดำเนินงานวิจัย



รูปที่ 3.4 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมี กายภาพ จุลินทรีย์ และการทดสอบทาง
ประสัมพันธ์ของมะตูมผงสำเร็จรูป

3.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

ผลิตภัณฑ์มะตูมผงสำเร็จรูปถูกนำมาวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีดังต่อไปนี้

3.3.1 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น โดยดัดแปลงจากวิธีของ AOAC (2000) มีขั้นตอน ดังนี้

1. อบถ้วยอลูมิเนียมเปล่า (aluminum can) ในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105°C นานเวลา 3 ชั่วโมง นำออกมาพักให้เย็นในโถดูดความชื้น (desiccator) บันทึกน้ำหนักถ้วยเปล่า (W_1)
2. ใส่ตัวอย่างผงมะตูมสำเร็จรูปปริมาณ 0.5 กรัม ลงในถ้วยอลูมิเนียม บันทึกน้ำหนักถ้วยอลูมิเนียมพร้อมตัวอย่าง (W_2)

3. อบตัวอย่างที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำออกมาพักไว้ให้น้ำออกมาพักให้เย็นใน โถดูดความชื้น (desiccator) บันทึกน้ำหนักด้วยอลูมิเนียมหลังอบ (W_3)

สมการคำนวณหาความชื้น (%)

$$\text{ความชื้น (\%)} = \frac{(W_2 - W_1) - (W_3 - W_1)}{(W_2 - W_1)} \times 100 \quad (3.1)$$

เมื่อ W_1 = น้ำหนักถ้วยเปล่า (กรัม)

W_2 = น้ำหนักถ้วยบรรจุตัวอย่างก่อนอบ (กรัม)

W_3 = น้ำหนักถ้วยบรรจุตัวอย่างหลังอบ (กรัม)

3.3.2 การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า ตามวิธีของ AOAC (2000)

1. อบถ้วยด้วยเซรามิก (crucible) ในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105°C 3 ชั่วโมง นำออกมาพักให้เย็นใน โถดูดความชื้น (desiccator) บันทึกน้ำหนักถ้วยเปล่า W_1

2. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างมะตุมผงสำเร็จรูป 0.5 กรัม ใส่ลงใน crucible ทำการบันทึกน้ำหนัก W_2

3. นำตัวอย่างไปเผาที่อุณหภูมิ 520°C 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นทิ้งให้ crucible เย็นในเตาเผา

4. ชั่งน้ำหนัก crucible หลังออกจากเตาเผา W_3

สมการคำนวณหาเถ้า (%)

$$\text{เถ้า (\%)} = \frac{(W_2 - W_1) - (W_3 - W_1)}{(W_2 - W_1)} \times 100 \quad (3.2)$$

เมื่อ W_1 = น้ำหนักถ้วยเปล่า (กรัม)

W_2 = น้ำหนักถ้วยก่อนเผา (กรัม)

W_3 = น้ำหนักถ้วยหลังเผา (กรัม)

3.3.3 การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน,ไขมัน, เยื่อใย

การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน,ไขมันตามวิธีการของ AOAC (2000) และ เยื่อใย ตามวิธีการของ AOAC (1990)

3.3.4 การวิเคราะห์ปริมาณคาร์โบไฮเดรต AOAC (2000)

สมการคำนวณปริมาณคาร์โบไฮเดรต

$$\text{คาร์โบไฮเดรต (\%)} = 100 - (\% \text{ โปรตีน} + \% \text{ ไขมัน} + \% \text{ เถ้า} + \% \text{ เยื่อใย}) \quad (3.3)$$

3.3.5 การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด

ปริมาณปริมาณน้ำตาลทั้งหมดโดยวิธีการของ AOAC (2000)

3.3.6 การวิเคราะห์ค่าพลังงานของอาหาร

ศึกษาค่าพลังงานของมะตูมผงสำเร็จรูป คำนวณตามสมการหาค่าพลังงานในสมการที่ 3.4

สมการหาค่าพลังงาน

$$\begin{aligned} \text{ค่าพลังงาน (kcal/100 g)} = & (4 \times \text{โปรตีน (กรัม)}) + (4 \times \text{คาร์โบไฮเดรต (กรัม)}) \\ & + (9 \times \text{ไขมัน (กรัม)}) \end{aligned} \quad (3.4)$$

3.4 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพ

3.4.1 วิเคราะห์ค่า yield และ solid recovery

วิเคราะห์ค่า yield และ solid recovery ที่ได้จากการทดลอง โดยค่า yield คือ ค่าประสิทธิภาพของความสามารถในการผลิตผง และ ค่า solid recovery คือ ความสามารถในการผลิตผงมะตูมสำเร็จรูป เทียบระหว่างของแข็งทั้งหมดในตัวอย่างก่อนและหลังการทำแห้ง โดยค่า yield และ solid recovery สามารถคำนวณได้ตามสมการ (3.5) และ (3.6) (C. W. Wong, Teoh, & Putri, 2017) โดยน้ำหนักแห้ง (% dry basis)

สมการการคำนวณ yield (%)

$$\text{yield (\% w/w dry basis)} = \frac{\text{น้ำหนักผงที่ได้จากการทำแห้ง (กรัม)}}{\text{น้ำหนักส่วนผสมก่อนการทำแห้ง (กรัม)}} \times 100 \quad (3.5)$$

สมการคำนวณ solid recovery (%)

$$\text{solid recovery (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักที่ได้จากการทำแห้ง (กรัม)}}{\text{น้ำหนักของแข็งทั้งหมดในส่วนผสมก่อนการทำแห้ง (กรัม)}} \times 100 \quad (3.6)$$

3.4.2 การวิเคราะห์ปริมาณน้ำอิสระ, ความหนาแน่นรวม (bulk density), tapped density และ ความสามารถในการดูดความชื้นกลับ (hygroscopicity)

ศึกษาปริมาณน้ำอิสระ (water activity, a_w) ตามวิธี AOAC (2000) ศึกษาปริมาณน้ำอิสระในอาหารด้วยเครื่อง water activity รุ่น Aqualab CX-2 (USA) ดังรูปที่ 3.5 บรรจุตัวอย่างปริมาณครึ่งหนึ่งของความสูงภาชนะ เกลี่ยผิวตัวอย่างให้เรียบและนำ can ใส่ลงในเครื่อง วัดตัวอย่างที่อุณหภูมิ 25°C บันทึกค่า a_w ที่อ่านได้จากเครื่อง โดยทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ



รูปที่ 3.5 เครื่อง water activity รุ่น Aqualab CX-2 (USA)

ศึกษาค่าความหนาแน่นรวม (bulk density) ตามวิธี AOAC (1995) โดยทำการชั่งกระบอกตวงขนาด 10 มิลลิลิตร เติตัวอย่างปริมาณ 2.5 กรัม ลงในกระบอกตวงผ่านกรวยกระดาษ

หลังจากนั้นซึ่งกระบอกตรวจที่บรรจุตัวอย่างและอ่านปริมาตรตัวอย่าง คำนวณค่าความหนาแน่นรวมในสมการที่ 3.7 โดยทำการทดลองจำนวน 2 ซ้ำ

สมการหาค่าความหนาแน่นรวม (bulk density)

$$\text{ความหนาแน่นรวม} = \frac{\text{มวล (กรัม)}}{\text{ปริมาตร (มิลลิลิตร)}} \quad (3.7)$$

ศึกษาค่า tapped density ตามวิธี AOAC (1995) โดยนำกระบอกตรวจที่ชั่งและวัดปริมาตรจากการหาความหนาแน่นรวม (bulk density) มาเคาะบนฝ่า 50 ครั้งและบันทึกปริมาตรที่อ่านได้ คำนวณได้จากสมการเดียวกับสมการหาค่าความหนาแน่นรวมมา ทำการทดลองจำนวน 2 ซ้ำ

ศึกษาค่าความสามารถในการดูดความชื้นกลับ (hygroscopicity) ดัดแปลงจากวิธีของ (Bazaria & Kumar, 2017) โดยชั่งตัวอย่างมะตูมผงสำเร็จรูป 0.5 กรัม ใส่ในถ้วยอลูมิเนียม (can) ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 105°C 4 ชั่วโมงแล้วทิ้งให้เย็นในตู้ดูดความชื้น นำ can ใส่ในโถดูดความชื้นที่มีสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้น 23% ปริมาตร 250 มิลลิลิตรบรรจุอยู่ในบีกเกอร์ ปิดฝาโถดูดความชื้น ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วัน นำตัวอย่างออกมาชั่งน้ำหนักหลังเข้าสู่สมดุล และคำนวณค่าความสามารถในการดูดความชื้นตามสมการที่ 3.8 ทำการทดลองจำนวน 2 ซ้ำ

สมการความสามารถในการดูดความชื้นกลับ (hygroscopicity)

$$\text{Hygroscopicity (\%)} = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100 \quad (3.8)$$

เมื่อ W_1 = น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น (กรัม)

W_2 = น้ำหนักตัวอย่างหลังหลังเข้าสู่สมดุล (กรัม)

3.4.3 วิเคราะห์ค่าการละลาย และค่า pH

การหาค่าการละลายอนุภาคน้ำหอมที่ดัดแปลงจากวิธีของ (Sangeeta, et al., 2015) โดยชั่งตัวอย่าง 0.5 กรัม ละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 25 มิลลิลิตร กวนด้วยแท่งแม่เหล็กกวนสาร (magnetic bar) ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที 1 ชั่วโมง นำมาวัดค่า pH หลังจากนั้นนำตัวอย่างเข้าเครื่องปั่นเหวี่ยง ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที 10 นาที เทส่วนที่เป็นของเหลวลงในถ้วยอลูมิเนียมที่ผ่านการอบที่ 105°C 4 ชั่วโมงและชั่งน้ำหนักแล้ว นำตัวอย่างเข้าตู้อบที่ 105°C 4 ชั่วโมง นำออกมาทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น ทำการชั่งน้ำหนักด้วยอลูมิเนียมหลังอบ นำมาคำนวณในสมการหาค่าการละลายในสมการที่ 3.9

สมการหาค่าการละลาย

$$\text{การละลาย (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (กรัม)}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (กรัม)}} \times 100 \quad (3.9)$$

การหาค่าการละลายที่อุณหภูมิ 100°C ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนมะตูมผงสำเร็จรูป โดยชั่งตัวอย่าง 2.5 กรัม ใส่ในน้ำเดือดปริมาตร 50 มิลลิลิตร คนด้วยแท่งแก้วคนสาร 30 วินาที กรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 4 ผ่านการอบที่ 105°C 1 ชั่วโมงและชั่งน้ำหนักแล้ว นำตัวอย่างเข้าตู้อบที่ 105°C 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำออกมาทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น ทำการชั่งน้ำหนักกระดาษกรองหลังอบ และนำมาคำนวณในสมการหาค่าการละลายวัด

3.4.4 การวิเคราะห์ค่าการกระจาย (dispersibility)

ศึกษาค่าการกระจายดัดแปลงจากวิธีของ (Hassan & Bakri, 1990) โดยนำชั่งตัวอย่าง 0.5 กรัม เติลงใน น้ำกลั่นปริมาตร 25 มิลลิลิตรและนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที เวลา 5 นาที จากนั้นดูคของเหลวด้านบนมาวัด การดูดกลืนแสง (ABS) 520 นาโนเมตร

3.4.5 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาค

ศึกษาขนาดอนุภาคและการกระจายตัวของมะตูมผงสำเร็จรูป โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนแสงเลเซอร์ ของเครื่อง particle size distribution analyzer รุ่น LA-9502v (Horiba Kyoto, Japan) ดังแสดงรูปที่ 3.6 ใช้ไอโซโพรพานอล (Isopropanol) เป็นสารตัวกลางเพื่อให้ตัวอย่างกระจายตัวได้ดี โดยใส่ตัวอย่าง 10 มิลลิกรัม ลงในไอโซโพรพานอล 10 มิลลิลิตร คนให้ตัวอย่างกระจายอยู่ในตัวทำละลาย หลังจากนั้นดูคตัวอย่างใส่ในเซลล์ที่มีไอโซโพรพานอลบรรจุอยู่ คำนวณหาขนาดอนุภาคของตัวอย่างโดยพิจารณาค่ากลาง D_{50}



รูปที่ 3.6 เครื่อง Particle size distribution analyzer รุ่น LA-9502v (Horiba Kyoto, Japan)

3.4.6 การวิเคราะห์ระดับโครงสร้างระดับจุลภาค

ศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคของผงมะตูมสำเร็จรูปด้วยเครื่อง scanning electron microscope (SEM) รุ่น JSM6010LV (JEOL, Tokyo, Japan) ดังแสดงในรูปที่ 3.7 โรอยตัวอย่างลงบนสตัปทองเหลืองที่ติดด้วยแผ่นเทปคาร์บอน หลังจากนั้นนำไปเคลือบด้วยทอง ก่อนนำเข้าเครื่อง SEM โดยใช้โหมดแสง SEI ระดับพลังงาน 15 kV และระดับกำลังขยายเท่ากับ 1,000 และ 2,000 เท่า เพื่อศึกษาลักษณะพื้นฐานของผงมะตูมสำเร็จรูป



รูปที่ 3.7 เครื่อง scanning electron microscope (SEM) รุ่น JSM6010LV (JEOL, Tokyo, Japan)

3.4.7 การวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อน

ศึกษาสมบัติเชิงความร้อนด้วยเครื่อง differential scanning calorimeter (DSC) รุ่น Pyris Diamond (USA) ดังรูปที่ 3.8 คัดแปลงวิธีจาก Bindu & Pradyuman (2006) โดยนำตัวอย่างผงมะตอมสำเร็จรูปบรรจุตัวอย่างลงในถาดอลูมิเนียม (sample pan) น้ำหนักไม่เกิน 10 มิลลิกรัม (บันทึกน้ำหนักตัวอย่าง) จากนั้นนำเข้าเครื่อง DSC โดยตั้งค่าอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่ 5°C ต่อนาที จาก 30 ถึง 150°C โดยใช้ถาดอลูมิเนียมที่ไม่ได้บรรจุตัวอย่างเป็นถาดอ้างอิง (reference pan) และนำมาวิเคราะห์หาอุณหภูมิสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g) ด้วยโปรแกรม Pyris Series-Diamond DSC โดยทำการทดลองจำนวน 2 ชั่วโมง



รูปที่ 3.8 เครื่อง differential scanning calorimeter รุ่น Pyris Diamond DSC (USA)

3.4.8 การวิเคราะห์หาค่าสี

ศึกษาคุณภาพสี ดัดแปลงวิธีของ (Saikia et al., 2015) ด้วยเครื่องวัดสี (ColorQuest® XE, Hunter Associates Laboratory, Inc., VA, USA) แสดงในรูปที่ 3.9 นำตัวอย่างใส่ลงในคิวเวต (cuvette) นำไปวิเคราะห์หาค่าสีในระบบ $L^* a^* b^*$ เพื่อใช้เป็นดัชนีในการวิเคราะห์คุณภาพของมะตูมผงสำเร็จรูป โดยค่า L^* หมายถึงค่าความสว่าง (lightness) ค่า a^* หมายถึงค่าความเป็นสีแดง (redness) และค่า b^* หมายถึงค่าความเป็นสีเหลือง (yellowness) โดยทำการทดลอง 2 ซ้ำ



รูปที่ 3.9 เครื่องวัดสี (ColorQuest® XE, Hunter Associates Laboratory, Inc., VA, USA)

3.4.9 การวิเคราะห์หาปริมาณวิตามินซี AOAC (1990)

เตรียมสารเคมี

1. สารละลาย Oxalic – acetic acid
 - 1.1 ชั่งสาร oxalic acid 3 กรัม ละลายในสารละลาย glacial acetic acid มิลลิลิตร
 - 1.2 ปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่นอุณหภูมิห้องที่ผ่านการต้มให้เดือดเป็นเวลา 10 นาที
 - 1.3 เก็บสารละลายที่อุณหภูมิ 4°C อายุในการเก็บรักษา 7-14 วัน
 2. สารละลาย Dye solution
 - 2.1 ชั่งสาร 2,6 – dichlorophenolindophenol 0.125 กรัม เติมน้ำกลั่นอุณหภูมิห้องที่ผ่านการต้มให้เดือดเป็นเวลา 10 นาที 250 มิลลิลิตร
 - 2.2 ชั่งสาร Sodium bicarbonate (NaHCO_3) 0.125 กรัม ผสมในสารละลายข้อ 2.1 ใช้ magnetic bar กวนให้ละลายทั้งหมด
 - 2.3 ใช้น้ำกลั่นปรับปริมาตรเป็น 500 มิลลิลิตร กรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 ใส่ในขวดทึบแสง เก็บในตู้เย็นอุณหภูมิ 4°C อายุการเก็บรักษา 21 วัน
 - 2.4 สารละลายมาตรฐานวิตามินซีความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ชั่งสารละลายมาตรฐาน Ascorbic acid 10 มิลลิกรัม ละลายในสารละลาย Oxalic – acetic acid ปริมาตร 10 มิลลิลิตร
 3. การเตรียมตัวอย่าง
 - 3.1 ชั่งมะตูมผงสำเร็จรูป 1 กรัม ผสมกับสารละลายวิตามินซีความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ปริมาตร 1 มิลลิลิตร และ น้ำกลั่นอุณหภูมิห้องที่ผ่านการต้มให้เดือดเป็นเวลา 10 นาที ปริมาตร 3 มิลลิลิตร ใช้ vortex เขย่าให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน ปริมาตรตัวอย่างทั้งหมดเท่ากับ 5 มิลลิลิตร
- วิธีหาปริมาณวิตามินซี
4. หาปริมาณวิตามินซีจากสารละลายมาตรฐาน
 - 4.1 ดูดสารละลายมาตรฐานวิตามินซีความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask) ขนาด 25 มิลลิลิตร
 - 4.2 ดูดสารละลาย Oxalic – acetic acid ปริมาตร 5 มิลลิลิตร คนให้ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน
 - 4.3 เทเทรตกับสารละลาย Dye solution จนกว่าจะถึงจุด end point สีของตัวอย่างจะเปลี่ยนเป็นสีชมพูคงที่อย่างน้อย 5 วินาที

5. กำหนดปริมาณวิตามินซีที่ได้เพื่อนำไปเทียบกับตัวอย่าง

5.1 หาปริมาณวิตามินซีในตัวอย่าง

5.1.1 คุ้ดตัวอย่างปริมาตร 1 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask) ขนาด 25 มิลลิลิตร

5.1.2 คุ้ดสารละลาย Oxalic – acetic acid ปริมาตร 6 มิลลิลิตร

5.1.3 ไทเทรตด้วยสารละลาย Dye solution จนกว่าจะถึงจุด end point สีของตัวอย่างจะเปลี่ยนเป็นสีชมพูคงที่อย่างน้อย 5 วินาที

สมการการคำนวณปริมาณวิตามินซีในมะตูมผงสำเร็จรูป 1 กรัม

$$\text{ปริมาณวิตามินซี (มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม)} = \left(\frac{A}{B} \times C \right) \times \left(D - \frac{B}{A} \right) \times \left(G \times \frac{H}{F} \right) \quad (3.11)$$

เมื่อ

A = ปริมาตรสารละลายมาตรฐานความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

B = ปริมาตร dye solution (มิลลิลิตร) ใช้ไทเทรตกับสารละลาย A

C = ปริมาตร 1 มิลลิลิตรของสารละลายมาตรฐาน 1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

D = ปริมาตร dye solution ใช้ไทเทรตตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

E = ปริมาณมะตูมผงสำเร็จรูป (มิลลิกรัม) ในตัวอย่างปริมาตร 1 มิลลิลิตร

F = ปริมาณมะตูมผงสำเร็จรูป 1 กรัม

H = ปริมาตรตัวอย่างที่เตรียมทั้งหมด (มิลลิลิตร)

3.4.10 การวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ

1. การเตรียมสารสกัด (Sample preparation)

นำมะตูมผงสำเร็จรูป 200 มิลลิกรัม เดิมเมทานอล (methanol) ปริมาตร 1.8 มิลลิลิตร แล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่อง vortex เป็นเวลา 3 นาที นำตัวอย่างไปปั่นแห้งที่ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที 5 นาที คัดส่วนใสที่ได้เก็บในตู้แช่แข็ง -20°C จนกว่าจะนำมาวิเคราะห์

2. การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวม (Total phenolic content assay)

