

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ลำไย

ลำไยเป็นไม้ผลเขตร้อน และกึ่งร้อน มีชื่อวิทยาศาสตร์อยู่หลายชื่อคือ *Euphoria longana* Lam.; *Diocarpus longan* Lour. หรือ *Nephelium longana* Camb. ลำไยจัดเป็นไม้ยืนต้นไม้ผลัดใบ สามารถปลูกได้ในพื้นที่ที่มีความสูง 300 ถึง 1,000 เมตร จากระดับน้ำทะเล ลำต้นสูงขนาดกลาง จนถึงใหญ่ ใบเป็นใบรวมประกอบด้วยใบย่อยอยู่บนก้านใบร่วมกัน ลำไยออกดอกเป็นช่อ ผลมีลักษณะกลม หรือทรงเบ็ยว เปลือกผลมีสีเขียวปนสีน้ำตาล เขียวปนเหลืองหรือน้ำตาลแดง เนื้อมีทั้งสีขาวขุ่น ขาวใส น้ำผึ้ง และขาวอมชมพู ลักษณะเนื้อมีทั้งแห้ง น้ำน้ำปานกลาง และแฉะน้ำ เมล็ดมีรูปร่างกลม หรือกลมแบนสีน้ำตาลเข้มหรือดำ ส่วนที่ติดขั้วเมล็ดมีวงกลมสีขาว (พรชัย, 2552)

ลำไยเป็นไม้ผลที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจอันดับหนึ่งของภาคเหนือ ปริมาณผลผลิตของลำไยในปี 2553 จาก 8 จังหวัดภาคเหนือ ได้แก่ เชียงราย พะเยา ลำปาง ลำพูน เชียงใหม่ ดาก แพร่ น่าน มีปริมาณผลผลิตอยู่ที่ 396,959 ตัน ซึ่งผลผลิตลำไยที่ออกสู่ตลาดมีปริมาณมาก และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดปัญหาหาค่าผลผลิตตกต่ำ (สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร, 2554) จึงได้มีการนำลำไยมาแปรรูป ปัจจุบันมีการแปรรูปลำไยเป็นลำไยผง ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่เก็บรักษาได้นาน ง่ายต่อการจัดเก็บ และการขนส่ง สามารถประยุกต์เป็นผลิตภัณฑ์ลำไยในรูปแบบต่างๆ เป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับลำไยได้มากกว่าการแปรรูปแบบอื่นๆ อีกทั้งช่วยแก้ปัญหาปริมาณลำไยล้นตลาด ราคาตกต่ำ นอกจากนี้ยังสามารถแปรรูปผลลำไยที่ไม่ได้มาตรฐานให้มีมูลค่าเพิ่ม และทำให้มีลำไยบริโภคได้ตลอดทั้งปี

2.2 คุณค่าทางโภชนาการของลำไย

ลำไยมีองค์ประกอบที่เป็นสารอาหารสำคัญหลายชนิด เช่น กลูโคส ซูโครส ฟรักโทส วิตามินซี วิตามินบี 1 และบี 2 เป็นต้น เนื้อลำไยมีรสหวานและมีสรรพคุณในการบำรุงร่างกาย บำรุงประสาท ลำไยแห้งมีสรรพคุณในการบำรุงหัวใจ ระบบประสาท ช่วยย่อยอาหาร ช่วยบำรุงกำลัง และบำรุงโลหิต (กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2548) ลำไยแห้งยังมีฤทธิ์ยับยั้งสารก่อมะเร็ง และลดอนุมูลอิสระในเม็ดเลือดขาว ทั้งยังยับยั้งกระบวนการสร้างเม็ดสีผิวเมลานินได้ดีกว่าสารเคมีที่ใช้ในเครื่องสำอางปัจจุบัน (อุษณีย์และคณะ, 2549) ในอนาคตอาจนำมาใช้ร่วมกับการรักษามะเร็ง เพราะ

ลดหรือไม่มีผลข้างเคียง ทำให้ลดขนาดการใช้ยาหรือเคมีบำบัด ซึ่งมีผลข้างเคียงมาก ถ้าไขมีสารออกฤทธิ์เหนี่ยวนำให้เซลล์มะเร็งตาย เช่น มะเร็งลำไส้ใหญ่ และเซลล์มะเร็งเม็ดเลือดขาว ถ้าไขมีสารที่ยับยั้งความเป็นพิษของสารก่อมะเร็งทางเดินอาหาร และสารที่ออกฤทธิ์ลดการเสื่อมสลายของข้อเข่า

2.3 การแปรรูปลำไยผง

2.3.1 การผลิตลำไยผงแบบดั้งเดิม

กระบวนการผลิตลำไยผงแบบดั้งเดิมประกอบด้วยขั้นตอนการนำลำไยแห้งมาต้มกับน้ำจนเข้มข้น นำมาฉีดพ่นบนน้ำตาลทราย และนำไปตากแห้ง จากนั้นนำมาบดละเอียด น้ำลำไยผงที่ได้จะมีรสหวาน (สำนักส่งเสริมและถ่ายทอดเทคโนโลยี, 2553) การแปรรูปลำไยผงด้วยวิธีนี้ถึงแม้จะง่ายแต่ก็ไม่สะดวก เพราะใช้เวลานาน และมีกำลังการผลิตต่ำ อีกวิธีหนึ่งที่ใช้กันในปัจจุบันคือการนำน้ำลำไยมาเกี่ยวกับน้ำตาลทรายจนข้น นำไปทำให้แห้ง แล้วบดเป็นผง ซึ่งการผลิตโดยวิธีนี้ใช้ต้นทุนต่ำ และใช้น้ำตาลทรายในปริมาณมาก (กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม, 2551) การผลิตน้ำลำไยผงทั้ง 2 วิธีนี้มีข้อจำกัดต่อกลุ่มผู้บริโภคที่เป็นโรคเบาหวาน และผู้บริโภคทั่วไปที่ให้ความสำคัญกับอาหารเพื่อสุขภาพ

2.3.2 การแปรรูปลำไยผงโดยวิธีทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง

การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง เป็นกระบวนการทำให้แห้งโดยให้สารละลายเยือกแข็ง จากนั้นทำให้เกิดการระเหิดกลายเป็นไอภายใต้ความดันต่ำกว่าจุด triple point ของน้ำ การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งใช้อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของสารละลาย จึงทำให้ผลิตภัณฑ์คงคุณภาพเดิมไว้ได้ วิธีกรรมวิธีมีค่าใช้จ่ายในการผลิตสูง และเครื่องมือราคาแพง (พรรณภา, 2552) เนื่องจากต้องใช้ระบบทำความเย็น และเครื่องปั๊มที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการควบคุมสถานะสุญญากาศ และต้องการเทคนิคเฉพาะในการใช้งาน รวมทั้งการดูแลรักษา (วนิดา, 2552) ผลิตภัณฑ์แห้งที่ได้มีโครงสร้างเป็นก้อนแข็ง ต้องนำไปบดเพื่อให้เป็นผง ซึ่งระหว่างการบดอาจทำให้เกิดการดูดซับความชื้นกลับ เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งสามารถดูดความชื้นได้อย่างรวดเร็ว เพราะมีความพรุนมาก ส่งผลให้เกิดการเกาะตัวกันได้ง่าย ผลิตภัณฑ์จึงเกิดการเสื่อมสภาพและสูญเสียปริมาณผลผลิตในระหว่างการบด (ชนิตา, 2552)

2.3.3 การแปรรูปลำไยผงแบบโฟม-แมท

วิธีนี้เป็นการทำแห้งของเหลว หรือผลไม้สดป่นที่มีลักษณะเป็นโฟม โดยใช้อากาศร้อนภายใต้สภาวะบรรยากาศปกติ วิธีการทำประกอบด้วยการนำน้ำผลไม้มาปั่นด้วยเครื่องผสม หรือเติมแก๊สหรืออาจเติมสารให้ความคงตัวของโฟมในปริมาณเล็กน้อย จากนั้นจึงแผ่แผ่นโฟมบนถาดที่มีรูและนำไปอบแห้ง น้ำผลไม้จะถูกทำให้แห้งอย่างรวดเร็ว เนื่องจากมีโครงสร้างเป็นรูพรุนของโฟมผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความพรุนมาก สามารถละลายได้ทันทีในน้ำเย็น ต้นทุนที่ใช้จะต่ำกว่าการใช้ตู้อบสุญญากาศ หรือการทำแห้งแบบเยือกแข็ง ข้อเสียของวิธีนี้คือ ผลิตภัณฑ์มีอายุการเก็บรักษาสั้น เนื่องจากโครงสร้างที่มีรูพรุนมาก สามารถดูดความชื้น และออกซิเจนได้ดี และในกระบวนการใช้อุณหภูมิไม่สูง จึงยากที่จะลดความชื้นให้ต่ำได้ (สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2552) การทำน้ำลำไยผงแบบโฟม-แมท ต้องอาศัยสารก่อโฟม และสารเพิ่มความคงตัว (stabilizer) เนื่องจากน้ำลำไยไม่สามารถตีให้เกิดโฟม หรือสามารถทำให้เกิดโฟมได้ สารก่อโฟม และสารเพิ่มความคงตัวช่วยทำให้น้ำลำไยมีความหนืดเพิ่มขึ้น และตีให้เป็นโฟมที่ไม่ยุบตัวง่าย ผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งแล้ว จะมีน้ำหนักเบามาก มีช่องว่างของแก๊สแทรกอยู่ในโครงสร้าง ทำให้มีความหนาแน่นต่ำ เมื่อนำมาละลายจะปล่อยแก๊สออกทำให้เกิดโฟมขึ้นในผลิตภัณฑ์ เหมือนเครื่องดื่มแบบอัดแก๊ส ซึ่งเป็นลักษณะที่ผู้บริโภคอาจไม่ต้องการ (ชนันท์, 2545)

2.3.4 การแปรรูปลำไยผงแบบอบแห้งพ่นฝอย

เทคนิคการอบแห้งแบบพ่นฝอย (spray drying) นิยมใช้สำหรับการทำแห้งสารละลายอินทรีย์ สารประเภทอิมัลชัน (emulsion) และของเหลวชนิดต่างๆ โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จะอยู่ในรูปผงแห้ง (ไทรท์และคณะ, 2553) การอบแห้งแบบพ่นฝอยใช้ในการผลิตอาหารผงหลายชนิด เช่น การผลิตผลิตภัณฑ์นม ไข่ผง กาแฟผงสำเร็จรูป ผลิตภัณฑ์น้ำผลไม้ ผลิตภัณฑ์น้ำส้มหรือน้ำผลไม้ที่มีปริมาณฟรักโทสหรือกลูโคสสูง เป็นต้น (Master, 1991) การทำงานของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย เริ่มจากอากาศจะถูกดูดผ่านเครื่องกรอง และผ่านเครื่องให้ความร้อน จากนั้นจึงเข้าสู่ห้องอบแห้ง (drying chamber) ส่วนตัวอย่างของเหลว (feed) ที่นำมาฉีดพ่นควรมีลักษณะเหลว และไม่ข้นหนืดมาก จากนั้นของเหลวจะถูกดูดโดยปั๊มผ่านอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดละอองฝอย หรืออะตอมไมเซอร์ (atomizer) เมื่อละอองของอาหารสัมผัสกับอากาศร้อนภายในห้องอบจะทำให้เกิดการระเหยของน้ำอย่างรวดเร็ว และจะได้ผงของผลิตภัณฑ์ตกลงสู่ด้านล่างของห้องอบ ผลิตภัณฑ์ผงจะถูกแยกออกจากอากาศโดยใช้ไซโคลอน (เอกคณัย, 2551)

ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการผลิตอาหารผงด้วยวิธีอบแห้งแบบพ่นฝอย ได้แก่

1) ความหนืด

ของเหลวที่มีความหนืดสูง (อาจเกิดจากการลดอุณหภูมิของของเหลว) จะทำให้ได้ละอองที่มีขนาดใหญ่ขึ้นในสถานะเดียวกัน และหากมีความหนืดสูงมาก จะทำให้ของเหลวที่ฉีดออกมา มีลักษณะคล้ายเส้นด้าย ทำให้อาหารไม่แห้งตามต้องการ ดังนั้นจึงไม่ควรใส่ของเหลวที่มีความหนืดสูงเกินไป

2) อัตราการไหลของของเหลว

อัตราการไหลของของเหลวที่สูงขึ้น จะทำให้ได้ละอองที่หยาบขึ้น ทำให้ผงแห้งมีความชื้นสูง เนื่องจากเวลาที่สัมผัสกับลมร้อนน้อยเกินไป จึงควรควบคุมอัตราการไหลของของเหลวให้เหมาะสม

3) อัตราการไหลของอากาศ

อัตราการไหลของอากาศที่ลดลง จะทำให้เวลาที่ละอองอยู่ในห้องอบนานขึ้น ซึ่งจะทำให้สัมผัสกับอากาศร้อนนานขึ้น และเป็นผลให้ลดความชื้นได้ดีขึ้น แต่หากอัตราการไหลของของเหลวสูง และอัตราการไหลของอากาศต่ำเกินไป เมื่ออุณหภูมิไม่สูงเพียงพอ ก็อาจทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความชื้นสูง และเกาะติดอยู่กับผนังของห้องอบได้

4) อุณหภูมิลมร้อนขาเข้า

การเพิ่มอุณหภูมิของลมร้อนขาเข้าจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการระเหยได้ แต่ทั้งนี้ก็ขึ้นกับการไหลของอากาศด้วย

