

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ลำไย

ลำไย (longan) เป็นไม้ผลตระกูล Sapindaceae จำแนกได้เป็น 2 สายพันธุ์ ตามลักษณะของ ลำต้น ผล เมล็ด และการใช้ประโยชน์ ดังนี้คือ ลำไยต้น ได้แก่ *Euphoria longana* Lamk. หรือ *Euphoria-longaan* Lour. หรือ *Dimocarpus longan* Lour. (Subhadrabandhu, 1990) เป็นลำไยที่ปลูกในภาคเหนือของประเทศไทยที่จังหวัดเชียงใหม่ เชียงราย ลำพูน ลำปาง แพร่ น่าน พะเยา และในภาคอีสานที่จังหวัดนครราชสีมา เลย หนองคาย อีกสายพันธุ์หนึ่งคือ ลำไยเถา ได้แก่ *Euphoria scandens* Winit. Kerr. หรือ *Dimocarpus longan* var. *obtusus* ใช้เป็นไม้ประดับ โดยจะตัดเป็นพุ่มเตี้ยหรือปลูกเป็น ไม้กั้นลม (พงษ์ศักดิ์, 2542)

ลำไยพันธุ์คอหรืออีคอ เป็นลำไยพันธุ์เบา คือ ออกดอกและเก็บผลก่อนพันธุ์อื่น ชาวสวนจึงนิยมปลูกมากที่สุดเพราะเก็บเกี่ยวได้ก่อน ทำให้ได้ราคาดี ตลาดต่างประเทศนิยม สามารถจำหน่ายทั้งผลสดและแปรรูป ซึ่งลำไยพันธุ์นี้เจริญเติบโตดีเฉพาะในดินอุดมสมบูรณ์และมีน้ำพอเพียง ทนแล้งและทนน้ำได้ดีปานกลาง ลำไยพันธุ์คอแบ่งตามสีของยอดอ่อนได้ 2 ชนิด คือ คอยอดแดงและคอยอดเขียว โดยคอยอดแดงจะเจริญเติบโตเร็วมากเมื่อเปรียบเทียบกับคอยอดเขียว ลำต้นแข็งแรง เปลือกลำต้นมีสีน้ำตาลปนแดง และใบอ่อนมีสีแดง สำหรับคอยอดเขียวจะมีลักษณะต้นคล้ายคอยอดแดง ใบอ่อนเป็นสีเขียว ออกดอกติดผลง่ายแต่อาจไม่สม่ำเสมอ นอกจากนี้ลำไยพันธุ์คอก็ยังแบ่งตามลักษณะของก้านช่อผลได้อีก 2 ชนิด คือ คอก้านอ่อนมีเปลือกของผลบาง และคอก้านแข็งมีเปลือกผลหนา ทรงผลกลมแป้นและเบี้ยว ผิวสีน้ำตาล มีกระหรือตาห่างสีน้ำตาลเข้ม เนื้อค่อนข้างนุ่ม สีขาวขุ่น ปริมาณน้ำตาลร้อยละ 20 เมล็ดขนาดใหญ่ปานกลาง รูปร่างแบนเล็กน้อย (ศูนย์วิจัยและพัฒนาลำไยและลิ้นจี่ มหาวิทยาลัยแม่โจ้, 2543)

ลำไยเป็นผลไม้ชนิดที่ต้องเก็บเกี่ยวเมื่อผลสุกพร้อมบริโภค (Subhadrabandhu, 1990) มีลำต้นสูงปานกลางจนถึงขนาดใหญ่ สามารถขยายพันธุ์ได้ด้วยเมล็ดและตอนกิ่ง มีผลทรงกลมหรือเบี้ยว เปลือกสีน้ำตาลปนเหลือง (พงษ์ศักดิ์, 2542) เนื้อขาวหรือสีชมพู มีเมล็ดกลมสีน้ำตาลแกมดำ มีรสหวาน กลิ่นหอม และไม่มึนเปรี้ยว โดยทั่วไปมีความหวานประมาณ 16-20 องศาบริกส์ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ประมาณ 6.7-6.9 (ชนันท์, 2545) เนื้อลำไยสดมีน้ำตาลอยู่ 3 ชนิด คือกลูโคส ฟรุคโทส