การหาปริมาณฟีนอลิกรวมตัดแปลงจากวิธีของ (Heleno, Martins, Queiroz, & Ferreira, 2015) โดยวิธี Folin-Ciocalteu Colorimetric ปิเปตสารละลายตัวอย่าง 0.4 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลอง เดิมสารละลาย Folin-Ciocalteu reagent 2 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ในที่มืดเป็นเวลา 6 นาที จากนั้นเติมโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) 20% ปริมาตร 0.6 มิลลิลิตร ผสมสารละลายให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องในที่มืดเป็นเวลา 30 นาที นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 760 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง UV-spectrophotometer ปริมาณฟีนอลิกรวมหาได้จากการนำค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างเทียบกับกราฟมาตรฐานของสารละลายกรดแกลลิก (gallic acid) ปริมาณที่ได้แสดงในหน่วย mgGA/L โดยวิเคราะห์ตัวอย่างละ 2 ซ้ำ

3. การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธีดีพีพีเอช

การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี 2, 2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) โดยปรับปรุงจากวิธีการของ (Zorić et al., 2017) เตรียมสารละลายดีพีพีเอช (DPPH reagent) โดยชั่งดีพีพีเอช 24 มิลลิกรัม ละลายในเมทานอล 100 มิลลิลิตร เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4°C เมื่อนำมาใช้งานเจือจางสารละลายที่เตรียมไว้ด้วยเมทานอลให้มีค่าการดูดกลืนแสงเท่ากับ 1.10 ± 0.06 ที่ความยาวคลื่น 515 นาโนเมตร ทำการทดสอบโดยผสมสารละลายตัวอย่างและสารละลายมาตรฐาน (Trolox ความเข้มข้น 5, 25, 50, 100 และ 200 $\mu\text{mol TEAC/g}$) 50 ไมโครลิตร ผสมกับสารละลายดีพีพีเอช 150 ไมโครลิตร ในไมโครเพลทขนาด 96 หลุม เขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 515 นาโนเมตร โดยใช้เครื่อง Microplate Spectrophotometer (Multiskan GO, Thermo Scientific™, U.S.) เปรียบกับ blank นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณจากกราฟสารละลายมาตรฐานในหน่วยของไมโครโมลสมมูลของ Trolox ต่อน้ำหนักตัวอย่างแห้ง 1 g ($\mu\text{mol TEAC/g}$, dry basis) โดยวิเคราะห์ตัวอย่างละ 2 ซ้ำ

4. การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธีเอบีทีเอส (ABTS radical cation decolorization assay)

การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี 2, 2'-Azino-bis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) (ABTS) ตัดแปลงวิธีการจาก (Adebayo, Arsad, & Samian, 2018) เป็นการทดสอบโดยใช้สารละลาย ABTS $^{\bullet+}$ reagent โดยเตรียมสารละลายเอบีทีเอสในน้ำกลั่นความเข้มข้น

7 มิลลิโมลาร์ ปริมาณ 15 มิลลิลิตร ผสมกับสารละลายโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต ($K_2S_2O_8$) ความเข้มข้น 140 มิลลิโมลาร์ 264 ไมโครลิตร ให้เจือจางสารละลาย ABTS+ reagent ที่เตรียมไว้ด้วยเมทานอลให้มีค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 734 นาโนเมตร เท่ากับ 0.70 ± 0.02 ทำการทดสอบโดยผสมสารตัวอย่างและสารละลายมาตรฐาน (Trolox ความเข้มข้น 5, 25, 50, 100 และ 200 $\mu\text{mol TEAC/g, g sample}$) 50 ไมโครลิตร ผสมกับสารละลายดีฟีพีเอช 150 ไมโครลิตร ในไมโครเพลทขนาด 96 หลุม เขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 นาที นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 734 นาโนเมตร โดยใช้เครื่อง Microplate Spectrophotometer (Multiskan GO, Thermo Scientific™, U.S.) เปรียบเทียบกับ blank นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณจากกราฟสารละลายมาตรฐานในหน่วยของไมโครโมลสมมูลของ Trolox ต่อน้ำหนักตัวอย่างแห้ง 1 g ($\mu\text{mol TEAC/g, g sample, dry basis}$) โดยวิเคราะห์ตัวอย่างละ 2 ซ้ำ

3.4.11 การตรวจนับเชื้อจุลินทรีย์

ตรวจนับเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด (total plate count) ยีสต์และรา ที่อาจก่อให้เกิดการเน่าเสียภายหลังจากการเก็บรักษามะตูมผงสำเร็จรูปด้วยเทคนิค pour plate โดยเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด ยีสต์และรา สามารถเกิดได้ทั้งบนผิวหน้า และในเนื้ออาหารเลี้ยงเชื้อ โดยชั่งตัวอย่างผงมะตูม ปริมาณ 11 กรัม ใส่ลงใน sterile stomacher bag ที่มี 0.1% sterile peptone ปริมาตร 99 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปทำให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่อง stomacher blender ประมาณ 5 นาที (จะได้ความเจือจาง 1:10 or 10^{-1}) จากนั้นเจือจางตัวอย่าง 10^{-1} fold serial dilution ด้วยเทคนิคปลอดเชื้อ โดยเปิดอาหารเหลวปริมาตร 1 มิลลิลิตร ลงใน 0.1 % sterile peptone ปริมาตร 9 มิลลิลิตร ในหลอดทดลอง (จะได้ความเจือจาง 10^{-2}) เปิดสารละลายเจือจางที่ 10^{-1} และ 10^{-2} ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ลงใน sterile Petri dishes จำนวน 2 ซ้ำ เทอาหารเลี้ยงเชื้อ plate count agar (PCA) และ potato dextrose agar (PDA) 20 มิลลิลิตร ที่มีอุณหภูมิ 45°C แล้วผสมให้เข้ากัน ทิ้งไว้ให้อาหารเลี้ยงเชื้อแข็งตัว นำจานเลี้ยงเชื้อที่มีอาหารเลี้ยงเชื้อชนิด plate count agar (PCA) ไปบ่มที่อุณหภูมิ 37°C นาน 24 ชั่วโมงโดยคว่ำจานเลี้ยงเชื้อลง และจานเลี้ยงเชื้อที่มีอาหารเลี้ยงเชื้อชนิด potato dextrose agar (PDA) ไปบ่มที่อุณหภูมิ 25°C นาน 48 ชั่วโมงนับจำนวนโคโลนีและคำนวณหาจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด ยีสต์ และรา เป็น colony forming unit/gram (CFU/g)

3.4.12 การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผงมะตูมสำเร็จรูป

การประเมินคุณลักษณะด้านประสาทสัมผัสของผงมะตูมสำเร็จรูปทั้ง 3 สูตร ดังแสดงในรูปที่ 3.11 โดยใช้วิธีการทดสอบแบบ 9 - point hedonic scale ที่มีระดับคะแนนตั้งแต่ 1-9 โดย 1 หมายถึง ไม่ชอบมากที่สุด และ 9 หมายถึง ชอบมากที่สุด ในด้านสี กลิ่นรส ความหวาน และความชอบโดยรวม จากผู้ทดสอบทั่วไปจำนวน 50 คน (ภาคผนวก ก)



รูปที่ 3.10 การทดสอบทางประสาทสัมผัสของมะตูมผงสำเร็จรูปทั้ง 3 สูตร

3.4 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

การทดลองถูกวางแผนแบบ Complete Randomized Design (CRD) สำหรับการทดสอบผลของอุณหภูมิขาเข้าของเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย ปริมาณมอลโทเดกซ์ทริน และชนิดของน้ำตาลหรือสารให้ความหวาน ต่อสมบัติเคมีกายภาพของมะตูมผง ข้อมูลถูกนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (one-way ANOVA) และเปรียบเทียบพหุคูณของค่าเฉลี่ย (multiple comparison test) ด้วยวิธีของ Tukey HSD ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยใช้โปรแกรม Minitab® 17

บทที่ 4

ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล

4.1 การศึกษาอัตราส่วนของส่วนผสมและสภาวะการทำแห้งแบบพ่นฝอยของการผลิตมะตูมผงสำเร็จรูป

4.1.1 การศึกษาปริมาณมอลโทเดทรีนซ์ต่อคุณภาพของมะตูมผงสำเร็จรูป

ในการศึกษาครั้งนี้ ได้ทำการทดลองเบื้องต้นเพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมของสารเพิ่มปริมาณของแข็งหรือสารตัวพา (carrier agent) ได้แก่ มอลโทเดทรีนซ์ ในการเลือกใช้สารชนิดนี้เนื่องจากมอลโทเดทรีนซ์เป็นสารที่นิยมใช้เพราะช่วยทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีปริมาณผลผลิตสูงและคุณภาพดี รวมทั้งมอลโทเดทรีนซ์มีราคาไม่แพง (Mishra et al., 2014) ในการทดลองได้เติมมอลโทเดทรีนซ์ในสัดส่วนเท่ากับ 12% 15% และ 18% ของน้ำหนักส่วนผสมทั้งหมดก่อนการทำแห้งแบบพ่นฝอย หลังจากเตรียมส่วนผสมเรียบร้อยแล้วพบว่าส่วนผสมมีค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (total soluble solid, TSS) อยู่ระหว่าง 32.10-38.00°Brix และค่าความเป็นกรดต่าง (pH) อยู่ระหว่าง 5.16-5.48 ดังแสดงผลในตารางที่ 4.1 จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มปริมาณมอลโทเดทรีนซ์มีผลทำให้ค่า TSS และ pH เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 4.1 ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดและค่าความเป็นกรดต่างของน้ำมะตูมที่มีปริมาณมอลโทเดทรีนซ์ต่างกันก่อนการทำแห้งแบบพ่นฝอย

Treatment ¹	Total soluble solid (°Brix) ²	pH ²
1A	32.10±0.14 ^c	5.16±0.00 ^b
2A	34.00±0.00 ^b	5.47±0.04 ^a
3A	38.00±0.00 ^a	5.48±0.00 ^a

¹ 1A, 2A, and 3A, respectively, denote the 12, 15, and 18% maltodextrin contents in the mixtures.

² Different letters in each column represent significant differences between treatments ($p < 0.05$).

The values are the mean of three replications ± standard deviation.

เมื่อนำส่วนผสมไปทำแห้งแบบพ่นฝอยได้กำหนดสภาวะในการทำแห้งโดยอุณหภูมิ ลมร้อนขาเข้าและลมร้อนขาออกของเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยอยู่ที่ 120°C และ 70°C ตามลำดับ และอัตราการป้อนอยู่ช่วง 16-17 มิลลิตรต่อนาที หรือความเร็วรอบของปั๊มประมาณ 10 รอบต่อนาที จากผลการทดลองพบว่า มะตูมผงสำเร็จรูปสูตรที่มีปริมาณมอลโทเดกทรีนซ์ 18% ของน้ำหนัก ส่วนผสมทั้งหมด (3A) มีปริมาณผลผลิต (yield) และ solid recovery เท่ากับ 32.38% และ 85.22% ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าสูตรที่มีมอลโทเดกทรีนซ์ 12% (1A) และ 15% (2A) ของน้ำหนักส่วนผสม ทั้งหมดอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยสูตร 1A และ 2A มี yield 19.74% และ 24.02% และ solid recovery 65.81% และ 77.20% ตามลำดับ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มปริมาณมอล โทเดกทรีนซ์มีผลทำให้ yield และ solid recovery เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ดังแสดงผลใน ตารางที่ 4.2 อย่างไรก็ตาม solid recovery ของสูตร 2A และ 3A ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Mishra et al. (2014) และ Wong et al. (2017) ซึ่ง Wong et al. (2017) พบว่าการเพิ่มปริมาณมอลโทเดกทรีนซ์จาก 10% ถึง 30% มีผลทำให้ solid recovery เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณมอลโทเดกทรีนซ์สูงขึ้นทำให้ส่วนผสมมีความ เข้มข้นสูงขึ้น ซึ่งช่วยลดการเกาะติดของผงข้างผนังห้องทำแห้ง (drying chamber) ได้ แต่เมื่อเพิ่ม ปริมาณมอลโทเดกทรีนซ์เป็น 40% และ 50% ทำให้ solid recovery ลดลงอาจเนื่องมาจากส่วนผสม มีความเหนียวมากเกินไป (Tonon et al., 2008; Chong & Wong, 2015)

ความชื้น (moisture content) ของผลิตภัณฑ์ผงต่ำกว่า 3% ทำให้ผลิตภัณฑ์ผงมี แนวโน้มที่จะมี flowing property ดี ผลิตภัณฑ์ผงมีความชื้นต่ำกว่า 10% แสดงว่ามีความปลอดภัย ทางด้านจุลินทรีย์ (Wong et al., 2017) อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปความชื้นของผลิตภัณฑ์ผงที่ได้จาก การทำแห้งแบบพ่นฝอยมีค่าต่ำกว่า 5% ซึ่งช่วยทำให้เก็บรักษาได้นานยิ่งขึ้น (Tontul & Topuz, 2017) จากการทดลองนี้พบว่า การเพิ่มปริมาณมอลโทเดกทรีนซ์จาก 12% เป็น 18% มีผลทำให้ ความชื้นของมะตูมผงสำเร็จรูปลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 1.62-2.41% (ตารางที่ 4.2) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Mishra et al. (2014) พบว่าการเพิ่มปริมาณมอลโทเดกทรีนซ์จาก 10% เป็น 20% มีผลทำให้ความชื้นของมะนาวผงลดลง Abadio et al. (2004) เพิ่มปริมาณ มอลโทเดกทรีนซ์จาก 10% เป็น 15% มีผลทำให้ความชื้นของน้ำสับประดะผงลดลง และ Ferrari et al. (2013) เพิ่มปริมาณมอลโทเดกทรีนซ์มีผลทำให้ความชื้นของ blackberry ผงลดลง

Water activity (a_w) เป็นการวัดปริมาณน้ำอิสระในอาหารที่เกี่ยวข้องกับการปฏิกิริยา ชีวเคมี (biochemical reaction) และ a_w ใช้ช่วยบ่งบอกถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ระหว่างการเก็บ รักษา (Wong et al., 2017) ในการศึกษาครั้งนี้พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณมอลโทเดกทรีนซ์มีผลทำให้ a_w ของ มะตูมผงสำเร็จรูปลดลงเพียงเล็กน้อย ($p > 0.05$) ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0.29-0.32 (ตารางที่ 4.2) ทั้งนี้ค่า a_w ต่ำกว่า 0.6 แสดงถึงความปลอดภัยทางด้านจุลินทรีย์และความเสถียรของผลิตภัณฑ์ระหว่าง

การเก็บรักษาด้วย (Wong et al., 2017) ในการศึกษาครั้งนี้ ค่า a_w ของมะตูมผงสำเร็จรูปสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wong et al., 2017 ทำแห้งกล้วยผงซึ่งมีค่า a_w ระหว่าง 0.21-0.32 สำหรับ Quek et al., 2007 ทำแห้งแดงโม่ผงซึ่งมีค่า a_w ระหว่าง 0.20-0.29

ตารางที่ 4.2 ผลของปริมาณมอลโทเดกทรีนต่อคุณภาพของมะตูมผงสำเร็จรูป

Parameter	Treatment ¹		
	1A	2A	3A
Moisture content (%)	2.41±0.81 ^a	1.86±0.12 ^b	1.62±0.08 ^b
a_w	0.32±0.02	0.30±0.03	0.29±0.02
Yield (%)	19.74±1.53 ^c	24.02±0.28 ^b	32.38±1.79 ^a
Solid recovery (%)	65.81±5.09 ^b	77.20±5.13 ^a	85.22±0.89 ^a
DPPH (μmol TEAC/g)	1.81±0.09	1.83±0.01	1.73±0.29
ABTS (μmol TEAC/g)	1.81±0.00 ^b	1.91±0.04 ^a	1.80±0.00 ^b
Total phenolics (mgGA/L)	190.45±2.65 ^b	215.30±18.5 ^a	176.14±3.54 ^c
Particle size (nm)	54.41±0.32 ^a	50.53±5.95 ^a	33.97±0.75 ^b

¹ 1A, 2A, and 3A, respectively, denote the 12, 15, and 18% maltodextrin contents in the mixtures. Different letters in each row represent significant differences between treatments ($p < 0.05$). The values are the mean of three replications ± standard deviation.

Wong et al. (2017) รายงานว่า ผลึกกัณฑ์กล้วยผงมีความชื้นและ a_w ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณมอลโทเดกทรีน เนื่องจากเป็นการเพิ่มปริมาณของแข็งก่อนการทำแห้ง มีผลทำให้ลดปริมาณน้ำในส่วนผสม นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Fazaeli et al. (2012) ในการทำแห้ง black mulberry juice แต่ผลการทดลองนี้ไม่สอดคล้องกับงานวิจัยของ Goula and Adamopoulos (2010) ที่พบว่า การเพิ่มปริมาณมอลโทเดกทรีนทำให้ผลึกกัณฑ์น้ำส้มผงมีความชื้นเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณมอลโทเดกทรีนที่เพิ่มขึ้นมากทำให้ระเหยน้ำออกได้ยากขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มมอลโทเดกทรีนมีผลทำให้ความชื้นของผลึกกัณฑ์สูงขึ้นและส่งผลกระทบต่อความสามารถในการดูดน้ำกลับ (hygroscopicity) ลดลง (Mishra et al., 2015)

การเพิ่มปริมาณมอลโทเดกทรีนซ์ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการยับยั้งหรือต้านสารอนุมูลอิสระ DPPH ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 1.73-1.83 $\mu\text{mol TEAC/g}$ (ตารางที่ 4.2) อย่างไรก็ตามปริมาณมอลโทเดกทรีนซ์มีผลต่อค่าความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ ABTS และสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (total phenolics) (ตารางที่ 4.2) ซึ่งพบว่า ปริมาณมอลโทเดกทรีนซ์ 15% (สูตร 2A) มีค่าความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ ABTS และสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดสูงสุดอยู่ที่ 1.91 $\mu\text{mol TEAC/g}$ และ 215.30 mgGA/L ตามลำดับ จากรายงานวิจัยของ Mishra et al. (2014) พบว่าการเพิ่มปริมาณมอลโทเดกทรีนซ์จาก 10% เป็น 20% มีผลทำให้สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดลดลง รวมทั้งลดความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ทั้งนี้เนื่องมาจากการเจือจางของสารมอลโทเดกทรีนซ์ในส่วนผสม

ขนาดอนุภาค (particle size) เป็นสมบัติทางกายภาพที่สำคัญอย่างหนึ่งของผลิตภัณฑ์ผง ทั้งนี้ขนาดอนุภาคส่งผลต่อการจัดการทางการขนส่ง นอกจากนี้ยังเกี่ยวข้องกับความคงตัวของคุณภาพผลิตภัณฑ์ระหว่างการเก็บรักษาด้วย โดยหากอนุภาคผงขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวมากมีผลทำให้เกิดการเสื่อมสลายของสารประกอบได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ขนาดอนุภาคผงเล็กทำให้ยากต่อการจัดการและการละลาย ขนาดอนุภาคผงที่ดีควรมีขนาดมากกว่า 50 นาโนเมตร (Tontul and Topuz, 2017) ปัจจัยที่มีผลต่อขนาดอนุภาคได้แก่ ความหนืดของสารละลายก่อนการทำแห้งแบบพ่นฝอย โดยความหนืดสูงส่งผลให้ขนาดอนุภาคใหญ่ ดังนั้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารตัวพา ความหนืดสูงขึ้น ขนาดอนุภาคก็จะใหญ่ขึ้น (Ferrai et al., 2012) ชนิดของสารตัวพามีผลกับขนาดอนุภาคโดยมอลโทเดกทรีนซ์มีผลทำให้ขนาดอนุภาคผงใหญ่กว่าการใช้ gum Arabic แต่ soy protein isolate ทำให้ขนาดอนุภาคผงใหญ่กว่าการใช้มอลโทเดกทรีนซ์ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากขนาดของโมเลกุลมีผลต่อความหนืดของสารผสมก่อนการทำแห้ง อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองนี้ พบว่า ขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 33.97-54.41 นาโนเมตร การเพิ่มปริมาณมอลโทเดกทรีนซ์จาก 15% เป็น 18% มีผลทำให้อนุภาคผงของมะตูมผงสำเร็จรูปมีขนาดเล็กลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 4.2 Wong et al. (2017) รายงานว่า การเพิ่มปริมาณมอลโทเดกทรีนซ์มีผลทำให้ความหนาแน่นปรากฏ (bulk density) ลดลง เนื่องจากมอลโทเดกทรีนซ์มีผลทำให้อนุภาคผงมีรูพรุนมากขึ้นซึ่งทำให้เกิด stickiness และลดความหนาแน่นปรากฏนั่นเอง