2.3.5 ข้อดีและข้อเสียของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย

เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยมีลักษณะพิเศษที่สามารถผลิตผงให้มีขนาดอนุภาคที่มีลักษณะเฉพาะ และปริมาณความชื้นของผงไม่ขึ้นอยู่กับการควบคุมอุณหภูมิหรือความไวต่อความร้อนของผลิตภัณฑ์ รักษาลักษณะเฉพาะ หรือคุณภาพของผงที่ได้คงที่ตลอดกระบวนการผลิต โดยไม่ขึ้นกับระยะเวลาในการเดินเครื่อง (สถานะการอบแห้งคงที่) นอกจากนี้การทำงานของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยมีความต่อเนื่อง และใช้งานง่าย สามารถดัดแปลงการทำงานให้ควบคุมแบบอัตโนมัติทั้งหมด โดยใช้เวลาในการตอบสนองต่อการสั่งการอย่างรวดเร็ว พนักงานควบคุมเครื่อง 1 คน สามารถจัดการกับเครื่องที่ควบคุมแบบอัตโนมัติได้มากกว่า 1 เครื่อง ถ้ามีการจัดวางเครื่องอย่างเป็นระบบ การอบแห้งแบบพ่นฝอยใช้ได้กับวัตถุดิบที่ไวต่อความร้อน และวัตถุดิบที่ทนทานต่อความร้อน วัตถุดิบอยู่ในรูปสารละลายอิมัลชัน กับรูปของแข็งเปียก หรือที่หลอมเหลวแล้วที่มีความเหนียวที่เหมาะสม จะสามารถทำการอบแห้งแบบพ่นฝอย สามารถอบแห้งวัตถุดิบใน

สภาวะการอบแห้งแบบปลดเชื้อ หรือการอบแห้งวัตถุดิบให้เป็นผงแบบ granular, agglomerate หรือ non-agglomerate (Barbosa-Cánovas and Vega-Mercado, 1996)

การอบแห้งแบบพ่นฝอย มีต้นทุนในการติดตั้งสูง หน่วยการผลิตจะมีขนาดใหญ่กว่า เครื่องอบแห้งประเภทอื่นๆ ทำให้การสร้างเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยมีราคาแพง แม้ว่าจะเป็น เครื่องอบแห้งประเภทพาความร้อน แต่ประสิทธิภาพเชิงความร้อนยังต่ำกว่าเครื่องอบแห้งแบบ สัมผัสกับอาหารโดยตรง (direct-contact dryer) นอกจากนี้ยังต้องใช้อุณหภูมิเข้าที่สูงมาก หาก เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีอุณหภูมิในการหลอมเหลวสูง อากาศเสียที่ปล่อยออกจากเครื่องอบแห้งจะมี ปริมาณมาก ซึ่งจะประกอบด้วยความร้อนซึ่งมีคุณภาพต่ำ มีผลในการจัดการความร้อนที่ออกจาก อุปกรณ์ และการแลกเปลี่ยนความร้อนจะมีราคาสูง ดังนั้นอุปกรณ์จะต้องมีการจัดการผง และ อากาศที่อึดตัว หรืออยู่ในสถานะใกล้อึดตัว ซึ่งจะต้องมีการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มี ความซับซ้อนยิ่งขึ้น

2.4 ปัญหาการแปรรูปปลายแห้งโดยวิธีอบแห้งพ่นฝอยและวิธีแก๊ส

ปัญหาหลักในการอบแห้งแบบพ่นฝอย คือ ความเหนียว หรือการเกาะติดของอาหารใน ระหว่างการอบแห้ง โดยเฉพาะในวัตถุดิบที่มีน้ำตาลมอลโทสสูง และกรดในปริมาณสูง เช่น น้ำผึ้ง และน้ำผลไม้ การผลิตน้ำตาลไม่ผงจากวัตถุดิบเหล่านี้ทำให้เป็นผงแห้งได้ยากเมื่อใช้เครื่องอบ แห้งแบบพ่นฝอย (Bhandari *et al.*, 1997) เนื่องจากมีอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงสถานะ หรืออุณหภูมิ กลาสทรานซิชัน (T_g) ต่ำกว่าอุณหภูมิการผลิต ซึ่งทำให้ในระหว่างการอบแห้ง อาหารยังคงมี ลักษณะเป็นน้ำเชื่อม หรือมีความเหนียวติดกับผนังของห้องอบแห้ง (Bhandari and Howes, 1999)

ค่า T_g เป็นสมบัติที่มีความสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมทางกายภาพ และเคมีของ ระบบอาหาร (Bell and Touma, 1996) ที่ T_g โครงสร้างของอาหารจะเปลี่ยนจากของแข็งอสัณฐาน (amorphous) ไปเป็นลักษณะยางหนืด (rubbery) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ย้อนกลับได้ การ เปลี่ยนแปลงระหว่างการอบแห้งเป็นแบบของเหลวไปเป็นลักษณะยางหนืด และเปลี่ยนเป็นของ แข็งอสัณฐาน ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงของอาหารระหว่างการเก็บรักษาเป็นการเปลี่ยนแปลง จากของแข็งอสัณฐานไปเป็นลักษณะยางหนืด โดยจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพต่างๆ ของวัสดุ ได้แก่ การเพิ่มปริมาตรอิสระ (free volume) การเพิ่มปริมาณความจุความร้อน (C_p) สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (α) สัมประสิทธิ์การนำไฟฟ้า และการเปลี่ยนแปลง สมบัติทาง viscoelastic (Genin and Rene, 1995) ปริมาตรอิสระ คือ ปริมาตรที่ว่างอยู่เนื่องจากการ สร้างของแข็งของโมเลกุล แสดงถึงปริมาตรที่โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ได้ การเร่งให้เกิดการ เปลี่ยนแปลงทั้งหมดนี้เป็นผลมาจากอุณหภูมิ ดังนั้นการวิเคราะห์หาค่า T_g จึงเป็นสิ่งสำคัญ สามารถ

วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Differential scanning calorimetry (DSC) Differential thermal analysis (DTA) และ Thermal mechanical analysis (TMA) เป็นต้น ของแข็งอสัณฐานถือเป็นสารละลายของแข็งได้ในสถานะที่ความหนืดของของแข็งอสัณฐานเท่ากับ 10^{12} Pa s เมื่ออุณหภูมิของของแข็งอสัณฐานเพิ่มขึ้นจนถึงจุด T_g จะเกิดการเปลี่ยนสถานะไปเป็นลักษณะยางหนืด ซึ่งจะมีความหนืดเฉลี่ยเท่ากับ 10^6-10^8 Pa s ในการวัดค่าความหนืดทำได้ค่อนข้างยาก และมักเกิดความผิดพลาด (Bhandari and Howes, 1999)

ค่า T_g เป็นสมบัติเฉพาะของของแข็งอสัณฐาน โดยอาหารที่เป็นของแข็งอสัณฐาน จะเกิดการก่อรูปในสภาวะที่ไม่สมดุล (non equilibrium condition) โดยอาจเกิดจากการกำจัดตัวกลางที่กระจายอยู่ล้อมรอบ เช่น น้ำ การหลอมเหลวด้วยความเย็น หรือการทำให้เย็นแบบยิ่งยวด (supercooling) ของแข็งอสัณฐานนี้จะไม่เกิดสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ จึงอยู่ในสภาวะที่ไม่เสถียร ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการตกผลึก (Bhandari and Howes, 1999) โดยที่ค่าความหนืดสูงกว่า 10^{12} Pa s ของแข็งอสัณฐานจะเกิดการเหนียว เนื่องจากในสถานะนี้โมเลกุลจะเกิดการเคลื่อนที่อย่างจำกัด ซึ่งจะมีความสำคัญต่อการจัดเรียงตัวของโมเลกุลเป็นผลึก โดยอัตราการเปลี่ยนแปลงจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และปริมาณความชื้น ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิที่ผิวหน้าของอนุภาค (particle) ระหว่างการอบแห้งแบบพ่นฝอย ไม่ควรเพิ่มขึ้นเกินกว่า 10-20 องศาเซลเซียสเหนือค่า T_g การเหนียวของวัตถุดิบเกี่ยวข้องกับค่า T_g โดยวัตถุดิบที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะมีค่า T_g สูง แต่หากวัตถุดิบนั้นมีค่า T_g ต่ำกว่าอุณหภูมิในการผลิต จะมีผลทำให้เกิดการเหนียว และเกาะติดของวัตถุดิบที่ผนังของเครื่องอบแห้ง อาหารที่เหนียวง่าย อนุภาคมีการเกาะติดกันต้องอาศัยการควบคุมค่า T_g หรือใช้อุณหภูมิในกระบวนการผลิตต่ำกว่าค่า T_g ของผลิตภัณฑ์ หรือการเพิ่มค่า T_g ของผลิตภัณฑ์ ด้วยการเติมสารที่มีมวลโมเลกุลสูง (Boonyai *et al.*, 2006; Bhandari *et al.*, 1997)

การลด หรือป้องกันการเกิดความเหนียวของวัตถุดิบระหว่างการอบแห้ง ทำได้โดยการเติมสารซึ่งเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของน้ำผลไม้ ซึ่งสามารถช่วยในการทำแห้งโดยสามารถลดความเหนียวของน้ำตาลที่มีในวัตถุดิบ (Bhandari *et al.*, 1993; Donlinsky, 2001; Mujumdar, 1987; Welti and Lafuenete, 1983) สารช่วยทำแห้งที่มีมวลโมเลกุลสูงเมื่อผสมกับวัตถุดิบข้างต้นเพื่อเพิ่มค่า T_g ของอาหาร ทำให้การอบแห้งประสบความสำเร็จในสภาวะอุณหภูมิที่เหมาะสม สารช่วยทำแห้งที่มีมวลโมเลกุลสูง จะมีค่า T_g สูง และช่วยเพิ่มค่า T_g ของวัตถุดิบที่มีปริมาณน้ำตาล และกรดสูง ตัวอย่างของสารดังกล่าว เช่น มอลโตเดกซ์ทริน กัมอะราบิก และสตาร์ชตัดแปร์ เป็นต้น (Jaya and Das, 2004; Krishnan *et al.*, 2005) สารเหล่านี้มีสมบัติด้านความหนืด และค่า T_g ที่ต่างกัน จึงส่งผลต่อคุณภาพของอาหารผงที่ผลิตได้ โดยช่วยปรับให้อาหารเป็นผงได้ดีขึ้น มีความคงตัวมากขึ้น และทำหน้าที่ห่อหุ้มสารให้กลิ่นรสในอาหาร ค่า T_g ของสารช่วยทำแห้งทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ มอลโตเดกซ์-

ตริน (DE 10) สตาร์ชตัดแปร และกัมอะราบิก มีค่าเท่ากับ 160, 243 และ 126 องศาเซลเซียสตามลำดับ

2.5 สารช่วยทำแห้ง

2.5.1 มอลโตเดกซ์ตริน

มอลโตเดกซ์ตริน $[(C_2H_{12}O_5)_n - H_2O]$ เป็นสารประกอบพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคสที่ส่วนใหญ่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,4 และมีค่าสมมูลเดกซ์โทรส (Dextrose equivalent, DE) น้อยกว่า 20 (DE หมายถึง ร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำตาลรีดิวิซ์ เมื่อคิดเทียบน้ำตาลที่มีในตัวอย่าง) (ศุภชัยและเพ็ญศิริ, 2546) มอลโตเดกซ์ตรินเป็นผงสีขาว ไม่มีรสหวาน ละลายน้ำได้ดีที่อุณหภูมิห้อง ค่าการละลายมากกว่า หรือเท่ากับร้อยละ 98 ค่าความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 4-6 และมีค่า T_g สูง (มอลโตเดกซ์ตริน DE 5 มีค่า T_g เท่ากับ 188 องศาเซลเซียส) นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร และยา (Changsha May Chemis Chemical Co., Ltd., 2010) โดยเฉพาะในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย เพราะมีราคาถูก (จารุณี, 2547)

มอลโตเดกซ์ตรินผลิตได้จากการย่อยแป้งข้าวโพด แป้งมันฝรั่ง หรือแป้งชนิดอื่น ด้วยกรดและ/หรือเอนไซม์ที่เหมาะสมและปลอดภัย ใช้เป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์หลายชนิด โดยใช้เป็นสารช่วยในการทำแห้งพวกสารแต่งกลิ่นรส สารช่วยเพิ่มกลิ่นรส และสารเพิ่มปริมาณ เช่น เครื่องดื่มผสมผง ซอสผงสำเร็จรูป (ศุภชัยและเพ็ญศิริ, 2546) มอลโตเดกซ์ตรินมีสมบัติเฉพาะได้แก่ มีความสามารถในการละลายน้ำมาก มีความหนืดต่ำที่ความเข้มข้นสูง และมีสีขาว ซึ่งจากสมบัติที่กล่าวมา ทำให้มีการนำมอลโตเดกซ์ตรินมาใช้สำหรับการอบแห้งแบบพ่นฝอยผลิตภัณฑ์อาหาร นอกจากนี้การใช้มอลโตเดกซ์ตรินที่มีค่าสมมูลเดกซ์โทรสต่ำ หรือมีค่า T_g สูง ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความคงตัวสูง (Carolina *et al.*, 2007) และสามารถป้องกันการระเหยของสารระเหยง่าย ช่วยป้องกันผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) นอกจากนี้ยังมีมวลโมเลกุลที่หลากหลาย ทำให้สามารถเลือกใช้ตามความต้องการได้ (จารุณี, 2547)

มอลโตเดกซ์ตรินมีความสามารถในการกักเก็บสารให้กลิ่นรสไม่ก่อยคื่นัก โดยเฉพาะสารให้กลิ่นรสจำพวกที่ไม่ชอบน้ำ เนื่องจากไม่มีสมบัติในการเป็นอิมัลซิฟายเออร์ (emulsifier) หรือสารทำให้คงตัว (stabilizer) ทำให้ระหว่างการอบแห้งสารให้กลิ่นรสไม่ถูกห่อหุ้ม และถูกทำลายด้วยความร้อน การใช้มอลโตเดกซ์ตรินในการห่อหุ้มกลิ่นรสจึงมักใช้ร่วมกับกัมอะราบิก หรือสตาร์ชตัดแปร (Reineccius, 1991) นอกจากนี้มอลโตเดกซ์ตรินเป็นสารพวกดูดความชื้น (hygroscopic) ทำให้เกาะตัวเป็นก้อน (caking) (Desobry *et al.*, 1997) จึงควรศึกษาการใช้สารอื่นร่วมกับมอลโตเดกซ์ตริน เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดี

การศึกษาการผลิตลำไยผงโดยใช้สัดส่วนมอลโตเดกซ์ตริน 0.4, 0.5 และ 0.6 กรัม/กรัมของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ ทำการอบแห้งแบบพ่นฝอย อัตราไหลของลมร้อน 1.45, 1.68 และ 1.8 ลูกบาศก์เมตร/นาที อุณหภูมิลมร้อน 165, 175 และ 185 องศาเซลเซียส พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการผลิต คือปริมาณสัดส่วนมอลโตเดกซ์ตริน 0.6 กรัม/กรัมของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ อุณหภูมิลมร้อนขาเข้า 185 องศาเซลเซียส และช่วงอัตราการไหลของลมร้อนระหว่าง 1.5-1.7 ลูกบาศก์เมตร/นาที ได้ปริมาณผลิตภัณฑ์ลำไยผงสูงสุดร้อยละ 40 (พิพจน์ และคณะ, 2548) ซึ่งถือว่ายังน้อยกว่าปริมาณผลผลิตที่ยอมรับได้ (ร้อยละ 50) (Bhandari *et al.*, 1997) นอกจากนี้จากการศึกษาของธัญญา (2552) เพื่อผลิตลำไยผงโดยการอบแห้งแบบพ่นฝอย ใช้ปริมาณสัดส่วนมอลโตเดกซ์ตริน 0.6 กรัม/กรัมของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ อุณหภูมิลมร้อนขาเข้า 175 ± 2 องศาเซลเซียส ขาออก 70 ± 2 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณผลผลิตที่ได้มีค่าร้อยละ 72.72 ± 3.61

การศึกษาของ Sudhagar และคณะ (2002) ในการทำน้ำมะม่วงผง โดยการอบแห้งแบบพ่นฝอย เพื่อหาปริมาณมอลโตเดกซ์ตรินที่เหมาะสม โดยมีอัตราการป้อนน้ำมะม่วง 22 กิโลกรัม/ชั่วโมง ปริมาณของแข็งเริ่มต้น (สัดส่วน) 0.19 ปริมาณของแข็งสุดท้าย (สัดส่วน) 0.95 อัตราการไหลของลม 950 กิโลกรัม อากาศแห้ง/ชั่วโมง อุณหภูมิของน้ำมะม่วงที่ป้อนเข้า 60 องศาเซลเซียส อุณหภูมิลมร้อนขาเข้า 167.3 องศาเซลเซียส อุณหภูมิลมร้อนขาออก 89 องศาเซลเซียส โดยที่สัดส่วนของของแข็งในน้ำผลไม้ต่อมอลโตเดกซ์ตรินที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 50:50, 55:45 และ 60:40 พบว่าสัดส่วนของของแข็งในน้ำผลไม้ต่อมอลโตเดกซ์ตรินเท่ากับ 55:45 มีความเหมาะสมในการผลิตมะม่วงผง โดยผลิตมะม่วงผงที่มีการไหลอย่างอิสระในช่องทางออกของเครื่องอบแห้ง (Sudhagar *et al.*, 2002) การศึกษาของ Bhandari และคณะ (1997) ในการทำน้ำสับปะรดและน้ำฝรั่ง โดยการอบแห้งแบบพ่นฝอย เพื่อหาปริมาณมอลโตเดกซ์ตรินที่เหมาะสม ใช้ น้ำสับปะรดเข้มข้น 75 องศาบริกซ์ ความเป็นกรดร้อยละ 3.5 (กรดซิตริก) น้ำฝรั่งที่มีความชื้นร้อยละ 17 จากนั้นนำไปผสมกับมอลโตเดกซ์ตรินในสัดส่วนต่างๆ อุณหภูมิขาเข้า และขาออก คือ 150 (+/-3) และ 65 (+/-2) องศาเซลเซียส ตามลำดับ ความเร็วของอะตอมไมเซอร์คือ 20,000 รอบ/นาที ผลการทดลองพบว่า สัดส่วนของของแข็งในน้ำสับปะรดและน้ำฝรั่งต่อมอลโตเดกซ์ตรินเท่ากับ 59:41 และ 50:50 ตามลำดับ มีความเหมาะสมในการผลิตน้ำสับปะรดผง และน้ำฝรั่ง เพราะผลผลิตที่ได้มีค่าตั้งแต่ร้อยละ 50 ขึ้นไป

2.5.2 สตาร์ชดัดแปร

สตาร์ชมันสำปะหลัง เป็นผลิตภัณฑ์สตาร์ชที่ผลิตจากหัวมันสำปะหลังซึ่งเป็นพืชที่มีการปลูกมากในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ รวมทั้งประเทศไทย สตาร์ชมันสำปะหลังไม่มีสี และกลิ่น

เมื่อนำมาใช้เป็นส่วนประกอบของอาหาร จะไม่ทำให้คุณลักษณะของอาหาร หรือกลิ่นรสของอาหารนั้นเปลี่ยนไป อย่างไรก็ตามปัจจุบันการใช้ประโยชน์จากสตาร์ชมันสำปะหลังที่ได้จากธรรมชาติในด้านอุตสาหกรรมอาหารยังมีข้อจำกัด เช่นเดียวกับกับสตาร์ชชนิดอื่นๆ เนื่องจากสตาร์ชที่ได้จากธรรมชาติมีการพองตัวอย่างรวดเร็ว และแตกง่าย ให้สารละลายที่มีความหนืดสูง และไม่เสถียรต่อสภาวะที่ใช้ในการแปรรูป เช่น แร้งเคือง ความร้อน การแช่แข็ง และการละลาย (freeze-thaw) ดังนั้นการตัดแปรรูปสตาร์ชมันสำปะหลังให้มีสมบัติเปลี่ยนไปจากสตาร์ชธรรมชาติจึงเป็นสิ่งจำเป็น เพราะจำให้ได้สตาร์ชตัดแปรรูปที่มีสมบัติต่างๆ กัน ตามที่อุตสาหกรรมอาหารต้องการนำไปใช้ประโยชน์ เป็นผลให้สามารถนำสตาร์ชมันสำปะหลังมาใช้ประโยชน์ในด้านอาหารได้มากขึ้น และยังก่อให้เกิดมูลค่าเพิ่มแก่ผลผลิตสตาร์ชมันสำปะหลัง นอกจากนี้ยังเป็นแนวทางหนึ่งที่จะช่วยรองรับผลผลิตส่วนเกินในช่วงที่ผลผลิตสตาร์ชออกมามาก

การตัดแปรรูปสตาร์ช มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติของสตาร์ชให้เหมาะสมต่อการใช้งาน สตาร์ชสามารถตัดแปรรูปให้มีระดับความหนืดตามที่ต้องการ มีความคงทนต่อสภาวะในกระบวนการผลิต เช่น มีความคงตัวต่ออุณหภูมิที่สูงมาก ทนต่อความเป็นกรดสูง เป็นต้น มีลักษณะเนื้อสัมผัสที่ดีขึ้น มีความคงตัวสูง ลดการเกิดการคืนตัวของแป้ง (retrogradation) จึงช่วยยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ได้ (นิสิตและคณะ, 2549) สำหรับสตาร์ชตัดแปรรูปที่นำมาใช้ในการอบแห้งแบบพ่นฝอย มีสมบัติดังนี้ คือ เป็นผงสีขาว ไม่มีกลิ่น และรส มีความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 4-8 มีพีเอชอยู่ระหว่าง 4-6 เป็นอิมัลซิไฟเออร์ที่ดี (Siam modified starch, 2010)

การตัดแปรรูปสตาร์ชสามารถทำได้หลายวิธี สตาร์ชตัดแปรรูปจะมีสมบัติแตกต่างกันตามวิธีที่ใช้ในการตัดแปรรูป การใช้ประโยชน์ของสตาร์ชตัดแปรรูปแต่ละชนิดจึงต้องเลือกให้เหมาะสมกับชนิดของผลิตภัณฑ์ (จารุณี, 2547)

สามารถแบ่งวิธีการตัดแปรรูปสตาร์ชได้ดังนี้ BeMiller (1997)

ก. การตัดแปรรูปทางเคมี (chemical modification)

การเกิดอนุพันธ์ (derivatization)

- การแทนที่ด้วยโมเลกุลชนิดเดียว (monostarch substitution) มีทั้งปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน เช่น สตาร์ชอะซิเตท (acetate starch) หรือปฏิกิริยาอีเทอร์ฟิเคชัน เช่น สตาร์ชไฮดรอกซีเอทิล (hydroxyethyl starch) มีสมบัติดังนี้ คือ ลดการเกิดการคืนตัวของสตาร์ช สตาร์ชสุกจึงเก็บได้นาน ความหนืดไม่เปลี่ยนแปลง โดยเฉพาะที่อุณหภูมิต่ำ นอกจากนี้ยังลดการเปลี่ยนความหนืดของอาหารขณะแช่แข็งและละลาย (freeze-thaw) มีอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชัน (gelatinization) ต่ำลง ความใสเพิ่มขึ้น มี peak viscosity สูงขึ้น เม็ดสตาร์ชจึงพองตัวได้ง่ายขึ้น และมากขึ้น

- การแทนที่ด้วยโมเลกุลที่มีหมู่ฟังก์ชันมากกว่า 1 หมู่ เช่น สตาร์ชครอสลิง (cross-linked starch) มีสมบัติดังนี้ คือ เม็ดสตาร์ชมีความแข็งแรงมากขึ้น การเชื่อมข้ามสามารถใช้ควบคุมการพองตัวของเม็ดสตาร์ชได้ ช่วยเพิ่มความคงตัวของสตาร์ชต่ออุณหภูมิสูง การกวน แรงเฉือน และสภาวะที่เป็นกรดได้

การลดขนาดโมเลกุลสตาร์ชโดยกรด (*acid thinning*) เช่น สตาร์ชย่อยด้วยกรด (*acid-modified starch*) หรือ *thin-boiling starch* มีสมบัติดังนี้ คือ สตาร์ชตัดแปรที่ได้ส่วนใหญ่ยังอยู่ในรูปเม็ดสตาร์ช มีความหนืดต่ำขณะร้อน ความเหนียวในการยึดเกาะ (*adhesiveness*) เพิ่มขึ้น สตาร์ชสุกจะมีเจลที่แข็งแรงเมื่อทิ้งไว้ให้เย็น

เดกซ์ตรีไนเซชัน (dextrinization) เป็นการให้ความร้อนกับสตาร์ชแห้งที่มีลักษณะเป็นกรด เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่พันธะ α -1,4 และรีพอลิเมโรเซชัน (*repolymerization*) ในเม็ดสตาร์ช เช่น การผลิตเดกซ์ตริน (*dextrin*) ความหนืดต่ำ แต่ความสามารถในการละลายสูง (อาจละลายน้ำได้ร้อยละ 100) จึงใช้เดกซ์ตรินที่ความเข้มข้นสูงๆ ในการแปรรูปอาหารได้ มักใช้เดกซ์ตรินเป็นสารทำให้เกิดฟิล์ม และสารยึดเกาะที่กินได้ในการเคลือบอาหารแทนกัมต่างๆ ซึ่งมีราคาแพงกว่า

ออกซิเดชัน (oxidation) ทำให้เกิดการฟอกสี และลดขนาดของโมเลกุลโดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (*bleaching* และ *depolymerization*) เช่น การผลิตสตาร์ชออกซิไดซ์ (*oxidized starch*) สตาร์ชมีสมบัติดังนี้ คือ ความหนืดลดลง ความร้อนที่ทำให้เกิดการดูดซึมน้ำ (*hydration*) น้อยลง สูญเสียสมบัติการเกิดเจลไปบางส่วน เป็นผงแห้งไม่เกาะติดกัน มีความใสเพิ่มขึ้น และมีความคงตัวต่ออุณหภูมิต่ำ

การย่อย (hydrolysis) โดยใช้เอนไซม์ หรือกรด เพื่อย่อยสลายเป็นมวลโมเลกุลเล็ก เช่น การผลิตมอลโตเดกซ์ตริน มีสมบัติดังนี้ คือ ความหนืดลดลงขณะร้อน ความสามารถในการยึดเกาะกันดีขึ้น ความสามารถในการละลายสูงขึ้น

ข. การดัดแปรทางกายภาพ (**physical modification**)

เจลาติไนเซชัน (gelatinization) เป็นการให้ความร้อนแก่แป้งจนผ่านขั้นตอนของเจลาติไนเซชัน แล้วทำแห้งทันที เช่น การผลิตแป้งพรีเจลาติไนซ์ (*pregelatinized starch*) มีสมบัติดังนี้ คือ สตาร์ชที่ได้จะกระจายตัวได้ในน้ำเย็น และให้ความข้นหนืดอย่างรวดเร็ว ไม่เกิดเจล หรือมีแนวโน้มในการเกิดเจลลดลง สามารถดูดซึมน้ำได้มากกว่าสตาร์ชดิบ

แป้งละลายน้ำเย็น (granular-cold-water-soluble-starch : GCWSS) เป็นการแปรรูปจนได้สตาร์ชที่สามารถละลายได้ในน้ำเย็น โดยไม่ต้องผ่านขั้นตอนการเกิดเจลาติไนเซชัน มีสมบัติดังนี้

คือ สตาร์ชที่ได้จะมีลักษณะเนื้อสัมผัสเรียบ มีความยืดหยุ่น มีความมันเงา โดยยังสภาพของเม็ดสตาร์ชอยู่ และสามารถละลายในน้ำเย็นได้ถึงร้อยละ 70-90

การลดขนาดเม็ดสตาร์ช โดยทางกล การทำให้เม็ดสตาร์ชแตกโดยทางกล เม็ดสตาร์ชจะมีขนาดเล็กกว่าปกติ มีสมบัติดังนี้ คือ จะได้เม็ดสตาร์ชที่มีขนาดเล็กๆ และมีสมบัติแตกต่างไปจากเดิม โดยเฉพาะหมู่ไฮดรอกซิล (OH-group) ที่สามารถทำปฏิกิริยาได้จะมีมากขึ้น

การแช่น้ำ (annealing) เป็นการให้ความร้อนในขณะที่เม็ดสตาร์ชอยู่ที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเจลาติไนเซชัน มีสมบัติดังนี้ คือ สตาร์ชยังอยู่ในรูปเม็ดสตาร์ช และให้ความหนืดสูงขึ้น

