

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ลำไย

ลำไยจัดเป็นไม้ผลกิ่งเมืองร้อน มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Dimocarpus longan* Lour. มีถิ่นกำเนิดในประเทศจีนตอนใต้และอินเดีย เป็นไม้ยืนต้นขนาดกลาง สูงประมาณ 9-12 เมตร เป็นไม้ผลเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งของประเทศไทย (กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2547) โดยจะเริ่มให้ผลผลิตเมื่อปลูกได้ประมาณ 3 ปี ต้นที่อายุ 4-5 ปี ขนาดทรงพุ่มกว้างประมาณ 3-3.5 เมตร จะให้ผลผลิต 20-30 กิโลกรัมต่อต้น ส่วนต้นที่มีอายุมากจะมีทรงพุ่มมากกว่า 10 เมตร อาจให้ผลผลิตสูงถึง 400-600 กิโลกรัมต่อต้น ซึ่งผลผลิตจะออกสู่ตลาดมากประมาณกลางเดือนกรกฎาคมถึงกลางเดือนสิงหาคม อย่างไรก็ตามผลผลิตของลำไยจะมากหรือน้อยแตกต่างกันตามพันธุ์ อายุต้น และการปฏิบัติดูแลรักษา (พาวิณ, 2543)

ลำไยเป็นไม้ผลเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย เพราะผลลำไยเป็นที่นิยมของผู้บริโภคทั้งภายในประเทศและต่างประเทศ ซึ่งนอกจากปริมาณผลผลิตจะพอเพียงต่อความต้องการบริโภคภายในประเทศแล้ว ยังสามารถส่งออกไปจำหน่ายยังตลาดต่างประเทศ ทำรายได้เข้าประเทศปีละหลายพันล้านบาท และมีแนวโน้มว่าปริมาณและมูลค่าการส่งออกยังคงเพิ่มขึ้นทุกปี (งานศูนย์ข้อมูลฝ่ายแผนงานพัฒนาการเกษตรสำนักงานเกษตรและสหกรณ์จังหวัดเชียงใหม่, 2547b)

ผลผลิตลำไยในประเทศไทยในปี 2551 มีผลผลิตออกสู่ตลาดประมาณ 433,200 ตัน สำหรับผลผลิตลำไยภาคเหนือจะออกสู่ตลาด 370,500 ตัน (ศูนย์สารสนเทศการเกษตร สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2551) โดยมีแหล่งปลูกที่สำคัญอยู่ทางภาคเหนือได้แก่ จังหวัดเชียงใหม่ ลำพูน ลำปาง แพร่ น่าน เชียงรายและแม่ฮ่องสอน ภาคตะวันออก ได้แก่ จันทบุรี และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ได้แก่ เลย หนองคาย นครพนมและมุกดาหาร เนื่องจากลำไยเป็นผลไม้ที่มีรสชาติหวานหอม และมีประโยชน์ทางโภชนาการหลายอย่าง (ตารางที่ 2.1) จึงเป็นที่นิยมบริโภคของทั้งชาวไทยและชาวต่างประเทศ สามารถบริโภคได้ทั้งในรูปผลสดและแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้หลายชนิด จึงเป็นที่นิยมบริโภคของทั้งชาวไทยและชาวต่างประเทศ

ตารางที่ 2.1 คุณค่าทางโภชนาการของลำไย

สารอาหาร	เนื้อลำไยสด	เนื้อลำไยแห้ง
ความชื้น ร้อยละ	81.10	17.80
ไขมัน ร้อยละ	0.11	0.40
เส้นใย ร้อยละ	0.28	1.60
โปรตีน ร้อยละ	0.97	4.60
เถ้า ร้อยละ	0.56	2.86
คาร์โบไฮเดรต ร้อยละ	16.98	72.70
ค่าพลังงานความร้อน กิโลแคลอรี/100 กรัม	72.79	311.80
แคลเซียม มิลลิกรัม/100 กรัม	5.70	27.70
เหล็ก มิลลิกรัม/100 กรัม	0.35	2.39
ฟอสฟอรัส มิลลิกรัม/100 กรัม	35.30	159.50
วิตามินซี มิลลิกรัม/100 กรัม	69.20	137.80
โซเดียม มิลลิกรัม/100 กรัม	-	4.50
โปแตสเซียม มิลลิกรัม/100 กรัม	-	2,012.00
ไนอาซีน มิลลิกรัม/100 กรัม	-	3.03
กรดแพนโทนิค มิลลิกรัม/100 กรัม	-	0.57
วิตามินบี 2 มิลลิกรัม/100 กรัม	-	0.37

ที่มา: กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (2547)

2.2 การแปรรูปลำไยผง

2.2.1 การทำน้ำลำไยผงแบบดั้งเดิม

เมื่อพิจารณาถึงวิธีการบริโภคลำไยแห้ง ผู้บริโภคส่วนใหญ่นิยมนำมาทำเป็นน้ำลำไย ด้วยการนำลำไยแห้งมาต้มกับน้ำและเติมน้ำตาลลงไปจนได้รสหวานตามต้องการ และต้มต่อจนเนื้อลำไยกั้นตัวซึ่งต้องใช้เวลาประมาณ 30-40 นาที การต้มน้ำลำไยดังกล่าวถึงแม้วิธีการจะกระทำได้อย่างง่าย แต่ก็ไม่สะดวกและใช้เวลานาน (ชนันท์, 2545) ปัจจุบันมีผลิตภัณฑ์ลำไยผงจำหน่ายในตลาดในปริมาณที่จำกัด การผลิตลำไยผงใช้วิธีแบบดั้งเดิมด้วยการนำน้ำลำไยมาเคี่ยวกับน้ำตาลทรายจนข้น นำไปทำให้แห้ง แล้วบดเป็นผง ซึ่งการผลิตโดยวิธีนี้ใช้ต้นทุนต่ำ และใช้น้ำตาลทราย

ในปริมาณมาก ทำให้มีข้อจำกัดด้านการตลาดต่อกลุ่มผู้บริโภคที่เป็นโรคเบาหวาน (ฟีโลรัก และ รัตนา, 2552)

2.2.2 การทำน้ำลำใยผงแบบโฟม-เมท

กระบวนการทำแห้งแบบโฟม-เมท เป็นวิธีการทำแห้งโดยใช้หลักการตีให้ผลิตภัณฑ์เกิดเป็นโฟมและใช้ความร้อนจากลมร้อนเป็นตัวระเหยความชื้นที่แทรกอยู่ในโฟมออกไป การทำให้เกิดโฟมเป็นขั้นตอนแรกของการทำแห้งแบบโฟม-เมท เป็นระบบสารแขวนลอยอย่างสมบูรณ์ในโฟมแก๊สของเหลว ซึ่งลักษณะโฟมที่ดีในการอบแห้งแบบโฟม-เมทนี้ จะต้องมีความคงตัวดีในระหว่างการอบแห้งเพื่อให้โฟมยังคงมีลักษณะเป็นโฟมและแตกหักออกเป็นผงได้ง่าย (Hart *et al.*, 1963)

วัชรและรัตนา (2543) ได้ศึกษาหาชนิดสารก่อให้เกิดโฟมและสูตรน้ำลำใยที่เหมาะสมในการผลิตน้ำลำใยผงโดยวิธีโฟม-เมท พบว่าส่วนผสมน้ำลำใยเข้มข้นที่เหมาะสมประกอบด้วยเนื้อลำใยสตร้อยละ 50 เนื้อลำใยแห้งร้อยละ 20 และน้ำตาลทรายร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก สารที่ก่อให้เกิดโฟมที่เหมาะสมคือ Methocel 65 HG ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก จากนั้นตีให้เกิดโฟมด้วยความเร็วสูง เป็นเวลา 15 นาที ทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที

การทำน้ำลำใยผงแบบโฟม-เมท เริ่มจากการนำน้ำลำใยมาทำให้เข้มข้น เพื่อลดปริมาณน้ำส่วนหนึ่ง และช่วยทำให้โฟมที่เกิดขึ้นมีความคงตัวยิ่งขึ้น เนื่องจากน้ำลำใยไม่สามารถตีให้เกิดโฟมหรือสามารถทำให้เกิดโฟมได้จึงมีการเติมสารก่อโฟมและสารเพิ่มความคงตัว (stabilizer) ใช้สำหรับเติมในน้ำลำใย เพื่อทำให้น้ำลำใยมีความหนืดเพิ่มขึ้น และตีให้เป็นโฟมที่ไม่ยุบตัวได้ง่าย ผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งแล้วจะมีน้ำหนักเบา มีช่องว่างของแก๊สแทรกอยู่ในโครงสร้าง ทำให้มีความหนาแน่นต่ำ เมื่อนำมาละลายจะปล่อยแก๊สออกทำให้เกิดโฟมขึ้นในผลิตภัณฑ์ ซึ่งเป็นลักษณะที่ผู้บริโภคไม่ต้องการ (ชนันท์, 2545)