จากผลการทดลองเบื้องต้นแสดงให้เห็นว่า ปริมาณมอลโทเดกทรีนซ์ 15% ของน้ำหนักรวมผสมทั้งหมดก่อนการทำแห้งแบบพ่นฝอย มีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ทดลองในขั้นตอนต่อไป เนื่องจากมีผลทำให้ได้ yield และ solid recovery ที่สูง ความชื้นและ a_w ต่ำ ความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ ABTS และสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดสูงสุด และขนาดอนุภาคประมาณ 50.53 นาโนเมตร ซึ่งมีผลดีต่อการเก็บรักษาและการขนส่ง

4.1.2 การศึกษาอุณหภูมิความร้อนขาเข้าของเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยต่อคุณภาพของมะตูมผงสำเร็จรูป

การศึกษาค่าผลของอุณหภูมิความร้อนขาเข้า (inlet temperature) ของเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยโดยใช้อุณหภูมิ 110°C 120 °C และ 130°C ต่อคุณภาพของมะตูมผงสำเร็จรูป โดยมีสัดส่วนของน้ำมะตูม น้ำตาลทราย มอลโทเดกทรินซ์ (หัวข้อ 4.1.1) และ FOS เท่ากับ 68% 15% 15% และ 2% ตามลำดับ โดยส่วนผสมมีค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (total soluble solid, TSS) อยู่ระหว่าง 33.75-34.00°Brix และค่าความเป็นกรดต่าง (pH) อยู่ระหว่าง 5.47-5.52 ดังแสดงผลในตารางที่ 4.3 โดยสภาวะในการทำแห้งแบบพ่นฝอยกำหนดให้อุณหภูมิความร้อนขาออกของเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยอยู่ที่ 70°C และอัตราการป้อนอยู่ช่วง 16-17 มิลลิเมตรต่อนาที หรือประมาณ 8-12 รอบต่อนาที ซึ่งอัตราการป้อนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิความร้อนขาเข้าของเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย

จากผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิความร้อนขาเข้าของเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยสูงขึ้นมีผลต่อการเพิ่มปริมาณ yield และ solid recovery อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ซึ่งในการทดลองมีค่าอยู่ระหว่าง 20.12-24.02% และ 59.63-77.20% ตามลำดับ ดังแสดงผลในตารางที่ 4.4 โดย Wong et al. (2017) และ Fang and Bhandari (2012) รายงานว่า solid recovery สูงกว่า 50% แสดงถึงการทำแห้งแบบพ่นฝอยที่มีประสิทธิภาพ ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Wong et al. (2017) ที่พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิความร้อนขาเข้าเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยจาก 140°C – 150°C ได้ solid recovery เพิ่มมากขึ้นจาก 44.30% เป็น 51.49% ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการถ่ายเทความร้อนและมวลที่ดีมากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิความร้อนขาเข้าเครื่องเป็น 160°C – 180°C พบว่า solid recovery ลดลง (48.73-48.99%) อาจเนื่องมาจากปัญหาจากความเหนียวของผลิตภัณฑ์ รวมทั้งอุณหภูมิที่สูงขึ้นเกินอุณหภูมิสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g) ของผลิตภัณฑ์ผง (Fazaeli et al., 2012)

ตารางที่ 4.3 ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดและค่าความเป็นกรดต่างของน้ำมะตูมก่อนการทำแห้งแบบพ่นฝอยโดยใช้อุณหภูมิลมร้อนขาเข้าของเครื่องต่างกัน

Treatment ¹	Total soluble solid (°Brix) ²	pH ²
1B	34.00±0.00	5.52±0.03
2B	34.00±0.00	5.47±0.42
3B	33.75±0.35	5.47±0.04

¹ 1B, 2B, and 3B, respectively, denote the inlet temperature of spray drying of 110, 120, and 130°C.

² The values are the mean of three replications ± standard deviation.

การเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนขาเข้าเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยจาก 110°C เป็น 130°C มีผลทำให้ความชื้นของมะตูมผงสำเร็จรูปลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ซึ่งมะตูมผงสำเร็จรูปมีค่าความชื้นอยู่ระหว่าง 1.65-2.09% อย่างไรก็ตามค่า a_w ของมะตูมผงสำเร็จรูปมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ที่ 0.26-0.32 (ตารางที่ 4.4) ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Wong et al. (2017) รายงานว่ากล้วยผงมีความชื้นและ a_w ลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนขาเข้า เนื่องมาจากอัตราการถ่ายเทความร้อนที่สูงช่วยทำให้ความชื้นระเหยออกไปได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Fazaeli et al. (2012) ในการทำแห้ง black mulberry juice ผง Mishra et al. (2014) ทำแห้ง alma juice ผง ซึ่งเมื่อเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนขาเข้าทำให้ a_w ลดลงเนื่องจากสามารถระเหยน้ำออกไปได้รวดเร็ว Quek et al. (2017) พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนขาเข้าทำให้การระเหยน้ำดีขึ้น ทำให้แดงโม่ผงมีความชื้นและ a_w ลดลง Goula and Adamopoulous (2005) ทำแห้งแบบพ่นฝอยมะเขือเทศ อย่างไรก็ตาม Chegini and Ghobadian (2005) พบว่าการทำแห้งแบบพ่นฝอยน้ำส้มผง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนขาเข้ามีผลทำให้ค่า hygroscopicity เพิ่มขึ้น ซึ่งอาจจะเป็นผลเสียต่อความคงตัวในการเก็บรักษาได้ โดย Mishra et al. (2014) และ Tonon et al. (2008) รายงานว่า การเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนขาเข้า ทำให้ลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ต่ำลง ซึ่งผลิตภัณฑ์ผงมีแนวโน้มเพิ่มการดูดความชื้นกลับได้ง่ายขึ้น เพราะความแตกต่างความชื้นระหว่างผลิตภัณฑ์และสิ่งแวดล้อมมีมาก

ตารางที่ 4.4 ผลของอุณหภูมิร้อนขาเข้าของเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยต่อคุณภาพของมะตูมผงสำเร็จรูป

Parameter	Treatment ¹		
	1B	2B	3B
Moisture content (%)	2.09±0.23 ^a	1.86±0.12 ^{ab}	1.65±0.29 ^b
a _w	0.32±0.01	0.30±0.03	0.26±0.04
Yield (%)	20.12±1.30 ^b	24.02±0.28 ^a	21.80±2.38 ^{ab}
Solid recovery (%)	59.63±4.61 ^b	77.20±5.13 ^a	64.57±6.39 ^{ab}
DPPH (μmol TEAC/g)	1.83±0.26	1.83±0.01	1.83±0.00
ABTS (μmol TEAC/g)	1.90±0.03	1.91±0.04	1.88±0.01
Total phenolics (mgGA/L)	214.80±14.5 ^a	215.30±18.5 ^a	173.36±6.43 ^b
Particle size (nm)	50.22±3.19	50.53±5.95	53.52±2.46

¹ 1B, 2B, and 3B, respectively, denote the inlet temperature of spray drying of 110, 120, and 130°C. Different letters in each row represent significant differences between treatments ($p < 0.05$). The values are the mean of three replications \pm standard deviation.

การเพิ่มอุณหภูมิร้อนขาเข้าเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ DPPH และ ABTS ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 1.83 $\mu\text{mol TEAC/g}$ และ 1.88-1.91 $\mu\text{mol TEAC/g}$ ตามลำดับ (ตารางที่ 4.4) อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิร้อนขาเข้ามีผลต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด พบว่า อุณหภูมิร้อนขาเข้าสูงสุดที่ 130°C (สูตร 3B) มีสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดต่ำที่สุดอยู่ที่ 173.36 mgGA/L ($p < 0.05$) ทั้งนี้การใช้อุณหภูมิต่ำในการทำแห้งที่สูงเกินไปอาจทำลายสารประกอบในผลิตภัณฑ์ได้ สอดคล้องการรายงานวิจัยของ Mishra et al. (2014) ที่พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิร้อนขาเข้าของเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยมีผลทำให้สารประกอบฟีนอลิกของน้ำมะขามป้อมผงลดลง ซึ่งส่งผลให้ความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระลดลงด้วย ทั้งนี้เนื่องมาจากสารเหล่านี้ถูกทำลายด้วยความร้อนที่สูง

อุณหภูมิร้อนขาเข้าเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดอนุภาคเฉลี่ยของมะตูมผงสำเร็จรูป ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 50.2-53.52 นาโนเมตร ($p > 0.05$) ดังแสดง

ในตารางที่ 4.4 อย่างไรก็ตาม Tontul and Topuz (2017) รายงานว่าการเพิ่มอุณหภูมิความร้อนขาเข้ามีผลทำให้ขนาดอนุภาคผงใหญ่ขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิสูงจะลดหรือป้องกันการหดตัวของอนุภาค Tonon et al. (2008) พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิทำให้พื้นผิวของอนุภาคผงเรียบมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ อุณหภูมิความร้อนขาเข้าสูงทำให้ขนาดอนุภาคเฉลี่ยเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ Wong et al. (2017) พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิความร้อนขาเข้าช่วยเพิ่มความสามารถในการละลาย (solubility) ของผลิตภัณฑ์ผง อาจเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงช่วยลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ผง ซึ่งไปเพิ่มขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผลิตภัณฑ์ผงได้ โดยขนาดอนุภาคผงที่ใหญ่ขึ้นทำให้ละลายได้ง่ายขึ้น แต่ผลนี้ตรงกันข้ามกับงานวิจัย Mishra et al. (2014) และ Cai and Corke (2000) พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิความร้อนขาเข้าของเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยมีผลทำให้ขนาดอนุภาคเฉลี่ยลดลง และ Mishra et al. (2014) พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิความร้อนขาเข้าไม่ส่งผลต่อความเร็วของผิวอนุภาคผง นอกจากนี้อุณหภูมิความร้อนขาเข้ามีผลต่อความหนาแน่นปรากฏ (bulk density) โดยหากใช้อุณหภูมิที่สูง มีผลทำให้ความหนาแน่นปรากฏมีค่าลดลง เนื่องมาจากการใช้ความร้อนที่สูงในการทำแห้งมีผลทำให้อัตราการระเหยของน้ำเร็วมากขึ้นซึ่งส่งผลให้อนุภาคผงเกิดการหดตัวน้อยลง ผลิตภัณฑ์ผงมีความชื้นลดลง ซึ่งทำให้ค่าความหนาแน่นปรากฏลดลง (Mishra et al., 2014; Wong et al., 2017) ความหนาแน่นปรากฏต่ำอาจส่งผลต่อการบรรจุและการขนส่งได้ (Tontul & Topuz, 2017)

จากผลการทดลองเบื้องต้นแสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิความร้อนขาเข้าเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยที่ 120°C มีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ทดลองในขั้นต่อไป เนื่องจากมีผลทำให้ได้ yield และ solid recovery ที่สูง ความชื้นและ a_w ต่ำ สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดสูง และขนาดอนุภาคประมาณ 50.53 นาโนเมตร ซึ่งมีผลดีต่อการเก็บรักษาและการขนส่ง

4.2 การศึกษานิตสารให้ความหวานต่อคุณภาพของมะตูมผงสำเร็จรูป

4.2.1 ผลของชนิดสารให้ความหวานต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของมะตูมผงสำเร็จรูป

ในการศึกษานี้ได้เปรียบเทียบผลของชนิดสารให้ความหวานซึ่งได้แก่ น้ำตาลทรายและมอลทิทอลต่อคุณภาพของมะตูมผงสำเร็จรูปและการยอมรับของผู้บริโภค ทั้งนี้มอลทิทอลเป็นสารให้ความหวานที่ใกล้เคียงกับน้ำตาลทราย หรือประมาณ 0.9 เท่าของน้ำตาลทราย มอลทิทอลจัดเป็นน้ำตาล disaccharide นิยมใช้น้ำตาลทรายในผลิตภัณฑ์ขนมหวาน เนื่องจากให้พลังงานต่ำ (2.1 kcal/g) และยังช่วยปรับปรุงลักษณะเนื้อสัมผัสและกลิ่นรสของผลิตภัณฑ์ได้ดี ไม่ทำให้ฟันผุ นอกจากนี้มอลทิทอลมีจุดหลอมละลาย (melting point) และความสามารถในการละลาย (solubility) ใกล้เคียงกับน้ำตาลทราย (Zumbe et al., 2001; Dobrev et al., 2013; Kearsley & Boghani, 2016; BeMiller, 2019) ในการทดลองนี้มีสัดส่วนของน้ำมะตูม สารให้ความหวาน (น้ำตาลทรายและหรือมอลทิทอล) มอลโทเดทรินซ์ที่เหมาะสม (หัวข้อ 4.1.1) และ FOS เท่ากับ 68% 15%

15% และ 2% ตามลำดับ ทั้งนี้ สูตร 1C มีปริมาณน้ำตาลทราย 15% ของน้ำหนักส่วนผสมทั้งหมด หรือน้ำตาลทราย 100% ของสารให้ความหวานทั้งหมด เปรียบเทียบกับ สูตร 2C มีปริมาณน้ำตาลทรายและมอลทิทอลอย่างละ 7.5% ของน้ำหนักส่วนผสมทั้งหมด หรือน้ำตาลทรายและมอลทิทอลอย่างละ 50% ของสารให้ความหวานทั้งหมด และสูตร 3C มีปริมาณมอลทิทอล 15% ของน้ำหนักส่วนผสมทั้งหมด หรือน้ำตาลทราย 100% ของสารให้ความหวานทั้งหมด จากการเตรียมส่วนผสมพบว่า ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดและค่าความเป็นกรดต่างของส่วนผสมก่อนการทำแห้งแบบพ่นฝอยของทั้ง 3 สูตร ไม่มีความแตกต่างกัน ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 35-36°Brix และ 5.15-5.24 ตามลำดับ (ตารางที่ 4.5) จากนั้นนำส่วนผสมไปทำแห้งแบบพ่นฝอยโดยกำหนดสภาวะในการทำแห้งดังนี้คือ อุณหภูมิลมร้อนขาเข้าที่เหมาะสม (จากหัวข้อ 4.1.2) และลมร้อนขาออกของเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยอยู่ที่ 120°C และ 70°C ตามลำดับ และอัตราการป้อนอยู่ช่วง 17-18 มิลลิลิตรต่อนาที หรือประมาณ 10 รอบต่อนาที จากผลการทดลองพบว่า มะตูมผงสำเร็จรูปสูตร 2C มีปริมาณ yield และ solid recovery เท่ากับ 27.34% และ 79.26% ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าสูตร 1C และ 3C อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยสูตร 1C และ 3C มีปริมาณผลผลิต 24.02% และ 20.21% และ solid recovery 77.20% และ 66.32% ตามลำดับ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ชนิดของสารให้ความหวานและสัดส่วนในการเตรียมมีผลทำให้ปริมาณผลผลิตและ solid recovery อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ดังแสดงผลในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.5 ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดและค่าความเป็นกรดต่างของน้ำมะตูมก่อนการทำแห้งแบบพ่นฝอย

Treatment ¹	Total soluble solid (°Brix)	pH
1C	36.00±0.00	5.21±0.04
2C	35.00±0.00	5.24±0.03
3C	35.60±0.57	5.15±0.01

¹1C, 2C, and 3C, respectively, denote 15% sucrose and 0% maltitol, 7.5% sucrose and 7.5% maltitol, and 0% sucrose and 15% maltitol in the mixtures. The values are the mean of three replications ± standard deviation.

ชนิดและสัดส่วนของสารให้ความหวานมีผลต่อความชื้นของมะตูมผงสำเร็จรูป โดยมีค่าความชื้นอยู่ระหว่าง 1.75-2.63% อย่างไรก็ตามค่า a_w ของมะตูมผงสำเร็จรูปมีค่าใกล้เคียงกัน

อยู่ที่ 0.28-0.32 (ตารางที่ 4.6) สูตร 2C มีความชื้นสูงที่สุด และสูตร 3C มีค่า a_w สูงสุด อาจเนื่องมาจากสูตรนี้มีมอลทิทอลที่ใช้ทดแทนน้ำตาลทราย ซึ่งมอลทิทอลเป็นน้ำตาลแอลกอฮอล์ที่สามารถดูดความชื้นกลับ (hygroscopicity) ได้เล็กน้อย (Kearsley & Boghani, 2016; Dobreva et al., 2013; Manley, 2011) ซึ่งอาจส่งผลต่อปริมาณความชื้นและ a_w ของผลิตภัณฑ์ได้ อย่างไรก็ตาม ความชื้นและ a_w ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำแห้งแบบพ่นฝอยจากทั้ง 3 สูตรนี้ มีค่าต่ำกว่า 5% และ 0.6 ตามลำดับ ซึ่งแสดงว่าผลิตภัณฑ์มะตูมผงสำเร็จรูปที่ผลิตได้นี้สามารถเก็บรักษาได้นาน มีความปลอดภัยทางด้านจุลินทรีย์ และมีความเสถียรของผลิตภัณฑ์ระหว่างการเก็บรักษา (Wong et al., 2017; Tontul & Topuz, 2017)

ตารางที่ 4.6 ผลของชนิดสารให้ความหวานต่อคุณภาพของมะตูมผงสำเร็จรูป

Parameter	Treatment ¹		
	1C	2C	3C
Moisture content (%)	1.86±0.12 ^b	2.63±0.19 ^a	1.75±0.68 ^{ab}
a_w	0.30±0.03	0.28±0.00	0.32±0.02
Yield (%)	24.02±0.28 ^b	27.34±0.48 ^a	20.21±2.30 ^b
Solid recovery (%)	77.20±5.13 ^{ab}	79.26±3.01 ^a	66.32±2.95 ^b
DPPH (μmol TEAC/g)	1.83±0.01	1.84±0.02	1.84±0.02
ABTS (μmol TEAC/g)	1.91±0.04 ^{ab}	1.96±0.03 ^a	1.84±0.03 ^b
Total phenolics (mgGA/L)	215.30±18.50	234.90±39.40	214.77±16.90
Vitamin C (mg/100g)	82.35±0.00 ^b	97.70±8.13 ^a	88.24±8.32 ^{ab}
Particle size (nm)	50.53±5.95	43.90±7.13	46.21±5.87
Glass transition temperature (°C)	44.36±0.79 ^b	49.59±0.13 ^a	41.95±1.58 ^b

¹1C, 2C, and 3C, respectively, denote 15% sucrose and 0% maltitol, 7.5% sucrose and 7.5% maltitol, and 0% sucrose and 15% maltitol in the mixtures. Different letters in each row represent significant differences between treatments ($p<0.05$). The values are the mean of three replications ± standard deviation.

