

บทที่ 4

ผลการวิจัย

4.1 ผลของชนิดน้ำเวย์ ความร้อน และเวลาในการคงอุณหภูมิต่อสมบัติเกี่ยวกับโฟม และองค์ประกอบทางเคมีของน้ำเวย์

การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของตัวอย่างน้ำเวย์ทั้ง 2 ชนิด คือ acid whey และ sweet whey (ตารางที่ 4.1) พบว่า sweet whey มีค่าความสว่างของสี (L^*) ค่าสีแดง-เขียว (a^*) ค่าสีเหลือง-น้ำเงิน (b^*) และความหนืดมากกว่า acid whey อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 4.1 สมบัติทางกายภาพของ Acid whey และ Sweet whey

คุณสมบัติทางกายภาพ	Acid whey	Sweet whey
สี		
L^*	$26.63^a \pm 0.12$	$25.44^b \pm 1.23$
a^*	$-0.89^a \pm 0.75$	$0.11^b \pm 0.09$
b^*	$3.00^a \pm 0.20$	$3.84^b \pm 0.22$
ความหนืด (cP)	$1.72^a \pm 0.05$	$20.34^b \pm 0.54$
ความถ่วงจำเพาะ (g/ml)	$1.058^a \pm 0.001$	$1.060^a \pm 0.001$
ปริมาณของแข็งทั้งหมด (g/100ml)	$6.36^a \pm 0.06$	$6.42^a \pm 0.07$

หมายเหตุ ค่าที่แสดงในตารางเป็นค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลอง 3 ซ้ำ

a,b,c ตัวอักษรกำกับที่แตกต่างกันในแนวนอนเดียวกันแสดงความแตกต่างกันของข้อมูลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ผลการวิเคราะห์ค่าสีด้วยเครื่องวัดค่าสีพบว่าตัวอย่างน้ำเวย์มีลักษณะเป็นสีเหลืองอ่อน โดยปกติสีน้ำนมจะมีสีขาวเนื่องจากการกระจายแสงในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ โดยเม็ดไขมันขนาดเล็กสามารถกระจายแสงได้ดีกว่า แต่เมื่อมีการตกตะกอนโปรตีนและเม็ดไขมันมีการรวมตัวกันใหญ่ขึ้นก็จะลดการมองเห็นเป็นสีขาวได้น้อยลง แล้วสีเหลืองอ่อนที่สังเกตได้ก็มาจากแคโรทีนที่ละลาย

ในไขมันที่มีอยู่ในนั้น นอกจากนี้ยังมีสารประกอบพวกแซนฟิลและไรโบฟลาวินจะให้สีเหลืองเช่นเดียวกัน แต่ไรโบฟลาวินสามารถละลายน้ำได้จึงเป็นตัวที่ทำให้น้ำนมที่ปราศจากไขมันมีสีเหลืองอ่อนเกิดขึ้นได้ อย่างไรก็ตามค่าความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) และค่าปริมาณของแข็งทั้งหมด (total solid) ของน้ำเวย์ทั้งสองชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน ($p \geq 0.05$) ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำเวย์ทั้งสองชนิดมีค่าอยู่ระหว่าง 1.0587-1.0597 acid whey และ sweet whey มีค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 6.35 ± 0.06 และ 6.41 ± 0.07 (w/w) ขณะที่น้ำเวย์ทั่วไปมีค่าปริมาณของแข็งเท่ากับร้อยละ 6.35 (w/w) (นิธิยา, 2541) สมบัติทางด้านกายภาพของ acid whey และ sweet whey

ผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของ acid whey และ sweet whey พบว่า acid whey จะมีค่าความเป็นกรดสูงกว่า sweet whey ตามความคาดหมาย เนื่องจากการเตรียม acid whey มีการใช้กรด ในขั้นตอนการตกตะกอนโปรตีนที่ pH เท่ากับ pI ของโปรตีน ปริมาณโปรตีนใน acid whey ต่ำกว่าใน sweet whey อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) อย่างไรก็ตามปริมาณน้ำตาลแลคโตส และปริมาณไขมันในน้ำเวย์ทั้งสองชนิดมีค่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 สมบัติทางเคมีของ acid whey และ sweet whey

	Acid whey	Sweet whey
pH	$4.58^a \pm 0.01$	$6.23^b \pm 0.03$
Lactose (g/100 ml)	$4.72^a \pm 0.01$	$4.74^a \pm 0.01$
Protein content (g/100ml)	$0.90^a \pm 0.04$	$2.22^b \pm 0.06$
Fat content (g/100ml)	$0.24^a \pm 0.12$	$0.22^a \pm 0.09$

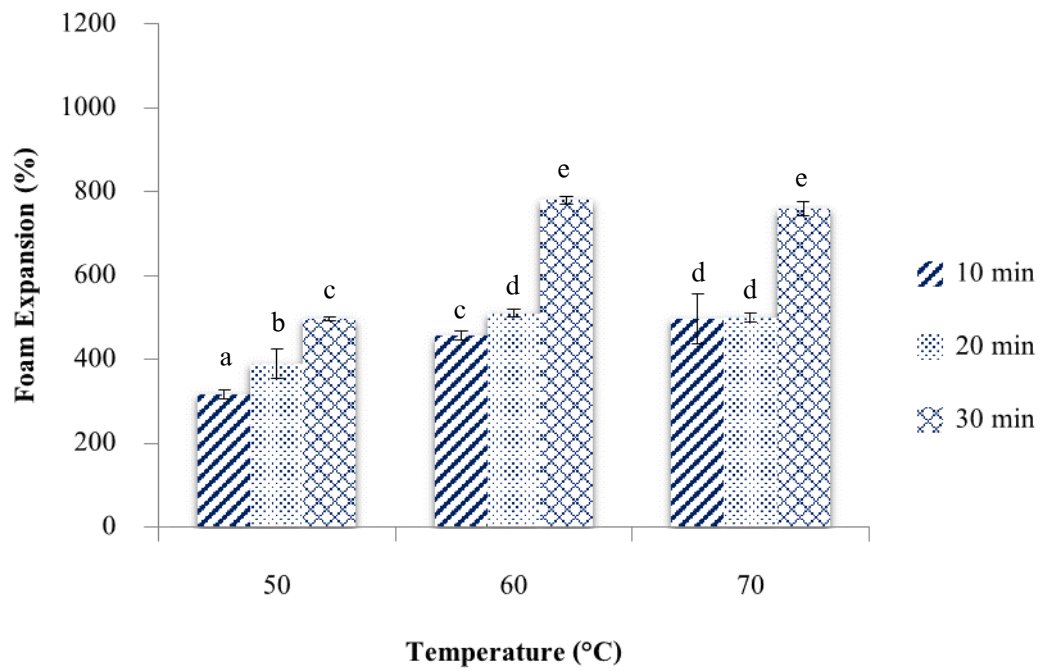
หมายเหตุ ค่าที่แสดงในตารางเป็นค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลอง 3 ซ้ำ

a,b,c ตัวอักษรกำกับที่แตกต่างกันในแนวนอนเดียวกันแสดงความแตกต่างกันของข้อมูลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

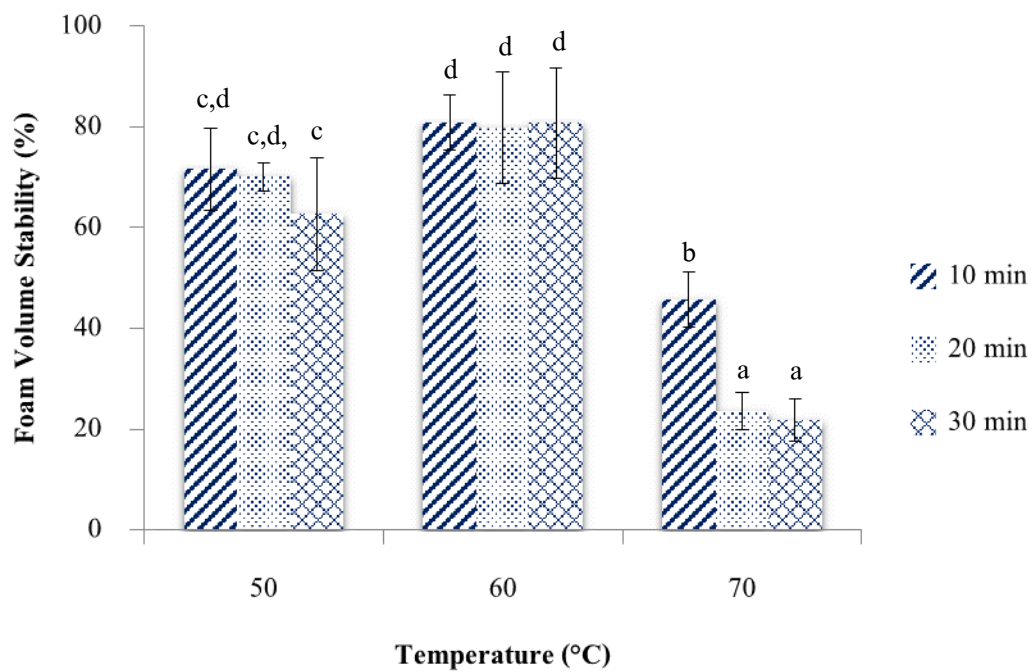
ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับการทดลองของ Irena et al. (2012) ที่ทำการศึกษาองค์ประกอบของ sweet whey ที่ตกตะกอนโดยใช้เอนไซม์เรนเนท พบว่ามีค่า pH ปริมาณน้ำตาลแลคโตส ปริมาณโปรตีน ปริมาณของแข็งทั้งหมด และปริมาณไขมันมีค่าเท่ากับ 6.12 ± 0.22 %, 4.89 ± 0.06 %, 1.71 ± 0.20 %, 5.14 ± 0.05 % และ 0.17 ± 0.05 % ตามลำดับ ในส่วนของปริมาณโปรตีนพบว่าผลที่ได้จากการทดลองมีค่าค่อนข้างมากกว่าเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์ การทดลองนี้ใช้การวิเคราะห์ตามวิธีของ Bradford ซึ่งเป็นวิธีที่อาศัยการทำปฏิกิริยา

ของโปรตีนกับสารละลายที่ใช้วิเคราะห์ แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยใช้สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (spectrophotometer) ก็จะได้ค่าของโปรตีนออกมาเทียบกับกราฟมาตรฐาน หากตัวอย่างมีความขุ่นอาจทำให้ค่าที่ได้สูงกว่าความเป็นจริง นอกจากนี้ยังมีรายงานปริมาณน้ำตาลแลคโตส ปริมาณของแข็งทั้งหมด และปริมาณโปรตีนของ sweet whey และ acid whey ว่ามีค่าเท่ากับร้อยละ 4.6-5.2, 6.3-7.0, 0.6-1.0 และ 4.4-4.6, 6.3-7.0, 0.6-0.8 ตามลำดับ สัดส่วนองค์ประกอบของ sweet whey ที่การผ่านกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส (reverse osmosis) ได้แก่ ปริมาณแลคโตส, ปริมาณโปรตีนทั้งหมด, ปริมาณไขมัน, pH, และปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 11.03, 1.91, 0.21, 5.8 และ 14.61 โดยน้ำหนักโดยมีความหนาแน่นเท่ากับ 1.057 กรัมต่อมิลลิลิตร (Gerberding and Byers, 1998) อย่างไรก็ตามการผ่านกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส อาจส่งผลต่อความเข้มข้นขององค์ประกอบต่างๆ ในน้ำเวย์ เนื่องจากนี้แล้ววิธีการเตรียมเวย์ คุณภาพของน้ำนมที่ใช้ รวมถึงวิธีวิเคราะห์ที่แตกต่างกันล้วนส่งผลต่อองค์ประกอบของน้ำเวย์ทั้งสิ้น

การศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อนแก่น้ำเวย์ทั้งสองชนิด ต่อสมบัติเกี่ยวกับโฟม ได้แก่ การขยายตัวของโฟม และความคงตัวเชิงปริมาตรของโฟม โดยการให้ความร้อนแก่น้ำเวย์ด้วยอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่มีการผันแปรอุณหภูมิ 3 ระดับ (50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 10, 20 และ 30 นาที จากนั้นนำน้ำเวย์ที่ได้รับความร้อนแต่ละสภาวะไปปั่นให้เป็นโฟมโดยเครื่องปั่นผสม (Kitchen aid) ที่ระดับสูงสุด วัดการขยายตัวของโฟมโดยการตักโฟม น้ำเวย์ที่ได้ใส่ในกระบอกตวง แล้วทำการวัดปริมาตรและจดบันทึกไว้ จากนั้นนำกระบอกตวงนี้ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที สังเกตและบันทึกปริมาตรของโฟมน้ำเวย์ที่เหลืออยู่ ผลของอุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อนแก่น้ำเวย์ที่มีต่อการขยายตัวของโฟม และความคงตัวเชิงปริมาตรของ acid และ sweet whey แสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ

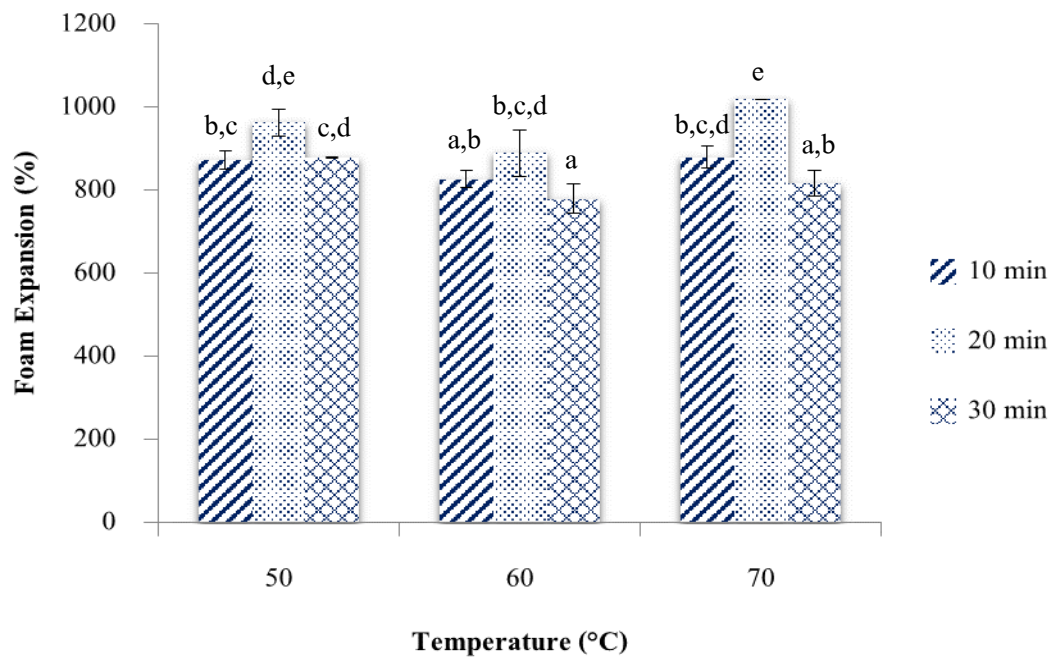


(a)

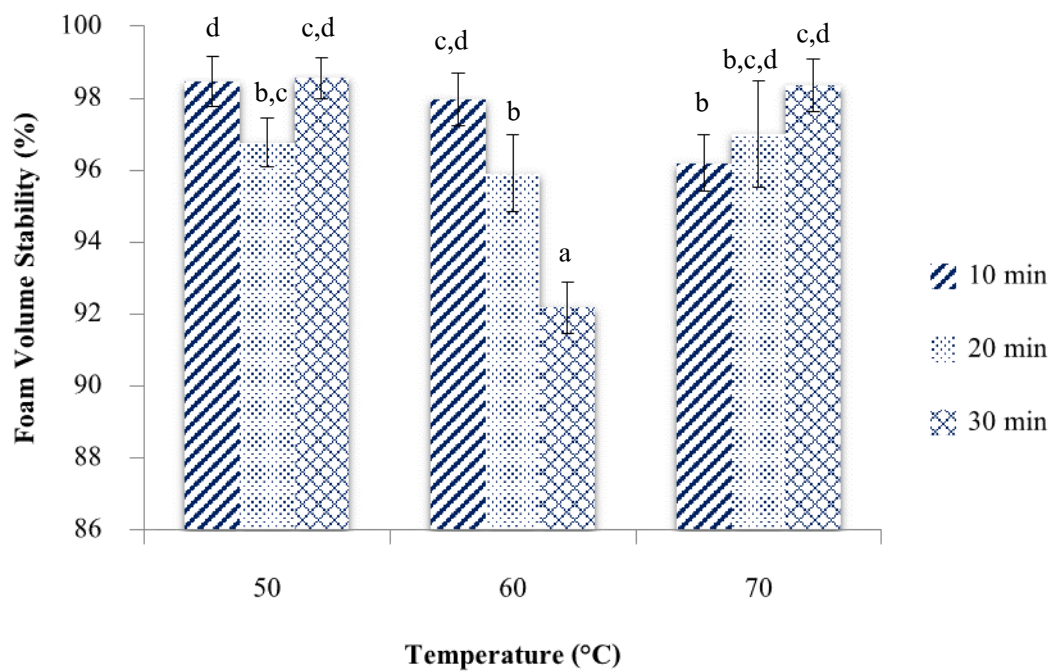


(b)

รูปที่ 4.1 ผลของอุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อนที่มีต่อ (a) Foam expansion และ (b) Foam volume stability ของ acid whey



(a)



(b)

รูปที่ 4.2 ผลของอุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อนที่มีต่อ (a) Foam expansion และ (b) Foam volume stability ของ sweet whey

ผลการศึกษาพบว่าโดยรวมแล้ว sweet whey มีสมบัติเกี่ยวกับโฟมที่ดีกว่า acid whey กล่าวคือจะมีการขยายตัวของโฟม และความคงตัวเชิงปริมาตรของโฟมที่มากกว่า acid whey อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) การเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้การขยายตัวของโฟมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นใน acid whey ในขณะที่ sweet whey อุณหภูมิมีผลต่อการขยายตัวของโฟมน้อยมาก การเพิ่มเวลาในการคงอุณหภูมิ มีแนวโน้มทำให้การขยายตัวของโฟมเพิ่มขึ้นใน acid whey ส่วนใน sweet whey ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการคงอุณหภูมิกับการขยายตัวของโฟมมีความซับซ้อน การให้ความร้อนแก่ acid และ sweet whey ที่อุณหภูมิ 60 และ 50 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จะทำให้ได้โฟมที่มีความคงตัวเชิงปริมาตรของโฟมสูงที่สุด นอกจากนี้ยังพบการมีอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อนอีกด้วย Borchertding et al. (2008) รายงานว่า ในการเตรียมโฟมของนมพร่องมันเนย (skimmed milk) พบว่าการให้ความร้อนแก่น้ำนมที่อุณหภูมิ 50-60 องศาเซลเซียสจะทำให้ได้โฟมนมที่มีขนาดเล็กและมีความเสถียรสูง นอกจากนี้ยังมีรายงานว่าโฟมของนมพร่องมันเนยที่ได้จากนมพร่องมันเนยที่ผ่านการให้ความร้อน 50 องศาเซลเซียสจะมีเสถียรมากกว่าโฟมที่ผ่านการให้ความร้อน 70 องศาเซลเซียส

Indrawati et al. (2008) ได้รายงานว่า foamability ของโปรตีนเวย์ลดลงเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น แต่ Na-caseinate ให้ผลในทางตรงข้ามกัน ซึ่งผลของความร้อนต่อความสามารถในการเกิดโฟมขึ้นกับโครงสร้างโมเลกุลของสารที่ไวต่อผิวสัมผัส (surface active) ในระบบที่สนใจศึกษา ซึ่ง Na-caseinate มีโมเลกุลที่มีความยืดหยุ่น อุณหภูมิสูงจึงไม่ส่งผลต่อโครงสร้าง ด้วยเหตุผลนี้ คุณสมบัติด้านการดูดซับ (absorb) และอัตราการดูดซับบริเวณผิวสัมผัส จึงไม่ผันแปรมากนักตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ อย่างไรก็ตามการให้ความร้อนต่อเวย์โปรตีนซึ่งเป็นโปรตีนขนาดใหญ่ ทำให้โปรตีนเกิดการคลายตัวส่งผลให้ส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ในโมเลกุลเพิ่มมากขึ้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นของผิวด้านที่ไม่ชอบน้ำจะลดพลังงานที่ใช้ในการดูดซับที่ผิวสัมผัสระหว่างของเหลวและอากาศ จึงมีผลในการปรับปรุงสมบัติเกี่ยวกับโฟมของเวย์โปรตีนได้ ถ้าการคลายตัว หรือเสียสภาพตามธรรมชาติอยู่ในระดับที่เหมาะสม (Mitchell, 1986)

การให้ความร้อนมีผลกระทบต่อโครงสร้างของเวย์โปรตีนในนมเป็นส่วนใหญ่ ในขณะที่เคซีนดูเหมือนจะได้รับการป้องกันในด้านการเสถียรภาพของซีรัมโปรตีน การให้ความร้อนแก่โปรตีนในนมก่อนที่จะเกิดอิมัลชัน พบว่าช่วยลดความสามารถของโปรตีนจากการเกิดผลึกที่หยาบเมื่อมีเวย์โปรตีนเข้าร่วมในระบบด้วย ในทางตรงกันข้ามการให้ความร้อนแก่สารละลายโซเดียมคาซีเนตในสภาพแวดล้อมที่มีการควบคุมสารเคมี จะส่งผลให้เกิดการปรับปรุงคุณสมบัติความเป็นอิมัลชันอย่างเห็นได้ชัด ในเวย์โปรตีนความร้อนมีผลกระทบต่อความคงตัวของอิมัลชัน ซึ่งอาจจะ

เกิดจากการรวมตัวเป็นหยดอันเนื่องมาจากอันตรกิริยาของโปรตีนกับโปรตีน (protein-protein interaction) ถึงแม้ความจริงที่ว่าเคซีนมีความคงตัวต่อความร้อนในอินเตอร์เฟสของ oil-in-water ระหว่างการเกิดอิมัลชัน แต่กระบวนการทางความร้อนมีผลกระทบในเชิงลบต่อระบบโปรตีนทั้งหมดเช่นกัน (Raikos, 2010) การศึกษาของ Lin et al. (2010) พบว่าระดับของเวย์โปรตีนลดลงร้อยละ 23 ในนมพาสเจอร์ไรส์ และลดลงมากกว่าร้อยละ 85 ในนม UHT เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำนมดิบ แอลฟา-แลคตัลบูมินมีความต้านทานด้านความร้อนสูงสุดประมาณร้อยละ 32 ยังคงอยู่สภาพเดิมหลังจากผ่านการให้ความร้อนที่ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลานาน 10 นาที มีการสูญเสียบีต้า-แลคโตโกลบูลินเอร้อยละ 42 และบีต้า-แลคโตโกลบูลินบีร้อยละ 53 เมื่อผ่านการให้ความร้อนนาน 75 องศาเซลเซียสเป็นเวลานาน 30 นาที นอกจากนี้ยังพบว่าบีต้า-แลคโตโกลบูลินเอและบีต้า-แลคโตโกลบูลินบีมีความคงตัวที่เอช ค่ามากกว่าที่พีเอชเป็นกลาง

การศึกษาของ Lee and Anema (2009) พบว่าลักษณะเนื้อสัมผัสที่ได้จากการผลิต cheese spread มีลักษณะแตกต่างกันเมื่อมีเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช การปรับพีเอชไปที่ 5.7 ในระบบที่มีเวย์โปรตีนจะพบการเสื่อมสภาพของเวย์โปรตีนและการเกิดอันตรกิริยาร่วมทำให้โครงสร้างโปรตีนเปลี่ยนไป ซึ่งในที่สุดจะส่งผลไปถึงการไหลของของเหลว (rheological) และลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์สุดท้าย ในตัวอย่างชีสที่ไม่มีเวย์โปรตีนเป็นองค์ประกอบ ค่าพีเอชที่เปลี่ยนไปไม่มีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของชีสที่ได้ ดังนั้นจึงมีแนวโน้มว่าผลของการปรับพีเอชส่งผลต่อสมบัติการไหลของของเหลวในชีสที่มีเวย์โปรตีนเป็นองค์ประกอบ เนื่องจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างเวย์โปรตีนกับเคซีน ภายใต้สภาพแวดล้อมที่เหมาะสม บีต้า-แลคโตโกลบูลินจะเกิดอันตรกิริยากับเคซีนส่งผลให้โปรตีนเกิดโครงสร้างตาข่ายที่แข็งแรง ส่งผลให้ชีสที่ได้มีความแน่น (firm) และมีความชื้นสูง ทั้งนี้การทดลองตกตะกอนเคซีนในนมจะส่งผลทั้งต่อเคซีนที่ตกตะกอนเพื่อนำไปทำชีสและทั้งน้ำเวย์ที่ผลิตได้ หากมีการตกตะกอนไม่สมบูรณ์ที่ pH ที่เหมาะสมก็จะทำให้น้ำเวย์ที่ได้มีค่าแตกต่างกันไป