2.2.3 การทำน้ำลำใยผงแบบอบแห้งพ่นฝอย

เทคนิคการอบแห้งแบบพ่นฝอย เป็นวิธีการที่นิยมใช้สำหรับการทำแห้งสารละลายอินทรีย์ สารประเภทอิมัลชันและของเหลวชนิดต่างๆ โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จะอยู่ในรูปของผงแห้งมักใช้การอบแห้งแบบพ่นฝอยในอุตสาหกรรมทางเคมีและอาหาร การอบแห้งด้วยวิธีนี้นอกจากจะใช้สำหรับการทำแห้งอย่างรวดเร็วแล้ว ยังเป็นวิธีการที่มีประโยชน์มากในการลดขนาดและปริมาตรของเหลวอีกด้วย จากการวิจัยและพัฒนาที่ต่อเนื่องกันมา ทำให้วิธีการอบแห้งแบบพ่นฝอยกลายเป็นวิธีการทำแห้งที่มีประสิทธิภาพและนิยมนำมาทำแห้งให้กับผลิตภัณฑ์หลายชนิดในปัจจุบัน

การอบแห้งแบบพ่นฝอยเป็นเทคนิคที่ใช้เพื่อระเหยน้ำออกจากของเหลวอย่างรวดเร็ว โดยอากาศร้อน กระบวนการนี้ประกอบไปด้วยการพ่นของเหลว (feed) ออกมาจนเป็นละอองขนาดเล็ก เข้าผสมกับอากาศร้อนที่ไหลผ่านอย่างรวดเร็ว ทำให้น้ำที่อยู่ในละอองของเหลวระเหยไปทั้งหมด และได้ผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในรูปของผงแห้ง ตัวอย่างของเหลวที่สามารถนำมาทำแห้งด้วยวิธีนี้ได้แก่ ของเหลวที่เป็นตัวทำละลาย สารประเภทอิมัลชันหรือสารแขวนลอย

การทำงานของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย เริ่มจากอากาศจะถูกดูดผ่านตัวกรองและผ่านตัวให้ความร้อน จากนั้นจึงเข้าสู่ห้องอบแห้ง (drying chamber) ตัวอย่างของเหลวที่นำมาฉีดควรมีลักษณะเหลวและไม่ข้นมาก จากนั้นของเหลวจะถูกดูดโดยปั๊มผ่านอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดละอองฝอย คือ atomizer ภายในห้องอบ เมื่อละอองสัมผัสกับอากาศร้อนจะทำให้เกิดการระเหยของน้ำอย่างรวดเร็ว และจะได้ผงของผลิตภัณฑ์ตกลงสู่ด้านล่างของห้องอบผงบางส่วนที่หลุดออกมากับอากาศ จะถูกแยกโดยใช้ไซโคลอน ซึ่งจะรวมเข้าเป็นผลิตภัณฑ์ผงในที่สุด กระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยเครื่อง spray dryer นั้น ประกอบด้วย 4 ขั้นตอน (เอกคณัย, 2551) คือ

1. การทำให้อากาศพ่นฝอยตัวเป็นละออง (atomization of feed) โดยอาศัยหัวฉีดพ่นแบบจานเหวี่ยง (rotary atomizer) หรือหัวฉีดพ่นด้วยความดัน (pressure nozzle)

หัวฉีดพ่นแบบจานเหวี่ยง (Rotary Atomizer) มีความเร็วรอบประมาณ 5,000-10,000 รอบต่อนาที ของเหลวที่ตกลงบนจานหมุนจะถูกเหวี่ยงออกด้านข้างกระจายเป็นละอองขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 30-120 ไมโครเมตร ซึ่งขนาดเฉลี่ยนี้จะแปรผันตรงกับอัตราการไหลของของเหลวและความหนืด แต่จะแปรผกผันกับอัตราการหมุนและเส้นผ่านศูนย์กลางของจานหมุน

หัวฉีดพ่นด้วยความดัน (Pressure Nozzles Atomizer) อาศัยความดันสูงจากลมหรือแรงดัน ทำให้อากาศพ่นฝอยตัวเป็นละอองฝอย อนุภาคที่ได้จะมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 120-250 ไมโครเมตร โดยขนาดอนุภาคจะแปรผันตรงกับอัตราการไหลของของเหลวและความหนืด แต่จะแปรผกผันกับความดัน ขนาดของอนุภาคของเหลวจะใหญ่กว่าที่ได้จากวิธีจานเหวี่ยง

2. การสัมผัสของละอองฝอยกับลมร้อน ทำให้เริ่มเกิดการระเหยของน้ำออกจากละอองของเหลว

3. การระเหยของละอองฝอยขณะเคลื่อนที่ไปกับกระแสลม

4. การแยกผลิตภัณฑ์แห้งจากกระแสลมร้อน โดยนิยมใช้ไซโคลอน ทำให้ได้อาหารผงที่มีลักษณะแห้งออกมา

มีปัจจัยหลายตัวที่เป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพของการผลิตอาหารผงด้วยวิธีอบแห้งแบบพ่นฝอย ได้แก่

1). ความหนืด

ถ้าของเหลวมีความหนืดสูง (อาจเกิดจากการลดอุณหภูมิของของเหลว) จะทำให้ได้ละอองที่มีขนาดใหญ่ขึ้นในสภาวะเดียวกัน และหากมีความหนืดสูงมาก จะทำให้ของเหลวที่ฉีดออกมามีลักษณะคล้ายเส้นด้าย ทำให้อาหารไม่แห้งตามต้องการ ดังนั้นจึงไม่ควรใส่ของเหลวที่มีความหนืดสูงเกินไป

2). อัตราการไหลของของเหลว

ถ้าอัตราการไหลของของเหลวสูงขึ้นจะทำให้ได้ละอองที่หยาบขึ้น ทำให้ผงแห้งมีความชื้นสูง เนื่องจากเวลาที่สัมผัสกับลมร้อนน้อยเกินไป จึงควรควบคุมอัตราการไหลของของเหลวให้เหมาะสม

3). อัตราการไหลของอากาศ

หากอัตราการไหลลดลงจะทำให้เวลาที่ละอองอยู่ในห้องอบนานขึ้น ซึ่งจะทำให้สัมผัสกับอากาศร้อนนานขึ้น และเป็นผลให้ลดความชื้นได้ดีขึ้น แต่หากอัตราการไหลของของเหลวสูงและอัตราการไหลของอากาศต่ำเกินไป เมื่ออุณหภูมิไม่สูงเพียงพอก็อาจทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความชื้นสูงและเกาะติดอยู่กับผนังของห้องอบได้

4). อุณหภูมิอากาศเข้า

การเพิ่มอุณหภูมิของอากาศเข้าจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการระเหยได้ แต่ทั้งนี้ก็ขึ้นกับการไหลของอากาศด้วย

2.3 ปัญหาการแปรรูปลำไยผงด้วยวิธีอบแห้งแบบพ่นฝอยและวิธีแก๊ส

การอบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งแบบธรรมชาติของวัตถุดิบที่มีลักษณะเหนียวดังกล่าวนี้ทำได้ยาก เนื่องจากน้ำตาลและกรดไม่สามารถเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพไปเป็นของแข็งแห้งได้ภายใต้สภาวะการผลิต ทั้งนี้มีปัจจัยควบคุมพื้นฐานคืออุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงสถานะที่เรียกว่า กลาสทรานซิชัน (T_g) ถ้าหากอุณหภูมิการผลิตสูงกว่าค่า T_g อาหารจะอยู่ในสถานะเป็นของเหลวที่เหนียวหนืด (rubbery state) หากต้องการทำให้อาหารเป็นผงแห้ง ต้องปรับอุณหภูมิการผลิตให้ต่ำกว่าค่า T_g หรือปรับให้ค่า T_g ให้สูงกว่าอุณหภูมิการผลิต น้ำตาลและกรดที่เป็นส่วนประกอบในลำไยมีสมบัติการเกิดกลาสทรานซิชันสูง ซึ่งหมายถึงการมีค่า T_g ต่ำนั่นเอง (พิไลรัก และรัตนนา, 2552) วิธีที่จะทำให้สามารถผลิตลำไยผงด้วยการอบแห้ง ต้องปรับค่า T_g ของลำไยให้สูงขึ้น ลำไยผงมีปัญหาความเหนียว และการเกาะตัวกัน เนื่องจากมีค่า T_g ที่ต่ำ การเติมมอลโทเดกซ์ทรินเพื่อเพิ่มค่า T_g และป้องกันไม่ให้เกิดผลิตภัณฑ์เกิดความเหนียว (stickiness) ใช้มากในผลิตภัณฑ์น้ำผลไม้ผง (พีรพล, 2550)