ชนิดและสัดส่วนของสารให้ความหวานไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ DPPH และปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 1.83-1.84 μmol TEAC/g และ 214.77-234.90 mgGA/L (ตารางที่ 4.6) อย่างไรก็ตามชนิดของสาร

ให้ความหวานมีผลต่อความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ABTS พบว่าสูตร 3C มีค่าต่ำที่สุดอยู่ที่ 1.84 $\mu\text{mol TEAC/g}$ ($p < 0.05$) สูตร 1C และ 2C มีค่าอยู่ระหว่าง 1.91-1.96 $\mu\text{mol TEAC/g}$ Saikia et al. (2015) และ Fang and Bhandari (2011) รายงานว่า ความไวต่อการถูกทำลายด้วยความร้อนของสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและสารต้านอนุมูลอิสระขึ้นกับลักษณะโครงสร้างของสารนั้น ๆ จากการทดลองนี้ชนิดและสัดส่วนของสารให้ความหวานยังมีผลต่อปริมาณวิตามินซี โดยสูตร 2C มีค่าสูงสุดอยู่ที่ 97.70 mg/100 g รองลงมาคือ สูตร 3C มีค่า 88.24 mg/100 g และ สูตร 1C มีค่า 82.35 mg/100 g ตามลำดับ

ชนิดและสัดส่วนของสารให้ความหวานไม่มีผลต่อขนาดของอนุภาคของมะตูมผงสำเร็จรูปทั้ง 3 สูตรมีค่าอยู่ระหว่าง 43.90-50.53 นาโนเมตร (ตารางที่ 4.6) ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสมบัติทางกายภาพของน้ำตาลทรายและมอลทิทอลใกล้เคียงกัน เช่น น้ำหนักโมเลกุล จุดหลอมละลาย เป็นต้น จึงทำให้ส่วนผสมก่อนการทำแห้งมีความหนืดใกล้เคียงซึ่งผงที่ได้จึงมีขนาดของอนุภาคใกล้เคียงกัน (Kearsley & Boghani, 2016; Dobrova et al., 2013; Manley, 2011) ทั้งนี้ขนาดของอนุภาคมีผลต่อการจัดการทางด้านบรรจุและการขนส่ง รวมทั้งยังมีผลต่อการเสื่อมคุณภาพของผงที่ได้จากการทำแห้งแบบพ่นฝอย กล่าวคือ อนุภาคผงมีขนาดเล็กมาก พื้นที่ผิวสูงขึ้นส่งผลให้เกิดการเสื่อมสลายของสารบางอย่างได้ง่าย (Tontul & Topuz, 2017)

อุณหภูมิสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g) เป็นสมบัติหนึ่งที่ใช้บ่งบอกถึงความคงตัวระหว่างการเก็บรักษา (Ferrari et al., 2013; Fang & Bhandari, 2011) โดยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลักของวัตถุดิบ เช่น น้ำตาลและกรดมี T_g ต่ำ และขึ้นอยู่กับความชื้นของผลิตภัณฑ์ผง โดยความชื้นต่ำมีผลทำให้ T_g สูงขึ้น นอกจากนี้คาร์โบไฮเดรตเป็นสารตัวพาที่ช่วยเพิ่ม T_g ให้สูงขึ้น ((Eroglu et al., 2018); Fang & Bhandari, 2012) โดยทั่วไปคาร์โบไฮเดรตที่มีขนาดของโมเลกุลใหญ่ช่วยเพิ่ม T_g ให้สูงขึ้น น้ำตาลทรายซึ่งเป็น disaccharide มีค่า T_g ประมาณ 65-70°C หรือประมาณ 61.93°C ส่วนน้ำตาลกลูโคสและน้ำตาลฟรุกโทสซึ่งเป็น monosaccharide มีค่า T_g ประมาณ 31°C และ 5-10°C ตามลำดับ อย่างไรก็ตามมอลทิทอลซึ่งเป็นน้ำตาลแอลกอฮอล์มีค่า T_g สูงกว่าอุณหภูมิห้อง (43.10°C) มีความเหมาะสมในการใช้ทำลูกอมได้ (Hartel et al., 2011; Hadjikinova & Marudova, 2016) T_g ของสารให้ความหวานที่ผสมกันหลายชนิด เช่น ในผลิตภัณฑ์ลูกอม มีความยากในการประมาณหรือทำนายค่า T_g (Hartel et al., 2011) จากผลการทดลองพบว่าชนิดและสัดส่วนของสารให้ความหวานมีผลต่อค่า T_g โดยสูตร 2C มีค่าสูงสุดอยู่ที่ 49°C รองลงมาคือ สูตร 1C มีค่า 44.36°C และ สูตร 3C มีค่า 41.95°C ตามลำดับ อย่างไรก็ตามจากรายงานวิจัยของ Hadjikinova and Marudova, 2016 พบว่า น้ำตาลทรายมีค่า T_g สูงกว่าน้ำตาลแอลกอฮอล์ซึ่งรวมทั้ง

มอลทิทอลด้วย จากผลการศึกษาคั้งนี้อาจเป็นเพราะองค์ประกอบที่อยู่ในผลิตภัณฑ์มะตูมผงสำเร็จรูปรวมทั้งความชื้นที่ส่งผลต่อค่า T_g (Hartel et al., 2011; Hadjikinova & Marudova, 2016)

ตารางที่ 4.7 องค์ประกอบทางเคมีของมะตูมผงสำเร็จรูป

Chemical composition	Treatment ¹		
	1C	2C	3C
Protein (%)	0.62±0.01	0.63±0.05	0.60±0.06
Lipid (%)	0.24±0.05	0.24±0.03	0.27±0.07
Carbohydrate (%)	97.80±0.20	97.90±0.20	97.06±0.90
Ash (%)	0.45±0.17	0.52±0.21	0.60±0.15
Total sugar content (%)	78.24±2.25 ^a	74.31±4.27 ^{ab}	67.65±1.04 ^b
Energy value (kcal/g)	3.95±0.06 ^a	3.81±0.02 ^b	3.51±0.12 ^c

¹1C, 2C, and 3C, respectively, denote 15% sucrose and 0% maltitol, 7.5% sucrose and 7.5% maltitol, and 0% sucrose and 15% maltitol in the mixtures. Different letters in each row represent significant differences between treatments ($p < 0.05$). The values are the mean of three replications \pm standard deviation.

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของมะตูมผงสำเร็จรูปแสดงในตารางที่ 4.7 พบว่าปริมาณโปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต และเถ้าของมะตูมผงสำเร็จรูปไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) อย่างไรก็ตาม ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (total sugar) และค่าพลังงาน (energy value) ที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เมื่อใช้มอลทิทอลแทนน้ำตาลทรายทั้งหมด โดยปริมาณน้ำตาลทั้งหมดและค่าพลังงานของมะตูมผงสำเร็จรูปทั้ง 3 สูตร มีค่าอยู่ระหว่าง 67.65-78.24% และ 3.51-3.95 kcal/g ตามลำดับ (ตารางที่ 4.7) มอลทิทอลเป็นสารให้ความหวานประมาณ 0.9 เท่าของน้ำตาลทราย และให้พลังงานเท่ากับ 2.1 kcal/g ซึ่งมอลทิทอลจะถูกดูดซึมช้าและไม่สมบูรณ์ มีผลทำให้ร่างกายหลังอินซูลินได้ช้าเมื่อเปรียบเทียบกับการบริโภคน้ำตาลทราย ดังนั้นจึงใช้เป็นสารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลทรายสำหรับผู้ป่วยเบาหวานได้ ((Zumbe, Lee, & Storey, 2001; Dobрева et al., 2013; Kearsley & Boghani, 2016; Manley, 2011) แต่อย่างไรก็ตามไม่ควรบริโภคเกินวันละ 20-40 กรัม (พิชญานินและปุ่นทรการ, 2557) แต่จากรายงานวิจัยของ Kearsley and Boghani (2016) และ Dobрева et al., 2013 กล่าวว่า มอลทิทอลเป็นวัตถุปรุงแต่งอาหาร

(food additive) มี E number คือ E965 สามารถรับประทานได้อย่างปลอดภัย (Generally Regarded As Safe, GRAS) โดยไม่ได้กำหนดปริมาณการบริโภคต่อวัน นอกจากนี้ ตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 182) พ.ศ.2541 เรื่องหลักเกณฑ์ในการกล่าวอ้างทางโภชนาการบนฉลากอาหารนั้น จากผลการศึกษานี้พบว่า อาจกล่าวอ้างทางโภชนาการบนฉลากมะตูมผงสำเร็จรูปสูตร 2C และ 3C ว่าเป็นมะตูมผงสำเร็จรูปน้ำตาลน้อย เนื่องจากทั้ง 2 สูตร ได้ลดปริมาณน้ำตาลทรายลงมากกว่า 25% เมื่อเทียบกับมะตูมผงสำเร็จรูปสูตร 1C โดยมะตูมผงสำเร็จรูปสูตร 2C และ 3C ได้ลดปริมาณน้ำตาลทรายลง 50% และ 100% ของปริมาณน้ำตาลทรายสูตร 1C ตามลำดับ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การเติมสารให้ความหวานมอลทิทอลเพื่อทดแทนน้ำตาลทรายในผลิตภัณฑ์มะตูมผงสำเร็จรูปไม่เปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมี แต่ลดปริมาณน้ำตาลทั้งหมดและค่าพลังงานลง

สีเป็นสมบัติหรือคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่สำคัญเนื่องจากเป็นสิ่งแรกที่ผู้บริโภคสามารถสังเกตเห็นได้ (Wong & Lim, 2016; Wong et al., 2016) ตารางที่ 4.8 แสดงค่าสีของมะตูมผงสำเร็จรูปทั้ง 3 สูตร พบว่าค่าความสว่าง (L^*) และความเป็นสีเหลือง (b^*) ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) ซึ่งค่าความสว่างและความเป็นสีเหลืองอยู่ระหว่าง 81.42-82.87 และ 20.37-22.47 ตามลำดับ แต่ค่าความเป็นสีแดง (a^*) ของมะตูมผงสำเร็จรูปสูตร 3C มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับมะตูมผงสำเร็จรูปสูตร 1C และ 2C จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า การเติมมอลทิทอลเป็นสารให้ความหวานแทนน้ำตาลทรายมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นสีแดงของมะตูมผงสำเร็จรูป โดย 2C มีค่าความเป็นสีแดงต่ำสุด และ 3C ความเป็นสีแดงสูงสุด อย่างไรก็ตามมอลทิทอลเป็นน้ำตาลแอลกอฮอล์ซึ่งไม่ทำให้เกิด Maillard reaction หรือการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลโดยไม่ใช้เอนไซม์ เนื่องจากเป็นน้ำตาล non-reducing (Manley, 2011; Dobreva et al., 2013) และจากรายงานวิจัยของ Kearsley and Boghani (2016) และ Dobreva et al., 2013 กล่าวว่า มอลทิทอลไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะสีของผลิตภัณฑ์เมื่อผ่านความร้อนเหมาะกับการใช้ในผลิตภัณฑ์ขนมอบ (bakery goods) ช็อกโกแลต (chocolate) และลูกกวาด (candy production) เป็นต้น

ความหนาแน่นปรากฏ (bulk density) ขึ้นอยู่กับขนาด รูปร่าง และพื้นผิวของอนุภาคผง โดยอนุภาคผงที่เรียบและรูปร่างคล้ายกันมีผลทำให้ความหนาแน่นปรากฏมากขึ้น นอกจากนี้หากขนาดอนุภาคผงเล็กทำให้ความหนาแน่นปรากฏเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากมีพื้นที่ว่างระหว่างอนุภาคน้อยลงความหนาแน่นปรากฏที่เพิ่มขึ้นมีผลดีต่อการบรรจุและการขนส่ง (Tontul & Topuz, 2017) ความหนาแน่นปรากฏ (bulk density) และ tapped density ผลิตภัณฑ์มะตูมผงสำเร็จรูปมีค่าอยู่ระหว่าง 0.49-0.56 g/ml และ 0.65-0.69 g/ml ตามลำดับ (ตารางที่ 4.9) ผลของ tapped density เป็นในทางเดียวกับความหนาแน่นปรากฏ จากผลการทดลองพบว่า การเติมสารให้

ความหวานมอลทิทอลเพื่อทดแทนน้ำตาลทรายในผลิตภัณฑ์มะตูมผงสำเร็จรูปมีผลทำให้ความหนาแน่นปรากฏเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ทั้งนี้ผลความหนาแน่นปรากฏและ tapped density สอดคล้องกับขนาดอนุภาคเฉลี่ย (ตารางที่ 4.6)

ตารางที่ 4.8 สีของมะตูมผงสำเร็จรูป

Treatment ¹	Color value ²		
	L*	a*	b*
1C	81.83±0.32	4.15±0.04 ^b	21.55±0.03
2C	82.87±1.40	3.80±0.34 ^b	20.37±1.33
3C	81.42±0.42	4.44±0.10 ^a	22.47±0.21

¹1C, 2C, and 3C, respectively, denote 15% sucrose and 0% maltitol, 7.5% sucrose and 7.5% maltitol, and 0% sucrose and 15% maltitol in the mixtures.

²Different letters in each column represent significant differences between treatments ($p < 0.05$). The values are the mean of three replications \pm standard deviation.

อย่างไรก็ตามค่าความสามารถในการละลาย (solubility) ของมะตูมผงสำเร็จรูปที่เติมมอลทิทอลแทนน้ำตาลทราย 100% (3C) เท่ากับ 97.45% ซึ่งมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับสูตร 1C (98.86%) และ 2C (99.88%) อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) สอดคล้องกับรายงานวิจัยของ Manley, 2011; Dobrev et al., 2013 พบว่า มอลทิทอลมีค่า solubility น้อยกว่าน้ำตาลทรายเล็กน้อย ซึ่งมอลทิทอลมีค่า solubility อยู่ที่ 65% ในขณะที่น้ำตาลทรายมีค่า solubility 67% ที่อุณหภูมิ 25°C อย่างไรก็ตามผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Mishra et al. (2015) ที่พบว่า ความสามารถในการละลายของมะนาวผงอยู่ในช่วง 94.34-98.08% ซึ่งความสามารถในการละลายที่ค่อนข้างสูงนี้ช่วยทำให้ผลิตภัณฑ์ละลายได้ง่ายขึ้น แต่ในงานวิจัยของ Abadio et al. (2004) พบว่าความสามารถในการละลายของสับปะรดผงมีค่า 81.56% ทั้งนี้ผลิตภัณฑ์ผงควรจะเปียกและละลายได้เร็วโดยไม่มีการเกิดการจับตัวเป็นก้อน (Wong & Lim, 2016) Wong et al. (2017) รายงานว่า ความสามารถในการละลายเป็นสมบัติที่บ่งบอกถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ผงได้ นอกจากนี้ Wong et al. (2017) รายงานว่าการเพิ่มปริมาณมอลโทเดทรินซ์ช่วยเพิ่มความสามารถในการละลาย (solubility) อาจเนื่องมาจากมอลโทเดทรินซ์ละลายน้ำได้ดี

ตารางที่ 4.9 ความหนาแน่นปรากฏ (bulk density) (tapped density) ความสามารถในการละลาย (solubility) การกระจาย (dispersibility) และความสามารถในการดูดความชื้นกลับ (hygroscopicity) ของมะตูมผงสำเร็จรูป

Treatment ¹	Parameter ²				
	Bulk density (g/ml)	Tapped density (g/ml)	Solubility (%)	Dispersibility (OD _{520nm})	Hygroscopicity (%)
1C	0.49±0.01 ^c	0.66±0.03 ^{ab}	98.86±0.58 ^a	0.026±0.01 ^b	21.99±0.23 ^b
2C	0.56±0.02 ^a	0.69±0.05 ^a	99.88±0.06 ^a	0.029±0.00 ^a	26.41±0.03 ^a
3C	0.54±0.00 ^b	0.65±0.05 ^b	97.45±0.27 ^b	0.029±0.00 ^a	26.13±0.48 ^a

¹1C, 2C, and 3C, respectively, denote 15% sucrose and 0% maltitol, 7.5% sucrose and 7.5% maltitol, and 0% sucrose and 15% maltitol in the mixtures.

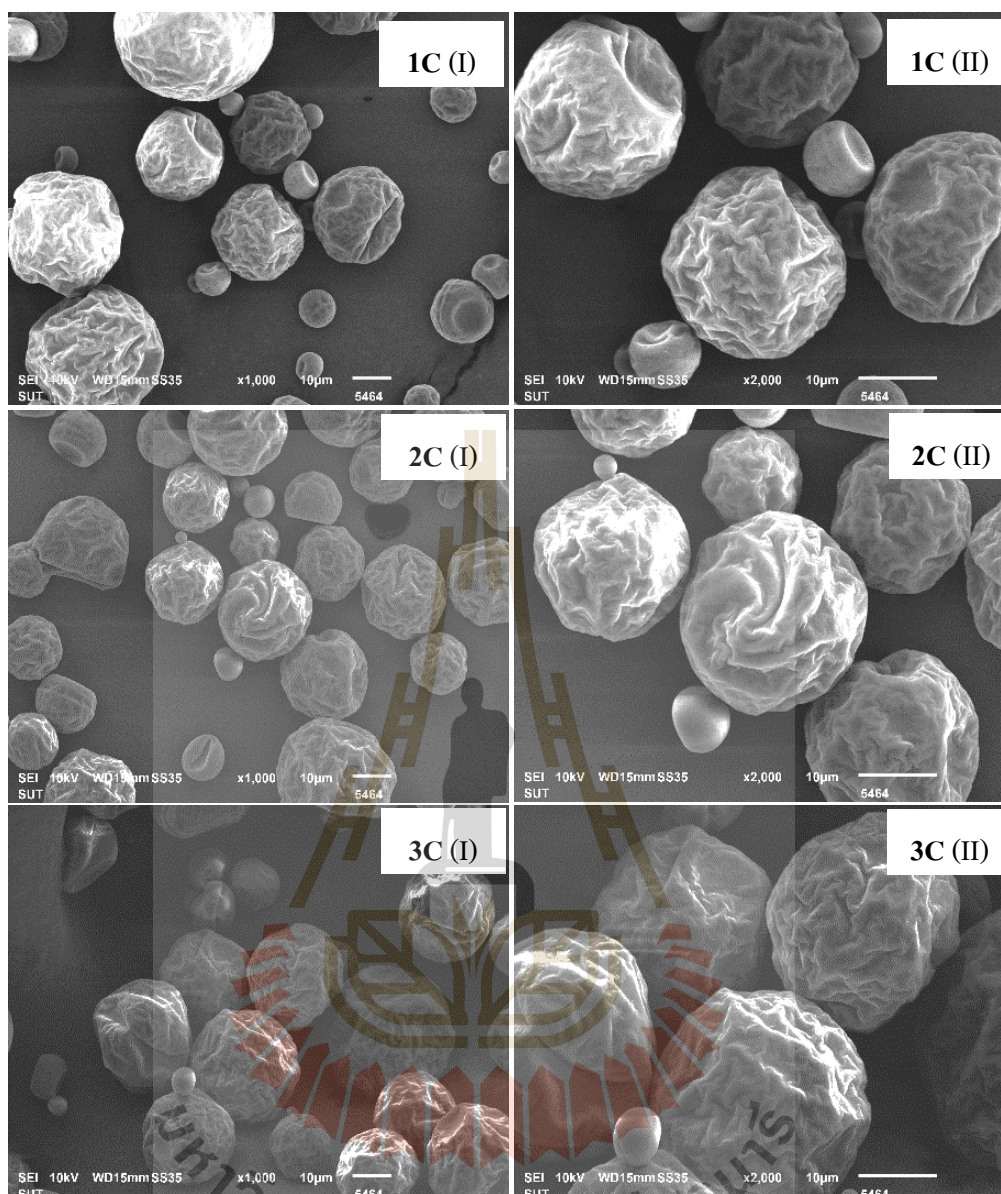
²Different letters in each column represent significant differences between treatments ($p < 0.05$). The values are the mean of three replications \pm standard deviation.

สำหรับค่าการกระจาย (dispersibility) และความสามารถในการดูดซับความชื้นกลับ (hygroscopicity) ของผลิตภัณฑ์มะตูมผงสำเร็จรูป มีค่าอยู่ระหว่าง 0.026-0.029 และ 21.99-26.41% ตามลำดับ ซึ่งพบว่า ผลิตภัณฑ์มะตูมผงสำเร็จรูปสูตร 2C และ 3C มีค่าการกระจายและความสามารถในการดูดซับความชื้นกลับสูงกว่าของสูตร 1C อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ทั้งนี้ความสามารถในการดูดซับความชื้นกลับหมายถึงความสามารถของอนุภาคผงที่สามารถดูดความชื้นรอบ ๆ (สิ่งแวดล้อม) และเป็นสาเหตุให้เกิดความเหนียวและทำให้อนุภาคผงจับตัวกัน ซึ่งหากค่าความสามารถในการดูดซับความชื้นกลับสูงบ่งบอกว่าผงสามารถดูดความชื้นได้ง่ายและทำให้ผงจับตัวเป็นก้อนได้ง่ายขึ้น (Wong & Lim, 2016; Tonon et al., 2008; Wong et al., 2017) แต่อย่างไรก็ตาม Dobрева et al., 2013; Kearsley and Boghani (2016) รายงานว่า มอลทิทอลมีความสามารถในการดูดซับความชื้นกลับต่ำกว่าน้ำตาลทราย จากผลการทดลองนี้ความสามารถในการดูดซับความชื้นกลับของมะตูมผงสำเร็จรูปมีความใกล้เคียงกับรายงานของ Wong and Lim (2016) ซึ่งพบว่า มะละกอผงมีค่าความสามารถในการดูดซับความชื้นกลับระหว่าง 24.57-32.98% Wong et al. (2017) พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนขาเข้าของเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยมีผลทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับความชื้นกลับของกล้วยผงสูงมากขึ้น โดยอยู่ระหว่าง 13.01-16.40%

เนื่องมาจากเมื่อใช้อุณหภูมิมีร่อนขาเข้าเครื่องสูงทำให้อัตราการระเหยน้ำสูง อนุภาคผงมีความชื้นต่ำ ซึ่งความชื้นต่ำนี้ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างความชื้นรอบ ๆ อนุภาคผงมาก ส่งผลให้อนุภาคผงดูดความชื้นกลับได้ง่ายมากขึ้น ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Wong et al. (2015) ทำแห้งขนุนและตับปะรดผง

จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า การเติมสารให้ความหวานมอลทิทอลเพื่อทดแทนน้ำตาลทรายในผลิตภัณฑ์มะตูมผงสำเร็จรูป 50% (2C) และ 100% (3C) มีผลทำให้ความหนาแน่นปรากฏเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลดีต่อการบรรจุและการขนส่ง นอกจากนี้การเติมสารให้ความหวานมอลทิทอล 50% (2C) ทำให้ค่าความสามารถในการละลายสูง แต่อย่างไรก็ตามมอลทิทอลมีผลทำให้การดูดความชื้นกลับเพิ่มมากขึ้นซึ่งอาจจะทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ลดลงระหว่างการเก็บรักษาได้ ทั้งนี้การเติมสารบางอย่างเพื่อช่วยลดการดูดความชื้นกลับ เช่น ผงเซลลูโลส ซึ่งเป็นสารที่ป้องกันการจับตัวเป็นก้อน (anticaking agent) จึงควรศึกษาในงานวิจัยถัดไป





รูปที่ 4.1 SEM images of 1C, 2C, and 3C, respectively, denote 15% sucrose and 0% maltitol, 7.5% sucrose and 7.5% maltitol, and 0% sucrose and 15% maltitol in the mixtures with magnifications of (I) 1,000x and (II) 2,000x.

