

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 น้ำผึ้ง (honey)

น้ำผึ้ง คือ น้ำหวานที่ผึ้งเก็บจากต่อมน้ำหวานของดอกไม้หรือต่อมน้ำหวานพิเศษของต้นไม้ผ่านขบวนการย่อยภายในตัวผึ้ง แล้วนำมาเก็บไว้ในหลอดรวงผึ้ง ผ่านการระเหยน้ำออกจากน้ำผึ้ง (การบ่ม) จนทำให้น้ำผึ้งในหลอดรวงนั้น มีปริมาณน้ำตาลที่เข้มข้นขึ้น จนได้ระดับที่เหมาะสมกับการเก็บรักษาที่ยาวนาน ผึ้งก็จะทำการปิดฝาหลอดรวงนั้น เราเรียกน้ำผึ้งนั้นว่าน้ำผึ้งที่สุกแล้ว เป็นน้ำผึ้งที่มีมาตรฐาน คุณภาพของน้ำผึ้งมีความผันแปรไปตามชนิดของพืชที่ให้น้ำหวาน ดิน น้ำ และช่วงเวลาในการเก็บน้ำผึ้ง ทำให้น้ำผึ้งมี สี กลิ่น รสชาติ และความเข้มข้นต่างกัน ไป (พิชัย, 2547)

2.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำผึ้ง

องค์ประกอบทางเคมีของน้ำผึ้งประกอบด้วยน้ำตาลฟรุกโทส และน้ำตาลกลูโคสประมาณ 70-80% น้ำ 10-20% และองค์ประกอบปริมาณเล็กน้อยอื่นๆ ได้แก่ กรดอินทรีย์ แร่ธาตุ วิตามิน โปรตีน สารประกอบฟีนอลิก และกรดอะมิโนอิสระ (Ouchemoukh *et al.*, 2007) น้ำผึ้งแต่ละชนิดจะมีองค์ประกอบทางเคมีต่างๆ แตกต่างกันไปดังตาราง 2.1 ซึ่งแสดงองค์ประกอบทางเคมีหลักของน้ำผึ้งไทยบางชนิด (ชนิษฐา, 2550) นอกจากนี้ น้ำผึ้งยังอุดมไปด้วยสารต้านอนุมูลอิสระที่เป็นเอนไซม์ (enzymatic antioxidants) ได้แก่ กลูโคสออกซิเดส และคะตะเลส และสารต้านอนุมูลอิสระที่ไม่ใช่เอนไซม์ (non-enzymatic antioxidants) ได้แก่ กรดแอสคอร์บิก ฟลาโวนอยด์ กรดฟีนอลิก อนุพันธ์ของแคโรทีนอยด์ กรดอินทรีย์ ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล กรดอะมิโน และโปรตีน (Baltrušaityte *et al.*, 2007) และยังพบแอลฟา-โทโคเฟอรอล ซึ่งเป็นรูปแบบหนึ่งของวิตามินอีที่มีสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (Ahmed *et al.*, 2007) ทำให้น้ำผึ้งมีสมบัติในการเป็นสารยับยั้งการเก็บของอาหารได้ ซึ่งจากประโยชน์ต่างๆ ที่มีในน้ำผึ้งดังกล่าวข้างต้น ทำให้มีความหลากหลายของผลิตภัณฑ์จากน้ำผึ้ง ทั้งในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง ยา และอาหาร

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำผึ้งดอกกล้วย น้ำผึ้งดอกสาบเสือ และน้ำผึ้งดอกทานตะวัน

องค์ประกอบทางเคมี	ชนิด		
	น้ำผึ้งดอกกล้วย	น้ำผึ้งดอกสาบเสือ	น้ำผึ้งดอกทานตะวัน
1. ความชื้น (%)	21.0±0.21	20.0±0.19	19.5±0.46
2. ของแข็ง (%)	79.0±0.05	80.0±0.02	80.5±0.02
3. เกล็ด (%)	0.07±0.03	0.09±0.03	0.11±0.03
4. water activity (a_w)	0.53±0.01	0.52±0.02	0.52±0.01
5. ค่าความเป็นกรดต่าง (pH)	4.49±0.01	3.84±0.00	3.53±0.02
6. ปริมาณกรดที่ไตเตรตได้ (%)	0.02±0.00	0.03±0.00	0.06±0.00
7. กลูโคส (%)	33.85	31.13	32.1
8. ฟรุกโทส (%)	43.89	48.54	40.66
9. ซูโครส (%)	<0.1	<0.1	<0.1
10. มอลโทส (%)	1.26	0.33	7.67
11. ไนโตรเจน (%)	0.05±0.00	0.06±0.01	0.06±0.01

ที่มา: ขนิษฐา (2550)

Lachman *et al.* (2007) ศึกษาการวิเคราะห์แร่ธาตุ (Al, B, Ca, Cu, Mg, Mn, Ni, Zn) ในตัวอย่างน้ำผึ้งที่มีต้นกำเนิดมาจาก 24 พื้นที่ใน Czech เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแร่ธาตุดังกล่าวกับต้นกำเนิด หรือประเภทของน้ำผึ้ง วิเคราะห์โดยวิธี flame atomic absorption spectrometry (F-AAS) และ optical emission spectrometry with inductively couple plasma (ICP-OES) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบความเร็วในการวิเคราะห์ก็พบว่า ICP-OES เป็นวิธีที่ดีกว่าเมื่อรวมข้อมูลในการวิเคราะห์ และค่าการนำไฟฟ้าของตัวอย่างพบว่า ตัวอย่างน้ำผึ้งถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ น้ำผึ้งจาก honeydew (honeydew honeys) และน้ำผึ้งจากเกสรละอองเรณู (nectar honeys) เช่นเดียวกับน้ำผึ้งจาก Slovak และ Polish ตัวอย่างของน้ำผึ้งจาก Czech จะมีระดับของนิกเกิลสูงกว่าน้ำผึ้งที่มีต้นกำเนิดจากส่วนอื่นๆ ของโลก

คุณภาพของน้ำผึ้ง วิเคราะห์โดยการทดสอบทางประสาทสัมผัส เคมี กายภาพ และจุลชีววิทยา ซึ่งในต่างประเทศ เกณฑ์คุณภาพของน้ำผึ้งจะเน้นในมาตรฐานการควบคุม ซึ่งรวบรวมอยู่ในมาตรฐานเกี่ยวกับอาหาร Codex โดยมาตรฐานเกี่ยวกับอาหาร Codex สำหรับคุณภาพของน้ำผึ้ง ได้แก่ ตัวแปรทางเคมี และทางกายภาพต่างๆ ซึ่งประกอบด้วยปริมาณความชื้น ปริมาณแร่ธาตุ ความเป็นกรด ปริมาณ hydroxymethylfurfural (HMF) diastase activity ปริมาณน้ำตาล และปริมาณของแข็งที่ไม่ละลายน้ำ (Finola *et al.*, 2007)

2.1.2 ประโยชน์ของน้ำผึ้ง

ประโยชน์ของน้ำผึ้ง ได้แก่ ใช้เป็นสารให้ความหวานในอาหาร สารถนอมอาหาร (Nagai *et al.*, 2006) มีสมบัติในการต้านจุลินทรีย์ และต้านอนุมูลอิสระ (Ouchemoukh *et al.*, 2007)

องค์ประกอบในน้ำผึ้งที่แสดงสมบัติการถนอมอาหาร ได้แก่ แอลฟา-โทโคเฟอรอล กรดแอสคอร์บิก และสารฟีนอลิกอื่นๆ นอกจากนี้ยังมีเอนไซม์ ได้แก่ กลูโคสออกซิเดชัน คะตะเลส และเปอร์ออกซิเดส (Nagai *et al.*, 2006)

2.1.3 สมบัติการต้านอนุมูลอิสระในน้ำผึ้ง

น้ำผึ้งอุดมไปด้วยสารต้านอนุมูลอิสระทั้งที่เป็นเอนไซม์ และไม่ใช่เอนไซม์ เช่น กลูโคสออกซิเดส คะตะเลส กรดแอสคอร์บิก ฟลาโวนอยด์ กรดฟีนอลิก อนุพันธ์ของแคโรทีนอยด์ กรดอินทรีย์ ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล (maillard reaction products) กรดอะมิโน และโปรตีน นอกจากนี้ยังพบ ฟลาโวนอยด์ ฟีนอบังคีน (flavonoids pinobanksin) ฟีนอคემบริน (pinocembrin) ควอเซทิน (quercetin) คริพซิน (chrysin) กาแลนกิน (galangin) ลูทีลิน (lutelin) และเคมเฟอรอล (kaempferol) (Baltrusaitytė *et al.*, 2007)

องค์ประกอบและปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระของน้ำผึ้งขึ้นอยู่กับแหล่งของดอกไม้ที่ถูกใช้ในการเก็บน้ำหวาน ฤดู และสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ กระบวนการผลิต และการเก็บรักษาอาจมีผลต่อองค์ประกอบ และกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระในน้ำผึ้งอีกด้วย (Nagai *et al.*, 2006) โดยทั่วไป ตัวอย่างน้ำผึ้งที่มีสีเข้มกว่าพบว่ามีปริมาณของสารต้านอนุมูลอิสระสูงกว่า หรือพบในน้ำผึ้งที่มีปริมาณน้ำมากกว่า สำหรับสีของน้ำผึ้งขึ้นอยู่กับสมบัติของความเป็นด่าง และปริมาณเถ้า นอกจากนี้ ยังขึ้นอยู่กับเมล็ดสีที่มีสมบัติต้านอนุมูลอิสระ ได้แก่ แคโรทีนอยด์ และฟลาโวนอยด์ (Baltrusaitytė *et al.*, 2007)

Baltrusaitytė *et al.* (2007) ศึกษาสารสกัดฟีนอลิกที่ถูกแยกมาจากน้ำผึ้ง 35 ชนิด และ beebread 9 ชนิด จากแหล่งที่แตกต่างกันในประเทศลิทัวเนีย โดยใช้ Amberlite XAD-2 resin จากนั้นทำการศึกษาสมบัติการต้านอนุมูลอิสระ โดยศึกษาการลดลงของสีเนื่องจากอนุมูลอิสระ ประจวบกับ 2,2'-azino-bis(3-ethylbenzthiazoline-6-sulphonic acid ion) (ABTS⁺) และกิจกรรมการจับอนุมูลอิสระ 1,1-Diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH[•]) จากการทดลองพบว่า สารสกัดจากน้ำผึ้ง และ beebread ทั้งหมดสามารถจับอนุมูลอิสระได้ 43.0-95.7% สำหรับการวิเคราะห์เบื้องต้นของสารประกอบฟีนอลิกในตัวอย่างน้ำผึ้งทำโดยใช้ High performance liquid chromatography (HPLC) ที่มี Ultraviolet (UV) และ mass spectrometer เป็นดีเทคเตอร์ ผลการทดลองพบว่า น้ำผึ้ง