เพื่อแก้ปัญหาการเกาะติดของอาหารผงได้มีการเติมสารที่ช่วยทำให้แห้ง (drying aids) ได้แก่ ไตรแคลเซียมฟอสเฟต (tricalcium phosphate) ซิลิกอนไดออกไซด์ (silicon dioxide) ซิลิเกต (silicates) เกลือของกรดสเตียริก (salts of stearic acid) และคาร์โบไฮเดรตดัดแปร (modified carbohydrates) ซึ่งสามารถเติมลงไปเพื่อป้องกันไม่ให้ผลิตภัณฑ์เกิดความเหนียว และเป็นผงที่มีการไหลได้อย่างอิสระ การเติมอนุพันธ์ของสตาร์ชที่ถูกไฮโดรไลซ์ (less hydrolysed starch derivatives) คือ มอลโทเดกซ์ทริน (maltodextrin) ลงไปในวัตถุดิบที่มีลักษณะเหนียวสามารถแก้ไขปัญหาการเกาะตัวกัน จากการศึกษาผลของการเติมมอลโทเดกซ์ทรินต่อจลนศาสตร์การทำให้แห้ง (drying kinetic) และความเหนียวของอาหารที่อุ้มไปด้วยน้ำตาลและกรดในระหว่างการทำให้แห้งแบบ convective drying พบว่าความเหนียวของของเหลวที่ถูกทำให้แห้งเปลี่ยนแปลงตามค่า T_g ที่ผิวของหยดของเหลว และการเติมมอลโทเดกซ์ทริน สามารถช่วยให้เกิดการอบแห้งที่ดีได้ (Adhikari *et al.*, 2004) และมีสมบัติเฉพาะ ได้แก่ความสามารถในการละลายน้ำมาก ความหนืดต่ำที่ความเข้มข้นสูง เก็บรักษากลิ่นได้ดี และไม่มีสี ซึ่งจากคุณสมบัติทั้งหมดสามารถใช้เป็นเหตุผลสำหรับนำมอลโทเดกซ์ทรินมาใช้สำหรับการอบแห้งแบบพ่นฝอยผลิตภัณฑ์อาหาร นอกจากนี้ มอลโทเดกซ์ทรินที่มีค่า Dextrose equivalent (DE) ต่ำ และมี T_g สูง ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ผงที่ผ่านการทำให้แห้งที่มีความคงตัวสูง (Carolina *et al.*, 2007)

2.4 สารลดความเหนียว

มอลโทเดกซ์ทริน คือสตาร์ชที่ผ่านการไฮโดรไลซิสบางส่วนด้วยกรดหรือเอนไซม์ มอลโทเดกซ์ทรินที่มีค่า Dextrose equivalent (DE) น้อยกว่า 20 ประกอบด้วย (1→4 และ 1→6)- α -D-glucopyranose-linked residues (Nickerson *et al.*, 2006) ค่า DE คือค่า reducing power ของพอลิแซ็กคาไรด์หรือโอลิโกแซ็กคาไรด์ที่ได้จากสตาร์ช เปรียบเทียบกับ D-glucose โดยน้ำหนักแห้ง โดยปกติมอลโทเดกซ์ทรินมีค่า DE < 20 ขณะที่ corn syrup solid มีค่า DE \geq 20 มอลโทเดกซ์ทรินที่มีค่า DE แตกต่างกันจะมีสมบัติทางเคมีและกายภาพแตกต่างกัน เช่น ความสามารถในการละลาย อุณหภูมิเยือกแข็ง และความหนืด เป็นต้น อย่างไรก็ตามมอลโทเดกซ์ทรินที่มีค่า DE เหมือนกันอาจจะมีคุณสมบัติแตกต่างกันก็ได้ ขึ้นอยู่กับวิธีการ ไฮโดรไลซิส แหล่งของสตาร์ช (ข้าวโพด มันฝรั่ง และข้าว) และอัตราส่วนของอะไมโลสต่ออะไมโลเพกทิน (Klinkesorn *et al.*, 2004)

ได้มีการทดลองผลิตน้ำลำไยผงที่เติมมอลโทเดกซ์ทรินโดยใช้วิธีอบแห้งแบบพ่นฝอยเพื่อหาปริมาณมอลโทเดกซ์ทรินและสภาวะการผลิตที่เหมาะสม โดยศึกษาชนิดของสารช่วยทำแห้ง (มอลโทเดกซ์ทริน และแป้งข้าวโพด) ปริมาณของสารช่วยทำแห้งที่ใช้ 0.1, 0.2 และ 0.3 กรัม/กรัม

ของแข็งที่ละลายได้ ความเข้มข้นของน้ำลำไย 18, 28 และ 38 องศาบริกซ์ อบแห้งแบบพ่นฝอยที่ สภาวะอุณหภูมิลมร้อน 165°C ปริมาณลมร้อน 1.7 m³/min อัตราการป้อนน้ำลำไย 2.28 ลิตรต่อ ชั่วโมง (ญานิกาและคณะ, 2549) นอกจากนี้พีพัฒนาและคณะ (2551) ศึกษาปริมาณสัดส่วน มอลโทเดกซ์ทริน 0.4, 0.5 และ 0.6 กรัม/กรัมของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ ทำการอบแห้งแบบ พ่นฝอยอัตราไหลของลมร้อน 1.45, 1.68 และ 1.8 m³/min อุณหภูมิลมร้อน 165, 175 และ 185°C พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการผลิต คือปริมาณสัดส่วนมอลโทเดกซ์ทริน 0.6 กรัม/กรัมของ ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ อุณหภูมิลมร้อน 185°C และช่วงอัตราการไหลของลมร้อนระหว่าง 1.5–1.7 m³/min ได้ปริมาณผลิตภัณฑ์ลำไยผงสูงสุดร้อยละ 40

นอกจากนี้ยังมีการอบแห้งแบบพ่นฝอยน้ำผลไม้ชนิดอื่นๆ จากการศึกษาของ Bhandari และคณะ (1993) ในการทำน้ำแบล็คเคอเรนท ราสเบอร์รี่ และแอปพริคอตผง โดยการอบแห้งแบบ พ่นฝอยใช้มอลโทเดกซ์ทรินที่มีค่า DE เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิเข้า 160°C ขาออก 90°C สัดส่วนของ ของแข็งในน้ำผลไม้ต่อมอลโทเดกซ์ทรินเท่ากับ 65:35, 60:40 และ 55:45 ตามลำดับ และจาก การศึกษาการทำน้ำสับประดงโดยการอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยใช้มอลโทเดกซ์ทรินที่มีค่า DE เท่ากับ 6 ปริมาณความชื้นร้อยละ 4 น้ำสับประดงเข้มข้น 75 องศาบริกซ์ ปริมาณกรดร้อยละ 3.3 อุณหภูมิเข้า 150±3°C และอุณหภูมิขาออก 65±2°C อัตราส่วนของมอลโทเดกซ์ทรินต่อน้ำ สับประดงเข้มข้น 50:50, 59:41, 60:40 และ 75:25 วัดปริมาณผลผลิตได้ร้อยละ 58.5, 50, 53 และ 45 ตามลำดับ และพบว่าผลิตภัณฑ์มีความแห้งมากขึ้นและการเกาะติดลดลง (Bhandari *et al.*, 1997)