จาก รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของเม็ดอนุภาคมะตูมผงสำเร็จรูป พบว่า ลักษณะพื้นผิวของอนุภาคผงมีความขรุขระคล้ายกันทั้ง 3 สูตร อย่างไรก็ตามขนาดของอนุภาคผงในสูตร 2C (I) มีแนวโน้มเล็กกว่าสูตร 1C และ 3C ซึ่งสอดคล้องกับค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคผงดังที่แสดงในตารางที่ 4.6 จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การเติมสารให้ความหวานมอลทิทอลเพื่อทดแทนน้ำตาลทรายในผลิตภัณฑ์มะตูมผงสำเร็จรูปไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลง

ลักษณะพื้นผิวของอนุภาคผง อย่างไรก็ตามเมื่ออนุภาคที่มีพื้นผิวความขรุขระมากอาจส่งผลต่อการเสื่อมสลายของสารประกอบบางชนิดได้ง่ายขึ้น เช่น สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ (bioactive compounds) ได้แก่ สารต้านอนุมูลอิสระ สารประกอบฟีนอลิก และวิตามินซี เป็นต้น

4.2.2 การวิเคราะห์ทางด้านจุลินทรีย์ของมะตูมผงสำเร็จรูป

การวิเคราะห์คุณภาพทางด้านจุลินทรีย์ของมะตูมผงสำเร็จรูปทั้ง 3 สูตร พบว่า มีจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด ยีสต์และรา น้อยกว่า 10 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม (CFU/g) ดังแสดงในตารางที่ 4.10 ซึ่งจากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่ามะตูมผงสำเร็จรูปทั้ง 3 สูตรมีคุณลักษณะด้านจุลินทรีย์อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนมะตูมผงสำเร็จรูป (มพช. 169/2556) โดยมะตูมผงสำเร็จรูปจะต้องมีจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดไม่เกิน 1×10^4 CFU/g ส่วนยีสต์และราต้องไม่เกิน 100 CFU/g (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2556)

ตารางที่ 4.10 คุณลักษณะทางด้านจุลินทรีย์ของมะตูมผงสำเร็จรูป

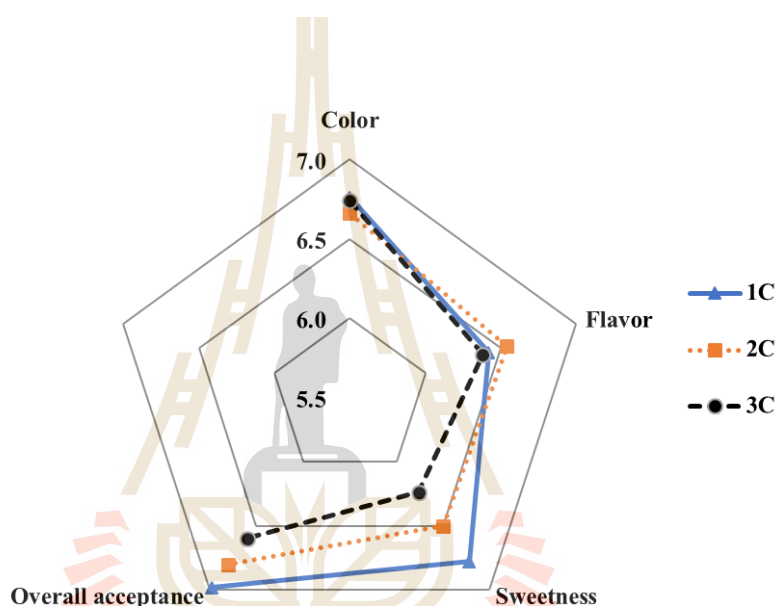
Treatment ¹	Total microorganism (CFU/g)	Yeast and mold (CFU/g)
1C	Less than 10	Less than 10
2C	Less than 10	Less than 10
3C	Less than 10	Less than 10

¹1C, 2C, and 3C, respectively, denote 15% sucrose and 0% maltitol, 7.5% sucrose and 7.5% maltitol, and 0% sucrose and 15% maltitol in the mixtures.

4.2.3 การทดสอบทางประสาทสัมผัสของมะตูมผงสำเร็จรูป

จากการประเมินคุณลักษณะด้านประสาทสัมผัสของมะตูมผงสำเร็จรูปโดยใช้วิธีการทดสอบแบบ 9-point hedonic scale ที่มีระดับคะแนนตั้งแต่ 1-9 โดย 1 หมายถึง ไม่ชอบมากที่สุด และ 9 หมายถึง ชอบมากที่สุด ในด้านลักษณะสี กลิ่นรส ความหวาน และความชอบโดยรวม (ตัวอย่างแบบสอบถามอยู่ในภาคผนวก ก) จากผู้ทดสอบทั่วไปจำนวน 50 คน พบว่า ผู้ทดสอบมีแนวโน้มความชอบด้านความหวาน และความชอบโดยรวมของมะตูมผงสำเร็จรูปสูตร 1C มากที่สุด และสูตร 3C ต่ำที่สุด โดยคะแนนอยู่ระหว่างชอบเล็กน้อยถึงชอบปานกลาง (6.0-7.0 คะแนน) ความชอบทางด้านสีและกลิ่นรสของมะตูมผงสำเร็จรูปทั้ง 3 สูตรมีคะแนนใกล้เคียงกันมากอยู่ระหว่างชอบเล็กน้อยถึงชอบปานกลาง (6.4-6.8 คะแนน) ดังแสดงผลใน รูปที่ 4

จากผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสแสดงให้เห็นว่ามะตูมผงสำเร็จรูปสูตร 2C ซึ่งเติมมอลทิทอล เพื่อทดแทนน้ำตาลทราย 50% ของสารให้ความหวานทั้งหมด เป็นสูตรที่ได้รับการยอมรับจากผู้ ทดสอบมากกว่ามะตูมผงสำเร็จรูปสูตร 3C นอกจากนี้มะตูมผงสำเร็จรูปสูตร 2C มีปริมาณผลผลิต solid recovery ความสามารถในการยับยั้งอนุมูลอิสระ ABTS และอนุมูลอิสระคล้ายแก้ว สูงกว่า มะตูมผงสำเร็จรูปสูตร 3C นอกจากนี้มะตูมผงสำเร็จรูปสูตร 2C มีปริมาณผลผลิต วิตามินซี และ อนุมูลอิสระคล้ายแก้ว สูงกว่ามะตูมผงสำเร็จรูปสูตร 1C ดังนั้นมะตูมผงสำเร็จรูปสูตร 2C จึงเป็น สูตรที่มีคุณภาพมากที่สุดและเหมาะกับการนำไปศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพระหว่างการเก็บ รักษาต่อไป



รูปที่ 4.2 Sensory evaluation of 1C, 2C, and 3C, respectively, denote 15% sucrose and 0% maltitol, 7.5% sucrose and 7.5% maltitol, and 0% sucrose and 15% maltitol

4.3 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของมะตูมผงสำเร็จรูประหว่างการเก็บรักษา

มะตูมผงสำเร็จรูปสูตร 2C ซึ่งมีปริมาณสารให้ความหวานชนิดน้ำตาลทรายและมอลทิทอลอย่างละ 7.5 % ของน้ำหนักส่วนผสมทั้งหมด ถูกบรรจุในถุงอลูมิเนียมฟอยล์ (aluminum laminated polyethylene) ปริมาณ 10 g และปิดผนึก ทั้งนี้จากงานวิจัยของ Muzaffar and Kumar (2016); Kumar and Mishra (2004); Wong and Lim (2016) พบว่าถุงชนิด aluminum laminated polyethylene ช่วยกันหรือลดการดูดความชื้นของผลิตภัณฑ์ผงได้ดีกว่าถุงชนิด high density polypropylene (HDPE) low density polypropylene (LDPE) และ polyethylene terephthalate (PET) ตามลำดับ หลังจากบรรจุแล้วนำมาเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C 35°C 45°C และ 55°C โดยทำการสุ่มตัวอย่างมะตูมผงสำเร็จรูปมาตรวจคุณภาพ ได้แก่ ความชื้น a_w สี ความสามารถในการต้านสาร

อนุมูลอิสระ DPPH และ ABTS ความหนาแน่นปรากฏและ tapped density ความสามารถในการละลาย ความสามารถในการดูดความชื้น และจำนวนจุลินทรีย์ ทุก 2 สัปดาห์ เป็นเวลา 8-12 สัปดาห์

4.3.1 การวิเคราะห์ทางสมบัติทางเคมีกายภาพของมะตูมผงสำเร็จรูประหว่างการเก็บรักษา

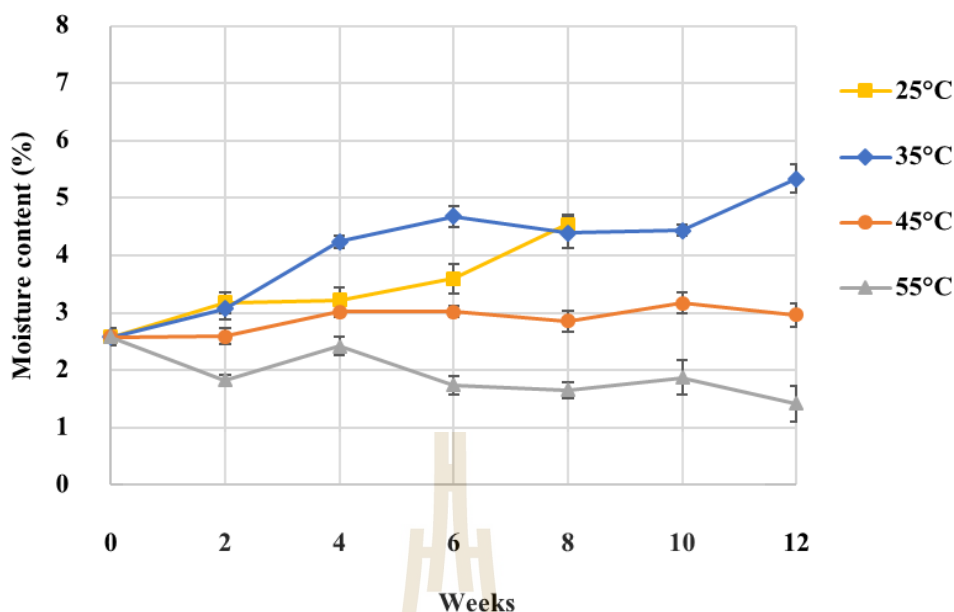
รูปที่ 4.3 แสดงปริมาณความชื้นของมะตูมผงสำเร็จรูประหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C เป็นเวลา 8 สัปดาห์ และ 35°C 45°C และ 55°C เป็นเวลา 12 สัปดาห์ การเปลี่ยนแปลงความชื้นของผลิตภัณฑ์นั้นเกี่ยวข้องกับสภาวะในการเก็บรักษา นอกจากนี้ความชื้นยังสามารถใช้บ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงค่า a_w ของผลิตภัณฑ์ได้ (Chiou & Langrish, 2007) มะตูมผงสำเร็จรูปสูตร 2C มีความชื้นเริ่มต้นอยู่ที่ 2.63% จากผลการทดลองพบว่า การเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C และ 35°C ระยะเวลามากกว่า 2 สัปดาห์ มีผลทำให้ความชื้นของตัวอย่างเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยในสัปดาห์ที่ 2 ตัวอย่างมีความชื้น 3.18% และ 3.07% ในสภาวะการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C และ 35°C ตามลำดับ หลังจากเก็บรักษาเป็นเวลา 8 สัปดาห์ ตัวอย่างมีความชื้นสูงขึ้นซึ่งมีค่าอยู่ที่ 4.54% และ 4.39% ตามลำดับ ทั้งนี้หลังจากการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 35°C เป็นเวลา 12 สัปดาห์ ตัวอย่างมีความชื้นเป็น 5.34% ในขณะที่การเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 45°C ปริมาณความชื้นเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยตลอดระยะเวลาในการเก็บรักษา อย่างไรก็ตามการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 55°C มีผลทำให้ปริมาณความชื้นลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

ปริมาณความชื้นของตัวอย่างที่เพิ่มขึ้นหลังจากการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C และ 35°C อาจเนื่องมาจากความชื้นจากภายนอกสามารถซึมผ่านเข้าไปในตัวอย่างได้ (Kumar & Mishra, 2004) ซึ่งผลการทดลองนี้เป็นไปทางเดียวกันกับผลงานวิจัยของ Wong and Lim (2016) ซึ่งพบว่ามะละกอผงที่ผ่านการทำแห้งแบบพ่นฝอย หลังจากการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 38°C มีปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ Mishra et al. (2014) และ Mishra et al. (2015) รายงานว่า ความชื้นของผงโยเกิร์ตมะม่วงมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ หลังจากเก็บรักษาที่อุณหภูมิ $38 \pm 1^\circ\text{C}$

ผลิตภัณฑ์อาหารผงควรมีค่า water activity (a_w) อยู่ระหว่าง 0.2-0.4 (Syamaladevi et al., 2016) ซึ่ง a_w สามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้ถึงความคงตัวของผลิตภัณฑ์ต่อปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidative stability) เช่น ปฏิกิริยาออกซิเดชันของลิพิด (lipid oxidation) และการหืน (rancidity) เป็นต้น (Caliskan & Dirim, 2013) มะตูมผงสำเร็จรูปสูตร 2C มี a_w อยู่ที่ 0.28 จากการทดลองพบว่า อุณหภูมิและระยะเวลาในการเก็บรักษามีผลทำให้ a_w เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยเฉพาะหลังจากการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C และ 35°C เป็นเวลา 2 สัปดาห์ มีค่า a_w เพิ่มขึ้นเป็น 0.38 และ 0.38 ตามลำดับ การเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 45°C และ 55°C เป็นเวลา 2 สัปดาห์ มีค่า a_w เพิ่มขึ้นเป็น 0.34 และ 0.32 ตามลำดับ (รูปที่ 4.4) อย่างไรก็ตาม a_w ของตัวอย่างแนวโน้มเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยตลอดระยะเวลาการเก็บรักษาที่ทุกอุณหภูมิ ยกเว้นในสัปดาห์ที่ 12 การเก็บรักษาที่อุณหภูมิ

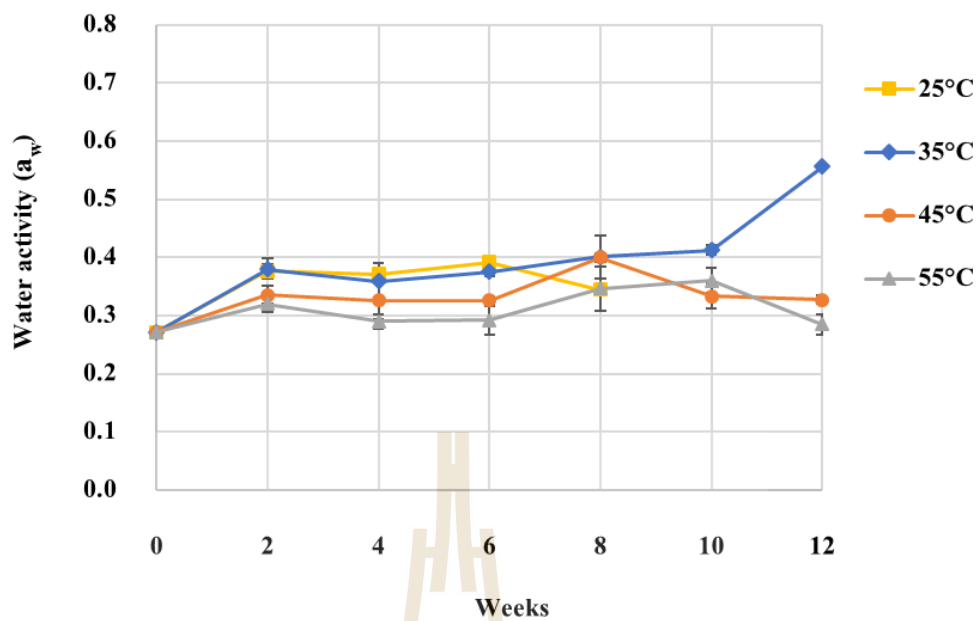
35°C มีค่า a_w เพิ่มขึ้นเป็น 0.56 แต่ค่า a_w ของตัวอย่างนี้ยังไม่เกินคุณลักษณะของมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนมะตูมผงสำเร็จรูป ซึ่งกำหนดไว้ที่ 0.6 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2556) นอกจากนี้ลักษณะทั่วไปของมะตูมผงสำเร็จรูปแห้งและไม่จับตัวเป็นก้อน ยังคงมีกลิ่นดีและไม่อับจากรายงานการวิจัยของ Gabas et al. (2007) พบว่า ค่า a_w ของตัวอย่างเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการเก็บรักษา นอกจากนี้ Chiou and Langrish (2007) รายงานว่า การเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิต่ำมีผลทำให้ความชื้นเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลต่อการเพิ่มค่า a_w ของผลิตภัณฑ์ผงด้วย Wong and Lim (2016) รายงานว่าหากค่า a_w ของผลิตภัณฑ์ผงไม่เกิน 0.6 แสดงว่ามีความคงตัวหรือเสถียรระหว่างการเก็บรักษา

สีของผลิตภัณฑ์เป็นหนึ่งในพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ซึ่งอาจมีผลต่อการยอมรับของผู้บริโภคได้ (Chen, 2009) รูปที่ 4.5 แสดงค่าความสว่าง (L^*) ความเป็นสีแดง (a^*) ความเป็นสีเหลือง (b^*) และค่าความแตกต่างของสี (ΔE) ของมะตูมผงสำเร็จรูประหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 35°C 45°C และ 55°C เป็นเวลา 8 สัปดาห์ จากผลการทดลองพบว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิสูง (55°C) นานมากกว่า 4 สัปดาห์ มีผลต่อการลดค่าความสว่าง แต่เพิ่มค่าความเป็นสีแดง ค่าความเป็นสีเหลือง และค่าความแตกต่างสีของผลิตภัณฑ์อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) อย่างไรก็ตามการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 35°C และ 45°C เป็นเวลา 8 สัปดาห์ ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพสีของผลิตภัณฑ์ Mishar et al. (2015) รายงานว่า การเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ผงที่อุณหภูมิสูงอาจส่งผลต่อการเร่งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งทำให้ค่าความเป็นสีแดงเพิ่มขึ้นและลดค่าความสว่างลง Wong and Lim (2016) กล่าวว่า หลังจากการเก็บรักษามะละกอผงนาน 7 สัปดาห์ ค่าความแตกต่างของสีเพิ่มมากขึ้น เนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของผลิตภัณฑ์ ทำให้ค่าสีเปลี่ยนแปลงไป ส่วน Muzaffar and Kumar (2016) กล่าวว่า สีของผลิตภัณฑ์ผงเปลี่ยนแปลง โดยค่าความเป็นสีแดงเพิ่มขึ้นอาจเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) หรือการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลโดยไม่ใช้เอนไซม์) อย่างไรก็ตามในการศึกษานี้ ได้ใช้มอลทิทอลทดแทนน้ำตาลทราย ซึ่งมอลทิทอลเป็นน้ำตาลแอลกอฮอล์ซึ่งไม่เป็นน้ำตาลรีดิวซ์ (non-reducing sugar) จึงไม่ทำให้เกิด Maillard reaction (Manley, 2011; Dobрева et al., 2013)