ทั้งหมดมี p-coumaric acid, kaempferol, chrysin และ apigenin การศึกษาแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า มีความหลากหลายในสมบัติการต้านอนุมูลอิสระ และปริมาณของสารประกอบฟีนอลิกในน้ำผึ้งจากแหล่งที่แตกต่างกัน และความหลากหลายเหล่านี้จะนำมาพิจารณาในการใช้ประโยชน์ของน้ำผึ้ง ซึ่งเป็นแหล่งของสารต้านอนุมูลอิสระธรรมชาติ

2.2 การแปรรูปอาหารผง

การทำแห้งหรือการกำจัดน้ำ (drying) หมายถึง การใช้ความร้อนภายใต้สภาวะควบคุมเพื่อกำจัดน้ำส่วนใหญ่ที่อยู่ในอาหาร โดยการระเหยน้ำหรือการระเหิดของแข็งในการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze drying or lyophilization) (Fellows, 2000)

2.2.1 การทำแห้งแบบพ่นฝอย (Spray drying)

การทำแห้งแบบพ่นฝอย คือ กระบวนการทำแห้งที่นำอาหารที่ผ่านการทำให้ข้นมาแล้ว จะถูกทำให้กระจาย และกลายเป็นอนุภาคหรือหยดน้ำเล็กๆ ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10-200 μm และพ่นเข้าไปในกระแสร้อนที่อุณหภูมิ 150-300°C ในถังอบขนาดใหญ่ มีการควบคุมอัตราการส่งวัตถุดิบเพื่อให้อุณหภูมิของอากาศที่จุดทางออกเท่ากับ 90-100°C ซึ่งเทียบได้กับอุณหภูมิกระเปาะเปียก (และอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์) เท่ากับ 40-50°C การอะตอมไมซ์หรือการพ่น (atomization) ที่สมบูรณ์ และสม่ำเสมอ สำคัญมากสำหรับการอบแห้งที่ดี (Fellows, 2000)

ประโยชน์ของการทำแห้งแบบพ่นฝอย คือ ความจำเพาะของผงยังคงมีค่าคงที่ตลอดเครื่องอบแห้ง เมื่อสภาวะการอบแห้งมีค่าคงที่ เป็นกระบวนการอบแห้งที่ควบคุมการทำงานได้ง่าย และได้อย่างต่อเนื่อง และสามารถปรับใช้ในระบบการควบคุมแบบอัตโนมัติได้ตลอดทั้งกระบวนการอบแห้ง นอกจากนี้เครื่องอบแห้งยังถูกออกแบบมาหลากหลาย เพื่อประยุกต์ใช้กับวัตถุที่มีความไวต่อความร้อน วัตถุดิบความร้อน สารที่เป็นสนิมได้ง่าย วัตถุสำหรับขัด (Barbosa-Cánovas and Vega-Mercado, 1996)

2.2.2 การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze drying or lyophilization)

การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง เป็นกระบวนการทำแห้งที่ใช้กระบวนการระเหิดของน้ำแข็ง ซึ่งเป็นกลไกหลักของการทำให้แห้งแบบแช่เยือกแข็ง โดยน้ำที่สถานะของเหลวจะถูกทำให้อยู่ในสถานะของแข็งระหว่างการทำเยือกแข็งเบื้องต้น หลังจากนั้นจะถูกกำจัดออกโดยการระเหิด ในระหว่างสภาวะการทำให้แห้งขั้นต้นภายใต้สภาวะการทำให้แห้งต่ำกว่าจุด triple point ของน้ำ คือ 0°C และความดัน 611 Pa การที่มีอุณหภูมิต่ำและความดันต่ำร่วมกับการไม่มีน้ำที่เป็นของเหลว

และออกซิเจนช่วยให้เกิดโครงสร้างรูพรุนเริ่มต้น และรักษาความเป็นรูพรุนที่เพิ่มสูงขึ้นไว้ได้ในระหว่างการทำแห้ง ซึ่งปัจจัยดังกล่าวยังช่วยลดการเสียสภาพเนื่องจากความร้อนและการใช้สารเคมีอีกด้วย ดังนั้นการทำให้แห้งแบบแช่เยือกแข็งจึงเป็นกระบวนการทำให้แห้งที่ดีมากสำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีความไวต่อความร้อน อย่างไรก็ตามเนื่องจากราคาในการทำแห้งด้วยกระบวนการนี้มีราคาสูง การนำกระบวนการทำให้แห้งแบบแช่เยือกแข็งนี้ไปประยุกต์ใช้จะถูกจำกัดในผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าสูง ได้แก่ ยา ผลิตภัณฑ์ทางชีวภาพ และอาหารที่มีคุณภาพ (Song *et al.*, 2005) แม้ว่าการทำให้แห้งแบบแช่เยือกแข็งเป็นกระบวนการทำให้แห้งที่มีค่าใช้จ่ายสูง แต่ค่าใช้จ่ายอาจจะลดลงได้ ถ้ากระบวนการทำให้แห้งใช้ระยะเวลาสั้น (Lin *et al.*, 2005)

การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเป็นกระบวนการทำให้แห้งสำหรับวัตถุที่มีความไวต่อความร้อน เช่น อาหาร ยา วัตถุชีวภาพ (Wang and Chen, 2005) และผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าสูง เช่น เนื้อ กาแฟ ปลา อาหารทะเลบางชนิด และผลไม้ เป็นต้น (Onwulata, 2005) เนื่องจากเป็นเทคนิคการทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำ ลดอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี และการสูญเสียเนื่องจากความร้อน (Schoug *et al.*, 2006) โดยทั่วไปการทดสอบในระดับห้องปฏิบัติการ มีความจำเป็นก่อนการผลิตในระดับอุตสาหกรรม เพื่อหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่สุดสำหรับผลิตภัณฑ์คุณภาพสูง แต่อย่างไรก็ตามการทดสอบการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งนั้นมีมูลค่าสูง กินระยะเวลา และยุ่งยาก โมเดลของกระบวนการผลิตสามารถช่วยไม่เพียงแต่เลือกสภาวะ และตารางการทำงานที่เหมาะสมเท่านั้นยังสามารถวิเคราะห์กลไกของการขนส่งได้อีกด้วย เพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบเครื่องทำแห้ง (Wang and Chen, 2005)

กระบวนการทำให้แห้งแบบแช่เยือกแข็งประกอบด้วยกระบวนการ 2 ขั้นตอน คือ ในขั้นตอนแรก ผลิตภัณฑ์ถูกแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการยุบตัวของโครงสร้างผลิตภัณฑ์ (collapse temperature, T_c) ซึ่งการทำให้แห้งระยะแรกเกิดขึ้นหลังจากผ่านกระบวนการแช่เยือกแข็งแล้ว ความดันของห้องอบ มีค่าต่ำลง ในขณะที่อุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้น และน้ำอิสระถูกกำจัดโดยการระเหิด นอกจากนี้การทำให้แห้งในระยะเริ่มต้นอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์จะถูกรักษาไว้ให้ต่ำกว่า critical thermal threshold ได้แก่ค่า T_c อีกด้วย ในที่สุด กระบวนการทำให้แห้งระยะที่สองจะกำจัดน้ำที่ก่อกวนระเหิด โดยการ desorption และอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์จะกลับไปที่อุณหภูมิห้องที่ละน้อย (Schoug *et al.*, 2006)

ข้อดีของการทำให้แห้งแบบแช่เยือกแข็ง คือ เป็นกระบวนการทำให้แห้งที่เหมาะสมกับวัตถุคิบบส่วนใหญ่ อุณหภูมิในการอบแห้งต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง กระทำที่ความดันต่ำ (27-133 Pa) และอาศัยการระเหิดของน้ำแข็งจากผิวหน้าของการระเหิด การเคลื่อนตัวของสารถูกละลายเกิดขึ้นน้อยมาก เนื่องจากอยู่ในสภาวะเยือกแข็ง นอกจากนี้ การอบแห้งเร็ว และสมบูรณ์ สี รส และกลิ่นของ

อาหารเหมือนเดิม สามารถคงคุณค่าทางโภชนาการไว้ได้ เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ไม่ใช้ความร้อน แต่มีข้อเสียคือ ค่าใช้จ่ายสูง (Fellows, 2000)

2.2.3 Foam spray drying

Foam spray drying คือ การทำแห้งแบบฟอง ประกอบด้วยกระบวนการของอิมัลชันของของเหลวและแก๊ส ที่ถูกพ่นเข้าไปในตู้อบแห้ง ซึ่งการกระจายตัวของอิมัลชัน จะทำให้เกิดการสร้างอนุภาคชนิดฟองขึ้นเมื่ออนุภาคแห้ง ลักษณะเฉพาะการทำแห้งของหยดฟอง (foamed droplets) จะมีความแตกต่างจากหยดของเหลวทั่วไป นอกจากนี้ สมบัติ และคุณลักษณะเฉพาะของผลิตภัณฑ์ที่มีโครงสร้างแบบฟอง (foamed products) ยังมีความแตกต่างจากหยดที่ไม่มีโครงสร้างแบบฟอง (nonfoamed droplets) เช่น ความหนาแน่นมีค่าลดลง ขนาดอนุภาค และความเป็นรูพรุนจะเพิ่มขึ้น มีความแตกต่างของสี ปริมาณความชื้นลดลง ความสามารถของผงในการกระจายตัวตลอดทั่วทั้งภายในน้ำ โดยไม่เกิดเป็นก้อน (dispersibility) และการละลายดีขึ้น ความสามารถในการรักษาสารที่ระเหยได้ดีขึ้นและลดการสลายตัวเนื่องจากความร้อน กระบวนการทำให้เกิดฟองอาจจะทำโดยการผสมของเหลว และแก๊สโดยตรง ซึ่งการกระจายตัวของขนาดของฟองในของเหลวเกิดขึ้นอย่างกว้างขวาง สำหรับวิธีที่ 2 ในการทำให้เกิดฟองคือ นำผลิตภัณฑ์ที่ทำให้มีความเข้มข้นสูงที่สุดมาทำให้แห้งด้วยแก๊ส ซึ่งการเกิดฟอง และการเพิ่มปริมาณของฟองสามารถเกิดขึ้นได้โดยการลดความดันหรือการเพิ่มอุณหภูมิ และวิธีที่ 3 ในการทำให้เกิดฟองทำโดยกระบวนการกำจัดความชื้นจากอาหารที่แก๊สถูกผลิตโดยปฏิกิริยาเคมีภายในหยดของสาร (Barbosa-Cánovas and Vega-Mercado, 1996)