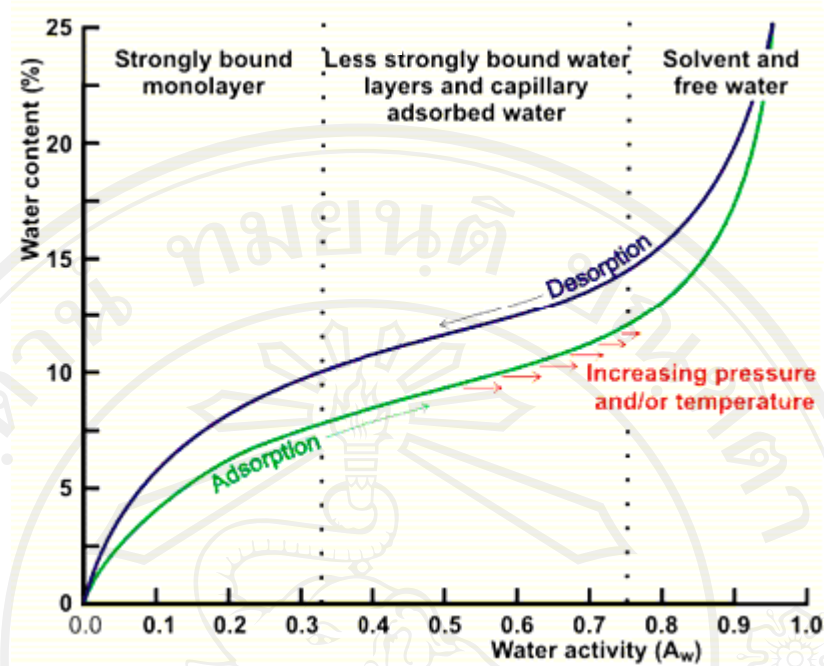
2.5 Moisture Sorption Isotherm

ซอร์ปชันไอโซเทอร์มเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำในอาหารกับ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ หรือ a_w ซึ่งกระบวนการลดความชื้น (desorption) และการเพิ่มความชื้น (adsorption) เกิดขึ้นได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ และจะมีผลต่อค่า a_w ด้วย (นิธิยา, 2549) ความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับ moisture sorption isotherm ของอาหารเป็นสิ่งที่ สำคัญสำหรับนักวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร ซึ่งสามารถนำความรู้ไปประยุกต์ใช้ได้ หลากหลาย เช่น การออกแบบและหาจุดที่เหมาะสมในกระบวนการทำแห้ง ใช้สำหรับวิเคราะห์ ปัญหาระหว่างการบรรจุเพื่อเลือกบรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสม สำหรับสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นเพื่อใช้ในกระบวนการอบแห้ง และสำหรับคาดคะเนอายุ การเก็บรักษา (Sinija and Mishra, 2008; Goula *et al.*, 2008) ในการถนอมอาหารและความคงตัว ของลักษณะของอาหาร เช่นรสชาติและความกรอบ ในระหว่างการเก็บรักษาจะขึ้นอยู่กับ การควบคุมปริมาณความชื้นที่อยู่ในอาหาร กระบวนการถนอมอาหารถูกพัฒนาขึ้นเพื่อยืดอายุการเก็บรักษา

โดยลดปริมาณน้ำเพื่อยับยั้งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์และยับยั้งปฏิกิริยาทางเคมี โดยปริมาณความชื้นเป็นเกณฑ์ที่สำคัญในการตัดสินคุณภาพของอาหาร ดังนั้น a_w คือตัวแปรที่ใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงของน้ำในอาหาร กราฟซอร์ปชันไอโซเทอร์ม ที่ได้จากความสัมพันธ์ของปริมาณความชื้น (moisture content) และค่า a_w จึงมีความสำคัญต่อความคงตัวของอาหาร (Iguedjal *et al.*, 2008)

ซอร์ปชันไอโซเทอร์ม มี 2 กระบวนการคือ adsorption และ desorption ซึ่งกระบวนการ adsorption และ desorption ไม่สามารถย้อนกลับ ดังนั้นทำให้เกิดความแตกต่างระหว่าง adsorption และ desorption isotherms อุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อซอร์ปชันไอโซเทอร์มของอาหาร ระหว่างการเก็บรักษา กระบวนการผลิต และการเปลี่ยนแปลงของ a_w เนื่องจากอุณหภูมิมีผลต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลน้ำ และสมดุลไดนามิกระหว่างวัฏภาคของไอกับวัฏภาคที่ถูกดูดซับ (Al-Muhtaseb *et al.*, 2004) adsorption isotherms ใช้สำหรับการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่สามารถดูดซึม หรือ ดูดซับโมเลกุลของน้ำจากสิ่งแวดล้อมได้โดยรอบ (hygroscopic products) เช่น น้ำผึ้ง และ กลีเซอริน เป็นต้น ส่วน desorption isotherms มีประโยชน์สำหรับการวิเคราะห์กระบวนการทำแห้ง หรือการกำจัดความชื้นจากอาหาร สำหรับการเกิด moisture sorption ในขั้นแรกนั้นโมเลกุลของน้ำจะก่อพันธะกับโมเลกุลอื่นๆ ที่เป็นองค์ประกอบในอาหาร เรียกว่า monolayer moisture จากนั้นจะเกิดการดูดซับความชื้นแบบ multilayer ซึ่งการดูดซับความชื้นแบบ multilayer จะประกอบด้วยปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับเข้าไปในที่ว่างของรูพรุน หรือที่ว่างขนาดเล็กของโครงสร้างแคปิลลารีภายในอาหารและเกิดการละลายของตัวถูกละลาย จนในที่สุดจะเกิดกลไกการกักเก็บน้ำภายในโมเลกุลของอาหารซึ่งวัฏภาคเหล่านี้ อาจเกิดขึ้นพร้อมกัน และจะเกิดต่างกัน ในอาหารแต่ละชนิด นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ และ โครงสร้างของอาหารอีกด้วย (Barbosa-Cánovas and Vega-Mercado, 1996)

ซอร์ปชันไอโซเทอร์มเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า a_w กับ ปริมาณน้ำ (ร้อยละ) ดังรูปที่ 2.1 โดยในส่วนแรกของเส้นโค้งแสดงน้ำชั้นเดี่ยวซึ่งมีความเสถียรมาก และถูกกำจัดโดยการทำให้แห้ง ส่วนที่ 2 เป็นส่วนที่แสดงถึงน้ำที่ถูกดูดซับในโมเลกุลต่างๆ ภายในอาหาร และสารละลายขององค์ประกอบที่ละลายน้ำได้ ส่วนสุดท้ายของเส้นโค้ง เป็นน้ำอิสระซึ่งจะกลั่นตัวภายในโครงสร้างแคปิลลารีหรือในเซลล์ของอาหาร น้ำอิสระนี้จะถูกดักในอาหาร และถูกยึดด้วยแรงอ่อนๆ และถูกกำจัดโดยง่ายด้วยการทำให้แห้งหรือเยือกแข็งได้ (วิไล, 2546)



รูปที่ 2.1 : ซอร์ปชันไอโซเทอร์มของอาหาร

ที่มา : Chaplin (2009)

อัตราการเปลี่ยนแปลงค่า a_w ต่อ moisture sorption isotherms แตกต่างกันขึ้นกับการกำจัดความชื้นจากอาหาร (desorption) หรือเป็นการให้ความชื้นต่ออาหารแห้ง (adsorption) ดังที่รู้จักกันในชื่อว่า ฮิสเตอรีซิสลูป (hysteresis loop) ความแตกต่างนี้อาจสูงมากในอาหารบางชนิด เช่น ข้าว ซึ่งสามารถใช้ค่าดังกล่าวในการกำหนดวิธีป้องกันผลิตภัณฑ์จากการดูดความชื้นได้ (วิไล, 2546)

การหา moisture sorption isotherms ทำโดยใช้เทคนิคการวัดน้ำหนักฐานแห้ง ซึ่งตัวอย่างจะถูกทำให้อยู่ในสถานะสมดุลใน desiccator ที่บรรจุสารละลายเกลือที่ทราบค่า a_w (0.05-0.95) และวางไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิเป็นเวลาประมาณ 1-3 สัปดาห์ (Al-Muhtaseb *et al.*, 2004) ตารางที่ 2.2 แสดงค่า a_w ของสารละลายเกลือชนิดต่างๆ ที่อุณหภูมิ 25°C