ผลการศึกษาแสดงว่า sweet whey มีสมบัติเกี่ยวกับโฟมที่ดีกว่า acid whey ดังนั้นจึงใช้ sweet whey เป็นตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาในตอนต่อไป โดยสภาวะการเตรียม sweet whey ที่เหมาะสมเมื่อพิจารณาในแง่ของความคงตัว และพลังงานที่ใช้ในการเตรียมน้ำเวย์ คือการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที ก่อนการนำไปสร้างโฟม

4.2 ผลของปริมาณของแข็งทั้งหมด และระยะเวลาในการสร้างโฟมต่อสมบัติของโฟมน้ำเวย์

การศึกษานำตัวอย่างน้ำเวย์มาปรับปริมาณของแข็งทั้งหมด (total solid) ด้วยมอลโตเด็คซ์ตรินเพื่อให้ได้ปริมาณ total solid เริ่มต้นของน้ำเวย์ 3 ระดับ คือร้อยละ 15, 25 และ 30 โดยน้ำหนัก จากนั้นนำตัวอย่างน้ำเวย์ไปผ่านความร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที แล้วนำน้ำเวย์ที่เตรียมได้ไปสร้างโฟมโดยวิธีการตีปั่น (whipping method) โดยเครื่องปั่นผสมอาหารที่เวลาการสร้างโฟมที่ต่างกัน จากนั้นวิเคราะห์สมบัติของโฟมน้ำเวย์ในด้านความหนาแน่นของโฟม ค่าโอเวอร์รัน และความคงตัวของโฟม ได้ผลดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลของปริมาณของแข็งทั้งหมดต่อสมบัติเกี่ยวกับโฟมของน้ำเวย์ที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

	ความหนาแน่น ของโฟม (g/ml)	ค่าโอเวอร์รัน (%)	ความคงตัวของโฟม (ml/min)
% ปริมาณของแข็งทั้งหมด	***	***	***
15	0.1589 ± 0.0106 ^a	525.40 ± 29.77 ^c	0.74 ± 0.22 ^b
25	0.1943 ± 0.0228 ^b	396.51 ± 63.34 ^b	0.39 ± 0.10 ^a
30	0.2718 ± 0.0162 ^c	282.82 ± 16.43 ^a	0.32 ± 0.04 ^a
เวลาในการตีปั่น	***	***	NS
10	0.2146 ± 0.0472 ^b	384.63 ± 97.47 ^b	0.45 ± 0.08
20	0.2136 ± 0.0541 ^b	384.72 ± 110.70 ^b	0.52 ± 0.31
30	0.1968 ± 0.0549 ^a	435.39 ± 120.92 ^a	0.48 ± 0.27
อันตรกิริยาระหว่าง			
% ปริมาณของแข็งทั้งหมด	NS	NS	***
และเวลาในการตีปั่น			

หมายเหตุ ค่าที่แสดงในตารางเป็นค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลอง 3 ซ้ำ

NS แสดงความไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$)

a,b,c ตัวอักษรกำกับที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแสดงความแตกต่างกันของข้อมูลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ร้อยละการปรับปริมาณของแข็งพิจารณาจากปริมาณที่มีการใช้ในการทำแห้งแบบ โฟมแมทในผลิตภัณฑ์อาหารโดยส่วนใหญ่ที่ร้อยละ 25 โดยน้ำหนักทั้งนี้ขึ้นกับวัตถุดิบแต่ละชนิด จึงมีการแปรผันปริมาณของแข็งทั้งหมดในสารละลายน้ำเวย์ จากการทดลอง พบว่าการปรับปริมาณ ของแข็งทั้งหมดด้วยมอลโตเด็กซ์ทรินมีผลต่อความหนาแน่นของโฟม ค่าโอเวอร์รัน และความ คงตัวของโฟมน้ำเวย์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยเมื่อปริมาณของมอลโตเด็กซ์ทรินเพิ่ม มากขึ้นทำให้ค่าความหนืดของส่วนผสมมีค่ามากขึ้น ส่งผลให้ค่าความคงตัวของโฟมเพิ่มมากขึ้น ด้วย ในทางกลับกันความข้นหนืดของส่วนผสมจะทำให้การแทรกตัวของฟองอากาศเกิดขึ้นได้น้อย ในระหว่างการตีปั่นเพื่อสร้างโฟมจึงทำให้โอเวอร์รันมีค่าลดลง ส่งผลให้ปริมาณฟองอากาศที่ ทำหน้าที่เป็นฉนวนความร้อนในโครงสร้างโฟมลดลง ความคงตัวของโฟมจึงลดลง ส่งผลให้ ค่าความคงตัวของโฟมลดลง ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับการทดลองของคัมเกล้า (2552) ที่ รายงานผลของการแปรผันมอลโตเด็กซ์ทรินในน้ำกระเทียมดองสูตรหวานที่ระยะการดอง 2 เดือน ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณมอลโตเด็กซ์ทริน จะส่งผลให้น้ำกระเทียมดองมีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้น ค่า โอเวอร์รันและอัตราการแยกตัวของของเหลว (มิลลิลิตรต่อนาที) มีค่าลดลงด้วย Bikerman (1973) รายงานว่า การเพิ่มความหนืดสามารถเพิ่มได้จนถึงค่าที่เหมาะสมค่าหนึ่งเท่านั้น ถ้าค่าความหนืดสูง มากเกินไปจะไปขัดขวางการกักเก็บอากาศในขณะที่ตีโฟม ทำให้ค่าโอเวอร์รันลดลง บ่งบอกถึงการ กักเก็บอากาศที่ลดลงส่งผลให้ความหนาแน่นของโฟมมากขึ้น

ระยะเวลาในการตีปั่นส่งผลต่อความหนาแน่นของโฟม และค่าโอเวอร์รันอย่างมี นัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อใช้เวลาในการตีปั่นเพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนาแน่นของโฟมมีค่า ลดลง และมีค่าโอเวอร์รันเพิ่มขึ้นกว่าที่เวลาในการตีปั่นน้อยๆ ซึ่งการตีปั่นที่เวลานานขึ้นจะทำให้ เกิดการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างน้ำ และอากาศได้มากขึ้นทำให้สามารถเกิดโฟมที่มีขนาดเล็กลง เร็วๆ มีจำนวนฟองอากาศขนาดเล็กมากขึ้น ส่วนความคงตัวของโฟมในแต่ละเวลาที่ใช้ในการตีปั่น มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) นอกจากนี้ยังพบอันตรกิริยาระหว่างปริมาณ ของแข็งทั้งหมดและเวลาในการตีปั่น ที่มีต่อความคงตัวของโฟม

ผลจากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าสภาวะที่เหมาะสมในการสร้างโฟมน้ำเวย์ที่มีสมบัติ เกี่ยวกับโฟมที่ดี คือ การปรับปริมาณของแข็งในน้ำเวย์ด้วยมอลโตเด็กซ์ทรินให้ได้ร้อยละ 25 เนื่องจากให้โฟมที่มีความคงตัวไม่ต่างจากค่าสูงสุด (ปริมาณของแข็งร้อยละ 25) แต่มีค่าโอเวอร์รัน มากกว่า ($p < 0.05$) และใช้เวลาในการตีปั่นนาน 30 นาที เนื่องจากจะได้โฟมที่มีการขึ้นฟูสูงสุด และ มีความคงตัวไม่ต่างจากการตีปั่นที่ระยะเวลาอื่นๆ

4.3 ผลของสารก่อโฟมต่อสมบัติของโฟมน้ำเวย์

เตรียมส่วนผสมน้ำเวย์ตามสภาวะที่ทำให้คุณสมบัติเกี่ยวกับโฟมของน้ำเวย์ดีที่สุด จากการศึกษาตอนที่ 4.2 มาเติมสารก่อโฟม (foaming agent) 3 ชนิดคือ เมโธเซล กลีเซอรอลโมโนสเตียเรต (GMS) และสารผสมระหว่าง GMS และเมโธเซลที่ระดับความเข้มข้นของสารก่อโฟมแต่ละชนิด 3 ระดับ (ร้อยละ 0.5, 1.5 และ 3.0 โดยน้ำหนัก) นำส่วนผสมไปตีให้เกิดโฟมที่ความเร็วสูงสุดเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำตัวอย่างโฟมน้ำเวย์มาทำการวัดค่าความหนาแน่นของโฟม ค่าโอเวอร์รัน และค่าความคงตัวของโฟมเช่นเดียวกับการศึกษาในตอนที่ 4.2 ได้ผลดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลของชนิดและปริมาณของสารก่อโฟมต่อสมบัติของโฟมน้ำเวย์

ชนิดของสารก่อโฟม	ร้อยละสารก่อโฟม	ความหนาแน่นของโฟม (g/ml)	ค่าโอเวอร์รัน (%)	Foam stability (ml/min)
GMS	0.5	ND	ND	ND
	1.5	ND	ND	ND
	3.0	ND	ND	ND
Methocel		NS	***	NS
GMS + Methocel	0.5	0.1464 ± 0.0023	598.66 ± 8.82 ^{c,d}	0.1632 ± 0.0098
	1.5	0.1364 ± 0.0034	642.03 ± 22.16 ^d	0.1314 ± 0.0088
	3.0	0.1552 ± 0.0023	559.88 ± 19.30 ^c	0.1369 ± 0.0036
		***	***	***
GMS + Methocel	0.5	0.2327 ± 0.0135 ^b	328.09 ± 28.81 ^b	1.4878 ± 0.3849 ^c
	1.5	0.2655 ± 0.0332 ^b	280.31 ± 44.25 ^b	0.3358 ± 0.0582 ^{a,b}
	3.0	0.4564 ± 0.0702 ^c	208.40 ± 28.83 ^a	0.5389 ± 0.0674 ^b

หมายเหตุ ค่าที่แสดงในตารางเป็นค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลอง 3 ซ้ำ

NS แสดงความไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$)

ND หมายถึง ไม่สามารถวัดได้เนื่องจากไม่เกิดโฟม

a,b,c ตัวอักษรกำกับที่แตกต่างกันในแนวนอนเดียวกันแสดงความแตกต่างกันของข้อมูลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ผลการศึกษาพบว่าการใช้ GMS ไม่ก่อให้เกิดโฟม ทุกระดับความเข้มข้นที่ใช้ในการศึกษา ทั้งนี้เนื่องจาก GMS มีลักษณะเป็นไข ละลายน้ำยาก ซึ่งจะไปขัดขวางการเกิดอันตรกิริยาระหว่างน้ำกับอากาศ เมื่อนำมาเติมลงไปในการละลายน้ำแล้วนำไปตีปั่นทำให้เกิดฟองน้อยมาก เมื่อหยุดการตีปั่นฟองนั้นจะยุบตัวลงอย่างรวดเร็วจนไม่สามารถนำมาวัดคุณสมบัติด้านต่างๆ ของโฟมได้เลย ทั้งนี้เนื่องจาก GMS มีสมบัติการเป็นอิมัลซิไฟเออร์จึงอาจขัดขวางการเกิดโฟมได้ โดยจะไปขัดขวางการเกิดอันตรกิริยาระหว่างน้ำและอากาศได้ การใช้เมโซเซล และสารผสมระหว่าง GMS และเมโซเซลเป็นสารก่อฟอง พบว่าสามารถทำให้เกิดโฟมที่มีความเสถียรได้ ความเข้มข้นของเมโซเซลมีผลต่อค่าโอเวอร์รันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) แต่ไม่มีผลต่อค่าความหนาแน่นของโฟม และความคงตัวของโฟม ส่วนปริมาณความเข้มข้นของสารก่อโฟมผสมมีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ต่อทั้งค่าความหนาแน่นของโฟม ค่าโอเวอร์รัน และค่าความคงตัวของโฟม โดยภาพรวมแล้วเมโซเซลจะทำให้ได้โฟมที่มีการขึ้นฟู และความคงตัวมากกว่าโฟมที่ได้จากสารก่อโฟมผสม อย่างไรก็ตามสารก่อโฟมผสมจะทำให้ได้โฟมที่มีความหนาแน่นสูงกว่าโฟมจากเมโซเซล