และซูโครส มีกรดอินทรีย์ ได้แก่ กรดกลูโคนิก กรดมาลิก และกรดซิตริก และมีกรดอะมิโนประมาณ 9 ชนิด ลำไยมีสรรพคุณทางยาคือ ใช้เป็นยาบำรุงสำหรับคนที่เป็นโรคประสาทอ่อนๆ นอนไม่หลับ บำรุงร่างกาย ช่วยซ่อมแซมส่วนที่สึกหรอ ช่วยย่อยอาหาร บำรุงโลหิต และช่วยบำรุงกำลังของสตรีภายหลังการคลอดบุตร (วีรชัย, 2538) ลำไยแห้งจะให้คุณค่าทางโภชนาการสูงกว่าลำไยสด 5 เท่า (กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2549)

### 2.1.1 ประโยชน์ของลำไย (วีรชัย, 2538)

ลำไยเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญเป็นที่นิยมรับประทานทั้งชาวไทยและชาวต่างประเทศ นอกจากจะนิยมรับประทานเป็นผลไม้สดแล้ว ส่วนต่างๆ ของลำไยยังมีสรรพคุณในการแก้ความเหนียวล้า อ่อนเพลีย ช่วยให้หลับสบายและเจริญอาหาร ส่วนต่างๆ ของลำไยมีสรรพคุณ ดังนี้

ก. เนื้อลำไย: เป็นยาบำรุงในคนที่เป็นโรคประสาทอ่อนๆ นอนไม่หลับ หากรับประทาน 10-15 กรัม จะช่วยบำรุงม้ามและบำรุงหัวใจ อีกทั้งช่วยให้เจริญอาหารอีกด้วย เนื้อลำไยสดมีน้ำตาลอยู่ 3 ชนิด คือ กลูโคส ฟรุคโตส และซูโครส มีกรดอินทรีย์หลายชนิด เช่น gluconic acid, malic acid, citric acid และ amino acid ประมาณ 9 ชนิด เนื้อลำไยแห้งจะมีเกลือแร่ที่มีประโยชน์ที่ร่างกายต้องการในปริมาณน้อย เช่น ทองแดง สังกะสี และแมงกานีส เป็นต้น

ข. เมล็ด: นำมาตากแห้ง แล้วบดขยี้เป็นผงใช้เป็นยาทาภายนอก แก้กลาก เกลื้อน แผลฝีหนอง เนื่องจากมีสาร saponin ที่ช่วยในการห้ามเลือด และชาวจีนนิยมใช้สระผม

ค. ใบ: ใช้ต้มกับน้ำรับประทานแก้ไข้มาลาเรีย ริดสีดวงทวาร และไข้หวัด

ง. ดอก: ใช้แก้แผลหนองต่างๆ

จ. ราก: รากสด นำมาต้มกับน้ำตาลกรวด ดื่มแต่น้ำ แก้อาการไข้ ส่วนรากแห้ง นำมาต้มกับน้ำ รับประทานแก้วิงเวียนศีรษะ อ่อนเพลีย แก้อาการตกขาว ขับพยาธิเส้นด้าย

การแพทย์จีนจัดลำไยให้อยู่ในกลุ่มสมุนไพรที่มีสรรพคุณบำรุงเลือด บำรุงสมอง บำรุงหัวใจ และช่วยเจริญอาหาร การใช้ทางตำราจีนจึงใช้กับผู้ที่มิมีอาการอ่อนเพลีย มิเจริญอาหาร เลือดจาง ความจำสั้น รวมทั้งสตรีที่มีอาการอ่อนเพลียเนื่องจากเสียประจำเดือนมากเกินไป และอาการอ่อนเพลียหลังคลอด เป็นต้น

อุษณีย์ (2548) ได้วิจัยพบว่า สารสกัดจากลำไยอบแห้งจะทำปฏิกิริยาลดอนุมูลอิสระในเม็ดเลือดขาว มีคุณสมบัติในการเปลี่ยนแปลงเอนไซม์ในร่างกาย ถ้ามีการนำไปใช้ควบคู่กับการใช้ยาต้านมะเร็งจะมีประโยชน์ในการรักษาร่วมกับการรักษามะเร็งด้วยเคมีบำบัด ซึ่งจะช่วยลดขนาดการใช้ยาและลดผลข้างเคียงได้ และพบว่าลำไยมีสารออกฤทธิ์ทำลายเซลล์มะเร็งลำไส้ใหญ่ และเซลล์มะเร็งเม็ดเลือดขาว สารสกัดจากลำไยแห้งมีฤทธิ์ในการทำลายและต้านอนุมูลอิสระได้อย่างมี

ประสิทธิภาพ และสามารถยับยั้งกระบวนการสร้างเม็ดสีผิวเมลานินได้ดีกว่าสารเคมีที่ใช้ในเครื่องสำอาง