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

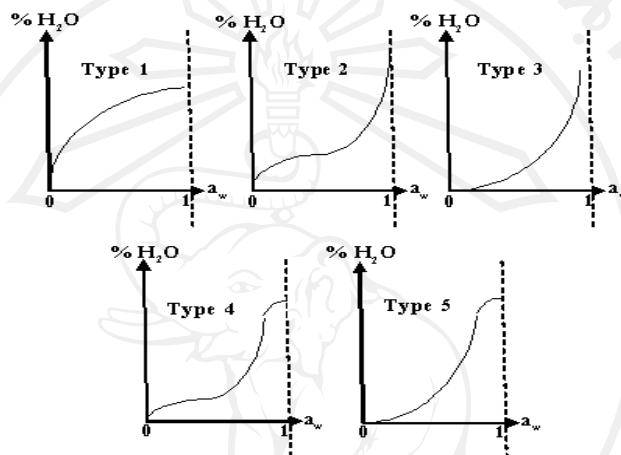
ที่มา : Barbosa-Cánovas and Vega-Mercado (1996)

Moisture sorption isotherms เป็นเครื่องมือทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่มีประโยชน์สำหรับการวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ (interaction) ของน้ำและสารในอาหาร ทำให้ได้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์อาหาร ได้แก่ การทำให้แห้ง การผสม การบรรจุผลิตภัณฑ์ในบรรจุภัณฑ์ และการเก็บรักษาอาหาร นอกจากนี้เซอร์พชันไอโซเทอร์มสามารถใช้ในการหาลักษณะโครงสร้างของผลิตภัณฑ์อาหารเช่น 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 *et al.*, 2002)

คุณภาพของอาหารส่วนใหญ่ที่ถูกเก็บรักษาโดยการทำให้แห้งนั้น ขึ้นอยู่กับปริมาณของความคงตัวทางกายภาพ เคมี และจุลชีววิทยา ซึ่งความคงตัวเหล่านี้เป็นผลหลักของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นสมดุลของอาหาร และความสอดคล้องกับค่า a_w ที่อุณหภูมิที่ได้รับ ซึ่งค่า water sorption isotherms เหล่านี้เป็นลักษณะเฉพาะของอาหารแต่ละชนิด และสามารถนำไปใช้ได้

โดยตรงในการแก้ไขปัญหาการออกแบบ การผลิตอาหาร การทำนายความต้องการการใช้พลังงาน และวิเคราะห์หาสภาวะการเก็บที่เหมาะสม (Peng *et al.*, 2007)

อาหารที่มีลักษณะเป็นผงมีแนวโน้มที่จะมีลักษณะเหนียว และเกาะตัวกันของอนุภาคผงซึ่งนำไปเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อปัญหาดังกล่าว ดังนั้น moisture sorption isotherms เป็นเครื่องมือที่ใช้ประโยชน์สำหรับการทำความเข้าใจในเรื่องของความสัมพันธ์ของผง และปัญหาเกี่ยวกับความคงตัวต่างๆ



รูปที่ 2.2 ประเภทของซอร์ปชันไอโซเทอร์ม

ที่มา : Mathlouthi and Roge (2003)

ไอโซเทอร์มแบ่งออกเป็น 5 ประเภทดังรูปที่ 2.2 (Brunauer, Deming and Teller, 1940) 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 หรือผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นพลาสติกคล้ายกิลิเซอรอลที่อุณหภูมิเหนือค่า T_g หรือเป็นลักษณะซอร์ปชันไอโซเทอร์มของผลิตภัณฑ์อาหารที่มีองค์ประกอบเป็นของแข็งที่ละลายน้ำได้ เช่น น้ำตาลหรือเกลือ (Rahman, 1995) ส่วนไอโซเทอร์มประเภทที่ 4 อธิบายการดูดซับโดยของแข็งที่ชอบน้ำ และมีความสามารถอุ้มน้ำได้ (swellable hydrophilic solid) จนกระทั่งถึงจุดสูงสุดของการ hydration และประเภทที่ 5 คือ Brunauer, Emmett and Teller (BET) multilayer adsorption isotherm (Brunauer, Emmett and Teller, 1938) ใช้สำหรับวิเคราะห์การดูดซับของไอน้ำบนถ่านหิน และสัมพันธ์กับไอโซเทอร์ม ประเภทที่ 2 และ 3 นอกจากนี้ยังพบว่าไอโซเทอร์ม 2 ประเภทที่พบบ่อยที่สุดในผลิตภัณฑ์อาหารคือ isotherm ประเภทที่ 2 และ 4 (Mathlouthi and Roge, 2003)

รูปร่างของไอโซเทอร์มที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับธรรมชาติของผงอาหารว่าเป็นโครงสร้างผลึกที่มีรูปแบบที่แน่นอน หรือเป็นโครงสร้างอสัณฐานที่มีรูปแบบไม่แน่นอน ซึ่งผงอาหารส่วนมากมีโครงสร้างอสัณฐาน ได้แก่ ตัวถูกละลาย เช่น น้ำตาล จะเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างไปเป็นผลึกในระหว่างการดูดซับของน้ำ มีหลายปัจจัยที่กระทบต่อการดูดซับของไอน้ำ และส่งผลต่อความคงตัวของ การเก็บรักษา เช่น การมีฟิล์มบางของสารละลายอิมัลชันที่ผิวของผลึก การกระจายขนาดของอนุภาคเล็กๆ และน้ำในผลึก ซึ่งทำให้องค์ประกอบอาหารที่มีโครงสร้างอสัณฐาน และมีแนวโน้มเกิดการเกาะตัวกันของผง (Mathlouthi and Roge, 2003) อาหารแต่ละชนิดจะมีชอร์ปชันไอโซเทอร์มแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ โครงสร้างทางกายภาพ องค์ประกอบทางเคมี และปริมาณของน้ำที่ยึดอยู่ในอาหาร (วิไล, 2546)

การศึกษาชอร์ปชันไอโซเทอร์มนั้นเป็นกระบวนการที่ค่อนข้างซับซ้อนและใช้เวลานาน ดังนั้นจึงมีนักวิจัยคิดค้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการทำนายชอร์ปชันไอโซเทอร์ม ซึ่งจะทำให้มีการประหยัดเวลา และนำไปใช้ในการทำนายและควบคุมการเก็บรักษาของอาหารได้อย่างเหมาะสม แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายชอร์ปชันไอโซเทอร์มสามารถแบ่งได้ตามจำนวนตัวแปรที่มีในสมการ ดังต่อไปนี้ (Rahman, 1995)

1. ไอโซเทอร์มประเภท 2 ตัวแปร ได้แก่

1.1 สมการของ Smith (1947) เป็นสมการอย่างง่ายที่ใช้อธิบาย water sorption isotherm ของพอลิเมอร์ทางชีวภาพ (bio-polymers) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ซึ่ง Becker and Sallans (1956) พบว่าสมการนี้ใช้ได้ในกรณี desorption ของ wheat ที่มีค่า a_w อยู่ระหว่าง 0.5-0.95 อย่างไรก็ตาม Young (1976) แนะนำว่าการสมการนี้จะถูกจำกัดที่ค่า a_w ต้องมากกว่า 0.3 ในกรณีของ Virginia peanut หรือเหมาะสำหรับ a_w ในช่วง 0.3-0.9 (Kumar and Siddaramaiah, 2007) ซึ่งสมการของ Smith (1947) สามารถแสดงได้ดังนี้คือ

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

เมื่อ M_w = ความชื้น (g น้ำ/g ของแข็งแห้ง)

A, B = ค่าคงที่

1.2 สมการของ Oswin (1946) ได้พัฒนาสมการอย่างง่ายสำหรับกราฟรูปลิ่มกลับ แสดงสมการได้ดังนี้

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

Boquet *et al.* (1978) กล่าวว่า สมการของ Oswin ใช้ได้ดีที่สุดสำหรับการอธิบายไอโซเทอร์มของอาหารที่มีโปรตีน และคาร์โบไฮเดรต เป็นองค์ประกอบ และใช้ได้ดีสำหรับเนื้อและผักต่างๆ

1.3 สมการของ Henderson (1952)

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

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

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

M_{bm} = ปริมาณความชื้นชั้นเดียว (monolayer moisture)

B_{bt} = ค่าคงที่ที่สัมพันธ์กับความร้อนสุทธิทั้งหมดของ sorption

1.5 Halsey (1948)

สมการนี้ใช้สำหรับอาหาร และองค์ประกอบของอาหารต่างๆ ที่มีค่า a_w เท่ากับ 0.10-0.80

(Kumar and Siddaramaiah, 2007)