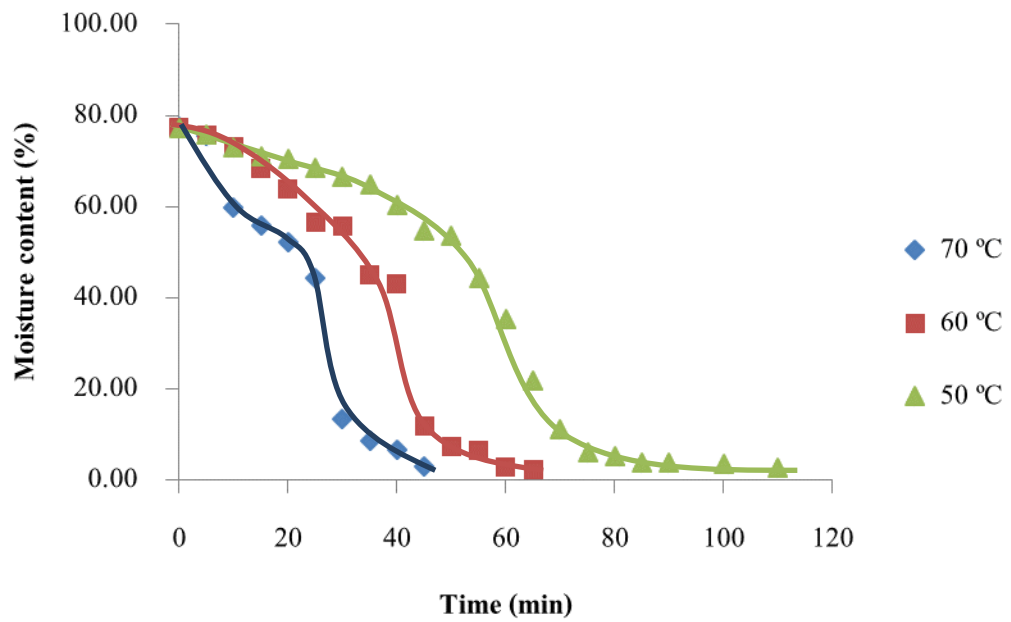
คัมเกล้า (2552) รายงานว่าโฟมน้ำกระเทียมแดงที่มีการเติมโมโนกลีเซอไรด์และโปรตีนถั่วเหลืองจะเกิดการยุบตัวเร็ว และเกิดการแยกตัวของของเหลวมากกว่าโฟมของเมทโซเซล สอดคล้องกับการทดลองของ Brygidyr et al. (1977) ซึ่งใช้สารผสมของโมโนและไดกลีเซอไรด์เป็นสารก่อให้เกิดโฟมในน้ำมะเขือเทศตีปั่นพบว่าโฟมที่ได้จะยุบตัวเร็ว นอกจากนี้โมโนกลีเซอไรด์มีลักษณะเป็นไขละลายน้ำยากจึงไม่เหมาะสำหรับผลิตภัณฑ์ออบแห้งแบบโฟมเมทที่เมื่อนำมาคั้นตัวแล้วทำให้ผลิตภัณฑ์ละลายน้ำไม่ดี การใช้เมโซเซลจะทำให้ได้ค่าโอเวอร์รันสูงสุด โดยการเติมเมโซเซลที่ร้อยละ 1.5 จะให้ค่าโอเวอร์รันสูงสุดเท่ากับร้อยละ 642.03 ± 30.42 เช่นเดียวกับการศึกษาของ Karim and Wai (1999) ที่พบว่าในการใช้เมโซเซลในการทำแห้งน้ำมะเฟืองโดยวิธีการการอบแห้งแบบโฟมเมท เมื่อเพิ่มปริมาณเมโซเซลมากขึ้นจะทำให้ค่าโอเวอร์รันเพิ่มมากขึ้นด้วย แต่ถ้าเติมในปริมาณที่มากเกินไประดับที่เหมาะสมก็จะทำให้ค่าโอเวอร์รันลดลงได้ โดยการเติมที่ร้อยละ 0.4 จะให้ค่าโอเวอร์รันสูงสุด โดยค่าโอเวอร์รันที่สูงมีบ่งชี้ว่าโฟมสามารถเก็บกักอากาศไว้ได้และทำให้ความหนาแน่นของโฟมลดลงได้ อย่างไรก็ตามการศึกษาของ Brygidyr et al. (1977) สำหรับการทำให้แห้งเนื้อมะเขือเทศปั่นและ Labelle (1996) สำหรับการทำให้แห้งน้ำส้มคั้น พบว่าโฟมของน้ำผักและน้ำผลไม้ที่ศึกษาจะยุบตัวเร็วขึ้นเมื่อมีการเติมสารก่อโฟมในปริมาณมากขึ้น นอกจากนี้แล้วยังมีงานวิจัยที่ใช้ GMS เมโซเซล และสารผสมระหว่างโมโนกลีเซอไรด์และไดกลีเซอไรด์เป็นสารก่อโฟม (Labelle, 1996; Brygidyr et al., 1977)

จากคุณสมบัติที่ดีในการเป็นสารก่อโฟมของเมโซเซล การศึกษาในตอนต่อไปจึงใช้เมโซเซลเป็นสารก่อโฟมโดยทำการเติมในระดับการเติมร้อยละ 1.5

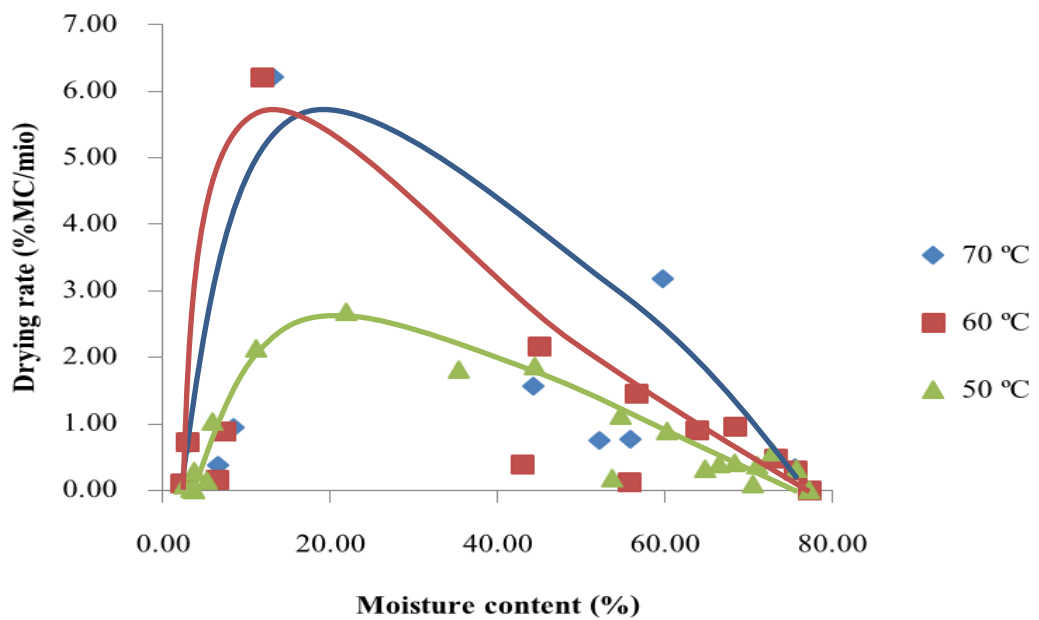
4.4 ผลของวิธีการทำแห้งต่อลักษณะการทำแห้ง และสมบัติของเวย์โปรตีนผง

เตรียมตัวอย่างโฟมน้ำเวย์ตามสภาวะที่เหมาะสมจากผลการศึกษาในตอนต้นที่ 4.3 แล้วนำไปทำแห้งในตู้อบ 2 ชนิด เพื่อให้ได้ ปริมาณความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์เท่ากับ 0.03 kg/kg (dry basis) ตามสภาวะดังนี้ ตู้อบลมร้อน โดยแปรผันอุณหภูมิที่ใช้ในการอบ คือ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียสโดยใช้ความเร็วลม (superficial air velocity) 0.5 เมตรต่อวินาที และตู้อบไมโครเวฟโดยผันแปรกำลังไฟฟ้า 3 ระดับ คือ 640, 720 และ 800 วัตต์

การทำแห้งโดยใช้ตู้อบลมร้อนจะนำโฟมที่ได้จากการตีปั่นใส่ลงในถุง แล้วบีบเป็นเส้นบนตะแกรงโดยมีตาครอบด้านล่างตะแกรง จากนั้นนำไปใส่ตู้อบลมร้อนที่มีการตั้งอุณหภูมิที่กำหนด บันทึกการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นทุก 5 นาที นำข้อมูลที่ได้มาสร้างเส้นโค้งการอบแห้ง (drying curve) และเส้น โค้งอัตราการอบแห้ง (drying rate curve) ได้ผลดังรูปที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ

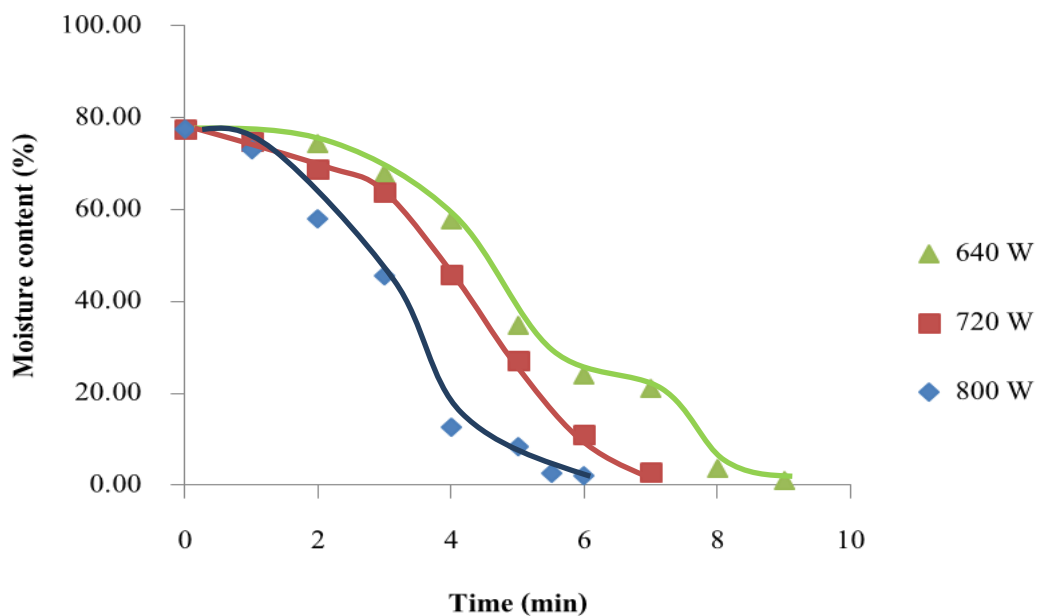


รูปที่ 4.3 เส้นโค้งการอบแห้งโดยใช้ตู้อบลมร้อนอุณหภูมิ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส

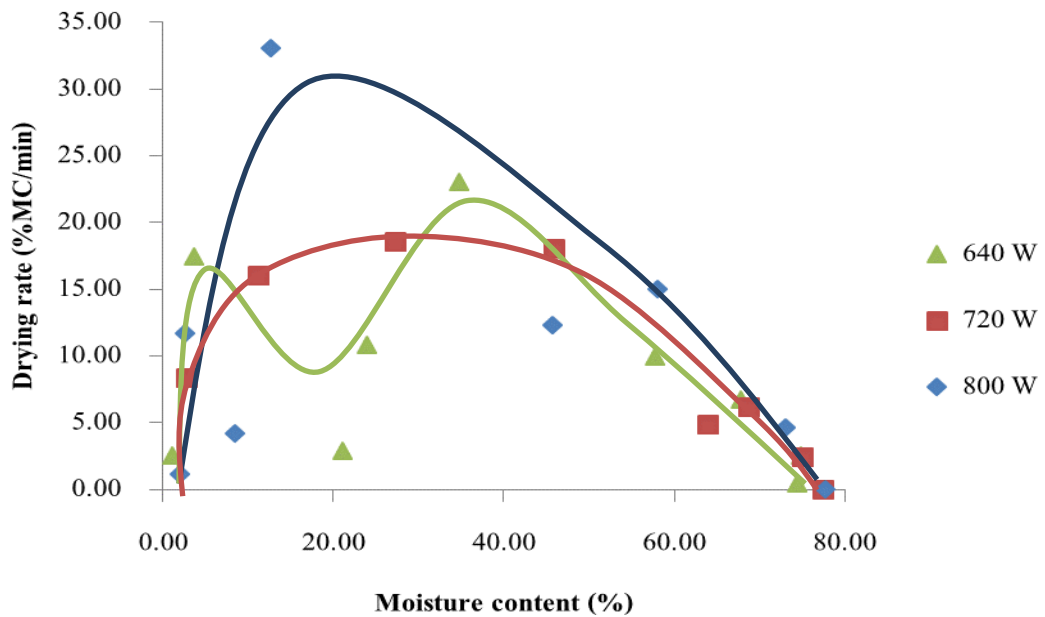


รูปที่ 4.4 เส้นโค้งอัตราการอบแห้งโดยใช้ตู้อบลมร้อนอุณหภูมิ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส

การทำแห้งโดยใช้ตู้อบไมโครเวฟมีขั้นตอนทำในลักษณะเดียวกัน โดยเมื่อหลังผ่านการ ตีปั่นแล้วนำมาบีบบนตะแกรง บันทึกการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นทุก 1 นาที โดยเมื่อเวลา การทำแห้งผ่านไป 2 นาทีให้นำถาดรองซึ่งจะมีน้ำที่กลั่นตัวออกจากโพนน้ำเวย์ออกมา กรณีที่มีการ อบแห้งที่มากกว่า 2 นาที เพราะหากไม่นำถาดรองนี้ออกจะทำให้เวย์ที่ติดอยู่บนตะแกรงไม่แห้ง เนื่องจากความชื้นในตู้อบนั้นมีค่าสูงทำให้เวย์ไม่แห้ง และชูดออกจากตะแกรงไม่ได้ เช่นเดียวกันกับ กรณีที่ใช้ตู้อบลมร้อนทำการเปลี่ยนถาดรองข้างล่างเมื่อเวลาการอบผ่านไปครึ่งหนึ่งของเวลาการอบ ทั้งหมด เพื่อลดความชื้นในตู้อบลง เนื่องจากน้ำที่กลั่นตัวออกมามีปริมาณค่อนข้างมาก เส้นโค้งการ อบแห้งและเส้นโค้งอัตราการอบแห้งโดยใช้ตู้อบไมโครเวฟแสดงดังรูปที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ



รูปที่ 4.5 เส้นโค้งการอบแห้งโดยใช้ตู้อบไมโครเวฟที่ กำลังไฟฟ้า 640, 720 และ 800 วัตต์



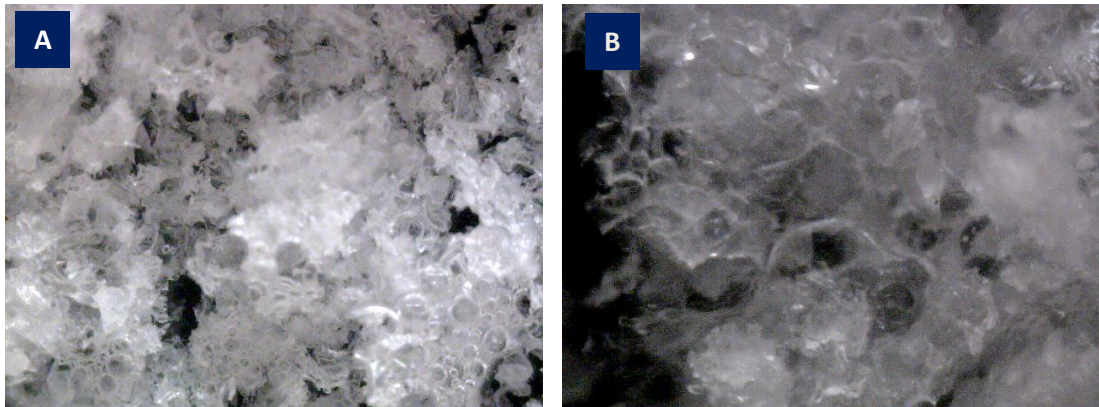
รูปที่ 4.6 เส้นโค้งอัตราการอบแห้งโดยใช้ตู้อบไมโครเวฟที่ กำลังไฟฟ้า 640, 720 และ 800 วัตต์

จากเส้นโค้งการอบแห้งข้างต้นพบว่า การใช้ตู้อบลมร้อนจะใช้เวลาในการทำแห้งนานกว่าการใช้ตู้อบไมโครเวฟมาก โดยที่การใช้อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นอุณหภูมิสูงสุดใช้เวลาการทำแห้งนานถึง 45 นาที ในขณะที่การใช้อุณหภูมิ 60 และ 50 องศาเซลเซียสจะใช้เวลาการอบแห้งนาน 60 และ 110 นาทีตามลำดับ เมื่อเทียบกับการใช้ตู้อบไมโครเวฟที่ กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์ (100%) ซึ่งเป็นกำลังไฟฟ้าสูงสุดใช้เวลาในการอบแห้งเพียง 6 นาที และที่ กำลังไฟฟ้า 720 (90%) และ 640 (80%) วัตต์ใช้เวลาในการอบแห้งนาน 7 และ 9 นาทีตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการทำแห้งโดยใช้ตู้อบไมโครเวฟใช้เวลาน้อยกว่าการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนมาก ทั้งนี้เนื่องจากการอบในตู้อบไมโครเวฟนั้นความร้อนถูกสร้างขึ้นภายในอาหาร เนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างอาหารกับสนามไมโครเวฟ จึงมีความต้านทานต่อการถ่ายเทความร้อนต่ำกว่าการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อาศัยกลไกการถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกลางจึงมีความต้านทานสูงกว่า ดังนั้นการทำแห้งโดยใช้ไมโครเวฟจึงมีประสิทธิภาพในการทำงานที่ดี การควบคุมทำได้ง่ายแม่นยำ และสามารถปรับปรุงแก้ไขคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์สุดท้ายได้ (Summu, 2001, Methakhup et al., 2005) Arslan and Ozcan (2010) ทำการศึกษาเปรียบเทียบการทำแห้งโดยใช้แสงแดด ตู้อบลมร้อน และตู้อบไมโครเวฟพบว่า การใช้อุณหภูมิสูง และกำลังไฟฟ้าสูงจะทำให้ปริมาณความชื้นในอาหารลดลงได้เร็วกว่าการทำแห้งที่ใช้ อุณหภูมิ และกำลังไฟฟ้าต่ำ นอกจากนี้ยังใช้เวลาในการทำแห้งน้อยกว่า Wu and Mao (2008) ทำการการศึกษาการใช้ไมโครเวฟในการทำแห้งเนื้อปลาการ์ป (grass carp

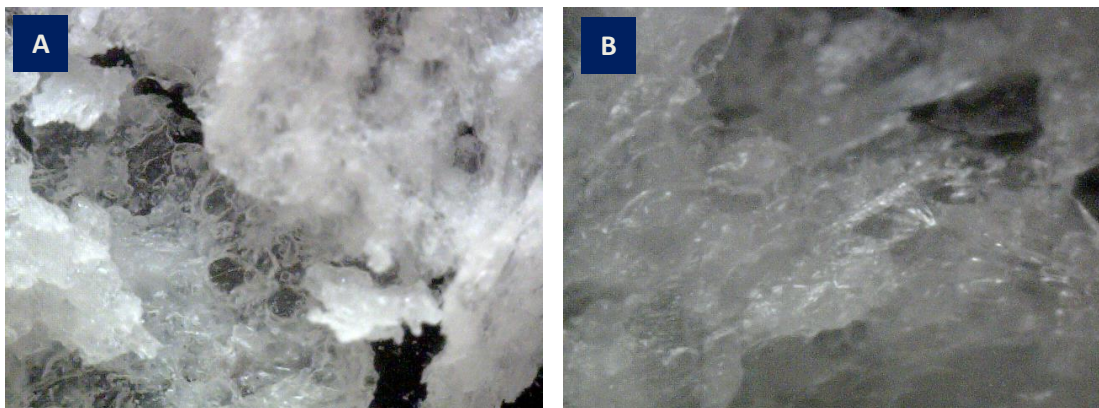
fillets) โดยแต่ให้มีความหนาประมาณ 2 เซนติเมตร จากนั้นนำไปทำแห้งในตู้อบไมโครเวฟที่ความถี่ 2450 MHz ใช้กำลังไฟฟ้า 400 วัตต์ จนกระทั่งมีความชื้นสุดท้ายร้อยละ 20 โดยน้ำหนักแห้ง พบว่าใช้เวลาเพียง 8 นาที เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส พบว่าต้องใช้เวลาการอบแห้งนานถึง 90 นาที

เส้นโค้งอัตราการอบแห้งแสดงให้เห็นชัดเจนถึงอัตราเร็วของการอบแห้งทั้งสองวิธีที่ระดับความชื้นต่างๆ อุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งโดยตู้อบลมร้อนส่งผลต่อลักษณะการทำแห้ง เช่นเดียวกับกำลังงานที่ใช้ในตู้อบไมโครเวฟ อย่างไรก็ตามอัตราการอบแห้งที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วงที่ปริมาณความชื้นในตัวอย่งยังสูงอยู่ในกรณีของตู้อบลมร้อน จะมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน ในขณะที่อัตราเร็วการทำแห้งเมื่อใช้กำลังงานไมโครเวฟระดับต่างๆ ในช่วงดังกล่าว มีค่าไม่ต่างกันมากนัก ในการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนนั้นอัตราการอบแห้งสูงในช่วงสั้นๆ เท่านั้นในช่วงปริมาณความชื้น 60% ที่อุณหภูมิ 60 และ 70 องศาเซลเซียส แต่ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสมีอัตราการอบแห้งที่ต่ำ และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย จากรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าอัตราการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสช้ากว่าที่อุณหภูมิ 60 และ 70 องศาเซลเซียส เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ต่ำกว่า จึงทำให้มีอัตราการระเหยของน้ำที่ต่ำกว่านั่นเอง การใช้ตู้อบไมโครเวฟจะมีอัตราการอบแห้งสูงที่ปริมาณความชื้นระหว่าง 10-50% ที่กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์มีอัตราการอบแห้งสูงที่สุด รองลงมาคือที่ กำลังไฟฟ้า 720 วัตต์ ซึ่งจะมีลักษณะคงที่ในช่วงปริมาณความชื้นร้อยละ 10-50 แต่ที่น่าสนใจคือที่ กำลังไฟฟ้า 640 วัตต์ หลังจากอัตราการอบแห้งที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในช่วงที่มีปริมาณความชื้นร้อยละ 30 มีแนวโน้มลดลงของอัตราการอบแห้ง ซึ่งเป็นผลมาจากกำลังไฟฟ้าที่ไม่สูงมาก ในช่วงนี้ความชื้นของโพนน้ำเวทย์ลดลงจนมีปริมาณความชื้นประมาณร้อยละ 20 ซึ่งมีความชื้นไม่สูงมากนัก และมีลักษณะเป็นแผ่นที่มีผิวหน้าค่อนข้างแข็ง แต่ข้างในจะเหนียว และเมื่อได้รับความร้อนต่อไปผิวนอกก็จะแห้งแข็ง แต่ข้างในยังมีความชื้นอยู่ จึงทำให้เกิดการระเหยของน้ำได้ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากการระเหยของน้ำช้ากว่าการใช้ตู้อบไมโครเวฟ

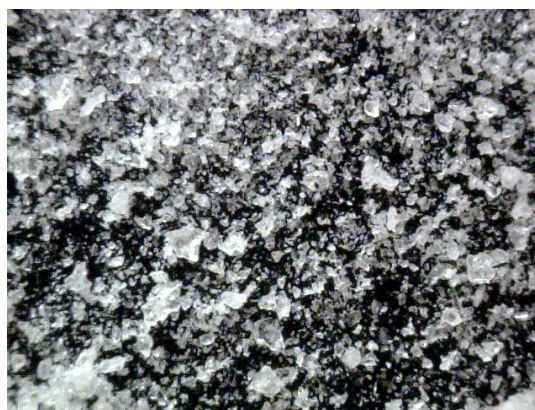
ลักษณะผลึกของเวย์โปรตีนหลังทำแห้งด้วยตู้อบลมร้อน และตู้อบไมโครเวฟ แสดงในรูปที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ ส่วนลักษณะของผงเวย์โปรตีนที่ผ่านการบดแล้วแสดงในรูปที่ 4.9 โดยภาพทั้งหมดถ่ายโดยใช้ Dino-lite Microscope



รูปที่ 4.7 ผลึกของเวย์โปรตีนหลังจากอบด้วยตู้อบลมร้อน (A) กำลังขยาย 60 เท่า และ (B) กำลังขยาย 190 เท่า



รูปที่ 4.8 ผลึกของเวย์โปรตีนหลังจากอบด้วยตู้อบไมโครเวฟ (A) กำลังขยาย 60 เท่า และ (B) กำลังขยาย 190 เท่า