การแปรรูปด้วยความร้อนชื้น (heat moisture treatment) เป็นการให้ความร้อนสูงกว่าจุดเจลาติไนเซชันแก่สตาร์ชในขณะที่สตาร์ชมีความชื้นต่ำ มีสมบัติดังนี้ คือ อุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันเพิ่มขึ้น ช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันแคบลง สตาร์ชมีความหนืดสูงขึ้น และคงตัวมากขึ้น

งานวิจัยของ Loksuan (2006) ในการห่อหุ้มบีตา-แคโรทีน โดยใช้สตาร์ชตัดแปรเป็นสารห่อหุ้ม เปรียบเทียบกับสตาร์ชที่ไม่ผ่านการตัดแปร และนำไปอบแห้งแบบพ่นฝอย พบว่าการเตรียมสตาร์ชมันสำปะหลังตัดแปรหลังจากผ่านความดันไอน้ำมีศักยภาพเพียงพอที่จะเป็นสารห่อหุ้ม การใช้กรรร่วมกับความดันไอน้ำเป็นผลให้สตาร์ชมีความหนืดต่ำ และมีปริมาณของแข็งสูง สตาร์ชนี้สามารถกักเก็บบีตา-แคโรทีนได้ดีในระหว่างกระบวนการอบแห้ง โดยที่ผิวของสตาร์ชมันสำปะหลังตัดแปรมีปริมาณแคโรทีนต่ำ บ่งชี้ว่าการผลิตไมโครแคปซูลนี้มีประสิทธิภาพ โดยที่บีตา-แคโรทีนผงที่ผลิตได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยจากสตาร์ชมันสำปะหลังตัดแปรมีความสามารถในการละลายในน้ำเย็นได้ดีกว่าสตาร์ชมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการตัดแปร

ค. การตัดแปรทางเทคโนโลยีชีวภาพ (biotechnological Modification)

การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของสตาร์ชโดยใช้การเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรม

Waxy starch คือ สตาร์ชที่มีอะไมโลสต่ำ หรือไม่มีเลย มีสมบัติดังนี้ คือ สตาร์ชไม่เกิดการคิ่นตัว หรือเกิดการคิ่นตัวเพียงเล็กน้อย มีความมันเงาสูง สามารถทำให้ชุ่มน้ำได้อย่างรวดเร็ว

High-amylose starch คือ สตาร์ชที่มีอะไมโลสสูง มีสมบัติดังนี้ คือ เม็ดสตาร์ชมีขนาดเล็กกว่า ฟองตัวได้ยาก และมีอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนเซชันสูงกว่าสตาร์ชดั้งเดิม มีโครงสร้างผลึกที่คงทนต่อการถูกทำลายในน้ำร้อนได้มากกว่าสตาร์ชดั้งเดิม สามารถผลิตแผ่นฟิล์มที่มีความแข็งแรงและยืดหยุ่นได้ดี เหมาะสำหรับการใช้เป็นสารเคลือบ (coating agent)

2.5.3 กัมอะราบิก

กัมอะราบิก (gum arabic) เป็นสารประกอบประเภทพอลิแซ็กคาไรด์กัมที่อยู่ในกลุ่มสารไฮโดรคอลลอยด์ (hydrocolloids) มีสภาพเป็นกลาง หรือเป็นเกลือของกรดเล็กน้อย ประกอบด้วยไอออนของแคลเซียม แมกนีเซียม และโพแทสเซียม มีมวลโมเลกุลประมาณ 200,000-300,000 โครงสร้างของกัมอะราบิก มีแกนหลักที่ประกอบด้วย D-galactopyranose เชื่อมกันด้วยพันธะ β -D-(1,4) และ β -D-(1,6) แขนงข้างเชื่อมด้วยพันธะ β -D-(1,3) ของ D-galactopyranose ที่แขนงข้างนี้จะมีส่วนที่เหลือสุดท้ายเป็น L-rhamnopyranose หรือ L-arabinofuranose โดยมากจะพบ D-glucuronic acid ต่อกับ D-galactose ด้วยพันธะ β -D-(1,6) และมักพบ L-arabinofuranose เชื่อมด้วยพันธะ 1,4 กับ D-glucuronic acid ส่วนมาก L-rhamnose จะต่อกับ D-gucuronopyranosyl เป็น 4-D- α -L-rhamnopyranosyl ซึ่งเป็นปลายนอนรีดิวซ์ (non-reducing end) (นันทรัตน์, 2538) และมีโปรตีนรวมอยู่ด้วยประมาณร้อยละ 2 (Dickinson, 2003) กัมอะราบิกถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในวงการอุตสาหกรรมอาหาร

กัมอะราบิกมาจากน้ำยางธรรมชาติที่ไหลออกมาจากผิวเปลือกของลำต้นของพืชในกลุ่มอะคาเซีย (acacia) โดยเฉพาะอย่างยิ่งอะคาเซียเซเนกัล (acacia senegal) น้ำยางจะไหลเกาะกันเป็นก้อน เมื่อกระทบความร้อนจากแสงแดด จะแห้งแข็งตัวใสคล้ายแก้วเกาะอยู่ตามกิ่งก้าน และลำต้นของพืช มีสีน้ำตาลแตกต่างกันไปตั้งแต่ขาวใสจนถึงเหลืองอำพัน รูปทรงมองคล้ายหยดน้ำ ทรงกลมรีหรือมีเหลี่ยมมุมตามธรรมชาติ น้ำยางในกลุ่มพืชอะคาเซียมีอยู่มากมายหลายชนิด ซึ่งชนิดที่ให้น้ำยางมีคุณภาพดีที่สุดคือ อะคาเซียเซเนกัล ที่เจริญเติบโตได้ดีในพื้นที่ตอนกลางของประเทศซูดานในทวีปแอฟริกา เป็นที่รู้จักในเชิงพาณิชย์ว่า กัมอะราบิก และกัมอะคาเซีย (acacia gum) ที่สำคัญเป็นสารไม่มีพิษต่อร่างกาย ซึ่งได้ผ่านการรับรองระบบมาตรฐานของอาหาร โลก และได้รับกำหนดในตำรับ GRAS (Generally Recognized as Safe) และมาตรฐานของ United State pharmacopia, Food Chemical Codex และ EU Number E414 รวมทั้งผ่านการรับรองจากสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา ประเทศไทย (Asia Pacific Food Industry Thailand, 2007)

กัมอะราบิก เป็นสารที่ไม่ให้พลังงาน สามารถใช้เป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์อาหารที่ให้พลังงานต่ำ หรือปราศจากน้ำตาลได้เป็นอย่างดี กัมอะราบิก เป็นผงสีขาว ไม่มีกลิ่น และรส เมื่อนำไปละลายน้ำ กัมอะราบิกสามารถละลายได้ดีในน้ำทั้งอุณหภูมิปกติ น้ำร้อน หรือน้ำเย็นได้ง่าย เพียงนำมาผสมในน้ำ และกวน หรือคนอยู่นละลาย สามารถละลายน้ำได้ดีมาก และให้สารละลายใส (Asia Pacific Food Industry Thailand, 2007) สารละลายกัมอะราบิกจะมีสภาพเป็นกรดเล็กน้อย โดยมีพีเอชอยู่ในช่วง 4.5-5.5 และสารละลายจะมีความหนืดมากที่สุด เมื่อมีพีเอชอยู่ในช่วง 6-7 สำหรับการลดความหนืดของกัมอะราบิก ทำได้โดยเติมสารอิเล็กโทรไลต์ ให้ความร้อน

เป็นเวลานาน หรือทำให้อยู่ในสภาพที่เป็นกรด ทำให้กัมอะราบิกถูกย่อยไปบางส่วน (นันทรัตน์, 2538) นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกับกัมชนิดอื่นๆ พบว่ากัมอะราบิกให้ความหนืดต่ำที่ความเข้มข้นสูงๆ (Brian *et al.*, 2001) ค่าความชื้นของกัมอะราบิกเท่ากับร้อยละ 6.30 (starlight products, 2010) กัมอะราบิกมีประสิทธิภาพในการลดความชื้นของอาหารผง ได้ดีกว่ามอลโตเดกซ์ตริน (Collares *et al.*, 2004) แต่เนื่องจากกัมอะราบิกมีราคาแพง จึงไม่เป็นที่นิยมใช้ (Gibbs *et al.*, 1999; McNamee *et al.*, 2001) กัมอะราบิกมีสมบัติในการเกิดฟิล์ม (Dickinson, 2003) และเป็นอิมัลซิฟายเออร์ที่เสถียร (Madene *et al.*, 2005) กัมอะราบิกมีประสิทธิภาพสูงในการทำหน้าที่เป็นอิมัลซิฟายเออร์ โดยเฉพาะในอิมัลชันประเภทน้ำมันในน้ำ (oil in water emulsion) เนื่องจากโครงสร้างที่เป็นกรดอะมิโนสามารถดูดซับจับอยู่บนพื้นผิวของหยดน้ำได้อย่างดี และแข็งแรง ช่วยป้องกันการเกิด coalescence in emulsion และในส่วน โครงสร้างที่เป็น arabinogalactan จะช่วยเพิ่มความหนืดให้กับส่วนที่เป็นน้ำ จึงมีสมบัติที่เหมาะสมในการผลิตอิมัลชันของน้ำมันให้กลั่นเพื่อใช้ในการแต่งกลิ่น ซึ่งใช้ได้ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งกลิ่นส้ม สำหรับประโยชน์ของกัมอะราบิกในการผลิตสารให้กลิ่น (encapsulated flavor) พบว่ากัมอะราบิกใช้ได้ผลดีที่สุดในการทำหน้าที่ลดแรงตึงผิว ทำให้เกิดอิมัลชันได้ง่าย และเกิดการกระจายตัวได้ดี เมื่อหุ้มอยู่ที่ผิวหน้าของหยดไขมันแล้วจะมีประจุอยู่โดยรอบ ที่สำคัญเป็นประจุชนิดเดียวกันจึงทำให้เกิดการผลักกันอยู่ตลอดเวลาช่วยป้องกันหยดไขมันเข้ามารวมตัวกันทำให้อิมัลชันคงรูปอยู่ได้นาน และเมื่อผ่านการอบแห้งแบบพ่นฝอยแล้ว กัมอะราบิกยังให้สมบัติที่เป็นฟิล์มหุ้มอยู่โดยรอบ และมีการเกาะติดสูง ทำให้อิมัลชันส่วนที่เป็นสารให้กลิ่นรสไว้ได้สูงมาก และลดการระเหยของสารให้กลิ่นรส ไม่มีผลกระทบต่อกลิ่น และ กลิ่นรส รวมทั้งสีของผลิตภัณฑ์ (Asia Pacific Food Industry Thailand, 2007)

งานวิจัยของ Shaikh และคณะ (2004) ในการห่อหุ้ม black pepper oleoresin โดยวิธีอบแห้งแบบพ่นฝอย ใช้กัมอะราบิก และสตาร์ชดัดแปรเป็นสารห่อหุ้ม ประเมินความเสถียรของสารชนิดต่างๆ ใน black pepper oleoresin จากค่าครึ่งชีวิต พบว่ากัมอะราบิกมีความสามารถในการปกป้อง black pepper oleoresin ได้ดีกว่าสตาร์ชดัดแปร เนื่องจากปริมาณสารชนิดต่างๆ ใน black pepper oleoresin คงเหลืออยู่ในปริมาณที่มากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับสารห่อหุ้มด้วยสตาร์ชดัดแปร นอกจากนั้น Krisnan และคณะ (2005) และ Kanakdande และคณะ (2006) ยังพบว่ากัมอะราบิก เป็นสารห่อหุ้มที่มีประสิทธิภาพดีกว่ามอลโตเดกซ์ตริน และสตาร์ชดัดแปร สำหรับห่อหุ้มสารให้กลิ่นรส เนื่องจากไมโครแคปซูลที่ได้สามารถไหลได้อย่างอิสระ และมีประสิทธิภาพในการห่อหุ้มสารให้กลิ่นรสดีที่สุดในเมื่อเปรียบเทียบกับมอลโตเดกซ์ตริน และสตาร์ชดัดแปร

2.6 สมบัติสำคัญของอาหารผง

2.6.1 ค่าแอกทีวิตี (water activity, a_w)

ค่า a_w คือ อัตราส่วนของความดันไอน้ำในอาหาร (P) ต่อความดันไออิ่มตัวของน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิเดียวกัน (P_0)

$$a_w = \frac{P}{P_0} \quad (2.1)$$

ค่า a_w เป็นสมบัติอย่างหนึ่งของอาหาร มีความสัมพันธ์กับความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity) ของบรรยากาศ ความชื้นสัมพัทธ์เป็นอัตราส่วนความดันย่อย (partial pressure) ของไอน้ำในอากาศต่อความดันไออิ่มตัวของน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิเดียวกันที่สภาวะสมดุล ตามสมการต่อไปนี้

$$a_w = E.R.H/100 \quad (2.2)$$

เมื่อ E.R.H = ความชื้นสัมพัทธ์สมดุล (Equilibrium relative humidity)

สมการดังกล่าวจะเป็นจริงก็ต่อเมื่อความชื้นในอาหารอยู่ในสมดุลกับความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศรอบๆ อาหาร (Barbosa-Cánovas *et al.*, 2007)

ค่า a_w ของอาหารมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ส่วนน้ำบริสุทธิ์มีค่า a_w เท่ากับ 1 อาหารมีค่า a_w น้อยกว่า 1 เนื่องจากในอาหารมีตัวถูกละลายซึ่งยึดเหนี่ยวอยู่กับโมเลกุลของน้ำ ทำให้น้ำระเหยได้ยาก และมีความดันไอน้ำต่ำกว่าน้ำบริสุทธิ์