จากการศึกษาหาสารสำคัญในสารสกัดลำไย โดย Rangkadilok *et al.* (2005) พบว่าสารที่สกัดได้จากเปลือก เนื้อ และเมล็ดลำไย มีสารกลุ่มโพลีฟีนอล คือ gallic acid, corilagin และ ellagic acid ซึ่งสารทั้ง 3 ชนิดนี้ผันแปรตามองค์ประกอบของผลลำไยและสายพันธุ์ โดยเมล็ดลำไยมีสารทั้ง 3 ชนิดมากที่สุด และเนื้อลำไยมีน้อยสุด เมื่อนำสารสกัดลำไยนี้ไปทดสอบการออกฤทธิ์ต่อระบบหัวใจและหลอดเลือดของหนู พบว่า สารสกัดจากเมล็ดและเนื้อลำไยช่วยลดการหดตัวของหลอดเลือดที่ถูกกระตุ้นด้วยนอร์อีพิเนฟริน (norepinephrine) และสารสกัดเมล็ดลำไยยังสามารถยับยั้งเชื้อมาลาเรียได้ จึงมีความเป็นไปได้ในการพัฒนาสารสกัดลำไยเป็นยาลดความดันเลือดหรืออาหารเสริมเพื่อบำรุงสุขภาพ

### 2.1.2 การแปรรูปลำไยโดยวิธีการอบแห้ง

ลำไยอบแห้ง หมายถึง ผลผลิตที่ได้จากการนำลำไยมาผ่านกรรมวิธีตามความเหมาะสม (ไม่รวมหมักดอง) แล้วนำมาลดความชื้นตามต้องการ โดยกรรมวิธีตามธรรมชาติหรือใช้อุปกรณ์ที่เหมาะสม โดยจะมีการปรับปรุงแต่งรสหวานด้วยน้ำตาลหรือไม่ก็ได้ ความชื้นต้องไม่เกินร้อยละ 18 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2550)

การอบแห้งลำไยสามารถแบ่งได้ 2 วิธีดังนี้ (พงษ์ศักดิ์, 2542)

1. การอบแห้งทั้งเปลือก เป็นวิธีที่นิยมใช้ในการอบผลลำไยสด เพราะมีขั้นตอนการที่ผลิตง่าย รวดเร็ว และได้ผลผลิตจำนวนมาก ทำโดยคัดเกรดลำไยเข้าเตาอบ ใช้เวลาอบ 40-50 ชั่วโมง จากนั้นบรรจุถุงพลาสติกและกล่อง เก็บรักษาไว้ได้นาน สามารถส่งออกและเก็บบริโภคได้ตลอดปี มีแนวโน้มในการผลิตและส่งออกสูงมาก โดยเฉพาะประเทศจีนและประเทศในแถบเอเชีย

2. การอบแห้งเนื้อ เป็นการอบลำไยที่ใช้เฉพาะเนื้อ ทำโดยการแกะเปลือกและคว้านเมล็ดออก แล้วนำลำไยเข้าเตาอบ การดำเนินงานใช้แรงงานค่อนข้างมาก ค่าใช้จ่ายสูง แต่ผลผลิตที่ได้มีลักษณะดีมาก และเป็นที่นิยมของผู้บริโภค

### 2.1.3 ส่วนประกอบทางเคมีของลำไยอบแห้ง

ส่วนประกอบของลำไยอบแห้งแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบของลำไยอบแห้ง

ส่วนประกอบ (หน่วย)	ต่อเนื้อลำไย 100 กรัม น้ำหนักแห้ง
<b>องค์ประกอบ</b>	
น้ำ (g)	17.6
โปรตีน (g)	4.90
ไขมัน (g)	0.40
เถ้า (g)	3.10
คาร์โบไฮเดรต (g)	74.0
พลังงาน (kJ)	1197
<b>แร่ธาตุ</b>	
แคลเซียม, Ca (mg)	45
เหล็ก, Fe (mg)	5.40
แมกนีเซียม, Mg (mg)	46
ฟอสฟอรัส, P (mg)	196
โพแทสเซียม, K (mg)	658
โซเดียม, Na (mg)	48
สังกะสี, Zn (mg)	0.22
ทองแดง, Cu (mg)	0.807
แมงกานีส, Mn (mg)	0.248
<b>วิตามิน</b>	
กรดแอสคอร์บิก (mg)	28
ไทอามีน (mg)	0.040
ไรโบเฟลวิน (mg)	0.500
วิตามินเอ, IU	0
ไนอาซิน (mg)	1.000
วิตามินบี 12 (μg)	0.00
เรตินอล (μg)	0



## ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

องค์ประกอบ ต่อเนื้อลำไย 100 กรัม น้ำหนักแห้ง

ลึพิด	
คอเลสเตอรอล (mg)	0
กรดอะมิโน	
ทรีโอนีน (g)	0.128
ไอโซลิวซีน (g)	0.097
ลิวซีน (g)	0.202
ไลซีน (g)	0.172
เมตไทโอนีน (g)	0.049
ฟีนิลอะลานีน (g)	0.112
ไทโรซีน (g)	0.094
วาเลีน (g)	0.217
อาร์จินีน (g)	0.131
ฮิสทีดีน (g)	0.045
อะลานีน (g)	0.585
กรดแอสพาทิก (g)	0.469
กรดกลูตามิก (g)	0.780
ไกลซีน (g)	0.158
โพรลีน (g)	0.158
เซอริน (g)	0.180

ที่มา : USDA National Nutrient Database for Standard Reference, Release 23 (2010)

## 2.2. การทำแห้ง

การทำแห้ง คือ การลดความชื้นของอาหารจนถึงระดับที่สามารถระงับการเจริญของจุลินทรีย์ได้ ปริมาณความชื้นที่ลดลงส่งผลให้มีค่าแอกทิวิตี (water activity ;  $a_w$ ) ลดลง ค่า  $a_w$  เป็นดัชนีบ่งชี้ความสามารถในการเจริญของจุลินทรีย์ หากอาหารมีค่า  $a_w$  ต่ำกว่า 0.60 ทำให้เก็บอาหารไว้ได้นาน (วิล, 2546) ตารางที่ 2.2 แสดงความสามารถในการเจริญของจุลินทรีย์และการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีในอาหารที่ระดับ  $a_w$  ต่างๆ

ตารางที่ 2.2 ความสำคัญของค่า  $a_w$  ต่ออาหาร

$a_w$	ปรากฏการณ์
0.95	ยับยั้งการเจริญของ <i>Pseudomonas</i> , <i>Bacillus</i> , <i>Clostridium perfringens</i> และยีสต์บางชนิด
0.90	ขีดจำกัดต่ำสุดสำหรับการเจริญของแบคทีเรียทั่วไป เช่น <i>Salmonella</i> , <i>Lactobacillus</i> , <i>Vibrio parahaemolyticus</i> , <i>Clostridium botulinum</i> รวมทั้งยีสต์และราบางชนิด
0.85	ยีสต์ส่วนใหญ่ถูกยับยั้งการเจริญเติบโต
0.80	ขีดจำกัดต่ำสุดสำหรับกิจกรรมของเอนไซม์ส่วนใหญ่และการเจริญของเชื้อราส่วนใหญ่ <i>Staphylococcus aureus</i> ถูกยับยั้งการเจริญเติบโต
0.75	ขีดจำกัดต่ำสุดสำหรับแบคทีเรียที่ทนความเข้มข้นของเกลือสูง (halophilic bacteria)
0.70	ขีดจำกัดต่ำสุดสำหรับเชื้อราที่ทนสภาพแห้งแล้งได้ดี (xerophilic molds)
0.65	อัตราเร็วสูงสุดในการเกิดปฏิกิริยามลลาร์
0.60	ขีดจำกัดต่ำสุดสำหรับการเจริญของยีสต์ที่ทนความเข้มข้นของน้ำตาลสูง (osmophilic yeasts) และเชื้อราที่ทนสภาพแห้งแล้งได้ดี (xerophilic molds)
0.55	เกิดความผิดปกติกับกรดคือออกซีไรโบนิวคลีอิก (ขีดจำกัดต่ำสุดสำหรับสิ่งมีชีวิต)
0.40	อัตราเร็วต่ำสุดในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน
0.25	ความต้านทานสูงสุดของสปอร์แบคทีเรีย

ที่มา: วิล (2546)

การทำแห้งมีผลต่อการควบคุมค่า  $a_w$  ในอาหาร ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลต่ออายุการเก็บของผลิตภัณฑ์อาหารแห้ง (บุษกร, 2547) โดยอาหารที่มีความชื้นสูงหรือมีปริมาณน้ำมากกว่าส่วนที่เป็นของแข็งจะมีค่า  $a_w$  เท่ากับ 1.0 และเมื่ออาหารมีความชื้นต่ำลงหรือมีปริมาณน้ำน้อยกว่าส่วนที่เป็นของแข็ง ค่า  $a_w$  จะลดลงต่ำกว่า 1.0 (นิธิยา, 2549) ซึ่งวิไล (2546), สินธนา (2542) และ นิธิยา (2549) ได้อธิบายผลของค่า  $a_w$  ต่อการเสื่อมเสียของอาหารและการเกิดปฏิกิริยาเคมีในอาหารดังต่อไปนี้