รูปที่ 4.9 พงเวย์โปรตีนหลังการอบที่ กำลังขยาย 60 เท่า

ผลึกของเวย์โปรตีนจากการทำแห้งทั้งสองวิธีมีลักษณะพรุณ ประกอบด้วยรูหรือโพรงอากาศเนื่องจากในระหว่างการทำแห้งจะมีการระเหยของน้ำออกจากโพนน้ำเวย์ ความร้อนจะทำให้มีการขับน้ำออกจากโพนการทำแห้งโดยใช้ตู้อบลมร้อน ดังรูปที่ 4.7 (A) ที่กำลังขยาย 60 เท่าจะเห็นรูอากาศขนาดเล็กกระจายอย่างสม่ำเสมอทั่วผลึกของเวย์โปรตีน และที่กำลังขยาย 190 เท่า (รูปที่ 4.7 (B)) จะเห็นลักษณะของรูอากาศชัดเจนขึ้นว่ามีขนาดใกล้เคียงกันกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ทั้งนี้เนื่องมาจากการทำแห้งที่ช้า น้ำค่อยๆ ระเหยไปเมื่อเทียบกับการทำแห้งโดยใช้ไมโครเวฟที่มีการระเหยของน้ำค่อนข้างรวดเร็วในเวลาไม่ถึง 10 นาที จากรูป 4.8 (A) จะเห็นว่าจำนวนรูปอากาศจะไม่กระจายสม่ำเสมอทั่วผลึกของเวย์โปรตีน มีขนาดรูที่มีขนาดใหญ่ และเมื่อพิจารณารูปที่ 4.8 (B) จะเห็นว่าขนาดรูอากาศจะไม่ชัดเจนเท่าการทำแห้งโดยใช้ตู้อบลมร้อน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการทำแห้งโดยใช้ไมโครเวฟจะใช้เวลาน้อย การทำแห้งรวดเร็ว เนื่องจากความไม่สม่ำเสมอในการกระจายพลังงานในตู้อบลมไมโครเวฟ ตัวอย่างที่วางบริเวณกลางตู้อบอาจได้รับพลังงานมากกว่าจึงทำให้ตัวอย่างที่วางอยู่บริเวณตรงกลางแห้งเร็วกว่าตัวอย่างที่วางอยู่บริเวณห่างจากจุดศูนย์กลางตู้อบ อีกทั้งยังสังเกตเห็นสีของผลึกเวย์โปรตีนตรงกลางจะมีสีน้ำตาลอ่อน เนื่องจากการได้รับความร้อนมากกว่าจุดอื่นๆ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ผลึกของเวย์มีขนาดของรูอากาศที่ไม่สม่ำเสมอ เมื่อนำผลึกของเวย์โปรตีนหลังการอบแห้งมาบดให้ละเอียดจะมีลักษณะเป็นผงสีขาวอมเหลืองดังรูปที่ 4.9

ตารางที่ 4.5 สมบัติทางกายภาพของเวย์โปรตีนผงที่เตรียมจากการทำแห้งโดยใช้ตู้อบลมร้อน และตู้อบไมโครเวฟ เปรียบเทียบกับเวย์โปรตีนผงที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์

	ผลผลิต	pH	L*	ค่าสี	
	(g)			a*	b*
เชิงพาณิชย์	-	6.20 ^a ± 0.00	82.00 ^a ± 0.12	1.97 ^a ± 0.01	24.27 ^a ± 0.21
ลมร้อน					
50 °C	5.16 ^a ± 0.40	6.59 ^c ± 0.00	85.61 ^{b,c} ± 0.01	-0.85 ^b ± 0.01	4.63 ^c ± 0.01
60 °C	5.40 ^a ± 0.52	6.59 ^c ± 0.00	84.97 ^b ± 0.95	-0.76 ^c ± 0.04	4.73 ^c ± 0.33
70 °C	5.11 ^a ± 0.33	6.59 ^c ± 0.01	84.99 ^b ± 0.00	-0.76 ^c ± 0.01	4.52 ^c ± 0.01
ไมโครเวฟ					
640 W	6.34 ^b ± 0.07	6.57 ^b ± 0.01	86.57 ^c ± 0.31	-0.87 ^b ± 0.03	5.50 ^b ± 0.05
720 W	5.77 ^{a,b} ± 0.35	6.57 ^d ± 0.01	85.24 ^c ± 0.58	-0.86 ^b ± 0.01	5.53 ^b ± 0.05
800 W	5.33 ^a ± 0.22	6.58 ^b ± 0.01	86.00 ^{b,c} ± 0.87	-0.88 ^b ± 0.01	5.49 ^b ± 0.03

หมายเหตุ ค่าที่แสดงในตารางเป็นค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลอง 3 ซ้ำ

a,b,c ตัวอักษรกำกับที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแสดงความแตกต่างกันของข้อมูลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

การวิเคราะห์คุณสมบัติของเวย์โปรตีนผงที่เตรียมได้ เปรียบเทียบกับเวย์โปรตีนผงที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์ ได้ผลดังตารางที่ 4.5 พบว่า ปริมาณผลผลิตที่ได้ (yield) จากวิธีการเตรียมที่สถานะต่างๆ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยการใช้ตู้อบไมโครเวฟจะทำให้ได้ผลผลิตสูงกว่าการใช้ตู้อบลมร้อน yield ของเวย์โปรตีนผงที่เตรียมโดยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ มีค่าใกล้เคียงกัน ($p \geq 0.05$) ในขณะที่การเตรียมโดยการใช้ตู้อบไมโครเวฟที่กำลังงาน 800 วัตต์ให้ผลผลิตต่ำสุด ($p < 0.05$) เมื่อเทียบกับการใช้กำลังงานระดับอื่นๆ ที่ไม่แตกต่างกัน เนื่องจากการทำแห้งที่ใช้เวลานานในกรณีการอบแห้งด้วยลมร้อน ในระหว่างการทำแห้งจะมีการระเหยน้ำออก หรือควบแน่นออกมาเป็นหยดน้ำหยดลงมาบนถาดรองทำให้มีของแข็งที่ละลายน้ำได้ติดลงมาด้วยในระหว่างการควบแน่น จึงทำให้ได้ผลผลิตลดลง เช่นเดียวกันกับการใช้ตู้อบไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้าสูง จะมีการควบแน่นของน้ำรวดเร็วมากเนื่องจากความร้อนสูง จึงทำให้มีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ติดลงมาด้วย

ค่า pH ของเวย์โปรตีนทั้งสามชนิดมีค่าแตกต่างกัน โดยเวย์เชิงพาณิชย์มีค่าพีเอช เท่ากับ 6.20 ซึ่งต่ำกว่าเวย์โปรตีนที่ผลิตได้ทั้งสองวิธี ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสภาวะที่ใช้ผลิตน้ำเวย์ที่แตกต่างกัน กล่าวคือในการตกตะกอนเคซีน โดยใช้เอนไซม์เรนเนตที่ต้องมีการปรับพีเอช ในเหมาะสมเพื่อที่จะให้เอนไซม์สามารถทำงานได้ดี อีกทั้งค่าสี L^* a^* b^* ของเวย์โปรตีนทั้งสามชนิดก็มีค่าแตกต่างกันอีกด้วย โดยเวย์โปรตีนเชิงพาณิชย์มีค่า L^* เท่ากับ 82.00 ± 0.12 , a^* เท่ากับ 1.97 ± 0.01 และ b^* เท่ากับ 24.27 ± 0.21 ค่าสีของเวย์โปรตีนที่ผลิตได้มีค่า L^* a^* b^* อยู่ระหว่าง 84.97 ถึง 86.57, -0.76 ถึง -0.88 และ 4.52 ถึง 5.53 ตามลำดับ โดยเวย์โปรตีนเชิงพาณิชย์มีสีเหลืองอมน้ำตาล ส่วนเวย์โปรตีนที่ผลิตได้ทั้งวิธีมีสีใกล้เคียงกันคือสีขาวอมเหลือง

ตารางที่ 4.6 สมบัติทางเคมีของเวย์โปรตีนผงที่เตรียมจากการทำแห้งโดยใช้ตู้อบลมร้อน และตู้อบไมโครเวฟ เปรียบเทียบกับเวย์โปรตีนผงที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์

	ไขมัน (%)	โปรตีน (%)	แลคโตส (mg/g)	ความชื้น (%)	a_w
เชิงพาณิชย์	$0.64^a \pm 0.040$	$3.42^a \pm 0.08$	$153.00^c \pm 0.00$	$2.73^a \pm 0.15$	$0.381^a \pm 0.002$
ลมร้อน					
50 °C	$0.15^c \pm 0.007$	$0.56^b \pm 0.04$	$76.50^a \pm 0.00$	$3.67^b \pm 0.02$	$0.410^b \pm 0.068$
60 °C	$0.22^d \pm 0.005$	$0.57^b \pm 0.05$	$106.25^b \pm 6.01$	$3.66^b \pm 0.02$	$0.398^b \pm 0.046$
70 °C	$0.30^c \pm 0.014$	$0.56^b \pm 0.04$	$110.50^b \pm 0.00$	$3.58^b \pm 0.02$	$0.401^b \pm 0.003$
ไมโครเวฟ					
640 W	$0.14^c \pm 0.003$	$0.56^b \pm 0.03$	$183.56^{d,c} \pm 6.04$	$3.63^b \pm 0.01$	$0.411^b \pm 0.010$
720 W	$0.14^c \pm 0.003$	$0.57^b \pm 0.04$	$175.02^d \pm 6.04$	$3.68^b \pm 0.02$	$0.409^b \pm 0.010$
800 W	$0.56^b \pm 0.020$	$0.58^b \pm 0.06$	$187.83^c \pm 0.00$	$3.66^b \pm 0.02$	$0.402^b \pm 0.011$

หมายเหตุ ค่าที่แสดงในตารางเป็นค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลอง 3 ซ้ำ

a,b,c ตัวอักษรกำกับที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างกันของข้อมูลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

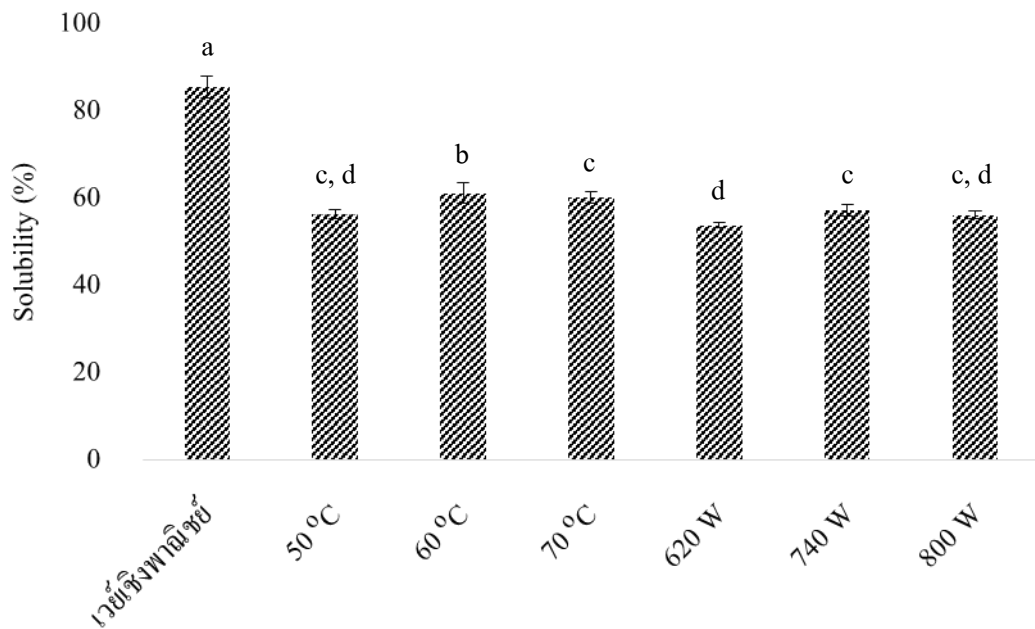
ปริมาณไขมันของเวย์โปรตีนผงทั้งสามชนิดมีค่าแตกต่างกันมาก เวย์โปรตีนผงเชิงพาณิชย์จะมีปริมาณไขมันสูงที่สุด รองลงมาคือ เวย์โปรตีนผงที่เตรียมโดยการใช้ตู้อบไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์ การใช้ตู้อบลมร้อน และการใช้ตู้อบไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 720 และ 640

วัดตามลำดับจะเห็นได้ว่าการใช้อุณหภูมิและกำลังไฟฟ้าสูงจะทำให้มีปริมาณไขมันสูง เพราะเวลาในการทำแห้งที่รวดเร็วจะทำให้สูญเสียปริมาณไขมันน้อย ดังนั้นการทำแห้งที่ใช้เวลาน้อยจะคงคุณค่าทางโภชนาการไว้ได้ ปริมาณไขมันของเวย์โปรตีนผงที่ผลิตได้ทั้งสองวิธีมีค่าใกล้เคียงกัน ยกเว้นการใช้ตู้อบไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 800 วัดจะมีค่ามากกว่าที่สภาวะอื่นๆ และใกล้เคียงกับเวย์โปรตีนในเชิงพาณิชย์ อย่างไรก็ตามปริมาณโปรตีน และปริมาณความชื้นของการอบแห้งทั้งสองวิธีมีค่าไม่แตกต่างกัน เช่นเดียวกับการทดลองของ Wu and Mao (2008) อีกทั้งยังพบว่าปริมาณไขมันของการอบแห้งโดยใช้ตู้อบไมโครเวฟจะมีค่ามากกว่าการใช้ตู้อบลมร้อน