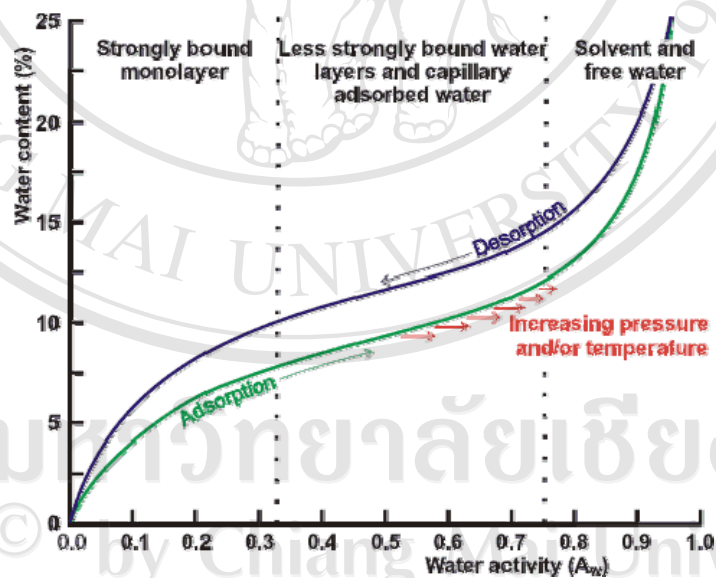
ค่า a_w เป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดที่มีอิทธิพลอย่างมากต่อคุณภาพ และการเน่าเสียของอาหาร ดังนั้นการลดปริมาณน้ำในอาหารให้น้อยลงเพื่อให้ค่า a_w ลดลง เป็นการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ และการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี ช่วยให้อาหารเก็บรักษาได้นาน กระบวนการที่ใช้ในการลดปริมาณน้ำ และ a_w เช่น การระเหย และการอบแห้ง เป็นต้น

จุลินทรีย์ทุกชนิดจะหยุดการเจริญเมื่ออาหารมีค่า a_w 0.6 หรือต่ำกว่า จุลินทรีย์ประเภทราจะหยุดการเจริญเมื่อ a_w มีค่า 0.7 หรือต่ำกว่า และยีสต์จะเริ่มเจริญได้เมื่ออาหารมีค่า a_w อยู่ในช่วง 0.7-0.8 ส่วนแบคทีเรียจะเริ่มเจริญเมื่อ a_w มีค่ามากกว่า 0.8 (นิธิยา, 2551)

2.6.2 (Moisture sorption isotherm)

ซอร์ปชันไอโซเทอร์มของอาหาร เป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่า a_w กับความชื้นของอาหาร ณ อุณหภูมิ และความดันคงที่ แสดงในรูปเส้นกราฟ เมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น ค่า a_w จะเพิ่มขึ้นด้วย แต่เป็นการเพิ่มแบบไม่เป็นเส้นตรง นอกจากนี้กราฟซอร์ปชันไอโซเทอร์มของอาหารแต่ละชนิดจะมีลักษณะที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความดันไอของน้ำในช่องว่างเนื้อผลิตภัณฑ์ และพลังงานของการจับพันธะของน้ำในผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด (ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บ

เกี่ยวกับมหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2547) ซอร์ปชันไอโซเทอร์มเป็นสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่สำคัญในการทำนายปฏิกิริยาระหว่างน้ำ และองค์ประกอบของอาหาร ซึ่งให้ข้อมูลที่มีประโยชน์ในกระบวนการผลิตอาหาร เช่น การอบแห้งเพื่อใช้ในการออกแบบอุปกรณ์อบแห้งที่เหมาะสม ใช้ในการทำนายความเสถียรของอาหารระหว่างการเก็บรักษา โดยการคำนวณความชื้นที่เปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในระหว่างการเก็บรักษา และใช้ในการเลือกวัตถุดิบที่ใช้ผลิตบรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสม (Gal, 1987) รวมถึงยังใช้พิจารณาหาความชื้นวิกฤตกับค่า a_w ซึ่งสามารถยอมรับได้ของผลิตภัณฑ์ที่เสื่อมเสียเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น (Van den Berg and Bruin, 1981; Palou *et al.*, 1997) นอกจากนี้การวิเคราะห์ข้อมูลซอร์ปชันไอโซเทอร์มโดยการประยุกต์หลักทางเทอร์โมไดนามิกเป็นข้อมูลที่สำคัญเพื่อใช้พิจารณาพลังงานที่ต้องใช้ในกระบวนการอบแห้ง โครงสร้างระดับจุลภาคของอาหาร และปรากฏการณ์ทางธรรมชาติของพื้นผิวอาหาร สมบัติของน้ำ และพารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์ของซอร์ปชันไอโซเทอร์ม (Rizvi and Benado, 1984) ความสามารถในการทำนายปริมาณความชื้นในระหว่างการเก็บรักษาภายใต้สภาวะต่างๆ มีความสำคัญมากในการลดต้นทุน และเวลาในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ (Debnath and Bhat, 2002; Johnson and Brennan, 2000; Menkov, 2000; Yanniotis and Zarmboutis, 1996)



ภาพที่ 2.1 ซอร์ปชันไอโซเทอร์ม

ที่มา : Chaplin (2009)

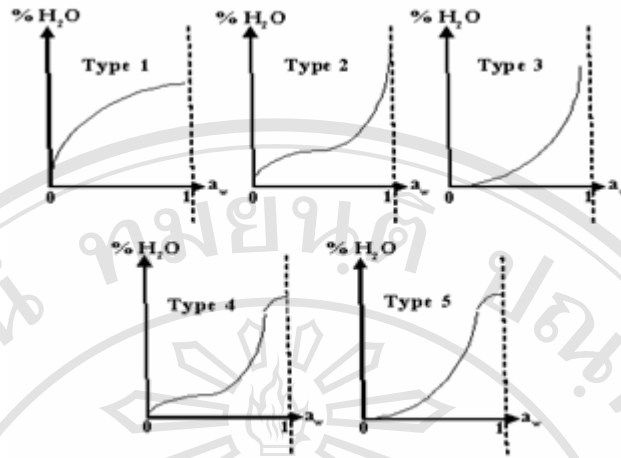
กราฟซอร์ปชันไอโซเทอร์มสามารถแบ่งเส้นกราฟออกเป็น 3 ส่วน (ภาพที่ 2.1) น้ำในส่วน I ของไอโซเทอร์ม เป็นน้ำที่ถูกอาหารดูดซับไว้รอบๆ อาหาร เป็นฟิล์มบางๆ เพียงชั้นเดียว (monolayer) เท่านั้น น้ำในส่วนนี้มีสมบัติเป็นส่วนหนึ่งของอาหารที่มีความคงตัวดีมาก ไม่ว่าที่อุณหภูมิใดๆ ก็ตามไม่สามารถทำให้น้ำส่วนนี้แข็งตัวได้ น้ำส่วนนี้ถูกยึดแน่นด้วยพันธะทางเคมี และไม่มีประโยชน์ หรือมีประโยชน์น้อยมากในการทำปฏิกิริยาต่างๆ สำหรับน้ำในส่วน II หมายถึง น้ำที่อาหารดูดซึมเพิ่มขึ้นมากขึ้นจากชั้นฟิล์มบางๆ เพียงชั้นเดียว เป็นน้ำที่เกาะตัวกันอย่างหลวมๆ มีการยึดกันน้อยกว่าน้ำในส่วน I ของไอโซเทอร์ม และน้ำในส่วน III เป็นน้ำที่รวมตัวกันอยู่ตามช่องว่างระหว่างสารประกอบของอาหาร จุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ในการเจริญ หรือเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงได้ สามารถแข็งตัวเป็นน้ำแข็งได้ และมีความดันไอใกล้เคียงกับน้ำบริสุทธิ์

การหาซอร์ปชันไอโซเทอร์มของอาหารทดลองโดยใช้เทคนิคการวัดน้ำหนักฐานแห้ง ซึ่งตัวอย่างจะถูกทำให้อยู่ในสถานะสมดุลในโถดูดความชื้นที่บรรจุสารละลายเกลือที่ทราบค่า a_w (0.05-0.95) และวางไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิเป็นเวลาประมาณ 1-3 สัปดาห์ (Al-Muhtaseb *et al.*, 2004) ตารางที่ 2.1 แสดงค่า a_w อิมิตัวของสารละลายอิมิตัวของเกลือชนิดต่างๆ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 2.1 ค่า a_w ของสารละลายเกลือที่แตกต่างกัน ที่อุณหภูมิ 25°C

สารละลายเกลืออิมิตัว	ค่า a_w
LiCl	0.11-0.15
KC ₂ H ₃ O ₂	0.20-0.23
MgCl ₂ 6H ₂ O	0.33
K ₂ CO ₃	0.44
Mg (NO ₃) ₂ 6H ₂ O	0.52-0.55
NaCl	0.75
CdCl ₂	0.82
K ₂ CrO ₄	0.88
KNO ₃	0.93-0.94
K ₂ SO ₄	0.97

ที่มา : Barbosa-Cánovas and Vega-Mercado (1996)



ภาพที่ 2.2 ประเภทของซอร์ปชันไอโซเทอร์ม

ที่มา : Mathlouthi and Roge (2003)

กราฟซอร์ปชันไอโซเทอร์มแบ่งออกเป็น 5 ประเภทดังภาพที่ 2.2 (Brunauer *et al.*, 1938) โดยประเภทที่ 1 คือ Langmuir isotherm ซึ่งได้มาโดยการดูดซับโมเลกุลเดี่ยวของแก๊สโดยของแข็งที่มีรูพรุน (porous solid) ในปริมาณของช่องว่างที่จำกัด ประเภทที่ 2 คือ sigmoid isotherm อธิบายซอร์ปชันไอโซเทอร์มสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ละลายได้ และมีแนวโน้มเป็นเส้นโค้งเข้าหาแนวเส้น a_w ที่มีค่าเท่ากับ 1 สำหรับประเภทที่ 3 คือ Flory-Huggins isotherm ใช้คำนวณสำหรับการดูดซับของตัวทำละลาย หรือผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นพลาสติกคล้ายกลีเซอรอลที่อุณหภูมิเหนือค่า T_g หรือเป็นลักษณะซอร์ปชันไอโซเทอร์มของผลิตภัณฑ์อาหารที่มีองค์ประกอบเป็นของแข็งที่ละลายน้ำได้ เช่น น้ำตาล หรือเกลือ (Rahman, 1995) ส่วนซอร์ปชันไอโซเทอร์มประเภทที่ 4 อธิบายการดูดซับโดยของแข็งที่ชอบน้ำ และมีความสามารถอุ้มน้ำได้ (swellable hydrophilic solid) จนกระทั่งถึงจุดสูงสุดของการดูดซึมน้ำ (hydration) และประเภทที่ 5 คือ Brunauer, Emmett and Teller (BET) multilayer adsorption isotherm (Brunauer *et al.*, 1938) ใช้สำหรับวิเคราะห์การดูดซับของไอน้ำบนถ่านหิน และสัมพันธ์กับซอร์ปชันไอโซเทอร์ม ประเภทที่ 2 และ 3 นอกจากนี้ยังพบว่าซอร์ปชันไอโซเทอร์ม 2 ประเภทที่พบบ่อยที่สุดในผลิตภัณฑ์อาหาร คือ ซอร์ปชันไอโซเทอร์มประเภทที่ 2 และ 4 (Mathlouthi and Roge, 2003)

รูปร่างของซอร์ปชันไอโซเทอร์มที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับธรรมชาติของผงอาหารว่าเป็นโครงสร้างผลึกที่มีรูปแบบที่แน่นอน หรือเป็นโครงสร้างอสัณฐานที่มีรูปแบบไม่แน่นอน ซึ่งอาหารผงส่วนมากมีโครงสร้างอสัณฐาน ได้แก่ ตัวถูกละลาย เช่น น้ำตาล จะเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างไปเป็นผลึกในระหว่างการดูดซับของน้ำ มีหลายปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับของไอน้ำ และ

ส่งผลต่อความคงตัวระหว่างการเก็บรักษา เช่น การมีฟิล์มบางของสารละลายอิมิตัวที่ผิวของผลึก การกระจายขนาดของอนุภาคเล็กๆ และน้ำในผลึก ทำให้องค์ประกอบอาหารที่มีโครงสร้างอัดแน่น และมีแนวโน้มเกิดการเกาะตัวกันของผง (Mathlouthi and Roge, 2003)

การวิเคราะห์ลักษณะซอร์ปชันไอโซเทอร์ม โดยใช้วิธีของ Bell and Labuza (2000) ทำได้ โดยเก็บตัวอย่างอาหารผงในโถดูดความชื้นที่มีการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในภาชนะด้วย สารละลายเกลืออิมิตัว ควบคุมระดับความชื้นสัมพัทธ์ 8 ระดับ (ร้อยละ 0-77) โดยใช้สารละลายเกลืออิมิตัวดังนี้ โพแทสเซียมเพนตะออกไซด์ ลิเทียมคลอไรด์ โพแทสเซียมอะซิเตท แมกนีเซียมคลอไรด์ โพแทสเซียมคาร์บอเนต แมกนีเซียมไนเตรท และโพแทสเซียมไอโอไดด์ ที่อุณหภูมิที่ต้องการศึกษา จนตัวอย่างเข้าสู่สภาวะสมดุลโดยที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก นำตัวอย่างไปวิเคราะห์ความชื้น สร้างกราฟซอร์ปชันไอโซเทอร์ม และหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมที่สุด

การศึกษาซอร์ปชันไอโซเทอร์มนั้นเป็นกระบวนการที่ค่อนข้างซับซ้อน และใช้เวลานาน ดังนั้นจึงมีนักวิจัยคิดค้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการทำนายซอร์ปชันไอโซเทอร์ม ซึ่งจะทำให้มีการประหยัดเวลา และนำไปใช้ในการทำนายและควบคุมการเก็บรักษาของอาหารได้อย่างเหมาะสม แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายซอร์ปชันไอโซเทอร์มสามารถแบ่งได้ตามจำนวนตัวแปรที่มีในสมการ ดังต่อไปนี้ (Rahman, 1995)

1. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของซอร์ปชันไอโซเทอร์มประเภท 2 ตัวแปร