- ผลของค่า  $a_w$  ต่อการเสื่อมเสียของอาหาร

ยีสต์ รา และแบคทีเรียจำเป็นต้องใช้น้ำอิสระ (free water) ในการเจริญ น้ำอิสระในอาหารทำให้  $a_w$  มีค่าสูง การผลิตอาหารให้มีค่า  $a_w$  ต่ำกว่า 0.6 จะช่วยควบคุมการเสื่อมเสียเนื่องจากจุลินทรีย์เหล่านี้ได้ ตัวอย่างของจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดการเสื่อมเสียของอาหารและระดับของค่า  $a_w$  ที่จุลินทรีย์เหล่านี้สามารถเจริญเติบโตได้แสดงในตารางที่ 2.2 วิธีที่ง่ายที่สุดในการลดค่า  $a_w$  ในอาหารคือการกำจัดน้ำในอาหาร เช่น การอบหรือการทำให้แห้ง การใช้อุณหภูมิสูงเพื่อระเหยน้ำออก การให้ความเข้มข้นของเกลือหรือน้ำตาลที่สูงเพื่อให้เกิดการออสโมซิสของน้ำออกจากอาหาร

- ผลของค่า  $a_w$  ต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีในอาหาร

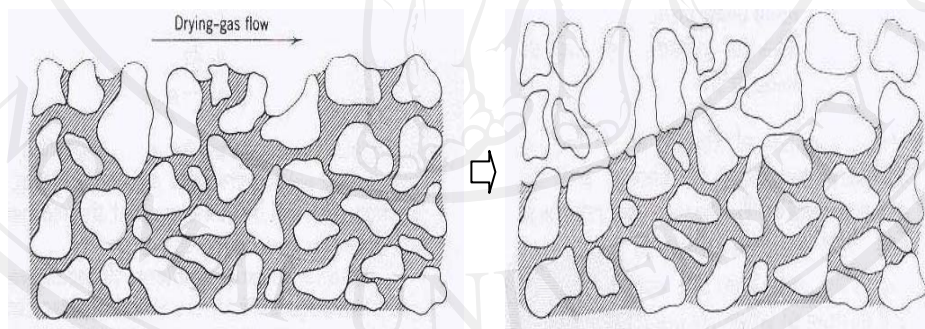
อาหารมักจะมีโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตซึ่งมีแนวโน้มที่จะเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (maillard reaction) ซึ่งทำให้เกิดสีน้ำตาล การเกิดสีน้ำตาลเนื่องจากปฏิกิริยาเมลลาร์ดมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อค่า  $a_w$  สูงขึ้น โดยจะเกิดได้สูงสุดในช่วง  $a_w$  เท่ากับ 0.6 ถึง 0.7 แต่ผลิตภัณฑ์บางชนิดเมื่อเพิ่มค่า  $a_w$  ก็ยังสามารถขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดได้ ดังนั้นการตรวจวัดและควบคุมค่า  $a_w$  ในผลิตภัณฑ์จึงเป็นวิธีที่ดีในการควบคุมปัญหาการเกิดสีน้ำตาลจากปฏิกิริยานี้

ค่า  $a_w$  มีผลต่อความคงตัวของตามธรรมชาติของโปรตีนและเอนไซม์ ซึ่งเอนไซม์และโปรตีนเกือบทุกชนิดต้องรักษาสภาพตามธรรมชาติไว้เพื่อให้สามารถทำหน้าที่ได้ตามปกติ ดังนั้นการรักษากระดับของ  $a_w$  จึงมีความสำคัญต่อการควบคุมการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของอาหาร ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นเนื่องจากเอนไซม์ถูกยับยั้งที่ระดับค่า  $a_w$  ต่ำกว่า 0.8 การเสื่อมเสียของอาหารเนื่องจากปฏิกิริยาของเอนไซม์มีผลทำให้เกิดกลิ่นที่รุนแรงและการเปลี่ยนแปลงรสชาติในผลิตภัณฑ์อาหารแห้งทำให้ผู้บริโภคไม่ยอมรับ โดยทั่วไปการเสื่อมเสียเนื่องจากปฏิกิริยาของเอนไซม์มักไม่เกิดกับผลิตภัณฑ์ลำไยที่ผ่านกระบวนการอบแห้ง เนื่องจากเอนไซม์ที่เร่งการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลในลำไยเป็นสารประกอบฟีนอลเอส (phenolase) เช่น phenoloxidase, polyphenoloxidase เป็นต้น (รัชณี, 2537) ซึ่งเอนไซม์กลุ่มนี้เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เพียงเวลาสั้นๆ จะถูกทำลายหรือทำให้เสียสภาพธรรมชาติได้