การทำให้แห้งแบบพ่นของอาหารที่อุดมไปด้วยน้ำตาลนั้นจะมีความเหนียวของอนุภาคเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผลิต โดยเกิดขึ้นจากลักษณะ thermoplastic ของน้ำตาลที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และกรดอินทรีย์ที่พบในอาหารนั้น ซึ่งกลไกของความเหนียวอธิบายได้โดยการไหลของสารที่มีรูปแบบไม่แน่นอน เมื่อพลังงานที่ผิวของอนุภาคถึงอุณหภูมิเหนือกว่าอุณหภูมิจุดเหนียว (sticky-point temperature) สารที่มีรูปแบบไม่แน่นอน จะเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้ว (ความหนืดเท่ากับ 10^2 Pa) ไปเป็นสถานะของเหลวหนืดคล้ายยาง (ความหนืด เท่ากับ 10^6 - 10^8 Pa) แล้วจึงกลับมาเหนียว อุณหภูมิจุดเหนียวปกติมีค่าสูงกว่าค่า T_g ประมาณ 10 - 23°C (Truong *et al.*, 2005)

อาหารที่มีความเหนียวง่าย อนุภาคมีการเกาะติดกัน ต้องอาศัยการควบคุม T_g หรือ ใช้ อุณหภูมิในกระบวนการผลิตต่ำกว่า T_g ของผลิตภัณฑ์ หรือ การเพิ่ม T_g ของผลิตภัณฑ์ด้วยการเติมสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เช่น การทำให้แห้งแบบพ่น (Spray drying) ของน้ำผึ้ง และน้ำแอปเปิ้ล จะต้องมีการเติมสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง จำนวนมาก เนื่องจาก T_g ของน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบ

หลักมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิทางออกของการทำให้แห้งแบบพ่น น้ำตาลกลูโคส และน้ำตาลฟรุกโทส เป็นองค์ประกอบหลักในน้ำผึ้ง ขณะที่น้ำตาลฟรุกโทส กลูโคส และซูโครสเป็นองค์ประกอบหลักในน้ำแอมเปิ้ล ซึ่งค่า T_g ของน้ำตาลฟรุกโทส กลูโคส และซูโครสบริสุทธิ์มีค่าเท่ากับ 5, -31 และ -62°C ตามลำดับ ดังนั้นค่า T_g ของผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำตาลเหล่านี้เป็นองค์ประกอบย่อมมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิของการทำงานปกติในการทำให้แห้งแบบพ่น ซึ่งการมีความชื้นจำนวนเล็กน้อยในตัวอย่างจะทำให้ค่า T_g มีค่าน้อยลงส่งผลให้เกิดปัญหาความเหนียวอย่างรุนแรง สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการทำให้แห้งแล้ว และผลิตภัณฑ์ที่กำลังทำให้แห้ง (Boonyai *et al.*, 2007)

Miao and Roos (2006) ศึกษาการเกิดสื่อน้ำตาลโดยไม่อาศัยเอนไซม์ในระบบโมเดลอาหาร ที่มี lactose, trehalose และ lactose/trehalose ที่ถูกทำให้แห้งแบบแช่เยือกแข็ง และแบบพ่นที่มี L-lisine และ D-xylose (2% w/w) เป็น reactant ซึ่งถูกวิเคราะห์ที่สภาวะแวดล้อมที่มีความดันไอสัมพันธ์ที่แตกต่างกัน 4 ค่า คือ 33.2, 44.1, 54.5 และ 65.6% ที่อุณหภูมิห้อง โดย sorption isotherms ของระบบโมเดลของอาหารถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวัดน้ำหนัก และข้อมูลที่ได้นำไปสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามแบบของ Brunauer-Emmett-Teller (BET) และ Guggenheim-Anderson-deBoer (GAB) วัด T_g โดย DSC และวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพของระบบโมเดลอาหาร โดย scanning electron microscopy (SEM) และเทคนิคทางสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ พบว่า ตัวอย่างที่ผ่านการทำให้แห้งแบบแช่เยือกแข็ง และแบบพ่นจะมีโครงสร้างทางกายภาพ และสมบัติการดูดซับน้ำแตกต่างกัน แต่มีลักษณะของ glass transition คล้ายคลึงกัน นอกจากนี้จุลศาสตร์การเกิดสื่อน้ำตาลโดยไม่อาศัยเอนไซม์นั้นไม่เพียงแต่มีผลกระทบมาจากองค์ประกอบในอาหารเท่านั้นยังมีผลกระทบมาจากสมบัติทางกายภาพของอาหารที่ได้รับจากวิธีการทำให้แห้งที่แตกต่างกัน โดยการเกิดผลึกขององค์ประกอบน้ำตาล จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปฏิกิริยาการเกิดสื่อน้ำตาลโดยไม่อาศัยเอนไซม์ ซึ่งจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกันของอาหาร โดยวิธีการทำให้แห้งที่แตกต่างกันนั้นควรจะมีการควบคุมปฏิกิริยาการเกิดสื่อน้ำตาลโดยไม่อาศัยเอนไซม์ในอาหารที่มีค่าความชื้นต่ำด้วย เนื่องจากมีผลต่อการเกิดผลึก

2.3 Glass Transition และสมบัติการเกาะติดของอาหารแห้ง

Glass transition temperature (T_g) หมายถึง อุณหภูมิในการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของอาหารจากที่ไม่มีรูปร่างแน่นอน (amorphous system) หรือมีสถานะคล้ายแก้ว (glassy state) ไปเป็นสถานะของเหลวหนืดคล้ายยาง (rubbery state) ความสามารถในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลในสถานะคล้ายแก้วมีค่าต่ำ เนื่องจากความหนืดของของผสมมีค่าสูง (ประมาณ 10^{12} Pa) (Silva *et al.*, 2006) ซึ่งสามารถวิเคราะห์อุณหภูมิดังกล่าวได้ด้วยเครื่อง Differential scanning calorimetry (DSC) ซึ่งการ

เปลี่ยนรูปแบบโครงสร้างที่สัมพันธ์กับความหนืด เช่น stickiness, elasticity, collapse, shrinkage และ crystallization จะขึ้นอยู่กับ glass transition (Sopade *et al.*, 2007)

T_g ขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุล และโครงสร้างเฉพาะของตัวถูกละลาย และยังขึ้นอยู่กับปริมาณของตัวทำละลายที่ปรากฏ (Rahman, 1995) ค่า T_g ถูกใช้เป็นตัวแปรทางเคมีกายภาพที่สามารถวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการผลิต คุณสมบัติ คุณภาพ ความคงตัว และความปลอดภัยของอาหาร (Barbosa-Cánovas and Vega-Mercado, 1996) glass transition ของอาหารที่ผ่านการทำให้แห้งแบบแช่เยือกแข็ง เป็นตัวแปรสำคัญในการอธิบายกลไกของกระบวนการเปลี่ยนรูปในอาหาร และการควบคุมอายุการเก็บของอาหารนั้น (Omar and Roos, 2007)

น้ำผึ้งประกอบด้วยน้ำตาลฟรุกโทส และน้ำตาลกลูโคสประมาณ 70-80% (Ouchemoukh *et al.*, 2007) โดยน้ำตาลฟรุกโทส และน้ำตาลกลูโคสมีค่า T_g เท่ากับ -42 และ -43°C ตามลำดับ (Rahman, 1995) ค่า T_g ของน้ำผึ้งอยู่ในช่วงระหว่าง -54.14 และ -33.64°C (Ahmed *et al.*, 2007) หรือ -47.2 และ -34.6°C (Lazaridou *et al.*, 2004) ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำผึ้ง ซึ่งเป็นปัญหาในการอบแห้ง

ปัญหาความเหนียว และการเกาะตัวกันของผลิตภัณฑ์อาหารผงยังคงมีความสัมพันธ์เกี่ยวเนื่องกับค่า T_g ที่ต่ำของผลิตภัณฑ์อาหารผงเหล่านี้ โดยทั่วไปถ้าต้องการทำผลิตภัณฑ์เหล่านี้ให้แห้ง จึงมีการเติมสารที่มีมวลโมเลกุลสูง เช่น มอลโทเด็กซ์ทริน ลงไปเพื่อเพิ่มค่า T_g (Silva *et al.*, 2006) Fitzpatrick *et al.* (2007) ศึกษา glass transition และการเกาะตัวกันเป็นก้อนของผงที่มีองค์ประกอบที่เป็นรูปแบบไม่แน่นอน เช่น amorphous lactose ในนมผง ซึ่งเมื่อให้อุณหภูมิ และปริมาณน้ำในสถานะที่พอเหมาะ ผลิตภัณฑ์จะเคลื่อนที่ในลักษณะเหมือนการไหลของสารที่มีความหนืดสูงทำให้อุณหภูมิความเหนียว ทำให้เกิดการจับกันเองของอนุภาค (cohesiveness) ที่เพิ่มขึ้น การจับตัวเกาะกันเป็นก้อนของผง และเพิ่มการเกาะติดกับพื้นผิวที่สัมผัสอีกด้วย ซึ่งการเปลี่ยนสถานะจากสถานะคล้ายแก้วไปเป็นสถานะของเหลวหนืดคล้ายยาง สามารถเกิดขึ้น โดยการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของผงในกระบวนการผลิตให้เหนือกว่า T_g ซึ่งความเหนียวที่ถูกชักนำด้วย glass transition นี้จะขึ้นอยู่กับเวลา และเมื่อเวลาผ่านไป กระบวนการการเกิดผลึกสามารถเปลี่ยน amorphous lactose ไปเป็น crystalline lactose และมากกว่านั้น ลักษณะการเกาะกันเป็นก้อนของผงขึ้นอยู่กับจำนวนขององค์ประกอบที่พบใน amorphous state การศึกษานี้ได้แสดงถึงการประยุกต์การวัดความสัมพันธ์ระหว่าง glass transition และปริมาณน้ำสำหรับทำนายปัญหาการเกาะกันเป็นก้อนของผงที่มีองค์ประกอบเป็นสารรูปแบบที่ไม่แน่นอน