1.1 สมการของ Smith เป็นสมการอย่างง่ายที่ใช้อธิบายซอร์ปชันไอโซเทอร์มของพอลิเมอร์ทางชีวภาพ (bio-polymers) ที่มีมวลโมเลกุลสูง ซึ่ง Becker and Sallans (1956) พบว่าสมการนี้ใช้ได้ ในกรณีการลดความชื้นของข้าวสาลี ที่มีค่า a_w อยู่ระหว่าง 0.5-0.95 อย่างไรก็ตาม Young (1976) แนะนำว่าการสมการนี้จะถูกจำกัดที่ค่า a_w ต้องมากกว่า 0.3 ในกรณีของถั่วลิสงเวอร์จิเนีย หรือเหมาะสำหรับ a_w ในช่วง 0.3-0.9 (Kumar and Siddaramaiah, 2007) ซึ่ง Smith (1947) ได้แสดงสมการไว้ดังนี้

$$M_w = A + B \ln(1 - a_w) \quad (2.3)$$

เมื่อ M_w = ความชื้น (g น้ำ/g ของแข็งแห้ง)

A, B = ค่าคงที่

1.2 สมการของ Oswin ได้พัฒนาสมการอย่างง่ายสำหรับกราฟรูปลอจิสต์กลับ แสดงสมการได้ดังนี้

$$M_w = A \left[\frac{a_w}{1 - a_w} \right]^B \quad (2.4)$$

Boquet *et al.* (1978) กล่าวว่า สมการของ Oswin ใช้ได้ดีที่สุดสำหรับการอธิบายซอร์ปชันไอโซเทอร์มของอาหารที่มีโปรตีน และคาร์โบไฮเดรต เป็นองค์ประกอบ และใช้ได้ดีสำหรับเนื้อ และผักต่างๆ

1.3 สมการของ Henderson

$$M_w = \left[\frac{\ln(1 - a_w)}{-A} \right]^{1/B} \quad (2.5)$$

1.4 สมการ BET ถูกค้นพบโดย Brunauer *et al.* (1938) ซอร์ปชันไอโซเทอร์มของ BET ส่วนใหญ่จะใช้ที่ค่า a_w อยู่ระหว่าง 0.05-0.45 แสดงสมการดังนี้ คือ

$$M_w = \frac{M_{bm} B_{bt} a_w}{(1 - a_w)[1 + (B_{bt} - 1)a_w]} \quad (2.6)$$

M_0 = ปริมาณความชื้นชั้นเดียว (monolayer moisture)

B = ค่าคงที่ที่สัมพันธ์กับความร้อนสุทธิทั้งหมดของ sorption

1.5 สมการของ Halsey

สมการนี้ใช้สำหรับอาหาร และองค์ประกอบของอาหารต่างๆ ที่มีค่า a_w เท่ากับ 0.10-0.80 (Kumar and Siddaramaiah, 2007)

$$M_w = \left[-\frac{A}{\ln a_w} \right]^{1/B} \quad (2.7)$$

$$\ln(M_w) = A + B \{ \ln[-\ln(a_w)] \} \quad (2.8)$$

1.6 สมการของ Chung and Pfof เป็นสมการที่แสดงการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระ สำหรับซอร์ปชันที่สัมพันธ์กับปริมาณความชื้น ดังสมการ

$$M_w = -\frac{1}{B} \ln \left[-\frac{\ln a_w}{A} \right] \quad (2.9)$$

1.7 สมการของ Iglesias and Chirife สมการนี้ถูกออกแบบเพื่อใช้อธิบายลักษณะอาหารที่มี น้ำตาลสูง แสดงสมการ ได้ดังนี้

$$\ln \left[M_w + \left(M_w^2 + M_{0.5w} \right)^{1/2} \right] = Aa_w + B \quad (2.10)$$

$M_{0.5w}$ = ปริมาณความชื้นที่ a_w เท่ากับ 0.5

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของซอร์ปชันไอโซเทอร์มประเภท 3 ตัวแปร

2.1 สมการ Cubic คือ สมการกำลังสาม ใช้สำหรับอธิบาย กราฟซอร์ปชันไอโซเทอร์มรูป พอลิโนเมียลกำลัง 3 อย่างง่าย

$$M_w = p_1 + p_2 a_w + p_3 a_w^2 + p_4 a_w^3 \quad (2.12)$$

2.2 สมการของ Schuchmann-Roy-Peleg ใช้ทำนายค่า a_w ที่ปริมาณความชื้นสูงแสดง สมการดังนี้ คือ

$$X_w = \frac{Aa_m}{(1 + Ba_m)(C - a_m)} \quad (2.13)$$

เมื่อ $a_m = a_w / (1 - a_w)$

2.3 สมการ GAB หรือ Guggenheim-Anderson-de Boer เป็นสมการที่ใช้สำหรับวัสดุอาหาร หลากหลายชนิดที่มีค่า a_w อยู่ในช่วงกว้าง แสดงสมการดังนี้ คือ

$$M_w = \frac{M_0 Y K a_w}{(1 + K a_w)(1 - K a_w + Y K a_w)} \quad (2.14)$$

$$\frac{a_w}{M_w} = \alpha(a_w)^2 + \beta(a_w) + \varepsilon \quad (2.15)$$

M_0 = GAB monolayer moisture (kg water/kg dry solid)

Y และ K = ความสัมพันธ์ของผลเนื่องจากอุณหภูมิ

2.6.3 ความสามารถในการไหล (flowability)

สมบัติในการไหลที่ดี และสม่ำเสมอเป็นสิ่งสำคัญอย่างหนึ่งในการผลิตอาหารผง เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดี และทำให้การผลิตรวดเร็วยิ่งขึ้น (สุทินและฤดี, 2525) การไหลของอาหารผงมีความสำคัญต่อการจัดการ และการเก็บรักษา สมบัติการไหลที่ลดลงของผงเกิดจากการอัดตัวแน่นของผง รวมถึงความชื้นที่มีผลทำให้ความสามารถในการไหลของผงลดลง สมบัติพื้นฐานที่แสดงถึงความสามารถในการไหล สามารถวัดได้จาก the angle of wall friction, the effective angle of internal friction, the failure function, the cohesion และ the ultimate tensile strength (อนุสร, 2552)

มุมกอง (angle of repose) ตามนิยามของ Terzaghi and Peck (1948) หมายถึง มุมกองระหว่างพื้นราบ และพื้นเอียงของกองวัสดุที่ถูกทำให้ไหลลงมาจากอุปกรณ์ที่จัดให้อยู่สูงเหนือพื้นราบ โดยใช้อุปกรณ์อย่างง่ายในการทำให้เกิดการไหลของวัสดุจากจุดที่อยู่เหนือพื้นราบจนกระทั่งมุมที่เกิดขึ้นคงที่ แล้วจึงวัดมุมกองของวัสดุแห้ง ค่ามุมกองของวัสดุแห้งที่มีค่าต่ำกว่าจะมีความสามารถในการไหลได้มากกว่าวัสดุแห้งที่มีค่ามุมกองที่สูงกว่า (Bodhimage, 2006) มุมกองเป็นดัชนีชี้วัดความสามารถในการไหลของผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นผง Carr (1965) ได้แบ่งกลุ่มความสามารถในการไหลของอาหารผงโดยการวัดมุมกองดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงค่าความสามารถในการไหลของอาหารผง

มุมกอง (θ)	ความสามารถในการไหล
< 35	ไหลได้ดี
35 – 45	ไหลได้พอใช้
45 – 55	ไหลได้จำกัด
> 55	ไม่ไหล

ที่มา: Carr (1965)

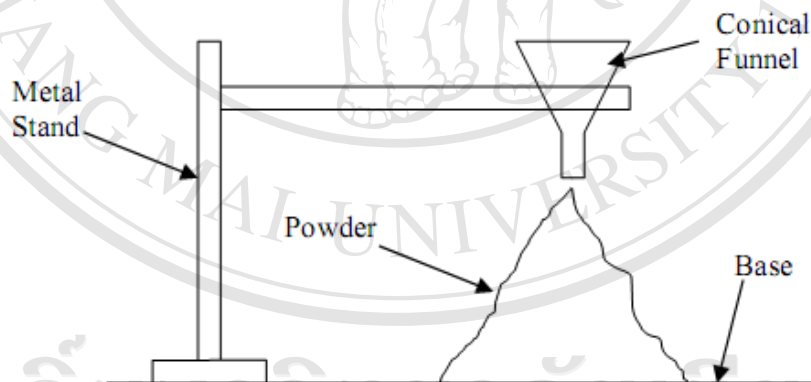
การวัดค่ามุมกองเป็นวิธีที่น่าเชื่อถือ รวดเร็ว และง่ายสำหรับการวัดความสามารถในการไหลของผงที่แตกต่างกัน โดยมุมกองที่มีขนาดเล็กกว่า จะมีความสามารถในการไหลของผงได้

อิสระกว่า ขณะที่มุมกองที่มีขนาดใหญ่กว่า แสดงว่าวัสดุมีความสามารถในการไหลได้ไม่ดี หรือมีความเกาะตัวกันระหว่างอนุภาคได้ดีกว่า (cohesiveness) ซึ่ง ISO 3435 ได้ใช้วิธีวัดมุมกองสำหรับการวิเคราะห์การเกาะตัวกันระหว่างอนุภาคของวัสดุที่มีขนาดใหญ่ (Bodhimage, 2006)

มุมกองสามารถวัดได้ 2 แบบ คือ static angle of repose เป็นมุมที่เกิดขึ้นระหว่างระนาบพื้นราบ และเส้นความชันที่ยาวไปตามพื้นผิวของกองที่เกิดขึ้นโดยวัสดุที่เทลงบนพื้นผิวราบ การวัด static angle of repose แสดงดังภาพที่ 2.3 สำหรับ dynamic angle of repose จะถูกวัดในกระบอกตวงที่มีการหมุน (rotating cylinder)

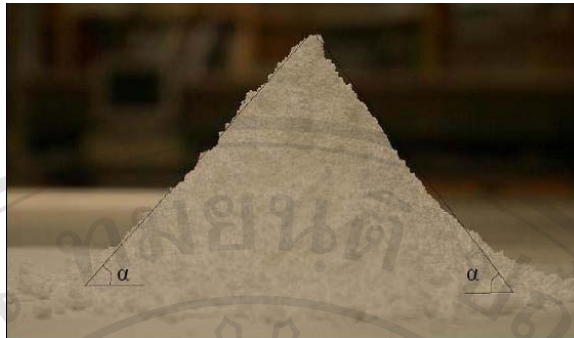
การวัด static angle of repose

อุปกรณ์สำหรับการวัด static angle of repose ในการศึกษาในปัจจุบันประกอบด้วยกรวยแก้วที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของทางออกด้านปลายกรวยแก้วขนาด 0.9 เซนติเมตร ซึ่งถูกตรึงไว้บนขาตั้งโลหะดังภาพที่ 2.3 โดยทางออกด้านปลายกรวยแก้วกรวยจะอยู่สูงจากฐาน 6 เซนติเมตร ตาม ISO 3435/1 ปลายทางออกของกรวยแก้วจะถูกปิดไว้ และตัวอย่างผง 200 กรัม จะถูกเทผ่านลงไป เมื่อปลายทางออกถูกเปิดออก วัสดุจะไหลออกไปสร้างเป็นรูปทรงกรวยบนฐาน (Bodhimage, 2006) ถ่ายภาพกองอาหารผง แล้ววัดมุมกองจากภาพ ดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.3 การวัด static angle of repose

ที่มา : Bodhimage (2006)



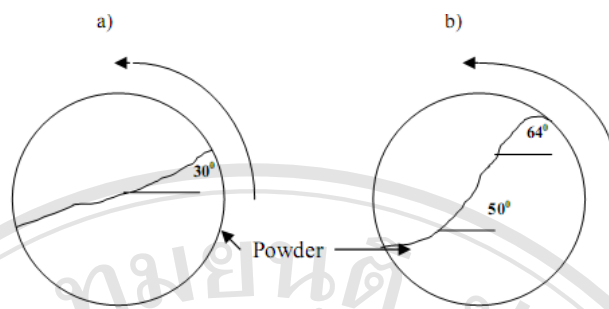
ภาพที่ 2.4 ตัวอย่างการวัด static angle of repose

ที่มา : Bodhimage (2006)

ภาพที่ 2.4 มุมกอนเป็นมุมระหว่างพื้นผิวของกองผงรูปกรวย และระนาบพื้นผิวซึ่งคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้คือ $\tan \alpha = H/R$ เมื่อ H = ความสูงของรูปกรวย และ R = รัศมีของวงกลม (Leesawat *et al.*, 2004)

การวัด dynamic angle of repose

การวัด dynamic angle of repose ด้วย Electrical Capacitance Tomography (ECT) โดย Dury และ Ristow ในปี 1998 นำผงตัวอย่างเข้าไปในกระบอกตวงที่มีการหมุน (rotating drum) แล้วสังเกตก้อนที่กลิ้งไปตามพื้นผิวของกองผง เมื่อเพิ่มอัตราการหมุนพบว่า ก้อนที่กลิ้งจะหยุดเป็นพั๊ๆ หรือน้อยลง และขาดออกจากพื้นผิวอย่างต่อเนื่อง โดย dynamic angle of repose คือ มุมที่เกิดขึ้นโดยพื้นผิวที่ลาดเอียงของกองผงกับแนวราบ เมื่อทำการหมุนในกระบอกตวงดังภาพที่ 2.5 และเมื่อเพิ่มอัตราเร็วการหมุนต่อไปมากขึ้น จะทำให้เกิดการเสียรูปของพื้นผิวแบนราบไปเป็นรูปร่างตัว S (S shape profile) การเสียรูปร่างเริ่มต้นจากการลดเข้ามาข้างในของขอบเขต และสามารถถูกประมาณค่าโดยเส้นตรง 2 เส้น ที่มีความชันแตกต่างกัน โดยเส้นตรงที่มีความชันมากกว่าดังภาพที่ 2.5 จะไว้สำหรับการวัด dynamic angle of repose (Bodhimage, 2006)



ภาพที่ 2.5 การวัด dynamic angle of repose

ที่มา : Bodhimage (2006)