### 2.2.1 กลไกการอบแห้งโดยใช้ลมร้อน

การทำแห้งโดยใช้ลมร้อนเป็นการให้พลังงานแก่อาหารเพื่อทำให้น้ำในอาหารเปลี่ยนสถานะเป็นไอแล้วระเหยออกจากอาหาร การใช้เครื่องอบแห้งแบบลมร้อนจะทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนและมวลสารของอาหารได้อย่างรวดเร็ว โดยการให้กระแสลมร้อนเคลื่อนที่ผ่านอาหาร ซึ่งการถ่ายเทความร้อนแบบนี้เรียกว่า การพาความร้อน ถ้าใช้พลังงานความร้อนจากแสงแดดจะเรียกว่า การตากแห้ง และถ้าใช้พลังงานไฟฟ้า ก๊าซหรือไอน้ำเรียกว่า การอบแห้ง การทำแห้งอาหารมีประโยชน์ เช่น ช่วยป้องกันการเน่าเสียเนื่องจากจุลินทรีย์ ป้องกันการเสื่อมเสียเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีและเอนไซม์ สามารถเก็บรักษาอาหารไว้ได้นานที่อุณหภูมิห้อง ลดขนาดของอาหารให้เล็กลงซึ่งจะช่วยประหยัดพื้นที่ในการจัดเก็บและมีน้ำหนักเบา ทำให้สะดวกในการบรรจุ การเก็บรักษา และการขนส่ง ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ใหม่ และเป็นการเพิ่มมูลค่าให้แก่ผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร (สุคนธ์ชื่น, 2539)

กลไกการทำแห้งของอาหารโดยใช้ลมร้อนเกิดขึ้นเมื่อลมร้อนพัดผ่านผิวหน้าอาหารที่เปียก ซึ่งความร้อนจะถูกถ่ายเทไปยังผิวของอาหาร และน้ำในอาหารจะระเหยออกมาด้วยความร้อนแฝงของการเกิดไอ ไอน้ำจะแพร่ออกมาจากเนื้อเยื่อของอาหารและถูกพัดพาไปโดยลมร้อนที่เคลื่อนที่ ดังรูปที่ 2.1

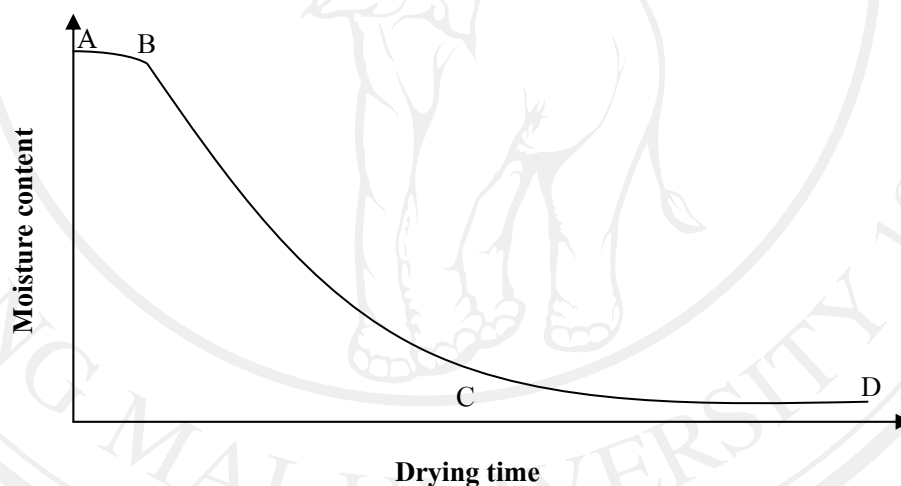


รูปที่ 2.1 การเคลื่อนที่ของความชื้นออกจากชิ้นอาหารระหว่างการทำแห้ง  
ที่มา : วิไล (2546)

เมื่อผิวของอาหารเริ่มแห้งทำให้ความดันไอน้ำที่ผิวหน้าของอาหารต่ำกว่าความดันไอภายในผิวของอาหาร เป็นผลให้เกิดความแตกต่างของความดันไอน้ำขึ้น ซึ่งเหตุการณ์นี้จะเกิดขึ้นเมื่อน้ำในอาหารเริ่มต่ำลง โดยอาหารชั้นในจะมีความดันไอน้ำสูง และจะค่อยๆ ลดต่ำลงเมื่อชั้นอาหารเข้าใกล้อากาศแห้ง ความแตกต่างนี้ทำให้เกิดแรงดันขึ้นและดันไอน้ำออกจากอาหาร