อนุพันธ์ของสตาร์ชที่ผ่านการไฮโดรลิซิส (Hydrolyzed starch derivatives) เช่น มอลโทเด็กซ์ทริน เป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่มี ความเหนียว ซึ่งถูกใช้ทั่วไปในการเป็นตัวช่วยในการทำให้

อาหารแห้งมีการเกาะติดกันลดลง โดย T_g ของของผสมจะเปลี่ยนไป ค่า T_g ของสารประกอบ amorphous แต่ละชนิดจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อผสมมอลโทเด็คซ์ทรินซึ่งมี T_g สูง ทำให้สามารถผลิต และควบคุมคุณภาพของอาหารแห้งได้ดีขึ้น (Boonyai *et al.*, 2007)

ค่า T_g ของสตาร์ช โปรตีน และกัม (วัตถุที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง) จะมีค่า T_g สูงกว่า น้ำตาล กรดอินทรีย์ และวัตถุที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ขณะที่ค่า T_g ของน้ำ จะมีค่าต่ำที่สุดอยู่ที่ประมาณ -135°C ดังนั้น น้ำจึงมีผลต่อการทำให้ค่า T_g ของของผสมลดลง ซึ่งค่า T_g ของวัตถุจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อผ่านกระบวนการทำแห้ง เนื่องจาก น้ำถูกกำจัดออกไป ดังนั้น ค่า T_g ของผลิตภัณฑ์อาหารจะมีค่าสูงขึ้น เมื่อปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์อาหารอยู่ในช่วงต่ำ ดังนั้น วัตถุที่มีค่า T_g สูง จะสามารถทำให้แห้งได้ง่าย ขณะที่วัตถุที่มีค่า T_g ต่ำ อาจจะทำให้แห้งได้ยาก เนื่องจากวัตถุยังคงอยู่ในสถานะของไหลภายใต้สภาวะทำแห้งปกติ (Onwulata, 2005)

ระบบอาหารที่มีพอลิแซคคาไลด์ และโปรตีนเป็นองค์ประกอบนั้นจะเป็นโครงสร้างแบบผสม เช่น สารละลายแช่เยือกแข็งที่ประกอบด้วย ซูโครส แล็กโทส แร่ธาตุในนม และ โปรตีนจาก skim milk powder และ guar หรือ locust bean gum ซึ่งมีผลต่อค่า T_g เนื่องจากการไม่ประสานกันของพอลิเมอร์ และการแยกกันของวัฏภาค โดยพบว่าค่า T_g ของสารละลายที่มีน้ำตาลเป็นองค์ประกอบจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีพอลิเมอร์ (โปรตีน หรือ พอลิแซคคาไลด์) เป็นองค์ประกอบ แต่อย่างไรก็ตามค่า T_g ทั้งหมดของระบบอาหารที่มีการแยกกันของวัฏภาคจะมีค่าสูง เนื่องจากมีวัฏภาคของโปรตีน มีความแตกต่างในจำนวนของกลาสที่สร้างขึ้นภายในแต่ละ domain เนื่องจากความเข้มข้นของพอลิเมอร์ที่มีการแยกวัฏภาคมีความแตกต่างกัน และมีผลต่อการเจือจางของน้ำตาลในสารละลาย และมีผลกระทบต่อค่า T_g (Roger *et al.*, 2006) นอกจากนี้ Silva *et al.* (2006) ได้ศึกษาการเปลี่ยนวัฏภาค (phase transition) ของเนื้อ camu-camu (*Myrciaria dubia* (HBK) Mc Vaugh) ธรรมชาติ และที่มีการเติม 30% มอลโทเด็คซ์ทริน DE 20 ที่ผ่านการทำให้แห้งแบบแช่เยือกแข็ง วิเคราะห์ด้วย DSC พบว่า ค่า T_g ของวัฏภาคที่ถูกทำให้เข้มข้นสูงสุด (T_g') มีค่าเท่ากับ -58.8°C และ -40.1°C สำหรับเนื้อ camu-camu ธรรมชาติ และที่มีการเติมมอลโทเด็คซ์ทรินตามลำดับ

ปัจจัยที่มีผลต่อค่า T_g ได้แก่ น้ำหนักโมเลกุลและโครงสร้างเฉพาะของตัวถูกละลาย ปริมาณของตัวทำละลายที่ปรากฏ (Rahman, 1995) และปริมาณน้ำในผลิตภัณฑ์ (Onwulata, 2005)

2.4 การลดความเหนียว (Stickiness)

มอลโทเด็กซ์ทริน (maltodextrin) : สารช่วยลดการเกาะติดของอาหารแห้ง

มอลโทเด็กซ์ทริน คือ สตาร์ชที่ผ่านการไฮโดรไลซิสบางส่วนด้วยกรด หรือ เอนไซม์ มอลโทเด็กซ์ทรินที่มีค่า dextrose equivalent (DE) น้อยกว่า 20 ประกอบด้วย (1→4 และ 1→6)- α -D-glucopyranose-linked residues (Nickerson *et al.*, 2006) ค่า DE คือ ค่า reducing power ของพอลิแซคคาไรด์ หรือ โอลิโกแซคคาไรด์ที่ได้จากสตาร์ช เปรียบเทียบกับ D-กลูโคส โดยน้ำหนักฐานแห้ง โดยปกติมอลโทเด็กซ์ทรินมีค่า DE < 20 ขณะที่ corn syrup solids มีค่า DE \geq 20 มอลโทเด็กซ์ทรินที่มีค่า DE แตกต่างกัน จะมีสมบัติทางเคมีกายภาพแตกต่างกัน เช่น ความสามารถในการละลาย อุณหภูมิเยือกแข็ง ความหนืด เป็นต้น อย่างไรก็ตามมอลโทเด็กซ์ทรินที่มีค่า DE เหมือนกันอาจจะมีสมบัติต่างกันก็ได้ขึ้นอยู่กับวิธีการไฮโดรไลซิส แหล่งของสตาร์ช (ข้าวโพด มันฝรั่ง ข้าว) และอัตราส่วนของอะไมโลสต่ออะไมโลเพกติน (Klinkesorn *et al.*, 2004)

มอลโทเด็กซ์ทรินที่มีค่า DE สูงกว่า จะมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า และมีค่า T_g ต่ำกว่า เช่น มอลโทเด็กซ์ทรินที่มีค่า DE 10 และ 20 มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 1800 และ 900 ตามลำดับ และมีค่า T_g เท่ากับ 160 และ 141°C ตามลำดับ ที่ a_w เท่ากับ 0.00 (Rahman, 1995) ซึ่งเมื่อผสมมอลโทเด็กซ์ทรินที่มีค่า DE ต่ำกว่า ลงไปในผลิตภัณฑ์ที่มีความเหนียว และนำไปทำให้แห้ง จะทำให้ผลิตภัณฑ์มีความเกาะติดกันต่ำกว่า เนื่องจาก มอลโทเด็กซ์ทรินที่มีค่า DE ต่ำกว่า จะมีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า ค่า T_g สูงกว่า ซึ่งจะสามารถทำให้แห้งได้ง่าย ทำให้โครงสร้างของผลิตภัณฑ์มีความเหนียวลดลง ขณะที่วัตถุดิบที่มีค่า T_g ต่ำกว่า อาจจะทำให้แห้งได้ยาก เนื่องจากวัตถุดิบยังคงอยู่ในสถานะของไหลภายใต้สภาวะทำแห้งปกติ (Onwulata, 2005)

การทำให้แห้งแบบพ่นของอาหารที่มีปริมาณน้ำตาลสูงได้แก่ น้ำผลไม้ และน้ำผึ้ง ซึ่งมีความเหนียวที่จำกัดต่อการทำให้แห้งแบบพ่น โดยในระหว่างการทำให้แห้งแบบพ่น ผลิตภัณฑ์จะเหนียวติดพื้นผิวของเครื่องมือหรือเกาะกันเป็นกลุ่มก้อน ดังนั้นการใช้ตัวช่วยในการทำให้แห้งแบบพ่น คือ มอลโทเด็กซ์ทริน เพื่อให้มีความเหนียวเกิดขึ้นต่ำที่สุดหรือไม่เกิดขึ้นเลย (Adhikari *et al.*, 2002) นอกจากนั้น มอลโทเด็กซ์ทรินยังเป็น wall material ที่กักเก็บ และป้องกันสารที่มีความไวต่อความร้อน (Onwulata, 2005) การเติมมอลโทเด็กซ์ทรินลงไปในน้ำมะม่วง ก่อนการทำแห้งแบบพ่น ในการผลิตน้ำมะม่วงผง ทำให้สามารถลดความเหนียว แต่เพิ่มความสามารถในการละลายของน้ำมะม่วงผง (Cano-Chauca *et al.*, 2005) นอกจากนี้ การเติม 30% มอลโทเด็กซ์ทริน DE 20 ลงไปในเนื้อ camu-camu (*Myrciaria dubia* (HBK) Mc Vaugh) ที่มี reducing sugar (กรัมของกลูโคส/100 กรัม) เท่ากับ 3.25 ± 0.03 แล้วนำไปทำให้แห้งแบบแช่เยือกแข็ง ทำให้ค่า T_g ของผลิตภัณฑ์สูงขึ้น (Silva *et al.*, 2006)

2.5 สมบัติของน้ำผึ้ง

2.5.1 Water activity (a_w)

คำจำกัดความของ water activity คือ อัตราส่วนของความดันไอของน้ำในระบบกับความดันไอของน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิเดียวกัน หรือความชื้นสัมพัทธ์สมดุลของอากาศแวดล้อมของระบบ ณ อุณหภูมิเดียวกัน (Rahman, 1995) ดังสมการ

$$a_w = \frac{P}{P_0} = \frac{RH(\%)}{100}$$

โดย P = ความดันไอของน้ำในตัวอย่างอาหาร

P_0 = ความดันไอของน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ t_0 ซึ่งเป็นอุณหภูมิสมดุลของระบบ

a_w = ค่า critical water activity

RH = ค่าความชื้นสัมพัทธ์ (%)