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

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

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

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

1.7 สมการของ Iglesias and Chirife (1978) สมการนี้ถูกออกแบบเพื่อใช้อธิบายลักษณะอาหารที่มีน้ำตาลสูง แสดงสมการได้ดังนี้

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

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

1.8 สมการของ Caurie (1981)

$$\frac{1}{M_w} = \frac{1}{C_c M_m} \left(\frac{1 - a_w}{a_w} \right)^{(2c_c / M_m)} \quad (2.9)$$

เมื่อ C_c = ค่าคงที่ของ Caurie

M_m = ปริมาณความชื้นชั้นเดียว (monolayer moisture)

2. ไอโซเทอร์มประเภท 3 ตัวแปร ได้แก่

2.1 สมการ Cubic คือ สมการกำลังสาม ใช้สำหรับอธิบาย กราฟเซอร์ปชันไอโซเทอร์มรูปโค้งกลับอย่างง่าย

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

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

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

เมื่อ $a_m = a/(1-a)$

a = water activity

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

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

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

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

$$M_w = A a_w^C + B a_w^D \quad (2.14)$$

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

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

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

ค่า A และ B คือ ฟังก์ชันของอุณหภูมิ

Stencl (2004) ได้ศึกษา Moisture sorption isotherm ของผงโยเกิร์ตที่ผ่านการทำให้แห้งแบบพ่นฝอย โดยวัด adsorption และ desorption ของน้ำในผงโยเกิร์ตที่อุณหภูมิในช่วง 20-40°C และมีช่วง a_w จาก 0.40-0.99 พบว่า sorption capacity มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และสามารถใส่

สมการหรือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ถึง 4 แบบ (Chung-Pfost, 1967; Halsey, 1948; Henderson; 1952; Oswin, 1946) ในการอธิบาย adsorption และ desorption ของน้ำในผงโยเกิร์ต

2.6 กลาสทรานซิชันและสมบัติการเกาะติดของอาหารแห้ง

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 DSC ซึ่งการเปลี่ยนรูปแบบโครงสร้างที่สัมพันธ์กับความหนืด เช่น stickiness, elasticity, collapse, shrinkage และ crystallization จะขึ้นอยู่กับกลาสทรานซิชัน (Sopade *et al.*, 2007)

กลาสทรานซิชันขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุล และโครงสร้างเฉพาะของตัวถูกละลาย และขึ้นอยู่กับปริมาณของตัวทำละลายที่ปรากฏ (Rahman, 1995) ค่า T_g ถูกใช้เป็นตัวแปรทางเคมีกายภาพที่สามารถวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการผลิต คุณสมบัติ คุณภาพ ความคงตัว และความปลอดภัยของอาหาร (Barbosa-Cánovas and Vega-Mercado, 1996) กลาสทรานซิชันของอาหารที่ผ่านการทำให้แห้ง เป็นตัวแปรสำคัญในการอธิบายกลไกของกระบวนการเปลี่ยนรูปในอาหาร และการควบคุมอายุการเก็บรักษาของอาหารนั้น (Omar and Roos, 2007)

2.7 สมบัติสำคัญของอาหารผง

2.7.1 ความสามารถในการไหล (flowability)

ในการผลิตอาหารผงสิ่งที่สำคัญอย่างหนึ่งคือต้องมีคุณสมบัติในการไหล (flow property) ดีและสม่ำเสมอ ทั้งนี้เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพคงที่ นอกจากนี้ยังจะทำให้การผลิตเป็นไปได้อย่างรวดเร็วขึ้นอีกด้วย สามารถหาได้หลายวิธี ได้แก่ การวัดมุมกอง การหาอัตราการไหล และคำนวณค่า compressibility วิธีที่นิยมมากที่สุดคือ การวัดมุมกอง (สุทิน และฤดี, 2525)

มุมกอง (angle of repose) ตามนิยามของ Terzaghi and Peck (1948) หมายถึง มุมกองระหว่างพื้นราบ และพื้นเอียงของกองวัสดุที่ถูกทำให้ไหลลงมาจากอุปกรณ์ที่จัดให้อยู่สูงเหนือพื้นราบ โดยใช้อุปกรณ์อย่างง่ายในการทำให้เกิดการไหลของวัสดุจากจุดที่อยู่เหนือพื้นราบจนกระทั่งมุมที่เกิดขึ้นคงที่ แล้วจึงวัดมุมกองของวัสดุแห้ง ค่ามุมกองของวัสดุแห้งที่มีค่าต่ำกว่าจะมีความสามารถในการไหลได้มากกว่าวัสดุแห้งที่มีค่ามุมกองที่สูงกว่า (Bodhmag, 2006)

มุมกองเป็นดัชนีชี้วัดความสามารถในการไหลของผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นผง Carr (1965) ได้แบ่งกลุ่มความสามารถในการไหลของอาหารผงโดยการวัดมุมกองดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ตารางแสดงค่าความสามารถในการไหลของอาหารผง

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

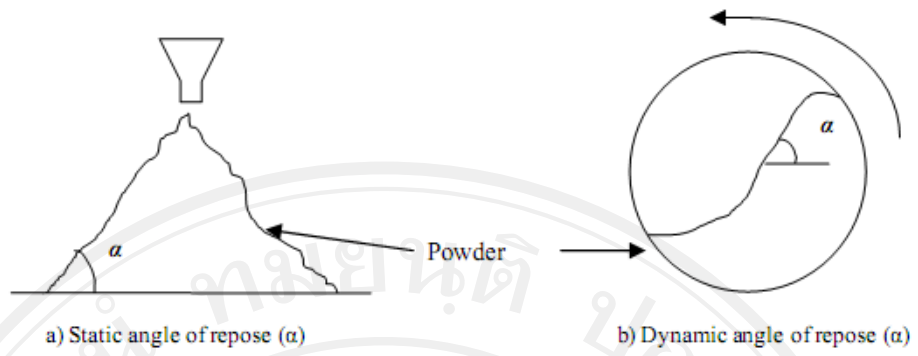
ที่มา: Carr (1965)

การวัดค่ามุมกองเป็นวิธีที่น่าเชื่อถือ รวดเร็ว และง่ายสำหรับการวัดความสามารถในการไหลของผงที่แตกต่างกัน โดยมุมกองที่มีขนาดเล็กกว่าจะมีความสามารถในการไหลของผงได้อิสระกว่า ขณะที่มุมกองที่มีขนาดใหญ่กว่าแสดงว่า วัสดุมีความสามารถในการไหลได้ไม่ดี หรือมีความเกาะตัวกันระหว่างอนุภาคได้ดีกว่า (cohesiveness) ซึ่ง ISO 3435 ได้ใช้วิธีวัดมุมกองสำหรับการวิเคราะห์การเกาะตัวกันระหว่างอนุภาคของวัสดุที่มีขนาดใหญ่ (Bodhmaghe, 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 (Bodhmaghe, 2006)

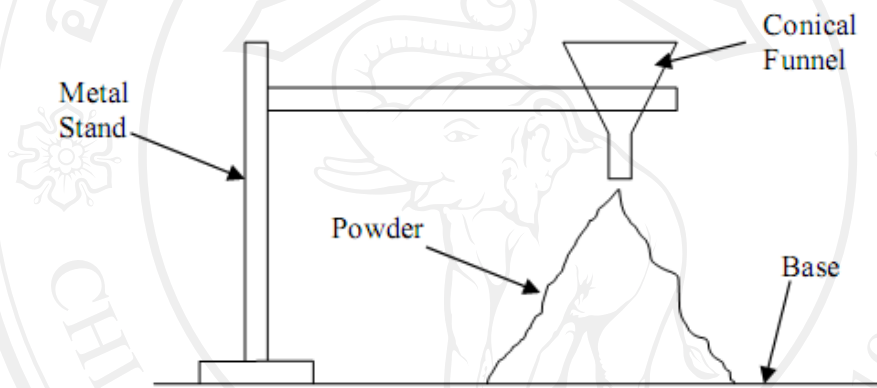
การวัด static angle of repose

อุปกรณ์สำหรับการวัด static angle of repose ในการศึกษาในปัจจุบันประกอบด้วยกรวยแก้วที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของทางออกด้านปลายกรวยแก้วขนาด 0.9 เซนติเมตร ซึ่งถูกตรึงไว้บนขาตั้งโลหะดังรูปที่ 2.4 โดยทางออกด้านปลายกรวยแก้วจะอยู่สูงจากฐาน 6 เซนติเมตร ตาม ISO 3435/1 ปลายทางออกของกรวยแก้วจะถูกปิดไว้ และตัวอย่างผง 200 กรัม จะถูกเทผ่านลงไป เมื่อปลายทางออกถูกเปิดออกวัสดุจะไหลออกไปสร้างเป็นรูปทรงกรวยบนฐาน (Bodhmaghe, 2006) ถ่ายภาพกองอาหารผงแล้ววัดมุมกองจากภาพ ดังรูปที่ 2.5