### 2.2.2 กราฟการทำแห้ง

กราฟการทำแห้งหรือการลดลงของความชื้นใช้บ่งชี้ลักษณะการอบแห้งของอาหาร เป็นกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของความชื้นในอาหารในแต่ละช่วงเวลาระหว่างการอบแห้ง ดังรูปที่ 2.2 ในช่วงเริ่มต้นของการอบแห้งเมื่อลมร้อนสัมผัสกับผิวหน้าของอาหารทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นถึงอุณหภูมิกระเปาะเปียก (AB ในรูปที่ 2.2) น้ำที่ผิวของอาหารเริ่มระเหยออกไปทำให้น้ำที่ผิวหน้ามีปริมาณน้อยลง จึงเกิดการเคลื่อนที่ของน้ำจากด้านในของอาหารมาที่ผิวเพื่อรักษาสมดุลของน้ำที่ผิวของอาหาร อัตราการเคลื่อนที่ของน้ำจากด้านในออกมาที่ผิวของอาหารจะเร็วกว่าอัตราการระเหยที่ผิวหน้าของอาหาร ช่วงนี้เป็นช่วงการอบแห้งคงที่ซึ่งเกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้นๆ เมื่อทำการอบแห้งต่อไปน้ำอิสระในอาหารจะเหลือน้อยลงทำให้การเคลื่อนที่ของน้ำออกมาที่ผิวหน้าของอาหารช้าลง ส่งผลให้อัตราการระเหยของน้ำต่ำลง และอัตราการระเหยก็จะลดลงจนเข้าใกล้ศูนย์ เป็นช่วงการอบแห้งลดลง ช่วงนี้เป็นช่วงที่นานที่สุดของกระบวนการทำแห้ง (วิไล, 2546)



รูปที่ 2.2 เส้นกราฟการทำแห้ง

ที่มา : วิไล (2546)

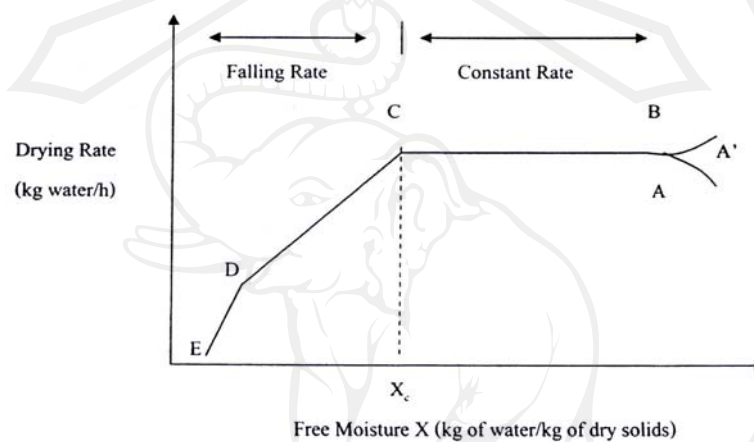
### 2.2.3 อัตราการทำแห้ง (drying rate)

อัตราการทำแห้ง หมายถึง ปริมาณน้ำที่ถูกกำจัดออกจากอาหารภายในช่วงเวลาหนึ่งตามปกติมักจะบอกเป็นปริมาณน้ำที่หายไป (กิโลกรัม) ต่ออาหารหนึ่งกิโลกรัมต่อชั่วโมง กลไกการทำแห้งอาจแบ่งออกเป็นสองช่วงหลัก ช่วงที่ 1 เป็นการเคลื่อนที่ของน้ำจากส่วนในของอาหารออกมายังผิวหน้า ในตอนต้นของการทำให้แห้งการเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในจะรวดเร็วกว่าการระเหย และผิวหน้าของอาหารยังอยู่ในสภาวะที่อิ่มตัวด้วยน้ำ ต่อมาการระเหยจะเกิดรวดเร็วกว่าการเคลื่อนที่ของน้ำจึงทำให้ผิวหน้าของอาหารเริ่มแห้งและอัตราการทำแห้งจะลดลง อาหารจะแห้งเร็ว



หรือช้าขึ้นอยู่กับปัจจัยภายนอกหลายอย่าง ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้น ความเร็วของลมร้อน และพื้นที่ผิวที่สัมผัสกับลมร้อน อาหารจะแห้งเร็วเมื่อลมร้อนมีอุณหภูมิสูงและมีความชื้นน้อย อย่างไรก็ตาม ถ้าอุณหภูมิในระยะเริ่มต้นสูง จะทำให้ผิวหน้าของอาหารแห้งเร็วเกินไป ทำให้ความชื้นภายในอาหารระเหยออกมาได้ยากขึ้น นอกจากนี้อาหารจะแห้งช้าลงถ้าวิธีการระบายลมร้อนไม่มีประสิทธิภาพ