ที่ระดับ a_w ต่ำ เชื้อจุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญได้ โดยอาหารส่วนมากมีค่า a_w ในช่วง 0.6-0.7 (Stencl, 2004) กิจกรรมของจุลินทรีย์ส่วนใหญ่จะถูกยับยั้งที่ a_w ต่ำกว่า 0.6 เชื้อราส่วนใหญ่ถูกยับยั้งการเจริญที่ a_w ต่ำกว่า 0.7 ส่วนยีสต์ และแบคทีเรียส่วนใหญ่ถูกยับยั้งการเจริญที่ a_w ต่ำกว่า 0.8 และ 0.9 ตามลำดับ ในขณะที่อาหารสด เช่น ผัก ผลไม้ เนื้อสัตว์ รวมทั้งสัตว์ปีกและปลา มีค่า a_w อยู่ระหว่าง 0.97-ประมาณ 1.00 (Fellows, 2000)

ค่า a_w เป็นปัจจัยหลักในการป้องกันหรือจำกัดการเจริญของจุลินทรีย์ และในหลายๆ กรณีพบว่า ค่า a_w คือ ตัวแปรเริ่มต้นที่มีผลต่อความคงตัวของอาหาร เป็นเกณฑ์สำหรับวัดการตอบสนองของจุลินทรีย์ และวิเคราะห์ประเภทของจุลินทรีย์ที่พบในอาหาร นอกจากนี้ปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อการเจริญของจุลินทรีย์ในผลิตภัณฑ์อาหาร ได้แก่ อุณหภูมิ pH ออกซิเจน สารอาหาร เป็นต้น ในอุตสาหกรรมน้ำผึ้งปริมาณน้ำของน้ำผึ้งเป็นปัจจัยสำคัญที่ก่อให้เกิดการเน่าเสียโดยเกิดการหมัก แต่อย่างไรก็ตามไม่ใช่เฉพาะปริมาณน้ำเท่านั้นแต่เป็นค่า a_w ของอาหารด้วยที่เป็นตัวควบคุมการเจริญของจุลินทรีย์ (Chirife *et al.*, 2006)

การลดค่า a_w เพื่อไม่ให้จุลินทรีย์สามารถนำน้ำไปใช้ในการเจริญ มีหลายวิธี เช่น การทำแห้ง การระเหย การอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง การทำให้น้ำในอาหารตกผลึกกลายเป็นน้ำแข็ง หรือการเติมน้ำในอาหาร การใช้คอลลอยด์ที่ชอบรวมกับน้ำ เช่น วุ้น ทำให้จุลินทรีย์หรือปฏิกิริยาทางเคมีต่างๆ ไม่สามารถนำน้ำไปใช้ได้ (วิล, 2546)

ค่า a_w ของผลิตภัณฑ์สามารถวัดได้จากค่าความชื้นสัมพัทธ์สมดุลของอากาศที่ปล่อยให้สมดุลกับผลิตภัณฑ์ ดังนั้นผลิตภัณฑ์จะต้องถูกวางไว้ในระบบปิด เพื่อให้เกิดความสมดุลได้ จุดที่เกิดความสมดุลคือจุดที่ a_w ของตัวอย่างมีค่าเท่ากับความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศนั่นเอง นอกจากการ

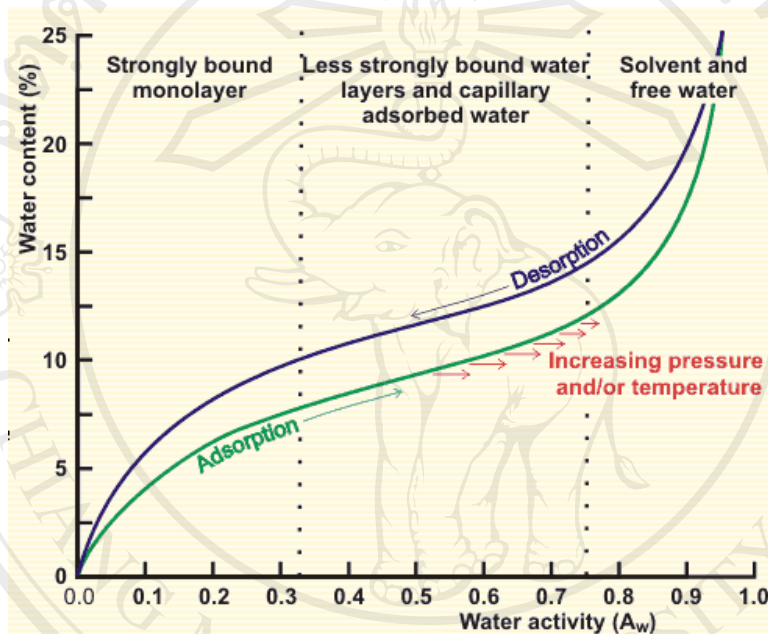
วัดค่า a_w โดยการวัดความชื้นสัมพัทธ์สมดุลแล้วยังมีเครื่องมือวัดค่า a_w โดยตรงเพื่อความสะดวกในการใช้งานด้วย การวัดค่า a_w โดยเครื่องมือที่ใช้วิธี Chilled-Mirror dew point ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับเป็นมาตรฐานระหว่างประเทศ AOAC จะสามารถวัดค่าได้โดยใช้เวลาประมาณ 5 นาที ในขณะที่เครื่องมือที่ใช้ Electronic Capacitive Sensors จะใช้เวลาประมาณ 30-90 นาที เพื่อเข้าสู่สภาวะสมดุลของความชื้นสัมพัทธ์ สำหรับการใช้งานบางอย่างการอ่านผลได้รวดเร็วจะทำให้ผู้ผลิตอาหารสามารถกำกับและควบคุมค่า a_w ได้ ณ จุดที่ทำการผลิตทำให้สามารถปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิตให้เหมาะสมได้ในระหว่างที่ทำการผลิต เครื่องมือในระบบ Chilled Mirror สามารถอ่านค่า a_w ได้กว้างกว่าระบบ Electronic Capacitive Sensors คือจะวัดค่าได้ในช่วงตั้งแต่ 0.030 ถึง 1.000 (รัตนันท์, 2007)

2.5.2 Sorption Isotherm

ค่า moisture sorption isotherms ของอาหาร แสดงถึงความสัมพันธ์ที่สมดุลระหว่างค่า a_w และปริมาณความชื้นของอาหารที่อุณหภูมิ และความดันคงที่ (Barbosa-Cánovas and Vega-Mercado, 1996)

Sorption Isotherm หาได้ 2 วิธีคือ adsorption หรือ desorption ซึ่งกระบวนการ adsorption และ desorption ไม่สามารถย้อนกลับได้ ดังนั้นทำให้เกิดความแตกต่างระหว่าง adsorption และ desorption isotherms อุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อ sorption isotherm ของอาหารระหว่างการเก็บรักษา กระบวนการผลิต และการเปลี่ยนแปลงของ a_w เนื่องจากอุณหภูมิมิผลต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลน้ำ และสมดุลไดนามิกสระหว่างวัฏภาคของไอกับวัฏภาคที่ถูกดูดซับ (Al-Muhtaseb *et al.*, 2004) adsorption isotherms ใช้สำหรับการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่สามารถดูดซึม หรือ ดูดซับ โมเลกุลของน้ำจากสิ่งแวดล้อมโดยรอบได้ (hygroscopic products) เช่น น้ำผึ้ง และกลีเซอรีน เป็นต้น ส่วน desorption isotherms มีประโยชน์สำหรับการวิเคราะห์กระบวนการทำแห้งหรือการกำจัดความชื้นจากอาหาร สำหรับการเกิด moisture sorption ในขั้นแรกนั้น โมเลกุลของน้ำจะก่อพันธะกับโมเลกุลอื่นๆ ที่เป็นองค์ประกอบในอาหาร เรียกว่า monolayer moisture จากนั้นจะเกิดการดูดซับความชื้นแบบ multilayer ซึ่งการดูดซับความชื้นแบบ multilayer จะประกอบด้วยปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับเข้าไปในที่ว่างของรูพรุน หรือ ที่ว่างขนาดเล็กของโครงสร้างแคปิลลารีภายในอาหาร และเกิดการละลายของตัวถูกละลาย จนในที่สุดจะเกิดกลไกการกักเก็บน้ำภายใน โมเลกุลของอาหาร ซึ่งวัฏภาคเหล่านี้จะเกิดขึ้นพร้อมกัน และจะเกิดต่างกัน ในอาหารแต่ละชนิดที่แตกต่างกัน และ ยังขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ และ โครงสร้างของอาหารอีกด้วย (Barbosa-Cánovas and Vega-Mercado, 1996)

sorption isotherms เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า a_w กับ ปริมาณน้ำ (%) ดังรูปที่ 2.1 โดยในส่วนของเส้นโค้งแสดงน้ำชั้นเดียวซึ่งมีความเสถียรมาก ไม่เยือกแข็ง และถูกกำจัดโดยการทำให้แห้ง ส่วนที่ 2 เป็นส่วนที่แสดงถึงน้ำที่ถูกดูดซับในโมเลกุลต่างๆ ภายในอาหาร และสารละลายขององค์ประกอบที่ละลายน้ำได้ ส่วนสุดท้ายของเส้นโค้ง เป็นน้ำอิสระซึ่งจะกลั่นตัวภายในโครงสร้างแคปิลลารีหรือในเซลล์ของอาหาร น้ำอิสระนี้จะถูกคักในอาหาร และถูกยึดด้วยแรงอ่อนๆ และถูกกำจัดโดยง่ายด้วยการทำให้แห้งหรือเยือกแข็งได้ (วิล, 2546)



รูปที่ 2.1 sorption isotherms

ที่มา : Chaplin (2008)

อัตราการเปลี่ยนแปลงค่า a_w ต่อ moisture sorption isotherms แตกต่างกันขึ้นกับการกำจัดความชื้นจากอาหาร (desorption) หรือเป็นการให้ความชื้นต่ออาหารแห้ง (adsorption) ดังที่รู้จักกันในชื่อว่า ฮิสเทอริซิสม์ (hysteresis loop) ความแตกต่างนี้อาจสูงมากในอาหารบางชนิด เช่น ข้าว สามารถใช้ค่าดังกล่าวในการกำหนดวิธีป้องกันผลิตภัณฑ์จากการดูดความชื้นได้ (วิล, 2546) ดังนั้นน้ำผึ้งจึงเป็น moisture sorption isotherms ชนิด adsorption (Onwulata, 2005)