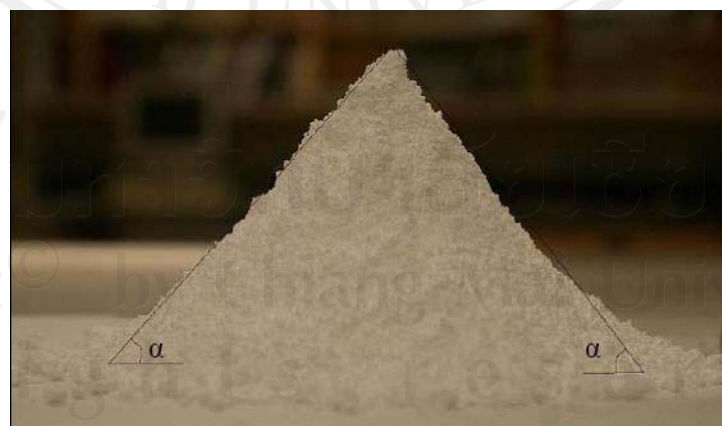
รูปที่ 2.3 Static และ dynamic of angle of repose

ที่มา : Bodhimage (2006)



รูปที่ 2.4 การวัด Static angle of repose

ที่มา : Bodhimage (2006)



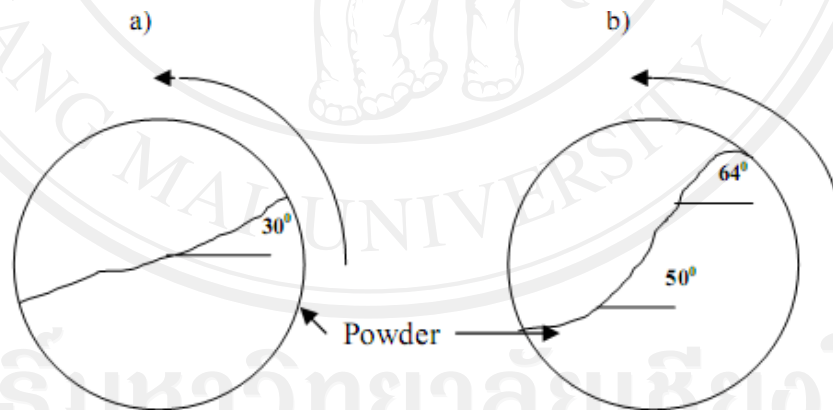
รูปที่ 2.5 ตัวอย่างการวัด Static angle of repose

ที่มา : Bodhimage (2006)

จากรูปที่ 2.5 Angle of repose เป็นมุมระหว่างพื้นผิวของกองผงรูปกรวย และระนาบพื้นผิว ซึ่งคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้เป็น $\tan \alpha = H/R$ 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) แล้วสังเกตก้อนที่ลื่นไปตามพื้นผิวของกองผง เมื่อเพิ่มอัตราการหมุนพบว่า ก้อนที่ลื่นจะหยุดเป็นพักๆ 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 (Bodhmag, 2006)



รูปที่ 2.6 การวัด Dynamic angle of repose

ที่มา : Bodhmag (2006)

Shittu and Lawal (2007) ได้ศึกษาการวัดมุมกองของตัวอย่างเครื่องดื่มหอมที่ผลิตในประเทศไนจีเรีย ปริมาณ 200 mL ในกระบอกตวง โดยนำกระบอกตวงไปแขวนบนชุดขาตั้งให้ปากของกระบอกตวงสูงจากพื้นผิวราบประมาณ 20 cm จากนั้นปล่อยให้ผงไหลอย่างอิสระภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลก ซึ่งได้กองโกโก้ผงบนพื้นผิวราบตามขวาง พบว่าค่ามุมกองอยู่ในช่วง

25.0-37.7 องศา เมื่อความชื้นและปริมาณน้ำตาลในเครื่องดื่มนมโกโก้ผง เท่ากับร้อยละ 0.8-3.6 และร้อยละ 52.4-90.5 ตามลำดับ แสดงว่าเครื่องดื่มนมโกโก้ผงมีความสามารถในการไหลที่ดี นอกจากนี้ Antoine *et al.* (2003) พบว่า มุมกองของผงถั่วเหลือง มีค่าเท่ากับ 38.33 ± 1.106 องศา และ Carr index มีค่าเท่ากับร้อยละ 26.72 ± 1.06

ปัจจัยที่มีผลต่อค่ามุมกองคือสภาวะในการเก็บรักษาของผงที่ต้องการทดสอบความสามารถในการไหลซึ่งถ้ามีการเปลี่ยนแปลงความชื้นของผงเพียงเล็กน้อยก็สามารถเพิ่มค่ามุมกองได้มากกว่า 100% (Zou and Brusewitz, 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 และโปรตีน ซึ่งมีจำนวนของไขมันอยู่เล็กน้อย ขณะที่พื้นผิวของ whole milk, cream และ whey protein powder ประกอบด้วยไขมันอยู่สูงจะไปยับยั้งความสามารถของการไหล (Kim *et al.*, 2005) และปริมาณไขมันยังมีผลอย่างมากต่อการเกาะตัวกันของนมผง โดยนมผงที่มีปริมาณไขมันที่พื้นผิวของอนุภาคมากกว่าก็จะส่งผลให้มีการเกาะตัวกันมากกว่าทำให้ความสามารถในการไหลของผลิตภัณฑ์นมผงมีค่าลดลง (Fitzpatrick *et al.*, 2007)

การวัด Carr's compressibility index

อาหารผงที่มีขนาดเล็กจะมี bulk density สูงกว่าอาหารผงขนาดใหญ่ เนื่องจากปริมาณของช่องว่างระหว่างอนุภาคมีน้อยกว่า เมื่อ bulk density สูงขึ้น คือน้ำหนักสารต่อหน่วยปริมาตรสูงขึ้น การไหลของสารก็ย่อมจะเร็วขึ้น จากค่า bulk density สามารถนำมาหาค่า compressibility ได้ โดยนำสารที่ทราบน้ำหนักมาใส่ในภาชนะที่สามารถวัดปริมาตรได้เช่น cylinder จดปริมาตรเริ่มต้นไว้ ทำการเคาะจนสารลงมาอัดกันแน่น ได้ปริมาตรคงที่ แล้วจดปริมาตรสุดท้ายไว้ การเคาะอาจกระทำได้ด้วยมือหรือใช้เครื่อง เช่น Jolting Volumeter ซึ่งจะยก cylinder ขึ้นลงด้วยความเร็วที่สม่ำเสมอ และสามารถตั้งจำนวนครั้ง และสามารถตั้งจำนวนครั้งที่ต้องการให้เคาะได้ จากค่าที่ได้ นำมาคำนวณหา Carr index ได้จากสมการ

$$CI = \left(\frac{TD - BD}{TD} \right) \times 100 \quad (2.16)$$

เมื่อ CI = Compressibility

TD = Tapped density (kg/m^3)

BD = Loose-packed bulk density (kg/m^3)

ค่า Compressibility นี้สามารถทำนายความสามารถในการไหล (flowability) ได้ โดยดูจาก ตารางความสัมพันธ์ระหว่าง Compressibility กับความสามารถในการไหล ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Compressibility กับ Flowability

Compressibility (%)	ความสามารถในการไหล
5-15	ดีมาก
12-16	ดี
18-21	ปานกลาง
23-35	ไม่ดี
33-38	แย่มาก
> 40	แย่มาก

ที่มา : Jones (1979)

2.7.2 ความสามารถในการละลาย (Solubility)