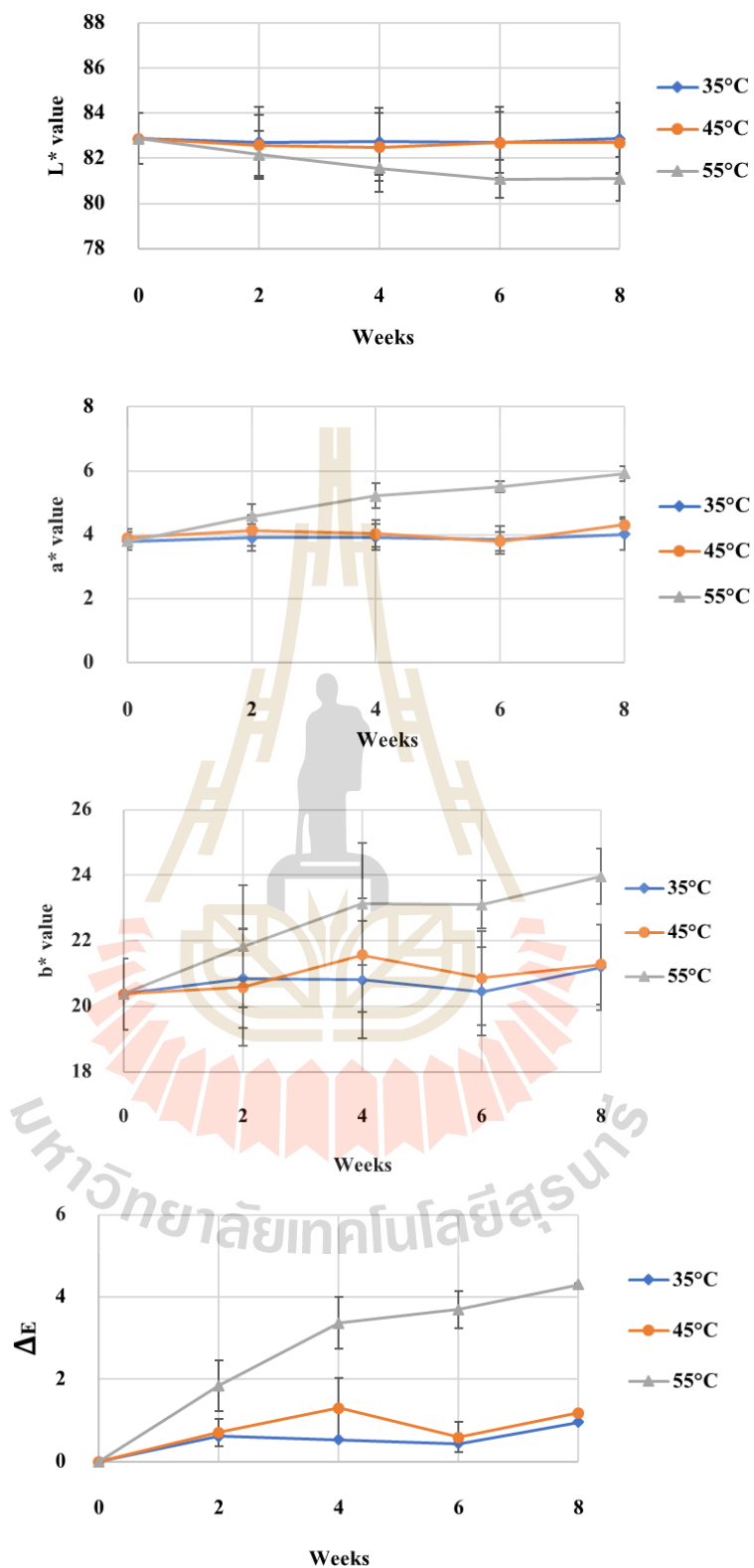


รูปที่ 4.3 Moisture content of spray dried bael fruit powder (2C) as affected by storage temperature and time.

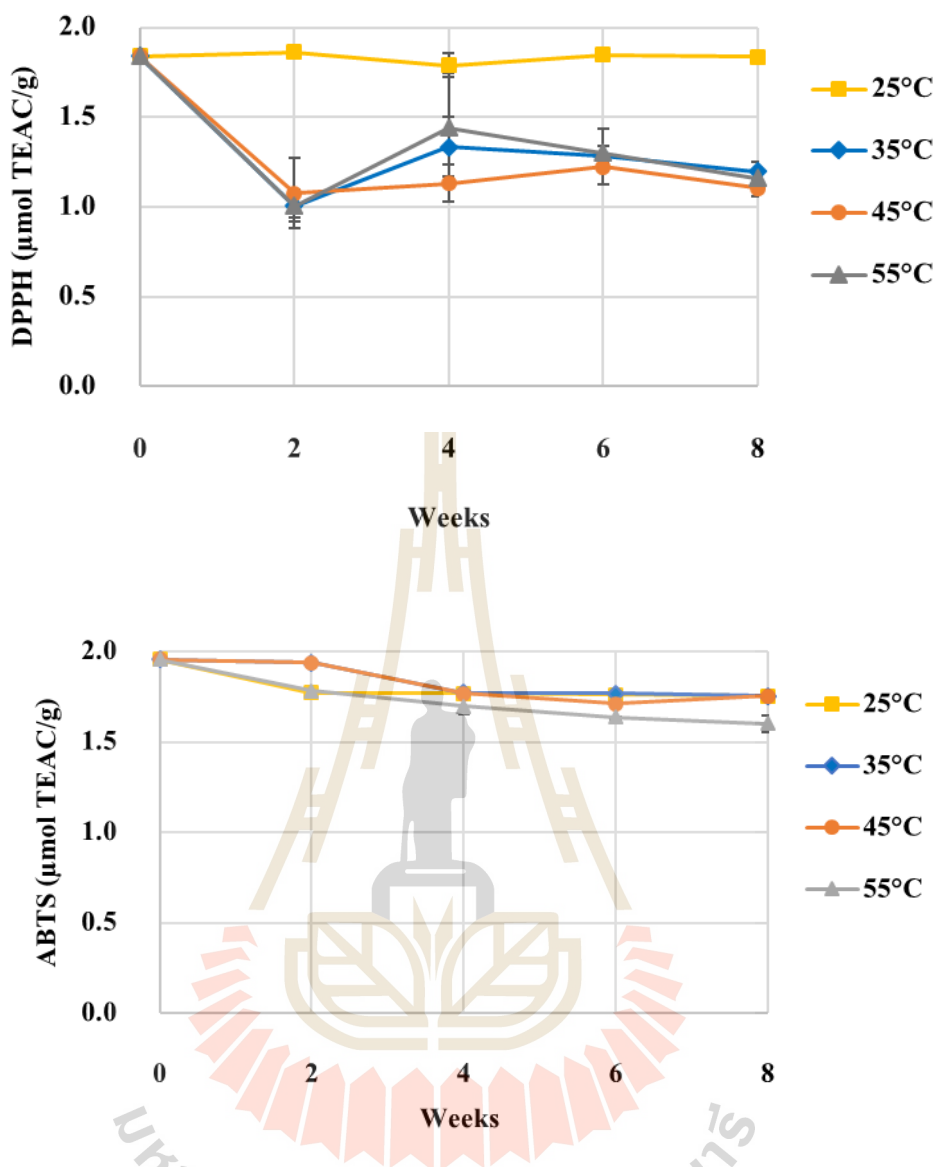
รูปที่ 4.6 แสดงการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ DPPH และ ABTS ของมะตูมผงสำเร็จรูประหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C 35°C 45°C และ 55°C เป็นเวลา 8 สัปดาห์ โดยมะตูมผงสำเร็จรูปมีค่าความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ DPPH และ ABTS เริ่มต้นอยู่ที่ 1.84 และ 1.96 $\mu\text{mol TEAC/g}$ ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่า การเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C เป็นเวลา 0-8 สัปดาห์ ค่าความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ DPPH ค่อนข้างคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลง แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเก็บรักษาเป็น 35°C 45°C และ 55°C พบว่า ค่าความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ DPPH ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) หลังจากเก็บรักษาเป็นเวลา 2 สัปดาห์ แต่เมื่อเพิ่มระยะเวลาการเก็บรักษาไปจนถึง 8 สัปดาห์ ค่าความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ DPPH เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น สำหรับค่าความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ ABTS มีค่าลดลงหลังจากเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C 35°C 45°C และ 55°C เป็นเวลา 4 สัปดาห์และมีค่าเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยระหว่างการเก็บรักษาระหว่าง 4-8 สัปดาห์ จากผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wong and Lim (2016) ซึ่งพบว่า การเก็บรักษามะละกอผงที่อุณหภูมิสูงมีผลทำให้ค่าความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระลดลง นอกจากนี้ Mishar et al. (2015) รายงานว่า ค่าความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระในผลิตภัณฑ์ลดลงอาจเนื่องมาจากการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิสูงส่งผลต่อการทำลายสารต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant compounds)



รูปที่ 4.4 Water activity (a_w) of spray dried bael fruit powder (2C) as affected by storage temperature and time.



รูปที่ 4.5 Color value (L^* , a^* , and b^*) and color difference (ΔE) of spray dried bael fruit powder (2C) as affected by storage temperature and time.



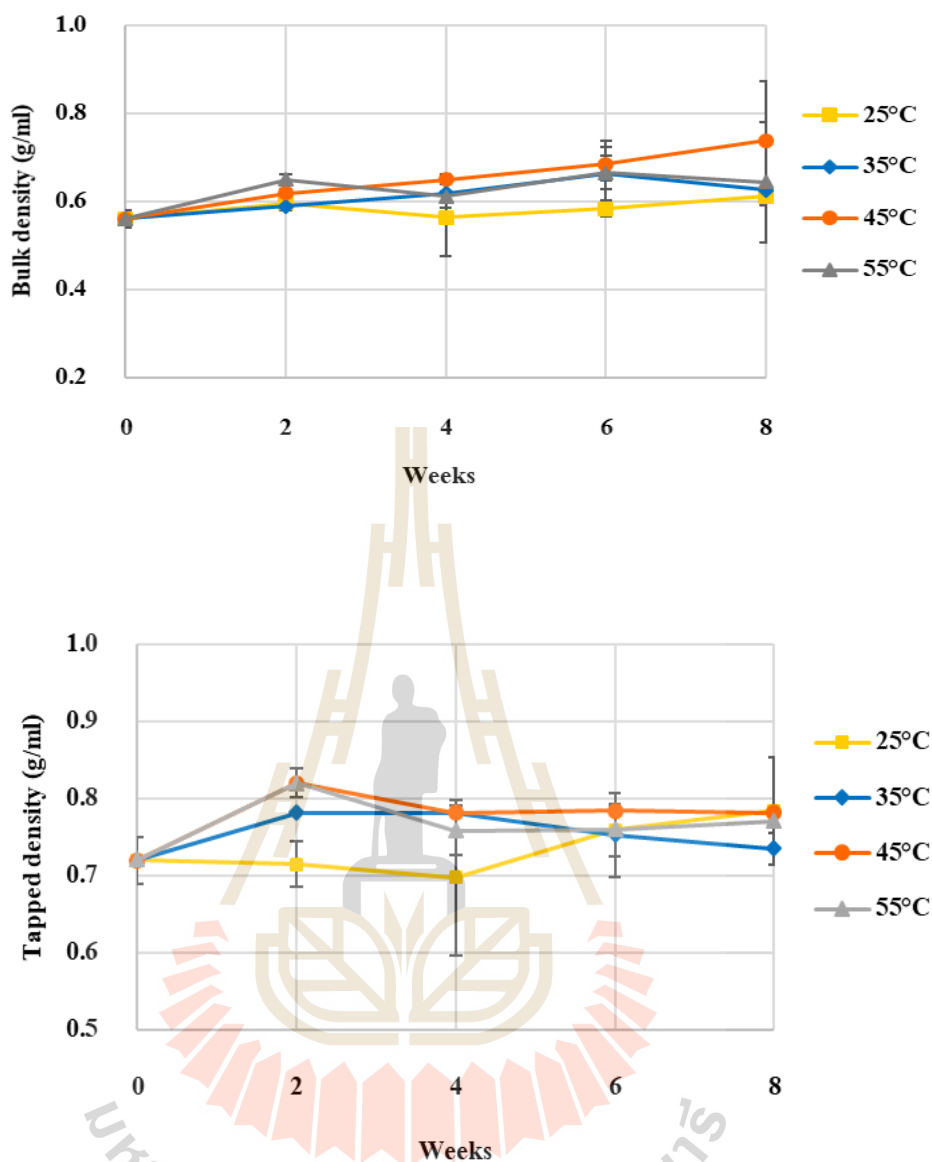
รูปที่ 4.6 DPPH and ABTS scavenging properties of spray dried bael fruit powder (2C) as affected by storage temperature and time.

ความหนาแน่นปรากฏเป็นอีกหนึ่งในพารามิเตอร์ที่ช่วยบ่งบอกถึงสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ผง ซึ่งอาจจะมีผลต่อการบรรจุและขนส่งผลิตภัณฑ์ได้ (Tontul and Topuz, 2017) รูปที่ 4.7 แสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นปรากฏและ tapped density ของมะตูมผงสำเร็จรูประหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C 35°C 45°C และ 55°C เป็นเวลา 8 สัปดาห์ จากการทดลองพบว่า ค่าความหนาแน่นปรากฏมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ Tontul and Topuz (2017) และ Muzzaffar and Kumar (2016) ได้กล่าวไว้ว่า ค่าความหนาแน่นปรากฏเพิ่มขึ้นอาจเกี่ยวกับการเพิ่มขึ้นของค่าความชื้นและ a_w ของผลิตภัณฑ์ผง เนื่องมาจากการเพิ่มติดกัน (cohesiveness) ระหว่าง

อนุภาคผง ซึ่งเกิดการความชื้นที่เพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามจากผลการศึกษานี้ ความชื้นและ a_w ของผลิตภัณฑ์มะตูมผงสำเร็จรูปมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นปรากฏเพียงเล็กน้อยเท่านั้น สำหรับ tapped density ของมะตูมผงสำเร็จรูประหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 35°C 45°C และ 55°C มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญหลังจากเก็บรักษาเป็นเวลา 2 สัปดาห์ ($p < 0.05$) และมีแนวโน้มคงที่ระหว่างการเก็บรักษา 4-8 สัปดาห์ การเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C พบว่า tapped density เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยหลังจากเก็บรักษาเป็นเวลา 4 สัปดาห์ และมีค่าเพิ่มขึ้นในสัปดาห์ที่ 6 และ 8 จาก Tontul and Topuz (2017) ได้กล่าวไว้ว่า ค่าความหนาแน่นปรากฏมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับ tapped density ซึ่งจากการทดลองนี้ที่พบว่า ค่าความหนาแน่นปรากฏเพิ่มขึ้น ค่า tapped density เพิ่มขึ้นด้วย

รูปที่ 4.8 แสดงการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางด้านความสามารถในการละลายและความสามารถในการดูดความชื้นกลับของมะตูมผงสำเร็จรูประหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C 35°C 45°C และ 55°C เป็นเวลา 8 สัปดาห์ จากการทดลองพบว่า ความสามารถในการละลายของมะตูมผงสำเร็จรูปลดลงหลังจากเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 35°C 45°C และ 55°C เป็นเวลา 2 สัปดาห์ หลังจากนั้นความสามารถในการละลายค่อนข้างคงที่ แต่ความสามารถในการละลายของมะตูมผงสำเร็จรูปลดลงหลังจากเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C เป็นเวลา 4 สัปดาห์ หลังจากนั้นความสามารถในการละลายค่อนข้างคงที่เช่นกัน ความสามารถในการละลายที่ลดลงอาจเนื่องมาจากปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นหลังจากการเก็บรักษา (รูปที่ 4.3) ซึ่ง Wong and Lim (2016) รายงานว่า ความสามารถในการละลายลดลงเมื่อความชื้นของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ความสามารถในการละลายลดลงอาจเกี่ยวข้องกับการเกิดผลึกของน้ำตาลระหว่างการเก็บรักษาได้ (Wong & Lim, 2016) อย่างไรก็ตาม Anema et al. (2006) ซึ่งพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิและระยะเวลาในการเก็บรักษาผงโปรตีนนมไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความสามารถในการละลาย

ค่าความสามารถในการดูดความชื้นกลับของมะตูมผงสำเร็จรูปเพิ่มขึ้นหลังจากเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 35°C 45°C และ 55°C เป็นเวลา 2 สัปดาห์ (รูปที่ 4.8) หลังจากนั้นความสามารถในการดูดความชื้นกลับค่อนข้างคงที่ แต่ความสามารถในการดูดความชื้นกลับของมะตูมผงสำเร็จรูปลดลงหลังจากเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C เป็นเวลา 2 สัปดาห์ หลังจากนั้นความสามารถในการดูดความชื้นกลับค่อนข้างคงที่เช่นกัน

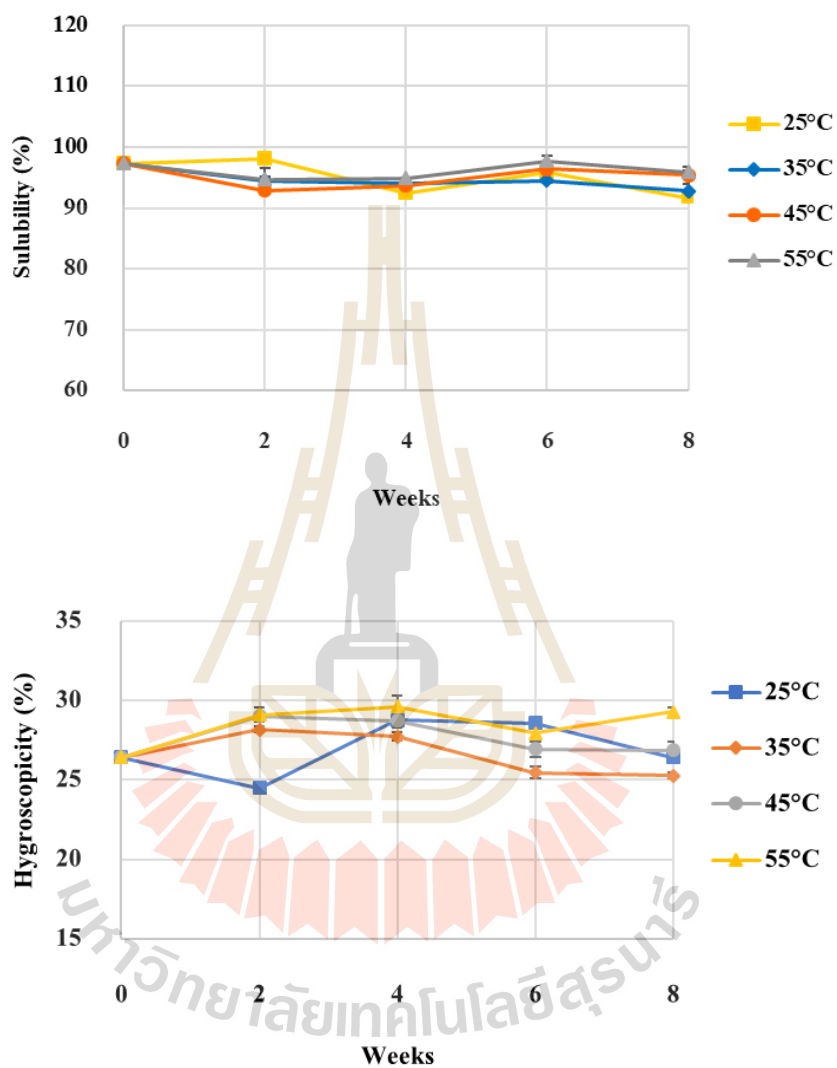


รูปที่ 4.7 Bulk and tapped density and solubility of spray dried bael fruit powder (2C) as affected by storage temperature and time.