การทำ moisture sorption isotherms ทำโดยใช้เทคนิคการวัดน้ำหนักฐานแห้ง ซึ่งตัวอย่างจะถูกทำให้อยู่ในสถานะสมดุลใน desiccator ที่บรรจุสารละลายเกลือที่ทราบค่า a_w (0.05-0.95) และวางไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิเป็นเวลาประมาณ 1-3 อาทิตย์ (Al-Muhtaseb *et al.*, 2004) โดยค่า a_w

ของสารละลายเกลือที่แตกต่างกัน ที่อุณหภูมิ 25°C อธิบายโดย Troller and Christian ปี 1978
 ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่า a_w ของสารละลายเกลือที่แตกต่างกัน ที่อุณหภูมิ 25°C

สารละลายเกลืออิ่มตัว	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)

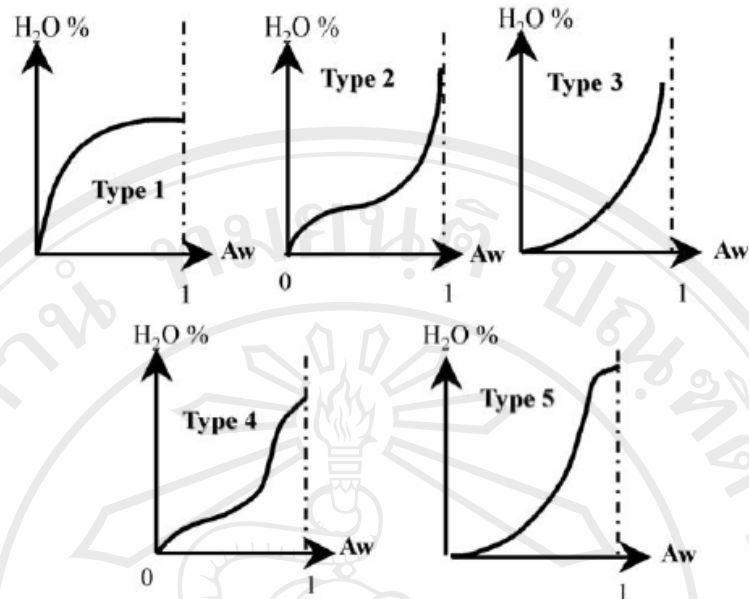
Moisture sorption isotherms เป็นเครื่องมือทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่มีประโยชน์สำหรับการวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ (interaction) ของน้ำ และสารในอาหาร ทำให้ได้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์อาหาร ได้แก่ การทำให้แห้ง การผสม การบรรจุผลิตภัณฑ์ในบรรจุภัณฑ์ และการเก็บรักษาอาหาร นอกจากนี้ sorption isotherms สามารถใช้ในการหาลักษณะโครงสร้างของผลิตภัณฑ์อาหารเช่น พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรของรูพรุน การกระจายขนาดของรูพรุน และความสามารถในการเป็นผลึก (crystallinity) (Debnath *et al.*, 2002) moisture sorption isotherms ยังสามารถใช้ในการทำนายความชื้นสูงสุดในอาหารที่ควรควบคุมในระหว่างกระบวนการทำแห้งและการเก็บรักษา ทำนายการเปลี่ยนแปลงในความคงตัวของอาหาร (Stencl, 2004) และ moisture

sorption isotherms ยังสามารถใช้ในการคัดเลือกความคงตัวของกลิ่น สี เนื้อสัมผัส สารอาหาร และความคงตัวทางชีวภาพที่เหมาะสมหรือสูงสุดของอาหาร (Debnath, 2002)

คุณภาพของอาหารส่วนใหญ่ที่ถูกเก็บรักษาโดยการทำให้แห้งนั้น ขึ้นอยู่กับปริมาณของความคงตัวทางกายภาพ เคมี และจุลชีววิทยา ซึ่งความคงตัวเหล่านี้เป็นผลหลักของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นสมดุลของวัสดุอาหาร และความสอดคล้องกับค่า a_w ที่อุณหภูมิที่ได้รับ ซึ่งค่า water sorption isotherms เหล่านี้มีลักษณะเฉพาะกับอาหารแต่ละชนิด และสามารถนำไปใช้ได้โดยตรงในการแก้ไขปัญหาการออกแบบ การผลิตอาหาร การทำนายความต้องการการใช้พลังงาน และวิเคราะห์หาสภาวะการเก็บที่เหมาะสม (Peng *et al.*, 2007)

อาหารที่มีลักษณะเป็นผงมีแนวโน้มบวมบ่อยครั้งที่จะมีลักษณะเหนียว และเกาะตัวกันของผง ซึ่งนำไปเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อปัญหาดังกล่าว ดังนั้น moisture sorption isotherms เป็นเครื่องมือที่ใช้ประโยชน์สำหรับการทำความเข้าใจในเรื่องของความสัมพันธ์ของผง และปัญหาเกี่ยวกับความคงตัวต่างๆ ซึ่ง moisture sorption isotherms สำหรับผงนั้นอธิบายถึงความสัมพันธ์ที่สมดุลระหว่างปริมาณความชื้นของผง และความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อมโดยรอบ (Foster *et al.*, 2005)

Isotherms แบ่งออกเป็น 5 ประเภทดังรูปที่ 2.2 ซึ่งถูกค้นพบโดย Brunauer, Deming and Teller ในปี 1940 โดยประเภทที่ 1 คือ Langmuir isotherm ซึ่งได้มาโดยการดูดซับโมเลกุลเดี่ยวของแก๊สโดยของแข็งที่มีรูพรุน (porous solid) ในปริมาตรของช่องว่างที่จำกัด ประเภทที่ 2 คือ sigmoid isotherm ใช้อธิบายสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ละลายได้ และมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงที่โค้งเข้าหาแนวเส้น a_w ที่มีค่าเท่ากับ 1 สำหรับประเภทที่ 3 คือ Flory-Huggins isotherm ใช้คำนวณสำหรับการดูดซับของตัวทำละลาย หรือผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นพลาสติกคล้ายกอลลีเซอรอลที่อุณหภูมิเหนือค่า T_g หรือใช้อธิบายสำหรับผลิตภัณฑ์อาหารที่มีองค์ประกอบเป็นของแข็งที่ละลายน้ำได้ เช่น น้ำตาลหรือเกลือ (Rahman, 1995) ส่วน isotherm ประเภทที่ 4 อธิบายการดูดซับโดยของแข็งที่ชอบน้ำ และมีความสามารถอุ้มน้ำได้ (swellable hydrophilic solid) จนกระทั่งถึงจุดสูงสุดของการ hydration และประเภทที่ 5 คือ B.E.T (Brunauer, Emmett and Teller, 1938) multilayer adsorption isotherm ใช้สำหรับวิเคราะห์การดูดซับของไอน้ำบนถ่านหิน และสัมพันธ์กับ isotherm ประเภท 2 และ 3 นอกจากนี้ยังพบว่า isotherm 2 ประเภทที่พบบ่อยที่สุดในผลิตภัณฑ์อาหารคือ isotherm ประเภทที่ 2 และ 4 (Mathlouthi and Roge, 2003)



รูปที่ 2.2 ประเภทของ Sorption isotherms

ที่มา : Mathlouthi and Roge (2003)

รูปร่างของ isotherm ที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับธรรมชาติของผงอาหารว่าเป็นผลึกที่มีรูปแบบที่แน่นอน หรือมีรูปแบบไม่แน่นอน ซึ่งผงอาหารส่วนมากมีโครงสร้างที่ซับซ้อน ได้แก่ ตัวถูกละลายที่มีผลึกรูปแบบที่แน่นอน เช่น น้ำตาล ซึ่งแสดงการเปลี่ยนเป็นผลึก ในระหว่างการดูดซับของน้ำ โดยน้ำตาลในรูปแบบที่แน่นอน มีหลายปัจจัยที่กระทบต่อการดูดซับของไอน้ำ และส่งผลต่อความคงตัวของสารละลาย การมีฟิล์มบางของสารละลายอิมัลชันที่ผิวของผลึก การกระจายขนาดของอนุภาคเล็กๆ และน้ำในผลึก คือ ปัจจัยบางประการ ซึ่งทำให้ความชื้นสัมพัทธ์สมดุลของน้ำตาลไม่มีความเป็นระเบียบ และมีแนวโน้มเกิดการเกาะตัวกันของผง (Mathlouthi and Roge, 2003) อาหารแต่ละชนิดจะมี sorption isotherms ของน้ำแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ รูปร่างของ sorption isotherms ของน้ำแตกต่างกันขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางกายภาพ องค์ประกอบทางเคมี และปริมาณของน้ำที่ยึดอยู่ภายในอาหาร (วิไล, 2546)

นอกจากนี้ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนาย sorption isotherms ยังสามารถแบ่งตามจำนวนของตัวแปร (Rahman, 1995) ได้ดังนี้คือ

1. Isotherms ประเภท 2 ตัวแปร ได้แก่

1.1 สมการของ Smith (1947) เป็นสมการอย่างง่ายที่ใช้อธิบาย water sorption isotherm ของพอลิเมอร์ทางชีวภาพ (bio-polymers) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ซึ่ง Becker and Sallans (1956) พบว่าสมการนี้ใช้ได้ในการณี desorption ของ wheat ที่มีค่า a_w อยู่ระหว่าง 0.5-0.95 นอกจากนี้

Young (1976) พบว่า การประยุกต์ใช้ของสมการนี้จะถูกจำกัดที่ค่า a_w ต้องมากกว่า 0.3 ในกรณีของ Virginia peanut หรือเหมาะสำหรับ a_w ในช่วง 0.3-0.9 (Kumar and Siddaramaiah, 2007) ซึ่งสมการของ Smith (1947) สามารถแสดงได้ดังนี้คือ

$$M_w = A + B \ln(1 - a) \quad (2.1)$$

1.2 สมการของ Oswin (1946) ได้พัฒนาสมการอย่างง่ายสำหรับกราฟรูปโค้งกลับ แสดงสมการได้ดังนี้คือ

$$M_w = A \left[\frac{a}{1-a} \right]^B \quad (2.2)$$

Boquet *et al.* (1978) กล่าวว่า สมการของ Oswin ใช้ได้ดีที่สุดสำหรับการอธิบาย isotherm ของอาหารที่มีโปรตีน และคาร์โบไฮเดรต เป็นองค์ประกอบ และใช้ได้ดีสำหรับ เนื้อ และผักต่างๆ