ปริมาณโปรตีนของเวย์โปรตีนผงที่ผลิตได้ในทุกสภาวะมีค่าอยู่ในช่วง 0.56-0.58 กรัมต่อกรัมผงเวย์โปรตีนซึ่งมีค่าน้อยกว่าในผงเวย์โปรตีนในเชิงพาณิชย์ (ร้อยละ 3.42) อีกทั้งยังมีปริมาณความชื้น และค่า a_w ที่แตกต่างกันกับผงเวย์ในเชิงพาณิชย์ โดยผงเวย์โปรตีนที่ผลิตได้มีปริมาณความชื้นอยู่ในช่วง 3.63-3.68 ในขณะที่ผงเวย์ในเชิงพาณิชย์มีปริมาณความชื้นเท่ากับ 2.73 ผงเวย์ที่ผลิตได้มีปริมาณความชื้นมากกว่าผงเวย์ในเชิงพาณิชย์เล็กน้อย ค่า a_w ของผงเวย์เชิงพาณิชย์มีค่าเท่ากับ 0.381 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าผงเวย์โปรตีนที่ผลิตได้ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.398-0.411

ปริมาณแลคโตสของผงเวย์โปรตีนการทำแห้งทั้ง 2 วิธีมีค่าแตกต่างกันการทำแห้งโดยใช้ตู้อบลมร้อนจะมีปริมาณแลคโตสต่ำกว่าวิธีอื่นๆ ที่อุณหภูมิการอบแห้ง 50 องศาเซลเซียสจะมีปริมาณแลคโตสเท่ากับ 76.50 มิลลิกรัมต่อกรัมผงเวย์โปรตีนจะมีค่าต่ำที่สุด รองลงมาคือที่อุณหภูมิ 60 และ 70 องศาเซลเซียส ตามลำดับ การทำแห้งโดยใช้ตู้อบไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้าสูงจะมีปริมาณแลคโตสสูงที่สุดคือ 187.83 มิลลิกรัมต่อกรัมผงเวย์โปรตีน ส่วนที่กำลังไฟฟ้า 720 และ 640 วัดมีปริมาณแลคโตสไม่แตกต่างกันในทางสถิติ ($p \geq 0.05$) ทั้งนี้เพราะการทำแห้งที่ใช้เวลานานกว่าจะมีการสูญเสียปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ไปกับการควบแน่นของน้ำระหว่างการทำแห้งไปมาก ทำให้ปริมาณแลคโตสมีค่าน้อยกว่ากรณีที่ใช้เวลาในการทำแห้งน้อย อย่างไรก็ตามปริมาณแลคโตสของผงเวย์เชิงพาณิชย์มีค่าเท่ากับ 153 มิลลิกรัมต่อกรัมผงเวย์โปรตีน ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่างการทำแห้งทั้งสองวิธี ทั้งนี้อาจขึ้นกับคุณภาพน้ำเวย์เริ่มต้นที่ใช้เป็นวัตถุดิบมีความแตกต่างกัน จึงไม่สามารถบ่งชี้ได้ว่ามีปริมาณแลคโตสมากหรือน้อย ถึงแม้ว่าจะเป็นการใช้เทคนิคการทำแห้งแบบ spray dried ที่ใช้เวลาในการทำแห้งเร็วมาก ทำให้คงคุณค่าทางโภชนาการอาหารไว้ได้มาก Gaiani et al. (2010) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของอุณหภูมิเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยที่มีผลต่อองค์ประกอบทางด้านพื้นที่ผิวของผงโปรตีนนม พบว่าการเพิ่มพื้นที่ผิวของไขมันในผงโปรตีนนม ซึ่งระหว่างการทำแห้งไขมัน และโปรตีนจะอยู่ใกล้ผิวที่ชอบน้ำมากกว่า ในขณะที่แลคโตสพบบริเวณแกนกลาง การเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสนี้ส่งผลกระทบต่ออย่างมากจากอุณหภูมิที่ใช้ทำแห้ง การใช้อุณหภูมิต่ำจะมีผลต่อไขมัน และโปรตีนอย่างมาก แต่ส่งผลกระทบต่อแลคโตสเล็กน้อย นอกจากนี้ยังพบว่าการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสของ

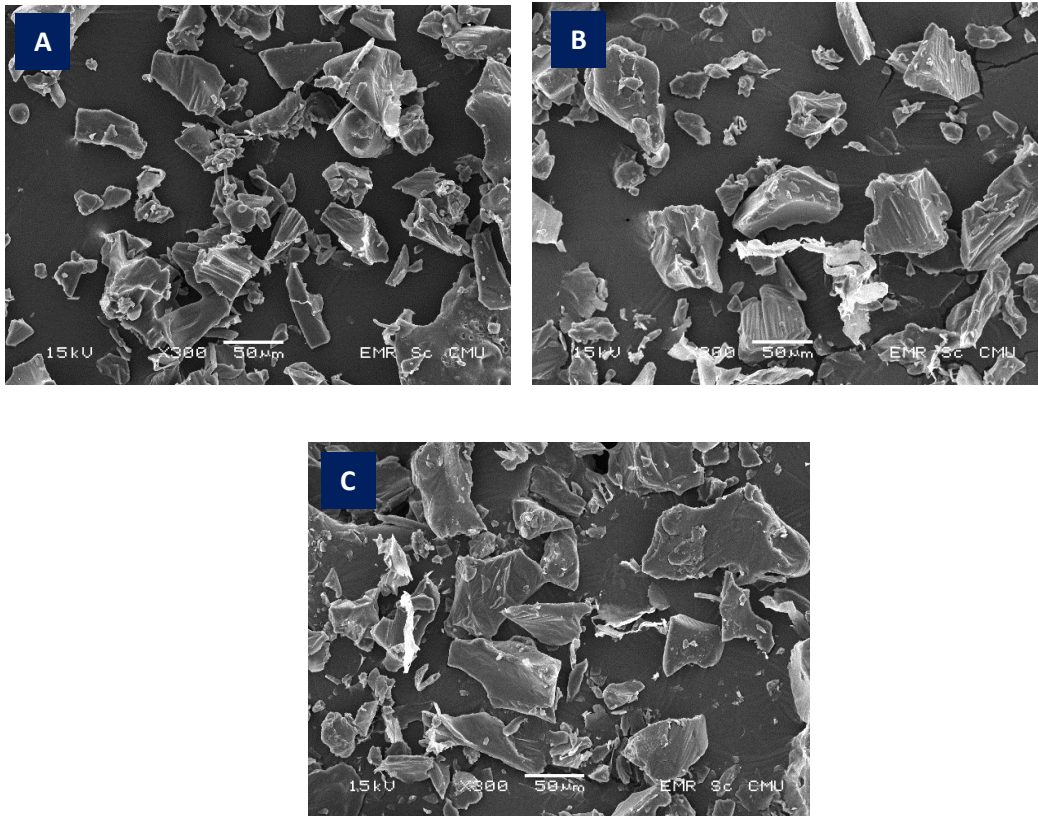
ไขมันจะเพิ่มความแข็งแรงให้กับผงที่มีเวย์โปรตีนเป็นองค์ประกอบมากกว่าผงที่มีเคซีนเป็นองค์ประกอบ ความสามารถในการละลายของเวย์โปรตีนที่ได้เทียบกับเวย์โปรตีนเชิงพาณิชย์ดังแสดงในรูปที่ 4.10



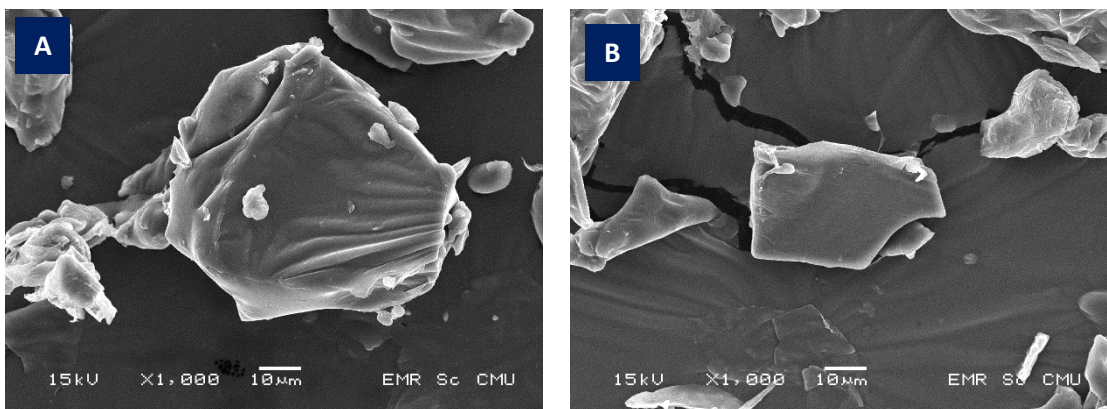
รูปที่ 4.10 ความสามารถในการละลายของเวย์โปรตีนที่ผลิตได้เทียบกับเวย์โปรตีนเชิงพาณิชย์

การวัดความสามารถในการละลายของผงเวย์โปรตีนทั้งสามชนิดมีค่าแตกต่างกัน โดยการละลายของผงเวย์โปรตีนพบว่าผงเวย์ในเชิงพาณิชย์มีค่าการละลายเท่ากับร้อยละ 85.55 ซึ่งมีค่าสูงที่สุด ผงเวย์โปรตีนที่ผลิตได้ทั้งสองวิธีมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย กล่าวคือการใช้อุณหภูมิ และกำลังไฟฟ้าที่สูงจะทำให้ผงเวย์โปรตีนที่ได้มีค่าการละลายที่มากกว่าผงเวย์โปรตีนที่ผลิตได้เมื่อใช้อุณหภูมิ และกำลังไฟฟ้าต่ำ

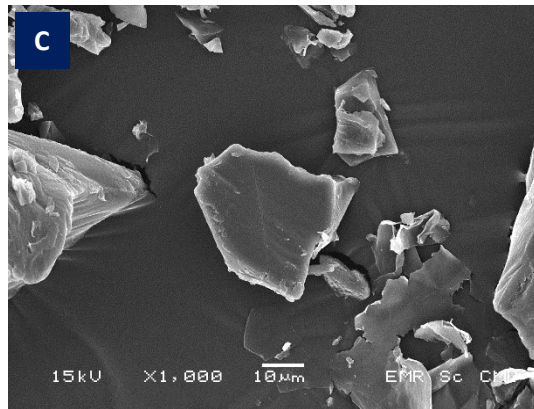
การตรวจดูโครงสร้างทางจุลภาค (microstructure) โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) ของเวย์โปรตีนผงที่ผลิตได้ เปรียบเทียบกับเวย์โปรตีนผงเชิงพาณิชย์ ได้ผลดังรูปที่ 4.11 ถึง 4.15



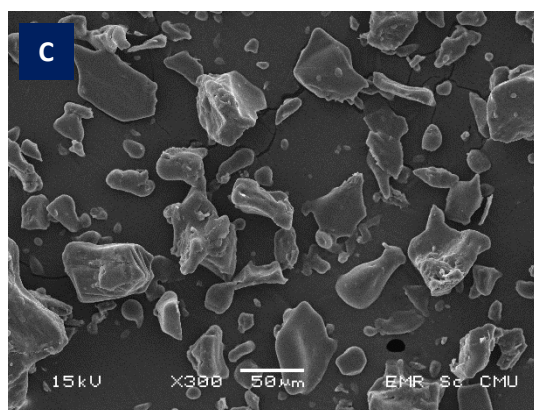
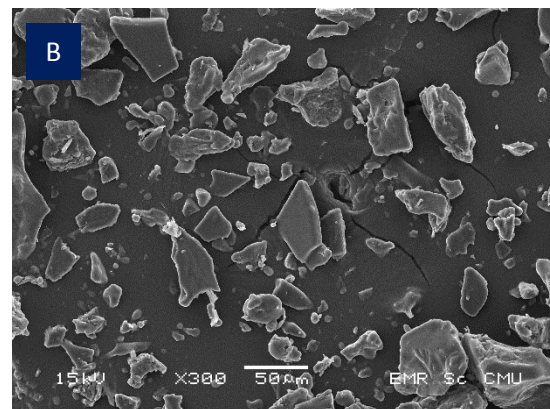
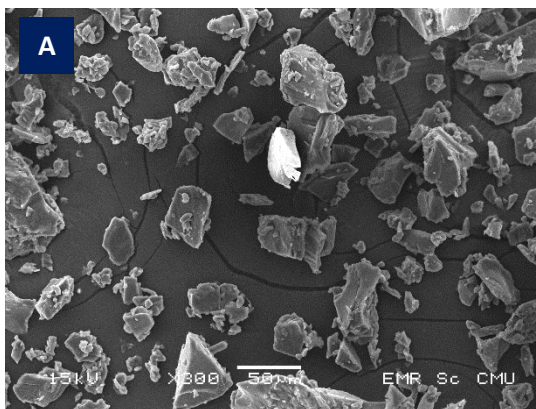
รูปที่ 4.11 เวย์โปรตีนผงที่ผลิตโดยตู้อบร้อนที่อุณหภูมิ (A) 50 องศาเซลเซียส (B) 60 องศาเซลเซียส และ (C) 70 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย 300 เท่า