4.3.2 การวิเคราะห์ทางด้านจุลินทรีย์ของมะตูมผงสำเร็จรูประหว่างการเก็บรักษา

การเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางด้านจุลินทรีย์ของมะตูมผงสำเร็จรูประหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C 35°C 45°C และ 55°C เป็นเวลา 8 สัปดาห์ พบว่า มีจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด ยีสต์และรา ตลอดอายุการเก็บรักษาทั้ง 8 สัปดาห์ น้อยกว่า 10 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม (CFU/g) ซึ่งมีคุณลักษณะด้านจุลินทรีย์อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนมะตูมผงสำเร็จรูป (มพช. 169/2556) โดยมะตูมผงสำเร็จรูปจะต้องมีจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดไม่เกิน

1×10^4 CFU/g ส่วนยีสต์และราต้องไม่เกิน 100 CFU/g (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ,2556) จากผลการทดลองนี้สอดคล้องการงานวิจัยของ Wong and Lim (2016) ซึ่งพบว่า มะละกอผง ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 38°C เป็นเวลา 7 สัปดาห์ มีปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดไม่เกิน 470 CFU/g



รูปที่ 4.8 Solubility and hygroscopicity of spray dried bael fruit powder (2C) as affected by storage temperature and time.

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 การศึกษาอัตราส่วนของส่วนผสมและสภาวะการทำแห้งแบบพ่นฝอยของการผลิตมะตูมผงสำเร็จรูป

ปริมาณมอลโทเดกทรีนซ์ 15% ของน้ำหนักส่วนผสมทั้งหมดก่อนการทำแห้งแบบพ่นฝอย และสภาวะในการทำแห้งแบบพ่นฝอยคือ อุณหภูมิลมร้อนขาเข้าและลมร้อนขาออกของเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยที่ 120°C และ 70°C ตามลำดับ อัตราการป้อนอยู่ช่วง 17-18 มิลลิลิตรต่อนาที หรือ 10 รอบต่อนาที มีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ทดลองต่อไป เนื่องจากมีผลทำให้ได้ yield และ solid recovery ที่สูง ความชื้นและ a_w ต่ำกว่า 5% และ 0.6 ตามลำดับ บ่งชี้ว่าผลิตภัณฑ์มะตูมผงสำเร็จรูปนี้สามารถเก็บรักษาได้นานและมีความปลอดภัยทางด้านจุลินทรีย์ ความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ ABTS (1.91 $\mu\text{mol TEAC/g}$) และสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (215.30 mgGA/L) สูงสุด และขนาดอนุภาคเฉลี่ย 50.53 นาโนเมตร ซึ่งมีผลดีต่อการเก็บรักษาและการขนส่ง รวมทั้งมีความคงตัวของคุณภาพผลิตภัณฑ์ระหว่างการเก็บรักษา

5.1.2 การศึกษาชนิดสารให้ความหวานต่อคุณภาพของมะตูมผงสำเร็จรูป

ชนิดของสารให้ความหวานและสัดส่วนในการเตรียมมีผลต่อ yield และ solid recovery โดยสูตร 2C (น้ำตาลทรายและมอลทิทอลอย่างละ 7.5% ของน้ำหนักส่วนผสมทั้งหมด) มี yield และ solid recovery สูงสุด ซึ่งเท่ากับ 27.34% และ 79.26% ตามลำดับ ค่าความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ ABTS ปริมาณวิตามินซี และอุณหภูมิสถานะคล้ายแก้ว (T_g) สูงกว่าสูตร 1C และ 3C อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์ทั้ง 3 สูตร (1C 2C และ 3C) มีค่าความชื้นและ a_w ต่ำกว่า 5% และ 0.6 ตามลำดับ ความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ DPPH ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และขนาดของอนุภาคผงเฉลี่ยไม่แตกต่างกัน

ผลิตภัณฑ์ทั้ง 3 สูตร (1C 2C และ 3C) มีปริมาณโปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต และเถ้าของมะตูมผงสำเร็จรูปไม่แตกต่างกัน แต่ค่าพลังงาน (energy value) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เมื่อใช้มอลทิทอลแทนน้ำตาลทราย การเติมมอลทิทอลเป็นสารให้ความหวานแทนน้ำตาลทรายมีผลต่อ

การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นสีแดง แต่ไม่เปลี่ยนแปลงค่าความสว่างและความเป็นสีเหลืองของมะตูมผงสำเร็จรูป นอกจากนี้ลักษณะพื้นผิวของอนุภาคผงมีความขรุขระคล้ายกันทั้ง 3 สูตร และมีจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด ยีสต์และรา น้อยกว่า 10 CFU/g อย่างไรก็ตามมอลทิทอลทำให้มะตูมผงสำเร็จรูปมีความหนาแน่นปรากฏ (bulk density) และความสามารถในการดูดซับความชื้นกลับ (hygroscopicity) เพิ่มขึ้น แต่ความสามารถในการละลาย (solubility) ลดลงเมื่อเติมมอลทิทอลทดแทนน้ำตาลทราย 100%

สูตร 2C (น้ำตาลทรายและมอลทิทอลอย่างละ 7.5% ของน้ำหนักส่วนผสมทั้งหมด) เป็นสูตรที่ได้รับการยอมรับจากผู้ทดสอบ และเป็นสูตรที่ทำให้มะตูมผงสำเร็จรูปมีคุณภาพโดยรวมสูงกว่าสูตร 1C และ 3C ดังนั้น สูตร 2C เหมาะกับการนำไปศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพระหว่างการเก็บรักษา

5.1.3 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของมะตูมผงสำเร็จรูประหว่างการเก็บรักษา

การเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C และ 35°C ระยะเวลามากกว่า 2 สัปดาห์ มีผลทำให้ความชื้นของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น ในขณะที่การเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 45°C ปริมาณความชื้นเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยตลอดระยะเวลาในการเก็บรักษา อย่างไรก็ตามการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 55°C มีผลทำให้ปริมาณความชื้นลดลง สำหรับ a_w ของตัวอย่างมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยตลอดระยะเวลาการเก็บรักษาที่ทุกอุณหภูมิ ยกเว้นในสัปดาห์ที่ 12 การเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 35°C มีค่า a_w เพิ่มขึ้นเป็น 0.56 แต่ค่า a_w ของตัวอย่างนี้ยังไม่เกิน 0.6 ซึ่งยังมีความปลอดภัยทางด้านจุลินทรีย์

การเก็บรักษาที่อุณหภูมิสูง (55°C) นานมากกว่า 4 สัปดาห์ มีผลต่อการลดค่าความสว่าง แต่เพิ่มค่าความเป็นสีแดง ค่าความเป็นสีเหลือง และค่าความแตกต่างสีของผลิตภัณฑ์ การเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C เป็นเวลา 0-8 สัปดาห์ ค่าความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ DPPH ก่อนข้างคองที่ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเก็บรักษาเป็น 35°C 45°C และ 55°C พบว่า ค่าความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ DPPH ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ความสามารถในการละลายของมะตูมผงสำเร็จรูปลดลงหลังจากเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 35°C 45°C และ 55°C เป็นเวลา 2 สัปดาห์ หลังจากนั้นความสามารถในการละลายก่อนข้างคองที่ ความสามารถในการดูดความชื้นกลับมีค่าคงที่ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา แต่ค่าความหนาแน่นปรากฏมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในการเก็บรักษาที่ทุกอุณหภูมิ

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การศึกษาอัตราส่วนของส่วนผสมและสภาวะการทำแห้งแบบพ่นฝอยของการผลิตมะตูมผงสำเร็จรูป

ควรศึกษาเทคนิคในการสกัดกลิ่นของมะตูมอบแห้ง, วิธีการรักษากลิ่นในขั้นตอนการทำแห้งและการเก็บรักษา มะตูมผงสำเร็จรูปด้วยทำแห้งแบบพ่นฝอยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์

5.2.2 การศึกษาชนิดสารให้ความหวานต่อคุณภาพของมะตูมผงสำเร็จรูป

ศึกษาชนิดสารให้ความหวานอื่นๆ เพื่อนำมาผสมกับสารให้ความหวานแทนน้ำตาลที่สามารถลดพลังงานที่ได้รับและเพิ่มความชอบของผู้บริโภคมากขึ้น

5.2.3 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของมะตูมผงสำเร็จรูประหว่างการเก็บรักษา

ควรเพิ่มระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อไปอีก เพื่อที่จะสามารถกำหนดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ได้ ทั้งนี้หากใช้ค่าความชื้นและ a_w เป็นตัวกำหนดอายุการเก็บรักษา โดยค่าความชื้นและ a_w มีมากกว่า 10% และ 0.6 ตามลำดับ



รายการอ้างอิง

- กองโภชนาการ กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข. (2530). **ตารางแสดงคุณค่าทางโภชนาการอาหาร**. กรุงเทพฯ: กระทรวงสาธารณสุข
- จันทร์ชรีรา โยชะคง และอัญชลีญา อินพรหม. (2547). การออกแบบและพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยสำหรับห้องปฏิบัติการ (ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ไม่ได้ตีพิมพ์). **มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, นครปฐม.**
- ชนกิจ ถาหมี, พิไลรัก อินธิปัญญา และ คุษฎี บุญธรรม. (2556). การประเมินอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ชาชงใบหม่อนผสมผลหม่อนโดยวิธีสภาวะเร่ง. **วารสารเกษตร 34(1), 157-166**
- ธีรพร กงบังเกิด, ขนิษฐา มาน้อย. 2545. โครงการการศึกษาการประมวลสถานภาพของมะตูมในปัจจุบัน. **รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย สัญญาเลขที่ PDG4520001.**
- ประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 182) พ.ศ.2541
- พรรณจิรา วงศ์สวัสดิ์, มณฑิรา นพรัตน์, และดวงพร ตั้งบำรุงพงษ์. (2545). กระบวนการผลิตน้ำผักผลไม้รวมผงโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบพ่นกระจายและไมโครเวฟสุญญากาศ. **วารสารวิจัยและพัฒนา มจร., 25 (3), 257-277.**
- พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์, และนิธิยา รัตนานนท์. (2561). Non enzymatic browning reaction / ปฏิกริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์. สืบค้นจาก <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0397/maillard-reaction>.
- พูนศิริ ทิพย์เนตร, พัชรี เสริมทรัพย์, สนิท จันทร์แก้ว, และ ฌปภา หอมหวล. (2554). การพัฒนาข้าวตูขุ่นมหวานเมืองเพชรบุรีด้วยมอลทิทอล. **วารสารวิทยาศาสตร์แห่งมหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี, 8 (1), 36-44.**
- ภัทรภาพ สุวรรณกิจบริหาร. (2541). การศึกษาการทำแห้งผลไม้จาก Freezed Dryer (ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ไม่ได้ตีพิมพ์). **มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, นครปฐม.**
- มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, สำนักงาน. (2556). **มาตรฐานอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ขนมขมขุ่มผงสำเร็จรูป มอช. 169/2556.** กรุงเทพฯ.
- รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์นามิต. (2553). **วิศวกรรมการแปรรูปอาหารและถนอมอาหาร**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ:สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารราชบัณฑิตยสถาน.

- หนูเดือน สารบุตร, กรรณิการ์ ห้วยแสน, พนอจิต นิติสุข, และ อนันต์ พันธุ์พิบูลย์. (2556). สมบัติทางกายภาพและการยอมรับของผู้บริโภคต่อขนมพายฝ้ายเติมผงสีมะนาวโห่ที่มีมอลโตเด็กซ์ทรินต่างกัน. วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร ฉบับพิเศษ การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5, 399-405.
- Abadio, F. D. B., Domingues, A. M., Borges, S. V., & Oliveira, V. M. (2004). Physical properties of powdered pineapple (*Ananas comosus*) juice—effect of malt dextrin concentration and atomization speed. **Journal of Food Engineering**, 64(3), 285-287. doi:10.1016/j.jfoodeng.2003.10.010
- Adebayo, I. A., Arsad, H., & Samian, M. R. (2018). Total phenolics, total flavonoids, antioxidant capacities, and volatile compounds gas chromatography-mass spectrometry profiling of *Moringa oleifera* ripe seed polar fractions. **Pharmacognosy magazine**, 14(54), 191.
- AOAC, (1990). Methods of Association of Official Chemists. 15th ed. Arlington ,VA, USA: **Official Analytical International.**
- AOAC, (1995). Methods of Association of Official Chemists. 16th ed. Gaithersburg , MD, USA: Official Analytical **Official Analytical International.**
- AOAC, (2000). Methods of Association of Official Chemists. 17th ed. Arlington ,VA, USA: **Official Analytical International.**
- Bazaria, B., & Kumar, P. (2017). Comparative analysis of bio-polymers addition on structural and physical properties of spray dried beetroot juice concentrate. **Journal of Food Processing and Preservation**, 41(6).
- Bazaria, B., & Kumar, P. (2017). Comparative analysis of bio-polymers addition on structural and physical properties of spray dried beetroot juice concentrate. **Journal of Food Processing and Preservation**, 41(6).
- Bhusari, S. N., Muzaffar, K., & Kumar, P. (2014). Effect of carrier agents on physical and microstructural properties of spray dried tamarind pulp powder. **Powder Technology**, 266, 354-364.
- Bindu, B. & Pradyuman, K. (2016). Comparative analysis of bio-polymers addition on structural and physical properties of spray dried beetroot juice concentrate. *Food Processing and Preservation*, (2017), 1-8.
- Cai, Y.Z., & Cork, H. (2000). Production and Properties of Spray-dried *Amaranthus* Betacyanin Pigments. **Journal of Food Science**, 65(6), 1248-1252.

- Chong, S. Y., & Wong, C. W. (2015). Production of Spray-Dried Sapodilla (*M anilkara* zapota) Powder from Enzyme-Aided Liquefied Puree. **Journal of Food Processing and Preservation**, 39(6), 2604-2611.
- Dobрева, V., Hadjikinova, M., Slavov, A., Hadjikinov, D., Dobrev, G., & Zhekova, B. (2013). Functional properties of maltitol. **Agricultural science and technology**, 5(2), 168-172.
- Eroglu, E., Tontul, I., & Topuz, A. (2018). Optimization of aqueous extraction and spray drying conditions for efficient processing of hibiscus blended rosehip tea powder. **Journal of Food Processing and Preservation**, 42(6), e13643.
- Fang, Z., & Bhandari, B. (2012). Comparing the efficiency of protein and maltodextrin on spray drying of bayberry juice. **Food Research International**, 48(2), 478-483.
- Fazaeli, M., Emam-Djomeh, Z., Ashtari, A. K., & Omid, M. (2012). Effect of spray drying conditions and feed composition on the physical properties of black mulberry juice powder. **Food and bioproducts processing**, 90(4), 667-675.
- Ferrari, C. C., Germer, S. P. M., & de Aguirre, J. M. (2011). Effects of Spray-Drying Conditions on the Physicochemical Properties of Blackberry Powder. **Drying Technology**, 30(2), 154-163.
- Ferrari, C. C., Marconi Germer, S. P., Alvim, I. D., & de Aguirre, J. M. (2013). Storage stability of spray-dried blackberry powder produced with maltodextrin or gum arabic. **Drying Technology**, 31(4), 470-478.
- Goula, A. M., & Adamopoulos, K. G. (2010). A new technique for spray drying orange juice concentrate. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, 11(2), 342-351.
- Hadjikinova, R., & Marudova, M. (2016). Thermal behaviour of confectionary sweeteners' blends. **BULGARIAN CHEMICAL COMMUNICATIONS**, 48, 446-450.
- Hartel, R. W., Ergun, R., & Vogel, S. (2011). Phase/state transitions of confectionery sweeteners: Thermodynamic and kinetic aspects. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, 10(1), 17-32.
- Hassan A. Al-Kahtani., & Bakirk H. Hassan (1990). Spray Drying of Roselle (*Hibiscus sabciariffa* L.) Extract. **Journal of Food Science**, 55, 1073-1076.
- Heleno, S. A., Martins, A., Queiroz, M. J. R., & Ferreira, I. C. (2015). Bioactivity of phenolic acids: Metabolites versus parent compounds: A review. **Food chemistry**, 173, 501-513

- Kumar, P., & Mishra, H. N. (2004). Storage stability of mango soy fortified yoghurt powder in two different packaging materials: HDPP and ALP. **Journal of Food Engineering**, 65(4), 569-576. doi:10.1016/j.jfoodeng.2004.02.022
- Liangqing, et al. (2014). Maltodextrin: A consummate carrier for spray-drying of xylooligosaccharides. **Food Research International**, 106 (2018), 383-393.
- Malcolm W., Kearsley, & Navroz Boghani. (2016). **Alternative Sweetener**. Ed(4). USA:
- Manley, D. (2011). Sugars and syrups as biscuit ingredients. In Manley's Technology of Biscuits, Crackers and Cookies (pp. 143-159): **Elsevier**.
- Mishra, P., Rai, G. K., & Mahanta, C. L. (2015). Process Standardization for Development of Spray-Dried Lemon Juice Powder and Optimization of Amla-Lemon Based RTS (Ready-to-Serve) Drink Using Response Surface Methodology. **Journal of Food Processing and Preservation**, 39(6), 1216-1228. doi:10.1111/jfpp.12338
- Moumita, S., Das, B., Hasan, U., & Jayabalan, R. (2018). Effect of long-term storage on viability and acceptability of lyophilized and spray-dried synbiotic microcapsules in dry functional food formulations. **Lwt**, 96, 127-132.
- Muzaffar, K., & Kumar, P. (2016). Moisture sorption isotherms and storage study of spray dried tamarind pulp powder. **Powder Technology**, 291, 322-327.
- Peter Dybdah Hede, Poul Bach, Anker D. Jensen. (2008). Two-fluids spray atomization and pneumatic nozzle for fluidbed coating/agglomeration purposes: A review. **Chemical Engineering Science**, 63 (2008), 3821 – 3842.
- Quek, S. Y., Chok, N. K., & Swedlund, P. (2007). The physicochemical properties of spray-dried watermelon powders. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, 46(5), 386-392.
- Saikia, S., Mahnot, N. K., & Mahanta, C. L. (2015). Effect of spray drying of four fruit juices on physicochemical, phytochemical and antioxidant properties. **Journal of Food Processing and Preservation**, 39(6), 1656-1664.
- Shri K. Sharma, Steven J. Mulvaney, Syed S. H. Rizvi. (2000). **Food Process Engineering : Theory and Laboratory Experiments**. USA: A John Wiley & Sons Publication.