1.3 สมการของ Henderson (1952)

$$M_w = \left[\frac{\ln(1-a)}{-A} \right]^{1/B} \quad (2.3)$$

1.4 สมการ BET ถูกค้นพบโดย Brunauer *et al.* (1938) BET isotherm ส่วนใหญ่จะใช้ที่ค่า a_w อยู่ระหว่าง 0.05-0.45 แสดงสมการดังนี้คือ

$$M_w = \frac{M_{bm} B_{bt} a}{(1-a)[1 + (B_{bt} - 1)a]} \quad (2.4)$$

M_{bm} = ปริมาณความชื้นที่เนื้อเยื่อชั้นเดียว

B_{bt} = ค่าคงที่ที่สัมพันธ์กับความร้อนสุทธิทั้งหมดของ sorption

1.5 Halsey (1948)

สมการนี้ใช้สำหรับอาหาร และองค์ประกอบของอาหารต่างๆ ที่มีค่า a_w เท่ากับ 0.10-0.80 หรือเหมาะสำหรับ a_w ในช่วง 0.4-0.9 (Kumar and Siddaramaiah, 2007)

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

$$\ln(M_w) = A + B \times \{\ln[-\ln(a_w)]\} \quad (2.6)$$

1.6 สมการของ Chung and Pfoest (1967) เป็นสมการที่แสดงการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระสำหรับ sorption ที่สัมพันธ์กับปริมาณความชื้น ดังสมการ

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

1.7 สมการของ Iglesias and Chirife (1978) สมการนี้ถูกออกแบบเพื่อใช้อธิบายลักษณะอาหารที่มีน้ำตาลสูง แสดงสมการได้ดังนี้

$$\ln \left[M_w + \left(M_w^2 + M_{0.5w} \right)^{1/2} \right] = Aa + B \quad (2.8)$$

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

1.8 สมการของ Caurie (1985)

$$\ln(M_w) = \ln A - r \times a \quad (2.9)$$

2. Isotherms ประเภท 3 ตัวแปร ได้แก่

2.1 สมการ Cubic คือ สมการกำลังสาม ใช้สำหรับอธิบาย กราฟ sorption isotherm รูปโค้งกลับอย่างง่าย

$$M_w = p_1 + p_2 a + p_3 a^2 + p_4 a^3 \quad (2.10)$$

2.2 สมการของ Schuchmann-Ray-Peleg (1990) ใช้ทำนายค่า a_w ที่ปริมาณความชื้นสูง แสดงสมการดังนี้ คือ

$$X_w = \frac{Aa_m}{(1 + Ba_m)(C - a_m)} \quad (2.11)$$

เมื่อ $a_m = a/(1-a)$

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

$$M_w = \frac{M_{gm} Y K_a}{(1 + K_a)(1 - K_a + Y K_a)} \quad (2.12)$$

$$\frac{a}{M_w} = \alpha(a_w)^2 + \beta(a_w) + \varepsilon \quad (2.13)$$

M_{gm} = GAB monolayer moisture (Kg water/Kg dry solid)

Y และ K = ความสัมพันธ์ของผลเนื่องจากอุณหภูมิ

3. Isotherms ประเภท 4 ตัวแปร ได้แก่

3.1 สมการของ Peleg (1993) เป็นสมการ 4 ตัวแปรอย่างง่ายที่สุด แสดงสมการได้ดังนี้ คือ

$$M_w = Aa^C + Ba^D \quad (2.14)$$

โดย $C < 1$ และ $D > 1$ สมการนี้ใช้ได้ทั้งกราฟ isotherm ที่เป็น และไม่เป็นรูปโค้งกลับ เป็นสมการที่ดีกว่าสมการ GAB

3.2 สมการของ Isse *et al.* (1993) ใช้สำหรับข้อมูล moisture isotherm ช่วงกว้างของมะม่วงใน 2 ช่วงของ submoisture sorption isotherms สำหรับ 2 ช่วงที่แตกต่างกันของ a_w

$$\ln M_w = A \ln \frac{[1]}{[1-a]} + B \quad (2.15)$$

ค่า A และ B คือ ฟังก์ชันของอุณหภูมิ

Stencl (2004) ได้ศึกษา Moisture sorption isotherm ของผงโยเกิร์ตที่ผ่านการทำให้แห้งแบบพ่น โดยวัด adsorption และ desorption ของน้ำในผงโยเกิร์ตที่อุณหภูมิในช่วง 20 – 40°C และมีช่วง a_w จาก 0.40 ถึง 0.99 พบว่า sorption capacity มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และสามารถใช้สมการหรือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ถึง 4 แบบ (Chung-Pfost, Halsey, Henderson และ Oswin) ในการอธิบาย adsorption และ desorption ของน้ำในผงโยเกิร์ต

2.5.3 ความสามารถในการไหล (flowability)

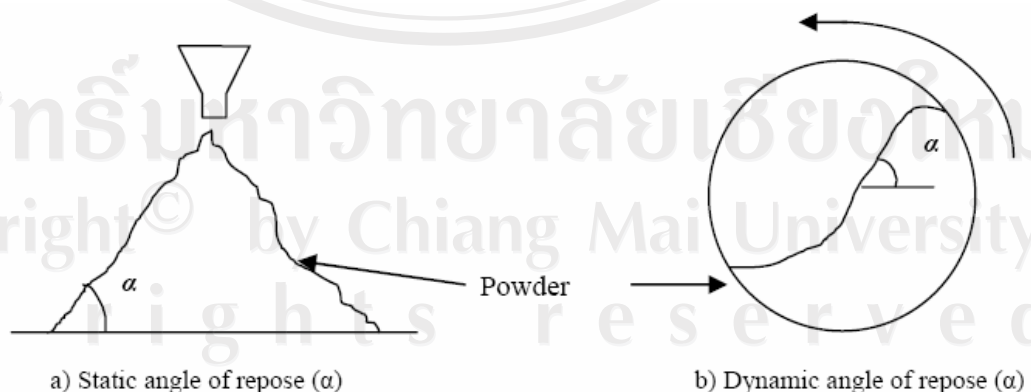
มุมกอง (Angle of repose) ตามนิยามของ Terzaghi and Peck (1948) หมายถึง มุมกองระหว่างพื้นราบ และพื้นเอียงของกองวัสดุที่ถูกทำให้ไหลลงมาจากอุปกรณ์ที่จัดให้อยู่สูงเหนือ

พื้นราบ โดยใช้อุปกรณ์อย่างง่ายในการทำให้เกิดการไหลของวัสดุจากจุดที่อยู่เหนือพื้นราบจนกระทั่งมุมที่เกิดขึ้นเองที่ แล้วจึงวัดมุมของวัสดุแห้ง ค่ามุมของวัสดุแห้งที่มีค่าต่ำกว่าจะมีความสามารถในการไหลได้มากกว่าวัสดุแห้งที่มีค่ามุมที่สูงกว่า (Bodhimage, 2006)

มุมกองเป็นดัชนีชี้วัดความสามารถในการไหลของผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นผง Carr (1965, 1970) and Raymus (1985) ได้กล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการไหลของผง และการวัดทางกายภาพอย่างง่ายว่า ค่ามุมกองที่ต่ำกว่า 30° แสดงว่ามีความสามารถในการไหลที่ดีมาก ค่ามุมกองอยู่ในช่วง 30° - 45° แสดงว่าอนุภาคผงสามารถไหลได้ดี แต่มีความเกาะตัวกันระหว่างอนุภาคเล็กน้อย สำหรับค่ามุมกองที่อยู่ในช่วง 45° - 55° แสดงว่ามีความเกาะตัวกันระหว่างอนุภาคมาก และค่ามุมกอง $>55^\circ$ แสดงว่า อนุภาคไหลได้ช้า หรือ มีความเกาะตัวกันระหว่างอนุภาคสูงมาก และมีความสามารถในการไหลจำกัด (Geldart *et al.*, 2006)

การวัดค่ามุมกองเป็นวิธีที่น่าเชื่อถือ รวดเร็ว และง่ายสำหรับการวัดความสามารถในการไหลของผงที่แตกต่างกัน โดยมุมกองที่มีขนาดเล็กกว่าจะมีความสามารถในการไหลของผงได้อิสระกว่า ขณะที่มุมกองที่มีขนาดใหญ่กว่าแสดงว่า วัสดุมีความสามารถในการไหลได้ไม่ดี หรือมีความเกาะตัวกันระหว่างอนุภาคได้ดีกว่า (cohesiveness) ซึ่ง ISO 3435 ได้ใช้วิธีวัดมุมกองสำหรับการวิเคราะห์ความเกาะตัวกันระหว่างอนุภาคของวัสดุที่มีขนาดใหญ่ (Bodhimage, 2006)

มุมกองสามารถวัดได้ 2 แบบ คือ static angle of repose เป็นมุมที่เกิดขึ้นระหว่างระนาบพื้นราบ และเส้นความชันที่ยาวไปตามพื้นผิวของกองที่เกิดขึ้นโดยวัสดุที่เทลงบนพื้นผิวราบ การวัด static angle of repose แสดงดังรูป 2.3 สำหรับ dynamic angle of repose จะถูกวัดในกระบอกตวงที่มีการหมุน (rotating cylinder) แสดงดังรูป 2.3 (Bodhimage, 2006)

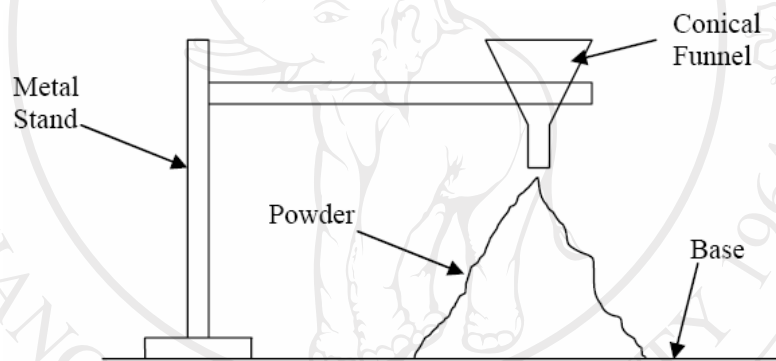


รูปที่ 2.3 Static และ dynamic of angle of repose

ที่มา : Bodhimage (2006)