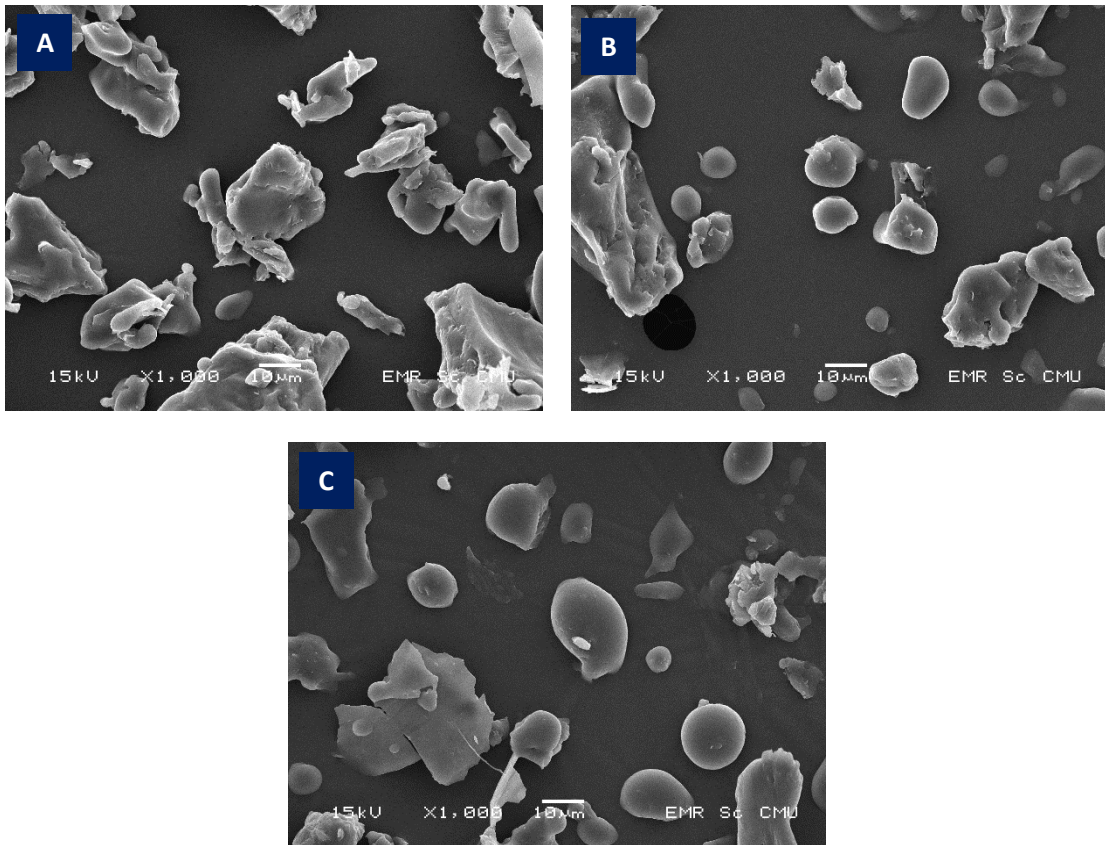
รูปที่ 4.12 เวย์โปรตีนผงที่ผลิตโดยตู้อบร้อนที่อุณหภูมิ (A) 50 องศาเซลเซียส (B) 60 องศาเซลเซียส และ (C) 70 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า



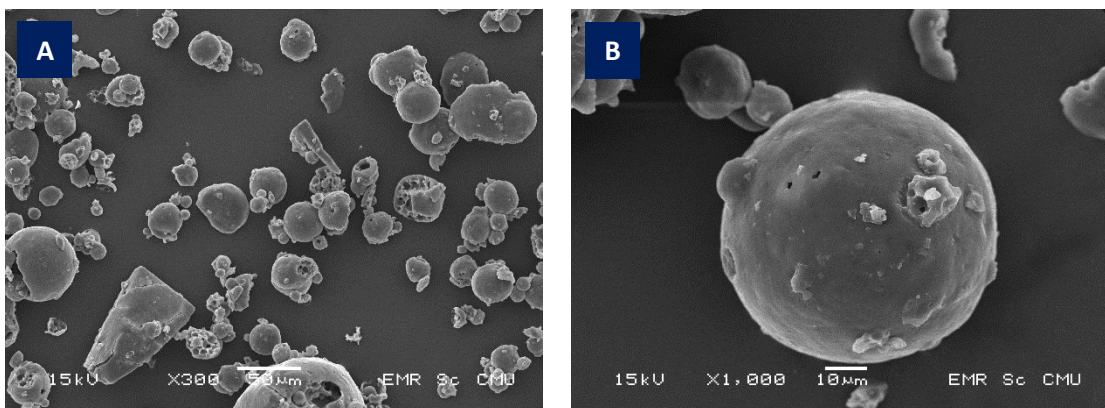
รูปที่ 4.12 เวย์โปรตีนผงที่ผลิตโดยตู้อบร้อนที่อุณหภูมิ (A) 50 องศาเซลเซียส (B) 60 องศาเซลเซียส และ (C) 70 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า (ต่อ)



รูปที่ 4.13 เวย์โปรตีนผงที่ผลิตโดยตู้อบไมโครเวฟ ที่กำลังงาน (A) 640 วัตต์ (B) 720 วัตต์ และ (C) 800 วัตต์ ที่กำลังขยาย 300 เท่า

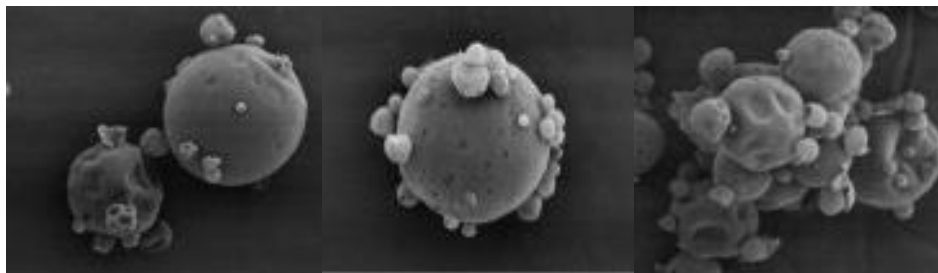


รูปที่ 4.14 เวย์โปรตีนผงที่ผลิตโดยตู้อบไมโครเวฟ ที่กำลังงาน (A) 640 วัตต์ (B) 720 วัตต์ และ (C) 800 วัตต์ ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า



รูปที่ 4.15 เวย์โปรตีนเชิงพาณิชย์ ที่กำลังขยาย (A) 300 เท่า และ (B) 1,000 เท่า

ผลการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของเวย์โปรตีนพบว่าการอบแห้งมีผลต่อลักษณะและขนาดของอนุภาคเวย์โปรตีนผงที่ผลิตได้ การทำแห้งโดยใช้ตู้อบลมร้อน (รูปที่ 4.11 และ 4.12) จะทำให้อนุภาคเวย์โปรตีนผงมีรูปร่างคล้ายผลึกที่มีความเป็นเหลี่ยมมุมสูง โดยที่อุณหภูมิอบแห้งสูงมีแนวโน้มทำให้พื้นผิวอนุภาคที่ได้เรียบมากขึ้นกว่าเมื่อใช้อุณหภูมิต่ำซึ่งจะทำให้ผิวอนุภาคมีลักษณะที่ขรุขระกว่า อนุภาคของเวย์โปรตีนผงมีความผันแปรของขนาด ไม่สม่ำเสมอ ส่วนการทำแห้งโดยใช้ตู้อบไมโครเวฟ (รูปที่ 4.13 และ 4.14) จะมีรูปร่างที่เป็นเหลี่ยมมนน้อยลงเมื่อเทียบกับการใช้ตู้อบลมร้อน และมีพื้นผิวที่เรียบขึ้นตามกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้น แต่ยังคงมีความผันแปรของขนาดอนุภาค การศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการทำแห้งโดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับอัลตราโซนิกพบว่าอนุภาคที่ได้จากการทำแห้งโดยใช้ไมโครเวฟจะมีรูปร่างเป็นรูปหลายเหลี่ยมแต่ค่อนข้างกลม อนุภาคที่ได้จะมีขนาดเล็กมากและมีแนวโน้มจะจับกันเป็นก้อน แต่เมื่อใช้เวลาในการทำแห้งเพิ่มขึ้นจะทำให้ขนาดของอนุภาคใหญ่ขึ้นและการจับเป็นก้อนน้อยลง (Leonelli and Mason, 2010; Park et al, 2008) ลักษณะของอนุภาคเวย์โปรตีนผงเชิงพาณิชย์ (รูปที่ 4.15) มีลักษณะเป็นทรงกลม และมีขนาดค่อนข้างสม่ำเสมอ ทั้งนี้เนื่องจากวิธีการทำแห้งที่ต่างกันจะส่งผลให้มีรูปร่างที่ต่างกัน อีกทั้งเวลาในการทำแห้งแบบ spray dry ใช้เวลาน้อยมากจึงทำให้ได้อนุภาคที่เป็นทรงกลม พื้นผิวเรียบ



รูปที่ 4.16 เวย์โปรตีนไอโซเลตที่ผ่านการทำแห้งแบบพ่นฝอยที่ขนาด 30×40 นาโนเมตร (Shah et al., 2012)

การศึกษาของ Shah et al. (2012) พบว่าผลึกที่ได้จากการทำแห้งแบบพ่นฝอยของเวย์โปรตีนไอโซเลตมีลักษณะดังรูปที่ 4.16 จะเห็นได้ว่าผลึกมีลักษณะใกล้เคียงกับเวย์โปรตีนที่จำหน่ายเชิงพาณิชย์ ทั้งนี้ยังมีการศึกษาผลกระทบของสภาวะในการอบแห้งแบบพ่นฝอยต่อฟังก์ชันของโปรตีนนมเข้มข้น (milk protein concentrate, MPC) อนุภาคที่ผลิตได้จากเครื่องพ่นฝอยที่มีการแปรผันอุณหภูมิที่ใช้ (70 °C, 107 °C, 155 °C และ 178 °C) ความสามารถในการละลายและการเสื่อมสภาพของโปรตีนวัดโดยใช้ focused beam reflectance measurement (FBRM) และ polyacrylamide

gel electrophoresis (SDS-PAGE) เมื่อนำผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้ไปส่องผ่านกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด พบว่าอนุภาคที่ผ่านการใช้อุณหภูมิต่ำมีลักษณะกลม (spherical particles) ในขณะที่การใช้อุณหภูมิสูงจะมีความกลมน้อยกว่า ผลของ FBRM ซึ่งให้เห็นว่าการละลายของอนุภาค MPC จะลดลงเมื่อมีการใช้อุณหภูมิสูงขึ้น โปรตีนเสื่อมสภาพมากขึ้น ส่วนผลของ SDS-PAGE ซึ่งให้เห็นว่าส่วนที่ไม่ละลายน้ำ ส่วนใหญ่คือเคซีนจะไวต่อความร้อนมากกว่าเวย์โปรตีน (Fang et al., 2012) เช่นเดียวกับการทดลองของ Maas et al. (2011) ที่ทำการศึกษาลักษณะอนุภาคของแมนนิทอลที่ผ่านการทำแห้งแบบพ่นฝอยก็พบว่าอนุภาคที่ได้มีลักษณะเรียบ และรูปร่างเป็นทรงกลม อีกทั้งยังพบว่าการระเหยออกของน้ำเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูง จะทำให้สารละลายมีความเข้มข้นสูงส่งผลทำให้ผลึกที่ได้มีขนาดใหญ่ และมีพื้นผิวขรุขระ