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

1. Wettability คือ ความสามารถของอนุภาคของผงในการดูดซับน้ำบนพื้นผิวของอนุภาค และปัจจัยที่มีผลต่อ wettability ได้แก่ กระบวนการเกาะกันเป็นก้อนของอนุภาคจำนวนของอนุภาคที่ดูดซับน้ำได้ พื้นผิวของอนุภาค หรือ การไม่มีอนุภาคที่ไม่เกาะกันเป็นก้อน

2. Sinkability คือ ความสามารถของผงในการจมลงไปในน้ำ หลังจากผงเกิดการดูดซับน้ำบนพื้นผิวของอนุภาค และถูกกระทบด้วยความหนาแน่นของอนุภาค

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

4. Solubility คือ อัตราการละลายหรือความสามารถในการละลายทั้งหมด โดยการไม่มีจุดและการบวมตัวอย่างรวดเร็วของอนุภาค เป็นปัจจัยที่กระทบต่อความสามารถในการละลาย

Solubility index (SI) คือ ร้อยละของมวลแห้งของสารที่ละลายได้ใน supernatant (W_s) กับมวลแห้งของตัวอย่างทั้งหมด (W_o) (Mandala and Bayas, 2004) โดยใช้ตัวอย่างปริมาณ 5 g ใส่ใน centrifuge tube เติมน้ำ 50 mL ที่อุณหภูมิ 30°C ปั่นด้วยความเร็ว 3000 rpm นาน 10 นาที เท supernatant ใส่ใน aluminium can อบที่อุณหภูมิ 105°C เวลานาน 24 ชั่วโมง (Shittu and Lawal, 2007)

$$SI (\%) = \frac{W_s}{W_o} \quad (2.17)$$

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

2.7.3 ขนาดอนุภาคอาหารผง

ขนาดอนุภาคส่งผลกระทบต่อสมบัติทางด้านกายภาพ เคมี ของอาหารผง การกระจายของขนาดแคบเท่าไรจะส่งผลให้อาหารผงมีความสม่ำเสมอ นอกจากนี้ยังมีผลต่อการปรับปรุงคุณภาพด้านการบริโภค

ในกระบวนการบดนี้จะทำให้วัตถุดิบหรืออาหารมีขนาดเล็กลงซึ่งไม่สามารถวัดได้ด้วยเครื่องวัดขนาดธรรมดา จำเป็นต้องใช้เครื่องมือช่วยในการแยกขนาดเหล่านั้น วิธีที่ค่อนข้างง่ายคือ การใช้ตะแกรงร่อน (sieve analysis) โดยตะแกรงที่ใช้มีลักษณะเป็นชั้นๆ เพื่อช่วยให้การแยกมีประสิทธิภาพมากขึ้น ขนาดของรูตะแกรง จะมีขนาดใหญ่ด้านบนและจะมีขนาดเล็กลงตามลำดับ โดยชั้นล่างสุดจะมีตาครอบรับ การทำงานจะอาศัยการเขย่า เพื่อให้สารหรืออาหารตกลงมายังชั้นล่างเรื่อยๆ จนถึงตาครอบรับโดยเครื่อง สามารถควบคุมเวลา วิธีการ ความเร็วในการเขย่าได้ อนุภาคที่เล็กที่สุดจะผ่านรูตะแกรง เพื่อไปยังตะแกรงต่อไป จนถึงขนาดรูตะแกรงที่ไม่สามารถผ่านไปได้ก็ยังคงค้างอยู่บนชั้นตะแกรงนั้น นั่นคือ อนุภาคของสารที่มีขนาดเล็กกว่ารูตะแกรงจะผ่านตะแกรงลงไปยังชั้นต่อไปด้วยแรงโน้มถ่วง

Sieve Analysis คือ วิธีการวิเคราะห์ขนาดหรือคัดขนาดของอนุภาคของแข็งโดยการร่อนผ่านของแข็งที่ทราบน้ำหนักไปบนชุดตะแกรงทดสอบ (test sieves) ซึ่งมีช่องขนาดต่างๆ กัน โดยจัดเรียงตะแกรงตามลำดับช่องที่ต้องการ ตะแกรงเหล่านี้อาจติดอยู่กับที่หรือเคลื่อนไหวได้ ช่องบนตะแกรงเกิดจากการนำหลอดขนาดต่างๆ กัน มาสานเป็นช่อง และบอกความกว้างของช่องตะแกรงเป็นเมช (mesh) ซึ่งหมายถึงจำนวนช่องของตะแกรงที่มีอยู่ในความยาว 1 นิ้ว เช่น ตะแกรงขนาด 10 เมชในความยาว 1 นิ้ว จะมีช่องอยู่ 10 ช่อง และช่องหนึ่งจะมีความยาวกว้าง 0.1 นิ้ว

หักออกด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวด ดังนั้น เมชขนาดเดียวกัน อาจแตกต่างกันถ้าทำจากเส้นลวดที่ต่างกัน จึงต้องบอกขนาดช่องหรือ aperture size ควบคู่กับขนาดเมชของตะแกรงด้วย ตะแกรงมาตรฐานที่นิยมใช้ได้แก่ ตะแกรงแบบอังกฤษ (British standard) ตะแกรงแบบไทเลอร์ (Tyler standard) และตะแกรงแบบอเมริกัน (ASTM) เป็นต้น โดยในเมชเบอร์เดียวกันของตะแกรงมาตรฐานแต่ละแบบอาจจะมีขนาดของช่อง (aperture size) ที่ต่างกันก็ได้ ตัวอย่างเช่น ตะแกรงขนาดเมช 100 แบบไทเลอร์มีขนาดช่อง 0.147 มม. แบบอังกฤษมีขนาดช่อง 0.152 มม. และแบบอเมริกันมีขนาดช่อง 0.149 มม. ดังนั้นในตะแกรงมาตรฐานทุกแบบจะต้องแสดงรายละเอียดทั้งขนาดเมชและขนาดช่องในแผ่นป้ายด้านข้างตะแกรง การวิเคราะห์ห้ขนาดทำได้ 2 วิธี คือ แบบแห้ง (dry) และแบบใช้น้ำช่วย (wet) ซึ่งวิธีหลังนี้จะเติมน้ำลงไปเพื่อช่วยให้ของแข็งที่มีขนาดเล็กลอดผ่านช่องตะแกรงได้ดีกว่าแบบแห้ง ของแข็งที่มีขนาดใหญ่เกินขนาด (oversize) จะค้างอยู่บนตะแกรง ส่วนของแข็งที่เล็กเกินขนาด (undersize) จะลอดผ่านช่องตะแกรงไปได้ การใช้เครื่องมือช่วยให้ตะแกรงเคลื่อนไหวหรือสั่น จะช่วยให้การร่อนมีประสิทธิภาพดีขึ้นและในเวลาทีน้อยลง แต่จะต้องไม่ใช่ตัวอย่างมากเกินไปในการทดลองครั้งหนึ่งๆ เพราะจะทำให้ของแข็งไปอุดตามช่อง หรืออาจทำให้เกิดไฟฟ้าสถิตย์และของแข็งรวมตัวเป็นก้อนทำให้ผลลัพธ์ที่ได้ผิดไป และความชื้นในของแข็งต้องทำให้มีน้อยที่สุด

การรายงานผลจาก sieve analysis มีหลายวิธีแต่ที่ใช้มากที่สุดคือการพล็อตระหว่าง cumulative undersize (หรือ over size) กับขนาดอนุภาคหรือขนาดช่อง (aperture size) ซึ่งเรียกว่า Cumulative analysis แต่ถ้าเป็นการพล็อตระหว่างสัดส่วนน้ำหนัก (weight retained) กับขนาดอนุภาคหรือขนาดช่อง (aperture size) จะเรียกว่า differential analysis การพล็อตอาจทำในกระดาษกราฟธรรมดา หรือกระดาษกราฟแบบ semi-log ซึ่งในแบบหลังจะให้ข้อมูลสำคัญที่มากกว่าการพล็อตโดยวิธีของ Gaudin-Schuhmann ซึ่งเป็นการพล็อตระหว่าง Cumulative under size percentage กับ sieve aperture บนกระดาษกราฟแบบ log-log scale จะให้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง ดังสมการ 2.19 (คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล, 2552)

$$W_t = 100 (d/k)^\alpha \quad (2.18)$$

- เมื่อ
- W_t = Cumulative weight percent undersize
 - d = Aperture size of sieve
 - K = Constant known as size modulus
 - α = Constant known as distribution modulus