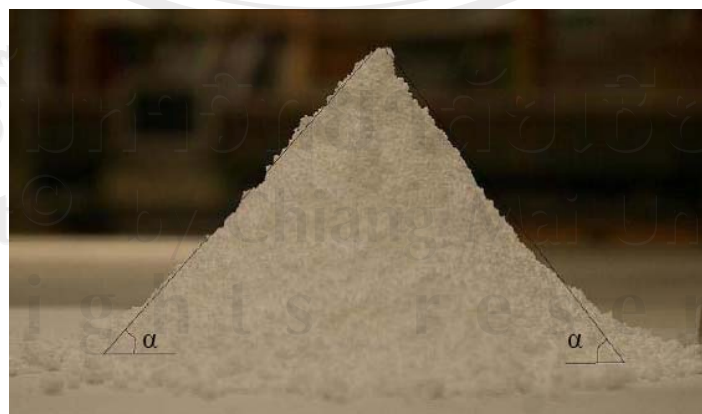
การวัด static angle of repose

อุปกรณ์สำหรับการวัด static angle of repose ในการศึกษาในปัจจุบันประกอบด้วยกรวยแก้วกรองที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของทางออกด้านปลายกรวยแก้วกรองขนาด 0.9 cm ซึ่งถูกตรึงไว้บนขาตั้งโลหะดังรูปที่ 2.4 โดยทางออกด้านปลายกรวยแก้วกรองจะอยู่สูงจากฐาน 6 cm ตาม ISO 3435/1 ก้อนผงจะถูกละทิ้งลงไปในตำแหน่งด้านหน้าของกรวยกรองเพื่อถ่ายรูปอัตโนมัติ ซึ่งหลังจากนั้นจะถูกวิเคราะห์สำหรับ static angle of repose โดยใช้ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ชื่อว่า “Scion Image” (www.scioncorp.com) ปลายทางออกของกรวยกรองจะถูกปิดไว้ และตัวอย่างผง 200 g จะถูกเทผ่านลงไป เมื่อปลายทางออกถูกเปิดออกวัสดุจะไหลออกไปสร้างเป็นรูปทรงกรวยบนฐาน โดยผู้ถ่ายภาพยังคงจับภาพโดยใช้กล้องถ่ายรูป และจากนั้นป้อนข้อมูลเข้าไปในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อวัด static angle of repose (Bodhimage, 2006)



รูปที่ 2.4 การวัด Static angle of repose

ที่มา : Bodhimage (2006)



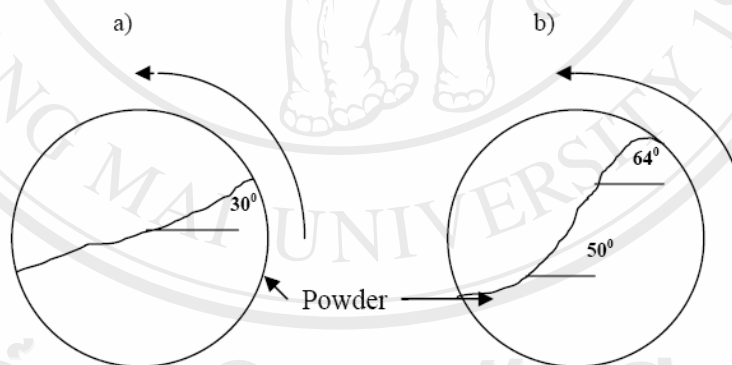
รูปที่ 2.5 ตัวอย่างผงสำหรับการวัด Static angle of repose

ที่มา : Bodhimage (2006)

จากรูปที่ 2.5 Angle of repose เป็นมุมระหว่างพื้นผิวของกองผงรูปกรวย และระนาบพื้นผิว ซึ่งคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้คือ $\tan \alpha = H/R$ 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) แล้วสังเกตก่อนที่กลิ้งไปตามพื้นผิวของกองผง เมื่อเพิ่มอัตราการหมุนพบว่า ก่อนที่กลิ้งจะหยุดเป็นพั๊กๆ หรือน้อยลง และขาดออกจากพื้นผิวอย่างต่อเนื่อง โดย dynamic angle of repose คือ มุมที่เกิดขึ้นโดยพื้นผิวที่ลาดเอียงของกองผงกับแนวราบเมื่อทำการหมุนในกระบอกตวงดังรูปที่ 2.6 และเมื่อเพิ่มอัตราเร็วการหมุนต่อไปมากขึ้น จะทำให้เกิดการเสีรูปร่างของพื้นผิวแบนราบไปเป็นรูปร่างตัว S (S shape profile) การเสีรูปร่างเริ่มต้นจากการลดเข้ามาข้างในของขอบเขต และสามารถถูกประมาณค่าโดยเส้นตรง 2 เส้น ที่มีความชันแตกต่างกัน โดยเส้นตรงที่มีความชันมากกว่าดังรูปที่ 2.6 จะไว้สำหรับการวัด dynamic angle of repose (Bodhimage, 2006)



รูปที่ 2.6 การวัด Dynamic angle of repose

ที่มา : Bodhimage (2006)

Shittu and Lawal (2007) ได้ศึกษาการวัดมุมกองของตัวอย่างเครื่องคั้มโกโก้ผงที่ผลิตในประเทศไนจีเรีย ปริมาณ 200 mL ในกระบอกตวง นำกระบอกตวงไปแขวนบนชุดขาตั้งให้ปากของกระบอกตวงสูงจากพื้นผิวราบประมาณ 20 cm จากนั้นปล่อยให้ผงไหลอย่างอิสระภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลก ซึ่งได้กองโกโก้ผงบนพื้นผิวราบตามขวาง พบว่าค่ามุมกองอยู่ในช่วง 25.0° - 37.7° เมื่อความชื้นและปริมาณน้ำตาลในเครื่องคั้มโกโก้ผง เท่ากับ 0.8-3.6% และ 52.4-90.5%

ตามลำดับ แสดงว่าเครื่องตีมโกลีผงมีความสามารถในการไหลที่ดี นอกจากนี้ Antoine *et al.* (2003) พบว่า มุมกอง และ Carr index ของผงถั่วเหลือง มีค่าเท่ากับ $38.33 \pm 1.106^\circ$ และ Carr index มีค่าเท่ากับ $26.72 \pm 1.06\%$

ปัจจัยที่มีผลต่อค่ามุมกองคือสถานะในการเก็บรักษาของผงที่ต้องการทดสอบความสามารถในการไหลซึ่งถ้ามีการเปลี่ยนแปลงความชื้นของผงเพียงเล็กน้อยก็สามารถเพิ่มค่ามุมกองได้มากกว่า 100% (Zou and Bruswitz, 2002) นอกจากนี้ ยังขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาค และองค์ประกอบของพื้นผิวของผง โดยเฉพาะอย่างยิ่งผงที่มีไขมันเป็นองค์ประกอบของพื้นผิวสูง จะไปยับยั้งสมบัติของการไหล โดยพบว่า skim milk powder มีการไหลได้ดีเมื่อเปรียบเทียบกับผงชนิดอื่นๆ คือ whole milk powder, cream powder และ whey protein concentrate เนื่องจากพื้นผิวของ skim milk powder ประกอบด้วยน้ำตาลแลคโทส และ โปรตีน ซึ่งมีจำนวนของไขมันอยู่เล็กน้อย ขณะที่พื้นผิวของ whole milk, cream และ whey protein powder ประกอบด้วยไขมันอยู่สูงจะไปยับยั้งความสามารถของการไหล (Kim *et al.*, 2005) และปริมาณไขมันยังมีผลอย่างมากต่อการเกาะตัวกันของนมผง โดยนมผงที่มีปริมาณไขมันที่พื้นผิวของอนุภาคมากกว่าก็จะส่งผลให้มีการเกาะตัวกันมากกว่าทำให้ความสามารถในการไหลของผลิตภัณฑ์นมผงมีค่าลดลง (Fitzpatrick *et al.*, 2007)

2.5.4 ความสามารถในการละลาย (Solubility)

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

1. Wettability คือ ความสามารถของอนุภาคของผงในการดูดซับน้ำบนพื้นผิวของอนุภาค และปัจจัยที่มีผลต่อ wettability ได้แก่ กระบวนการการเกาะกันเป็นก้อนของอนุภาคจำนวนของอนุภาคที่ดูดซับน้ำได้ พื้นผิวของอนุภาค หรือ การไม่มีอนุภาคที่ไม่เกาะกันเป็นก้อน
2. Sinkability คือ ความสามารถของผงในการจมลงไปในน้ำ หลังจากผงเกิดการดูดซับน้ำบนพื้นผิวของอนุภาค และถูกกระทบโดยความหนาแน่นของอนุภาค
3. Dispersibility หมายถึง ความสามารถของผง ในการกระจายตัวตลอดทั่วทั้งภายในน้ำ โดยไม่เกิดเป็นก้อน ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ dispersibility คือ การไม่มีของอนุภาคที่มีขนาดมากกว่า $250 \mu\text{m}$ หรือ อนุภาคที่เกาะตัวกันเป็นก้อน
4. Solubility คือ อัตราการละลายหรือความสามารถในการละลายทั้งหมด โดยการไม่มีจุด และการบวมตัวอย่างรวดเร็วของอนุภาค เป็นปัจจัยที่กระทบต่อความสามารถในการละลาย

Solubility index (SI) คือ ร้อยละของมวลแห้งของสารที่ละลายได้ใน supernatant (W_s) กับ มวลแห้งของตัวอย่างทั้งหมด (W_o) (Mandala and Bayas, 2004)

$$SI = \frac{W_s}{W_o} \times 100\% \text{ (ของแข็งที่ละลายได้ (g) / มวลแห้งของตัวอย่างทั้งหมด (g))}$$

ปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการละลาย คือ ธรรมชาติของตัวถูกละลาย และตัว ทำละลาย อุณหภูมิ ความดัน ขนาดของอนุภาค และการกวนผสม (Rahman, 1995)

การวิเคราะห์ค่าความสามารถในการละลาย โดยใช้ตัวอย่างปริมาณ 5 g ใส่ใน centrifuge tube เติมน้ำ 50 mL ที่อุณหภูมิ 30°C ปั่นที่ความเร็ว 3000 rpm นาน 10 นาที เท supernatant ใส่ใน aluminium can อบที่อุณหภูมิ 105°C เวลานาน 24 ชั่วโมง คำนวณหาค่าความสามารถในการละลาย (%) ดังนี้ (Shittu and Lawal, 2007)

ค่าความสามารถในการละลาย (%)

$$= \frac{\text{น้ำหนัก supernatant ก่อนอบ} / \text{น้ำหนัก supernatant หลังอบ}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างที่ซั่งเริ่มต้น}} \times 100$$