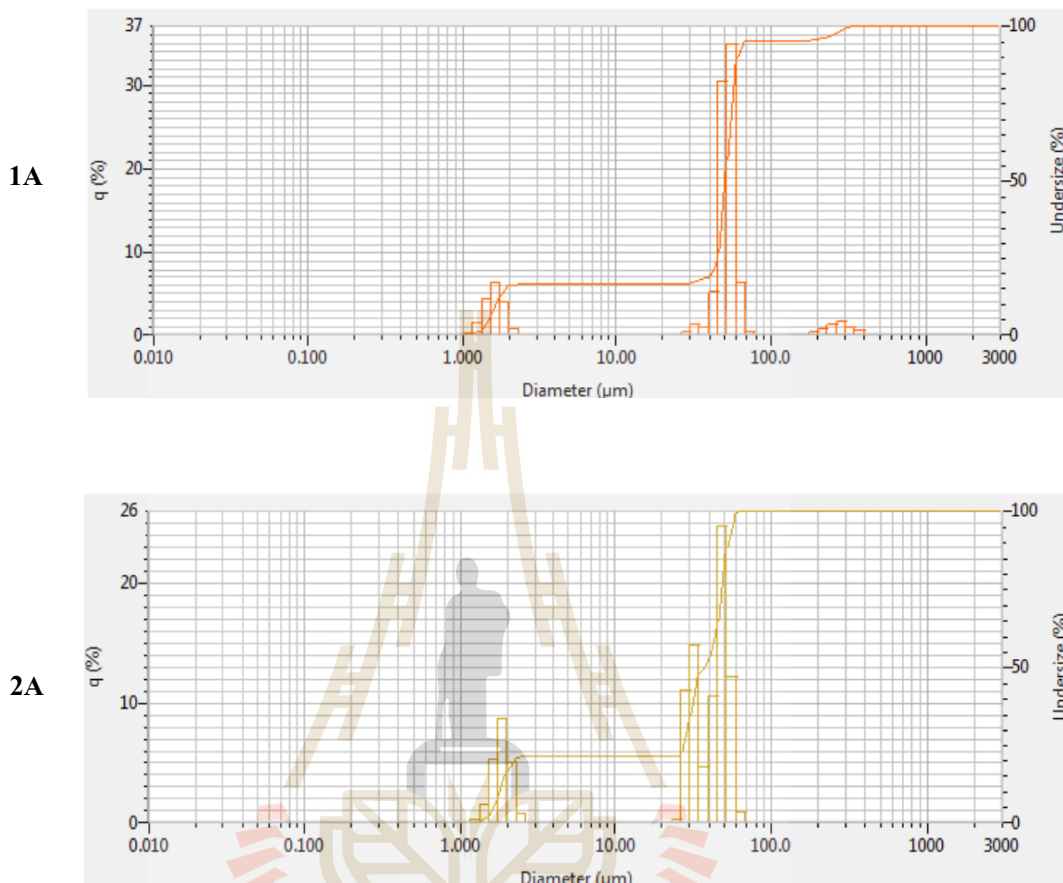
- Tonon, R. V., Brabet, C., & Hubinger, M. D. (2008). Influence of process conditions on the physicochemical properties of açai (*Euterpe oleracea* Mart.) powder produced by spray drying. **Journal of Food Engineering**, 88(3), 411-418.
- Wong, C. W., Teoh, C. Y., & Putri, C. E. (2017). Effect of enzymatic processing, inlet temperature, and maltodextrin concentration on the rheological and physicochemical properties of spray-dried banana (*Musa acuminata*) powder. **Journal of Food Processing and Preservation**, 42(2).
- Wong, C., & Lim, W. (2016). Storage stability of spray-dried papaya (*Carica papaya* L.) powder packaged in aluminium laminated polyethylene (ALP) and polyethylene terephthalate (PET). **International Food Research Journal**, 23(5).
- Wong, C., Pui, L., & Ng, J. (2015). Production of spray-dried Sarawak pineapple (*Ananas comosus*) powder from enzyme liquefied puree. **International Food Research Journal**, 22(4)
- Zorić, Z., Pelaić, Z., Pedisić, S., Garofulić, I. E., Kovačević, D. B., & Dragović-Uzelac, V. (2017). Effect of storage conditions on phenolic content and antioxidant capacity of spray dried sour cherry powder. **LWT-Food Science and Technology**, 79, 251-259.
- Zumbe, A., Lee, A., & Storey, D. (2001). Polyols in confectionery: the route to sugar-free, reduced sugar and reduced calorie confectionery. **British Journal of nutrition**, 85(S1), S31-S45.



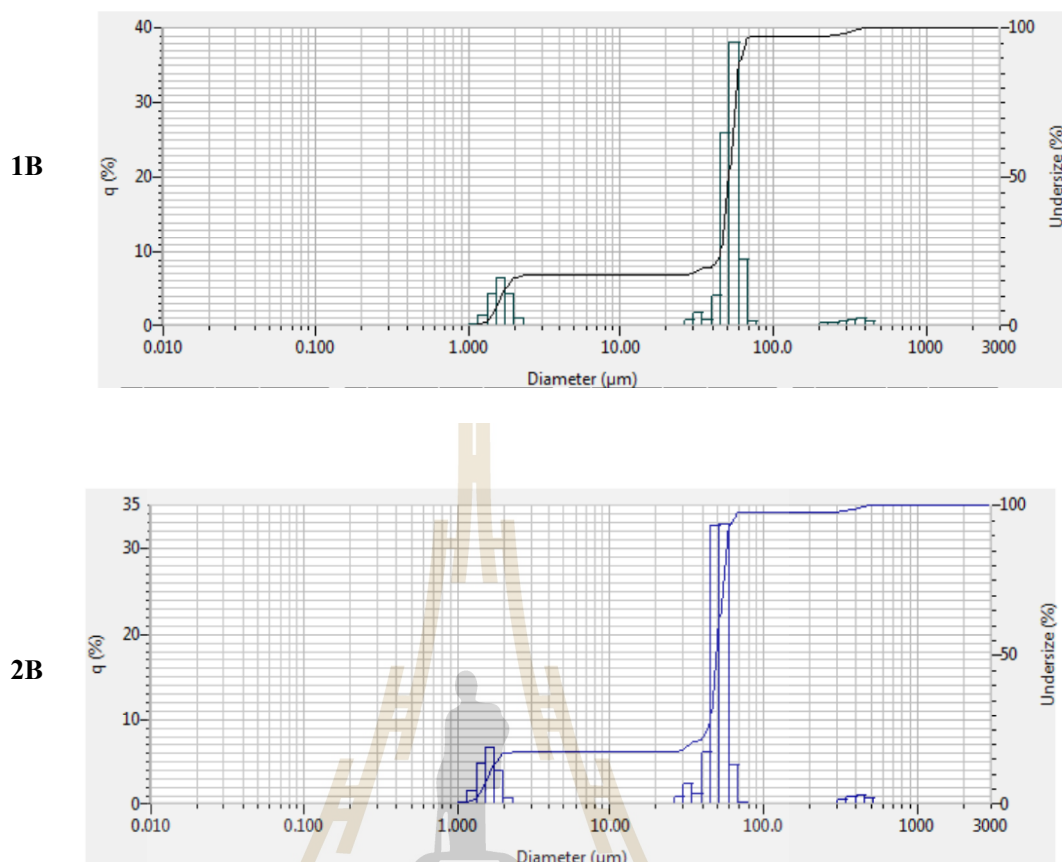
ภาคผนวก ก

ผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพ

ก.1 ขนาดอนุภาคของมะตูมผงสำเร็จรูป

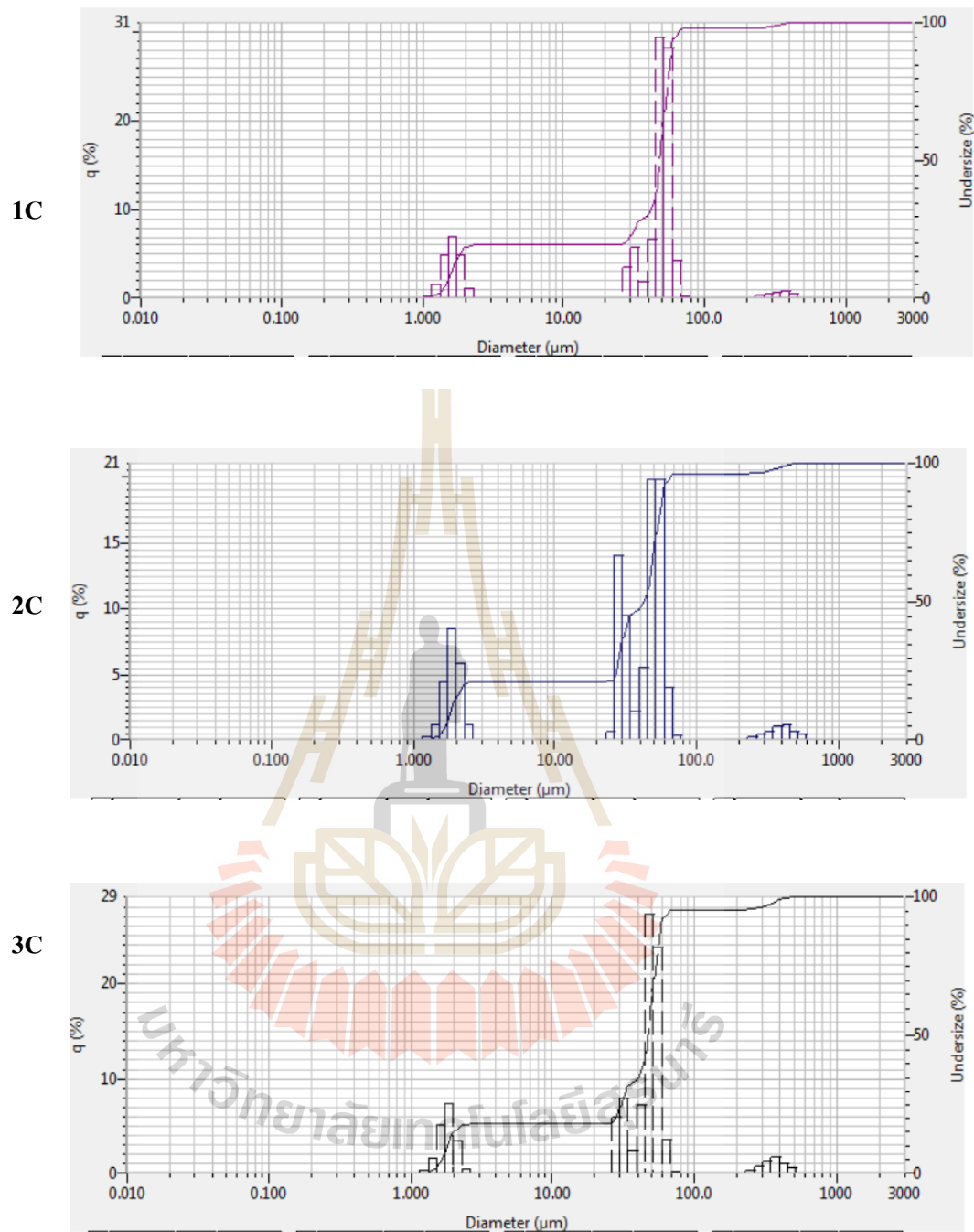


รูปที่ ก.1 ขนาดอนุภาคของมะตูมผงสำเร็จรูป สูตร 1A และ 2A แสดงตามลำดับดังนี้ปริมาณ
มอลโทเดกทรีน 12% และ 18% ของน้ำหนักรวมทั้งหมด



รูปที่ ก.2 ขนาดอนุภาคของมะตูมผงสำเร็จรูป สูตร 1B และ 2B แสดงตามลำดับดังนี้ อุณหภูมิเข้าในการพ่นฝอย 110°C และ 130°C

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ ก.2 ขนาดอนุภาคของมะตูมผงสำเร็จรูป สูตร 1C 2C และ 3C แสดงตามลำดับดังนี้ ปริมาณน้ำตาลทราย 15% ของน้ำหนักวัตถุดิบทั้งหมด น้ำตาลทราย และ มอลทิทอลอย่างละ 7.5% ของน้ำหนักส่วนผสมทั้งหมด และ ปริมาณมอลทอล 15% ของน้ำหนักวัตถุดิบทั้งหมด

1. การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส

ประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสโดยใช้วิธี 9-point hedonic scale ให้คะแนนตั้งแต่ 0-9 (1 หมายถึงชอบน้อยที่สุด ไปถึง 9 หมายถึงชอบมากที่สุด) ในด้านสี กลิ่นรส ความหวาน และความพอใจโดยรวม โดยใช้แบบทดสอบทางประสาทสัมผัสเพื่อประเมินความพึงพอใจต่อมะตูมผงสำเร็จรูป

แบบทดสอบทางประสาทสัมผัส

Hedonic scale scoring test (acceptance test)

วันที่ (date)

ชื่อผู้บริโภคร (name)อายุ.....

ปี

คำชี้แจง โปรดทำการประเมินตัวอย่างน้ำมะตูมที่ท่านได้รับและให้คะแนนตามความเห็นที่เหมาะสมกับคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ท่านกำลังทดสอบชิม

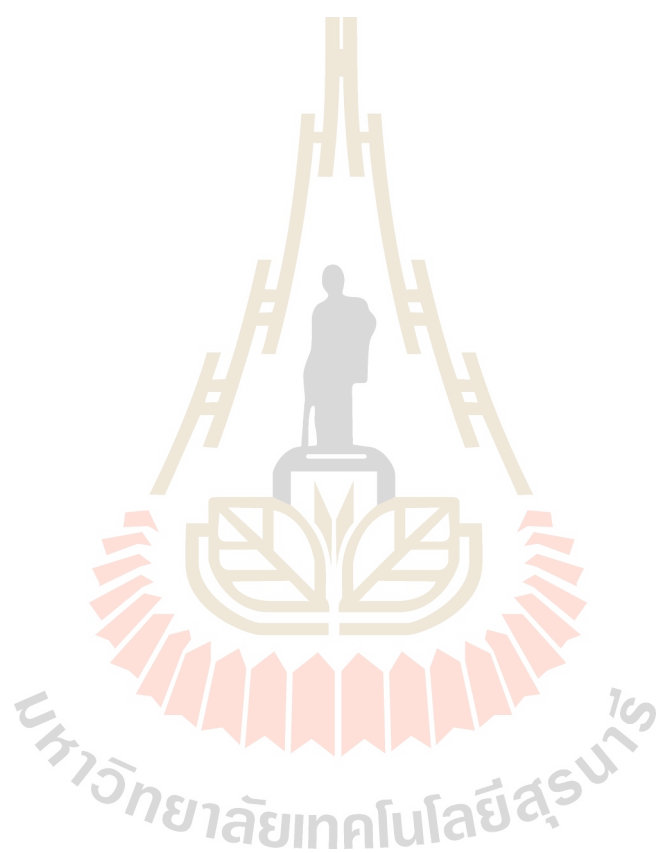
ระดับคะแนนความพอใจ

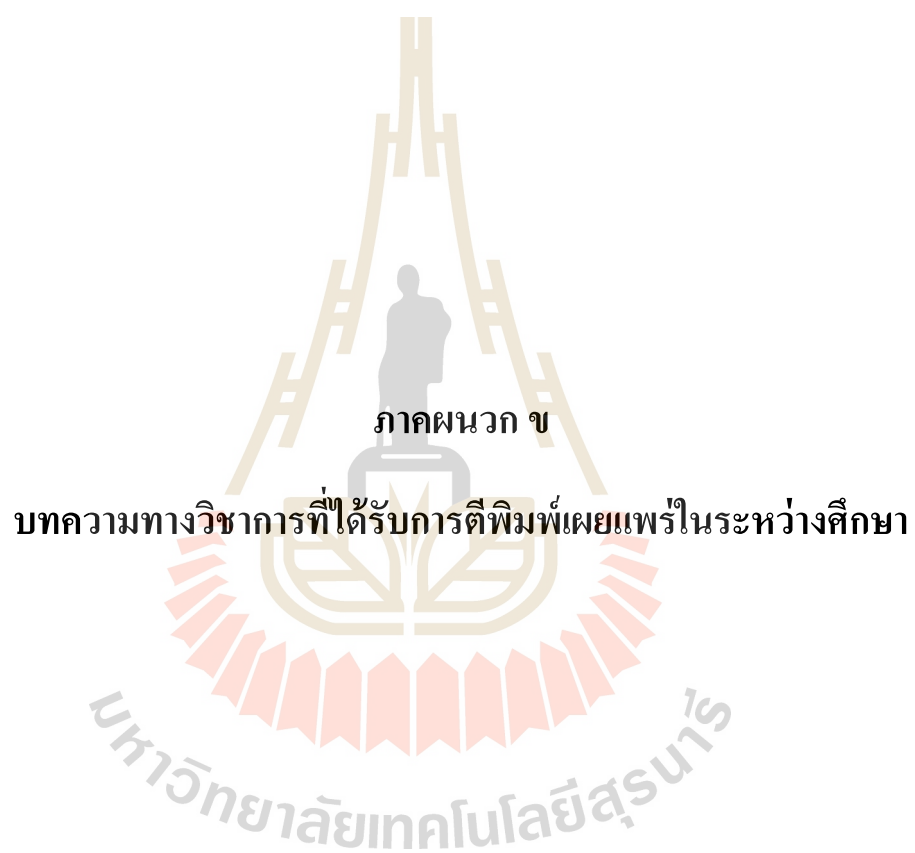
- 1 = ไม่ชอบเลย 4 = ไม่ชอบเล็กน้อย 7 = ชอบปานกลาง
 2 = ไม่ชอบมาก 5 = เฉยๆ 8 = ชอบมาก
 3 = ไม่ชอบปานกลาง 6 = ชอบเล็กน้อย 9 = ชอบมากเป็นพิเศษ

คุณลักษณะต่างๆ ของตัวอย่าง	ระดับคะแนนความพอใจ (acceptance level)				

1. ลักษณะปรากฏ (appearance) - สี
2. กลิ่นรส (flavor)
3. ความหวาน (sweetness)

4. พอใจโดยรวม (overall acceptance)
5. ความคิดเห็น เพิ่มเติม (comments)					





ภาคผนวก ข

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

1. รายชื่อบทความวิจัยเต็มรูปแบบที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ

Pornpimol Moolkaew, Tiraporn Junyusen*, Natthaporn Chatchavanthatri, Van Man Phan, and **Siriporn Sornsomboonsuk**. Microwave-assisted extraction of *Pleurotus sajor-caju* Polysaccharides and Characterization of Bioactive compound. Suranaree Journal of Science & Technology. (Article in press).

2. รายชื่อบทความวิจัยเต็มรูปแบบที่ได้รับการตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการระดับชาติ

ศิริพร สอนสมบุญสูง นุชนาฏ ทยเมฆ และธีราพร จุลยุเสน. การพัฒนาการผลิตสตาร์ชมันสำปะหลังที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์โดยใช้วิธีทางเคมีกายภาพ. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมอาหารแห่งชาติ ครั้งที่ 3 ประจำปี 2560 มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่ วันที่ 4 เมษายน 2560 หน้า 91-99

ณัฐพร ชัชวาลชาติ ธีราพร จุลยุเสน นาฏนภางค์ พามขุนทด **ศิริพร สอนสมบุญสูง** วีรชัย อัจหาญ และพยุงค์ดี จุลยุเสน. 2561. การปรับสภาพเหง้ามันสำปะหลังด้วยด่างเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายด้วยเอนไซม์. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ระดับชาติ ครั้งที่ 19 และการประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ระดับนานาชาติ ครั้งที่ 11 วันที่ 26-27 เมษายน 2561 หน้า 442-448

ธีราพร จุลยุเสน*, ณัฐพร ชัชวาลชาติ, พรพิมล มูลแก้ว, **ศิริพร สอนสมบุญสูง** และ พยุงค์ดี จุลยุเสน. ผลของปริมาณมอลโทเดกทรีนต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของชาชมพูน้ำดอกไม้มังงะสำเร็จรูป. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมอาหารแห่งชาติ ครั้งที่ 5 ประจำปี 2562 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี วันที่ 28-29 มีนาคม 2562 หน้า 45-52 (นำเสนอบทความวิจัยดีเด่นระดับชาติ)

3. รายชื่อบทความวิจัยเต็มรูปแบบที่ได้รับการตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

Sornsomboonsuk, S., Junyusen, T., Pamkhuntod, N., Chatchavanthatri, N., Moolkaew, P., and Junyusen, P. (2018). Effects of heat/moisture treatment on physicochemical and morphological characteristics of cassava starch. The 19th TSAE National Conference and

the 11th TSAE International conference, Kasetsart University, Thailand, 26-27 April 2018. Page 40-44.

Moolkaew, P., Junyusen, T., Chatchavanthatri, N., Pamkhuntod, N., **Sornsomboonsuk, S.**, and Junyusen, P. (2018). Effects of autoclave and microwave-assisted extractions of *Pleurotus sajor-caju* (Fr.) sing on polysaccharides yields and microstructural characteristics. The 19th TSAE National Conference and the 11th TSAE International conference, Kasetsart University, Thailand, 26-27 April 2018. Page 117-112.

Natthaporn Chatchavanthatri, Tiraporn Junyusen*, Weerachai Arjharn, Pormpimol Moolkaew, and **Siriporn Sornsomboonsuk**. Effects of Replacement of Sucrose by Maltitol on the Physicochemical and Sensorial Properties of Rose Apple Jam. The 10th International Conference on Food Engineering and Biotechnology (ICFEB 2019), Tokyo, Japan on March 26-29, 2019.

Siriporn Sornsomboonsuk, Tiraporn Junyusen*, Natthaporn Chatchavanthatri, Pormpimol Moolkaew, and Nadnapang Pamkhuntod. Evaluation of Physicochemical Properties of Spray Dried Bael Fruit Powder during Storage. The 10th International Conference on Food Engineering and Biotechnology (ICFEB 2019), Tokyo, Japan on March 26-29, 2019.

ประวัติผู้เขียน

นางสาวศิริพร สอนสมบูรณ์สุข เกิดเมื่อวันที่ 7 พฤษภาคม พ.ศ. 2537 ศึกษาในชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนบุญวัฒนา จังหวัดนครราชสีมา และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2559

ปี พ.ศ.2559 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