การศึกษาของ Oliveira และคณะ (2009) โดยการผสมมอลโตเดกซ์ตริน และแคชชูทัม (cashew gum) ซึ่งเป็นสารช่วยในการอบแห้งแบบพ่นฝอยมะม่วงหิมพานต์ พบว่าการดูดน้ำกลับและความสามารถในการไหลเป็นสมบัติที่มีความเกี่ยวข้องกัน เนื่องจากการดูดน้ำกลับของผงจะก่อให้เกิดปัญหาในการไหลซึ่งเกิดจากการดูดซับน้ำ (Fitzpatrick *et al.*, 2005) รวมถึงสะพานของเหลว (liquid bridges) ที่มีปริมาณเพิ่มขึ้น และแรงแคพิลลารี (capillary forces) ที่กระทำต่ออนุภาค (Scoville and Peleg, 1981) สมบัติทั้งสองอย่างขึ้นอยู่กับค่า T_g ของผง เมื่อค่า T_g สูง การดูดกลับความชื้นต่ำ ทำให้เกิดการไหลอย่างอิสระได้มากขึ้น การเพิ่มความเข้มข้นของสารช่วยทำแห้งส่งผลให้การดูดน้ำกลับลดลง และส่งเสริมให้ความสามารถในการไหลดีขึ้น (ยกตัวอย่างเช่น มุมกองลดลง) พบว่าอัตราส่วนของสารช่วยการทำแห้งต่อมะม่วงหิมพานต์ อัตราส่วน 5:1 โดยน้ำหนักและปริมาณแคชชูทัมในอัตราส่วนมากกว่า หรือเท่ากับร้อยละ 50 ส่งผลให้มุมกองน้อยกว่า 24 องศา แสดงว่ามะม่วงหิมพานต์ผง มีความสามารถในการไหลได้ดี เนื่องจากมีมุมกองน้อยกว่า 35 องศา (Carr, 1965)

2.6.4 ความสามารถในการละลาย (Solubility)

สมบัติการละลายของผง (Barbosa-Cánovas and Vega-Mercado, 1996) มีดังนี้

1. Wettability คือ ความสามารถของอนุภาคของผงในการดูดซับน้ำบนพื้นผิวของอนุภาค และปัจจัยที่มีผลต่อ wettability ได้แก่ กระบวนการเกาะกันเป็นก้อนของอนุภาคจำนวนของอนุภาคที่ดูดซับน้ำได้ พื้นผิวของอนุภาค หรือการไม่มีอนุภาคที่ไม่เกาะกันเป็นก้อน
2. Sinkability คือ ความสามารถของผงในการจมลงไปในน้ำ หลังจากผงเกิดการดูดซับน้ำบนพื้นผิวของอนุภาค และถูกกระทบโดยความหนาแน่นของอนุภาค

3. Dispersibility หมายถึง ความสามารถของผง ในการกระจายตัวตลอดทั่วทั้งภายในน้ำ โดยไม่เกิดเป็นก้อน ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ dispersibility คือ การไม่มีของอนุภาคที่มีขนาดมากกว่า 250 ไมโครเมตร หรืออนุภาคที่เกาะตัวกันเป็นก้อน

4. Solubility คือ อัตราการละลายหรือความสามารถในการละลายทั้งหมด โดยการไม่มีจุด และการบวมตัวอย่างรวดเร็วของอนุภาค เป็นปัจจัยที่กระทบต่อความสามารถในการละลาย

Solubility index (SI) คือ ร้อยละของมวลแห้งของสารที่ละลายได้ในสารละลาย (W_s) กับมวลแห้งของตัวอย่างทั้งหมด (W_o) (Mandala and Bayas, 2004) โดยใช้ตัวอย่างปริมาณ 5 กรัม ใส่ในหลอดเหวี่ยง เติมน้ำ 50 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ปั่นที่ความเร็ว 3000 รอบ/นาที นาน 10 นาที เทส่วนสารละลายใส่ในถ้วยอะลูมิเนียมสำหรับการวิเคราะห์หาความชื้นอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เวลานาน 24 ชั่วโมง (Shittu and Lawal, 2007)

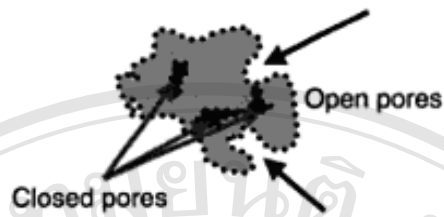
$$SI(\%) = \frac{W_s}{W_o} \quad (2.16)$$

2.6.5 ความหนาแน่น (Density) (Barbosa-Cánovas *et al.*, 2005)

(1) ความหนาแน่นของอนุภาค (Particle density)

ความหนาแน่นของอนุภาคสามารถอธิบายได้ในรูปของมวลต่อปริมาตรทั้งหมด ความหนาแน่นจะมีความสัมพันธ์กับการอธิบายสมบัติอื่นๆ ของอนุภาค เช่น โครงสร้างของผง (bulk powder structure) และขนาดของอนุภาค (particle size) โดยขึ้นอยู่กับวิธีการวิเคราะห์ปริมาณ total volume ความหนาแน่นของอนุภาคจะมีค่าจำกัดความที่แตกต่างกัน โดยแบ่งออกเป็น true particle density, apparent particle density หรือ effective (aerodynamic) particle density เนื่องจากอนุภาคนั้นมักเกิดการแตก การร้าว การเกิดโพรง หรือการติดกันของอนุภาค ดังนั้นการนิยามจึงแตกต่างกัน

True particle density แสดงถึง มวลของอนุภาคหารด้วยปริมาตรที่ประกอบด้วย open และ close pores ดังภาพที่ 2.6 และความหนาแน่นอนุภาคของวัตถุที่เป็นของแข็ง สำหรับสารเคมีบริสุทธิ์ สารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ ความหนาแน่นของสารสามารถอ้างอิงได้จากหนังสือข้อมูลทางเคมี ฟิสิกส์ โดยวัตถุนินทรีย์ประกอบด้วยอนุภาคที่แข็ง ส่วนสารประกอบอินทรีย์จะมีลักษณะที่อ่อนนุ่ม และอนุภาคที่เป็นรูพรุน true density ของอาหารผงหลายชนิดมักมีค่าต่ำกว่าผงแร่ หรือโลหะ วัตถุประเภทที่ไม่ใช่โลหะ (non metallic) จะมีความหนาแน่นมากกว่า 2,000 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ในขณะที่อนุภาคของอาหารส่วนใหญ่จะมีความหนาแน่นต่ำกว่า 1,000-1,500 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร



ภาพที่ 2.6 ผงที่ประกอบด้วย open และ close pores
ที่มา : Barbosa-Cánovas and Joliano (2005)

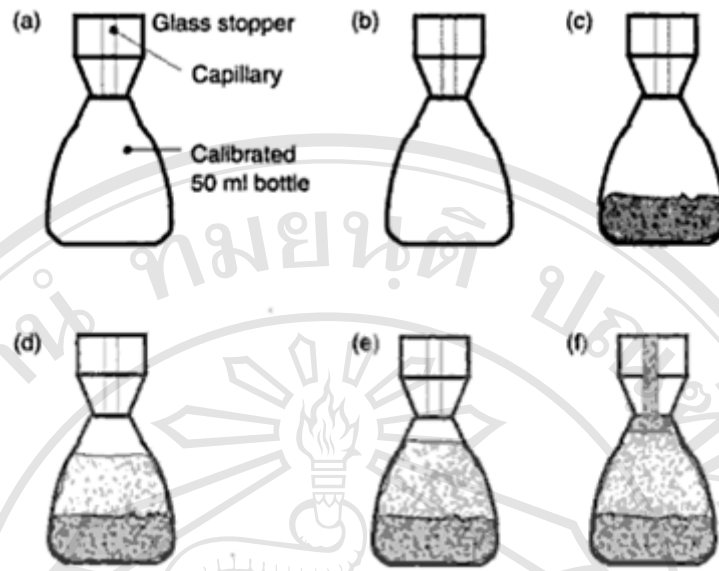
Apparent particle density คือ มวลของอนุภาคหารด้วยปริมาตรที่ประกอบด้วย open pore ซึ่งสามารถวิเคราะห์โดยวิธีการแทนที่ด้วยก๊าซ หรือของเหลว เช่น liquid or air pycnometry

Effective particle density แสดงถึงมวลของอนุภาคหารด้วยปริมาตรที่ประกอบด้วย open และ close pores ในกรณีนี้ปริมาตรคือปริมาตรภายใน aerodynamic envelope ซึ่งจะแสดงการไหลของก๊าซผ่านตัวอย่างอนุภาค ความหนาแน่นชนิดนี้มีความสำคัญมากต่อการนำไปประยุกต์ใช้ซึ่งจะมีผลต่อ bulk flow ในอากาศรอบๆ ที่อยู่ล้อมรอบอนุภาคคล้ายกับการไหลของของเหลว (fluidization)

ความหนาแน่นของอนุภาคที่แตกต่างกันสามารถอธิบายได้จาก dimensionless form ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่น หรือความถ่วงจำเพาะ ซึ่งเป็นสัดส่วนของความหนาแน่นของอนุภาคต่อความหนาแน่นของน้ำ การวิเคราะห์มวลของอนุภาคที่แม่นยำนั้นสามารถทำได้ง่ายแต่การประเมินปริมาตรนั้นสามารถทำได้ยากเนื่องจากมีรูปร่างที่ไม่สม่ำเสมอ และการมีช่องว่างระหว่างอนุภาค

การวิเคราะห์ความหนาแน่นของอนุภาคด้วยวิธี Liquid pycnometry

สามารถใช้ liquid pycnometry ในการหาความหนาแน่นของอนุภาคทั้งวัตถุที่ละเอียด และหยาบ โดยจะขึ้นอยู่กับปริมาตรของขวดพิคโนมิเตอร์ที่ใช้ โดยทั่วไปแล้วจะใช้ขวดพิคโนมิเตอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร ส่วนสารที่ใช้ในการวิเคราะห์ควรเป็นสารที่ไม่ทำละลาย หรือไม่สามารถแทรกซึมเข้าไปในตัวอย่างอาหารผง ขั้นตอนการวิเคราะห์ความหนาแน่นของอนุภาคโดยวิธี liquid pycnometry แสดงดังภาพที่ 2.7

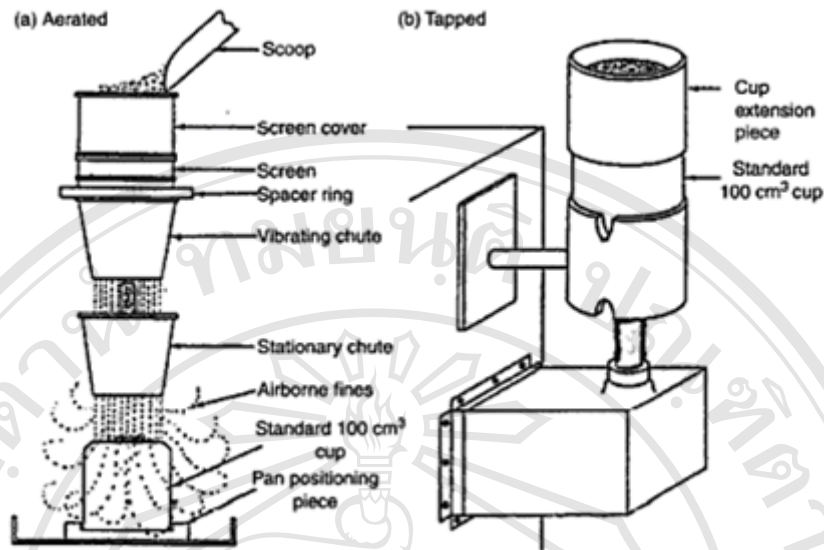


ภาพที่ 2.7 แสดงขั้นตอนการวิเคราะห์ความหนาแน่นของอนุภาคด้วยวิธี liquid pycnometry
ที่มา : Barbosa-Cánovas and Joliano (2005)

2.6.5.2 ความหนาแน่นรวม (Bulk density) (Barbosa-Cánovas and Joliano, 2005)

ความหนาแน่นรวมสามารถประเมินได้จากความหนาแน่นของอนุภาค โดยเป็นการวิเคราะห์ความหนาแน่นของของแข็ง และอนุภาคที่มีรูพรุนภายใน หรือสามารถวิเคราะห์ได้จากลักษณะการจัดตัวของอนุภาคภายในบรรจุภัณฑ์ ความหนาแน่นรวม ประกอบด้วยปริมาตรของวัตถุที่เป็นของแข็ง และของเหลว

ความหนาแน่นรวมสามารถวิเคราะห์ได้โดยวิธี Aerate powder จากการเทผงลงในตะแกรงร่อนซึ่งจะเขย่าผงผ่านลงไปยังถ้วย แสดงดังภาพที่ 2.8 Hokasawa powder tester จะรวบรวมผงเข้าด้วยกันโดยอัตโนมัติ ซึ่งจะเพิ่มความสามารถในการผลิตโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อควบคุมคุณภาพในการผลิต เครื่องนี้สามารถใช้ในการวิเคราะห์ความหนาแน่นรวมด้วยวิธี Tap bulk density โดยบรรจุผงผ่านการเคาะ (tapping) เขย่า หรือใส่ในภาชนะที่ใช้เพื่อการวิเคราะห์ความสิ้นสะเทือน หลังการเคาะผงส่วนเกินที่เหลืออยู่ คือ เศษที่ติดขอบของถ้วย ความหนาแน่นรวมหาได้จากน้ำหนักของถ้วย การวิเคราะห์ด้วยวิธี tap density สามารถวิเคราะห์ด้วย tap density tester หรือ Copley volumeter ซึ่งประกอบด้วย cylinder และตัวเคาะ ข้อดีของ Hokasawa powder tester และ Copley over ก็คือสามารถกำหนดมวลของผงที่ใช้ และไม่ต้องขนย้ายหากต้องการชั่งน้ำหนัก รวมถึงมีจำนวนการเคาะที่เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 2.8 แสดงการวิเคราะห์ความหนาแน่นของผงด้วย Hokasawa powder tester ทั้งวิธี aerate density และ tapped density

ที่มา : Barbosa-Cánovas and Joliano (2005)

ปริมาณความชื้นมีผลต่อความหนาแน่นของอาหารผง คือ ถ้าปริมาณความชื้นในอาหารผงสูง ทำให้ความหนาแน่นของอาหารผงสูงขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการไหลลดลง เนื่องจากอนุภาคผงเกาะติดกัน และทำให้ความสามารถในการละลายลดลง เนื่องจากอาหารผงดูดความชื้นจึงเปลี่ยนสถานะไปเป็นของเหลวหนืดคล้ายยาง และเกิดการเกาะตัวกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ ทำให้ความสามารถในการกระจายตัวของอนุภาคผงในน้ำลดลง และมีพื้นที่ผิวในการสัมผัสน้ำที่น้อยลง

2.7 การเปลี่ยนแปลงของอาหารผงระหว่างการเก็บรักษา

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของอาหาร เป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าคุณภาพเป็นหลัก โดยไม่จำเป็นต้องติดตามจนถึงจุดที่ผลิตภัณฑ์ไม่เป็นที่ยอมรับ ซึ่งโดยทั่วไปอาจใช้การศึกษาความคงตัว เป็นแนวทางในการประเมินอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ (Guillet and Rodrigue, 2010)

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของอาหารระหว่างเก็บรักษามีความสำคัญ คือ ใช้ในการบ่งชี้คุณภาพของอาหารว่ายังมีความปลอดภัยต่อการบริโภค ซึ่งในแง่ของผู้บริโภคจะเป็นการรับรู้ข้อมูลของผลิตภัณฑ์ และใช้ในการคัดเลือกผลิตภัณฑ์ แต่ในแง่ของผู้ผลิตจะใช้ประเมินคุณภาพของ

อาหารที่ผลิต และใช้ประกอบการแสดงอายุการเก็บบนฉลาก หรือเพื่อความปลอดภัยของผู้บริโภค ซึ่งปัจจุบันมีข้อกำหนดที่ต้องระบุอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ด้วย ดังนั้นในการพัฒนาผลิตภัณฑ์จึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาการเปลี่ยนแปลงของอาหารระหว่างการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ด้วย โดยอาจประเมินภายใต้สภาวะต่างๆ เช่น บรรจุภัณฑ์ การเก็บรักษา และการจัดจำหน่าย ซึ่งเมื่อทราบถึงการเปลี่ยนแปลงระหว่างการเก็บจึงสามารถที่จะใช้ประกอบการขอยื่นเอกสารต่างๆ ที่เกี่ยวข้องทางกฎหมายได้ หรืออาจใช้ในการทดสอบเพื่อปรับปรุงสูตรของผลิตภัณฑ์ให้มีอายุการเก็บรักษาที่เหมาะสมได้ ซึ่งประโยชน์ของการศึกษาการเปลี่ยนแปลงระหว่างการเก็บรักษา (Man, 2002) มีดังนี้

1. เปรียบเทียบผลของสูตร และกระบวนการผลิตต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพ และการเปลี่ยนแปลงระหว่างการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ได้
2. ป้องกันปัญหาที่เกิดจากการเรียกคืนผลิตภัณฑ์ และของเหลือทิ้งที่ต้องกำจัดทิ้ง
3. ใช้ในการเลือกบรรจุภัณฑ์ หรือสภาวะการเก็บรักษาที่เหมาะสม
4. ใช้บ่งชี้ความสัมพันธ์ของวัตถุดิบที่ใช้ต่อการเปลี่ยนแปลงระหว่างการเก็บรักษา
5. ใช้บ่งชี้หรือหาดัชนีของการเสื่อมเสียต่างๆ ในขั้นตอนของการพัฒนาผลิตภัณฑ์

โดยทั่วไป เมื่อผลิตภัณฑ์ไม่เป็นไปตามที่กำหนดจึงบ่งชี้ว่าอายุของผลิตภัณฑ์สิ้นสุดลง การพิจารณาการเปลี่ยนแปลงระหว่างการเก็บรักษา จึงสามารถประเมินจากปัจจัยที่บ่งบอกถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในปัจจัยใดปัจจัยหนึ่ง ไม่ว่าจะเป็นคุณภาพทางกายภาพ เคมี จุลินทรีย์ หรือประสาทสัมผัส แต่สิ่งที่สำคัญ และควรต้องพิจารณาก่อนเป็นอันดับแรก ได้แก่ ความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์ต่อการบริโภค ซึ่งปัจจัยเหล่านี้สอดคล้องกับระบบการผลิต การควบคุมคุณภาพ และการประกันคุณภาพ โดยอาจใช้หลักของการประเมินอันตรายในระบบการผลิตอาหารของ Hazard Analysis Critical Control Point (HACCP) ได้แก่ อันตรายทางกายภาพ เคมี หรือจุลินทรีย์เข้ามาร่วมพิจารณาด้วย

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงระหว่างการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์อาหาร มีแนวคิดหลักๆ ของการศึกษาการเปลี่ยนแปลงระหว่างการเก็บรักษา ดังนี้ (Man, 2002)

1. ต้องเข้าใจในตัวผลิตภัณฑ์ โดยควรต้องคำนึงถึงลักษณะของอาหารนั้น และความปลอดภัยต่อการบริโภคอาหาร
2. ทราบ และเข้าใจถึงปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์
3. สามารถระบุปัจจัยที่สำคัญได้ โดยอยู่บนพื้นฐานของมาตรฐานหรือข้อกำหนดทางกฎหมาย คู่แข่งขัน หรือผู้บริโภค

2.7.1 วิธีการศึกษาการเปลี่ยนแปลงระหว่างการรักษา

ผลิตภัณฑ์ก่อนที่จะส่งไปจำหน่าย จะมีการทดสอบการเปลี่ยนแปลงระหว่างการรักษา ในสภาวะปกติก่อน ถ้าเวลาที่ใช้ในการทดสอบสั้นกว่าอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์ เราสามารถทดสอบในสภาวะเร่ง เพื่อแก้ไขในการทำนายการเปลี่ยนแปลงระหว่างการรักษา วิธีการแต่ละวิธีจะบอกถึงความแตกต่างของระดับความเสี่ยง เวลาที่ใช้ รวมทั้งค่าใช้จ่าย (ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2547)

(1) การเก็บรักษา

สภาวะการเก็บรักษาจะเก็บในสภาวะทดลองซึ่งมีความหลากหลายทั้งอุณหภูมิ ความชื้น สัมผัส การเก็บในสภาวะเร่ง และให้ถูกแสง โดยทั่วไปสภาวะการเก็บจะถูกควบคุมเพื่อลดอัตราการเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์ที่สภาวะคงที่ สภาวะการเก็บรักษานี้สามารถนำมาใช้ในการทำนายอายุการเก็บได้

(2) ความถี่ของการเก็บตัวอย่าง

การทดสอบหาอัตราการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของอาหารให้เพียงพอต่อการดูแลแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงนั้นควรเก็บตัวอย่างอย่างน้อยที่สุด 6 ช่วงเวลา ต่อการทดสอบหนึ่งครั้ง ซึ่งเวลาในการเก็บตัวอย่างนี้สามารถเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับผลิตภัณฑ์ หากผลิตภัณฑ์มีการเสื่อมเสียเกิดขึ้นเร็วกว่าที่คาดไว้ เวลาในการเก็บตัวอย่างก็ควรจะเร่งขึ้น หรือการเก็บตัวอย่างอาจมีความถี่ลดลงหากเกิดการเสื่อมเสียช้า ทั้งนี้หากทดสอบเก็บตัวอย่างในสภาวะเร่ง ความถี่ในการเก็บตัวอย่างควรเพิ่มขึ้น และต้องแน่ใจว่ามีจำนวนตัวอย่างเพียงพอสำหรับใช้ทดสอบอายุการเก็บ

2.7.2 การเสื่อมเสียของอาหาร

ปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงระหว่างการรักษา จะมีความสัมพันธ์ และเชื่อมโยงไปถึงการเสื่อมเสียของอาหารผง ซึ่งการเสื่อมเสียของอาหารผงหมายถึง การที่อาหารเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นสี กลิ่น รส รูปร่าง ลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหาร หรือคุณค่าทางโภชนาการ โดยคุณภาพจะอยู่ในระดับที่ไม่ยอมรับของผู้บริโภค หรือตามเกณฑ์ที่กำหนด ขึ้นอยู่กับลักษณะของผลิตภัณฑ์อาหารผง

(1) การเสื่อมเสียทางเคมี

การถ่ายเทความชื้นหรือไอน้ำ

น้ำมีความสำคัญสูงที่ส่งผลต่อคุณภาพ และการเปลี่ยนแปลงระหว่างการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหารผง ซึ่งไม่ใช่แค่เพียงสมบัติในการเป็นตัวกลางของการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีหรือชีวเคมีเท่านั้น น้ำยังเกี่ยวข้องโดยตรงในด้านการเสื่อมเสียที่เกิดจากเชื้อจุลินทรีย์ รวมทั้งยังเกี่ยวข้องโดยตรงต่อคุณภาพทางประสาทสัมผัสด้วย ดังนั้นการถ่ายเทความชื้นหรือไอน้ำที่มีอยู่ทั้งใน และนอกผลิตภัณฑ์ หรือบรรจุภัณฑ์จึงส่งผลต่ออาหารในรูปแบบต่างๆ เช่น การเสื่อมเสียของอาหารผงจากการดูดความชื้นเข้าไป ทำให้ผลิตภัณฑ์เกาะกันเป็นก้อน (ยุทธนา, 2553) หรือส่งผลต่อความหนาแน่นของอาหารผง (ธัญนิษา, 2552) เป็นต้น

ค่าออเตอร์แอคทีวิตี (a_w)

ค่า a_w เป็นค่าที่สำคัญในการควบคุม และป้องกันการเสื่อมเสียของผลิตภัณฑ์อาหารผง เนื่องจากค่า a_w เป็นปัจจัยที่ระดับปริมาณน้ำขั้นต่ำในอาหารที่เชื้อจุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ในการเจริญ และปฏิกิริยาเคมีต่างๆ โดยทั่วไปเมื่ออาหารอยู่ภายใต้สภาวะบรรยากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์หนึ่งๆ เมื่อเกิดการถ่ายเทความชื้น อาหารจะมีความชื้นคงที่ นั่นคือมีความชื้นสัมพัทธ์สมดุล ความสัมพันธ์ของค่า a_w กับความชื้นสัมพัทธ์จึงมีค่าเท่ากับ $a_w = ERH/100$ ซึ่งค่า a_w สามารถนำไปใช้ในการประเมินขั้นต้นได้ว่า เชื้อจุลินทรีย์ใดเป็น หรือไม่เป็นสาเหตุที่ทำให้อาหารเกิดขึ้นจากเชื้อจุลินทรีย์ หรือการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เคมี หรือชีวเคมีได้ (Labuza and Hyman, 1998)

ดังนั้นการเสื่อมเสียทางเคมีของอาหารผงในระหว่างการเก็บรักษา จึงเกิดมาจากสาเหตุหลักคือ ปริมาณความชื้น และค่า a_w ที่เพิ่มขึ้น (พันธลพ, 2552)

(2) การเสื่อมเสียทางกายภาพ

อุณหภูมิ เป็นปัจจัยที่มีบทบาทสำคัญในการทำให้ปฏิกิริยาดำเนินไปได้เร็ว หรือช้า ซึ่งถือว่าเป็นปัจจัยที่เร่งได้ จึงมีการนำไปใช้ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงระหว่างการเก็บรักษาในสภาวะเร่งด้วยอุณหภูมิ เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงทางเคมี และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างการแปรรูป และการเก็บ จะเห็นว่าอุณหภูมิมิผลต่ออัตราเร็วของปฏิกิริยาก่อนข้างมาก ที่อุณหภูมิสูงปฏิกิริยาจะดำเนินไปได้เร็วกว่าที่อุณหภูมิต่ำ (รุ่งนภา, 2548) อุณหภูมิในการเก็บรักษาที่สูงขึ้น จะส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพอื่นๆ เช่น การเปลี่ยนแปลงค่าสี ความสามารถในการไหล ความสามารถในการละลาย ดังนั้นอุณหภูมิจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญมาก ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพของอาหารผง (Liu *et al.*, 2010)

การเสื่อมเสียทางกายภาพของอาหารผงในระหว่างการเก็บรักษา เช่น ค่าความสว่างลดลง ความสามารถในการละลายลดลง (Liu *et al.*, 2010) ความสามารถในการไหลลดลง ความหนาแน่นรวม และความหนาแน่นของอนุภาคเพิ่มขึ้น (ธัญนิษา, 2552)

(3) การเสื่อมเสียจากจุลินทรีย์

จุลินทรีย์ทุกชนิดจะหยุดการเจริญ เมื่ออาหารมีค่า a_w 0.6 หรือต่ำกว่า ซึ่งเป็นระดับที่ยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ทุกชนิด เช่น ยีสต์ รา และแบคทีเรีย ที่เป็นสาเหตุให้อาหารเสื่อมเสีย รวมถึงจุลินทรีย์ที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ ซึ่งในอาหารผงจะมีค่า a_w อยู่ในช่วงระหว่าง 0.2-0.3 ดังนั้นอาหารผงซึ่งมีค่า a_w ต่ำมาก จึงมีความคงตัวสูง และเก็บรักษาได้นาน (นิธิยา, 2551)

การเสื่อมเสียจากจุลินทรีย์ของอาหารผงในระหว่างการเก็บรักษา เช่น จำนวนของจุลินทรีย์ทั้งหมด ยีสต์ และราเพิ่มขึ้น (พันธัลพ, 2552)

(4) การเสื่อมเสียทางประสาทสัมผัส

การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นอย่างชัดเจนว่าผลิตภัณฑ์นั้นเกิดการเสื่อมเสีย คือ การเปลี่ยนแปลงด้านสี กลิ่น ลักษณะเนื้อสัมผัส โดยการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนี้ จะบ่งชี้ว่าเกิดขึ้นจากเชื้อจุลินทรีย์ หรือเกิดจากปฏิกิริยาทางเคมี การทดสอบทางประสาทสัมผัส จะเป็นการบอกถึงการยอมรับของผู้บริโภคหรือการเรียกคืนผลิตภัณฑ์