การเปลี่ยนแปลงอัตราการทำแห้งของอาหารสามารถแสดงในรูปของกราฟอัตราการทำแห้ง ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการระเหยของน้ำและปริมาณความชื้นในอาหาร



รูปที่ 2.3 กราฟอัตราการทำแห้ง

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

จากรูปที่ 2.3 สามารถแบ่งย่อยเป็น 4 ช่วงดังนี้ ช่วง A-B หรือ A'-B เป็นช่วงที่อุณหภูมิในชิ้นผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นเมื่อสัมผัสกับลมร้อน ช่วง B-C เรียกว่า ช่วงอัตราการทำแห้งคงที่ (constant rate period) เป็นการอบแห้งในสภาวะที่ผิวของอาหารยังอึดตัวด้วยน้ำ ซึ่งสภาวะการอึดตัวนี้จะถูกควบคุมไว้ได้โดยการเคลื่อนที่ของน้ำจากด้านในผลิตภัณฑ์ เนื่องจาก hydraulic gradient โดยอัตราการเคลื่อนที่ของน้ำมาที่ผิวจะเท่ากับอัตราการระเหยของน้ำที่ผิวของอาหาร ปัจจัยควบคุมการทำแห้งในช่วงนี้ ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วของลมร้อน จุด C เป็นจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราการทำแห้ง ความชื้น ณ จุดนี้เรียกว่า ความชื้นวิกฤต (critical moisture content) อัตราการทำแห้งจะเริ่มลดลงเมื่อผิวของอาหารเริ่มแห้ง เนื่องจากอัตราการระเหยของน้ำสูงกว่าอัตราการเคลื่อนที่ของน้ำจากด้านในของอาหารมาที่ผิว ช่วง C-D และ D-E เป็นช่วงอัตราการทำแห้งลดลง (falling rate period) ผิวหน้าการระเหย (drying front) ในช่วงนี้จะเคลื่อนที่เข้าไปภายในชิ้นอาหารทำให้น้ำเกิดการระเหยจากภายใน แล้วไอน้ำจึงเคลื่อนที่ผ่านชั้นอาหารที่แห้งแล้วออกไปภายนอก

นอกจากการแพร่ และน้ำที่อยู่ภายในอาหารส่วนที่ยังชื้นอยู่จะแพร่ออกมาที่ผิวหน้าการระเหย (drying front) ในอัตราที่ต่ำกว่าอัตราการระเหย ซึ่งการเคลื่อนที่ในลักษณะนี้จะเป็นไปอย่างช้าๆ จึงทำให้อัตราการทำแห้งในช่วงนี้ลดลง ปัจจัยที่ควบคุมการทำแห้งในช่วงนี้คือ ความต้านทานการเคลื่อนที่ของน้ำในผลิตภัณฑ์ และช่วงนี้อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์จะสูงกว่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกของลมร้อน จากกราฟเห็นว่าในช่วงอัตราการทำแห้งลดลง 2 ช่วง เนื่องจากช่วง C-D ยังคงมีความชื้นที่ผิวหลงเหลืออยู่เล็กน้อย แต่ที่จุด D ความชื้นที่ผิวระเหยไปหมดทำให้ผิวหน้าแห้งสนิท อัตราการทำแห้งจึงช้าลงไปอีก (Barbosa-Canovas and Vega-Mercado, 1996)

### 2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำแห้ง (สุคนธ์ชื่น, 2539)

1. ธรรมชาติของอาหาร อาหารที่มีลักษณะเนื้อโปร่งจะมีการเคลื่อนที่ของน้ำภายในอาหารเร็วกว่าอาหารที่มีลักษณะเนื้อแน่น และอาหารที่มีน้ำตาลน้อยจะแห้งเร็วกว่าอาหารที่มีน้ำตาลสูง ซึ่งน้ำตาลเมื่อได้รับความร้อนจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะเป็นของเหลวหนืดและกีดขวางการเคลื่อนที่ของน้ำทำให้อาหารแห้งช้า และอาหารที่มีการลวก การนวด หรือการคลึง จะทำให้เซลล์แตกและแห้งเร็วขึ้น
2. ขนาดและรูปร่าง มีผลต่อพื้นที่ผิวต่อน้ำหนัก เช่น อาหารที่มีรูปร่างเหมือนกัน ถ้ามีขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักมากกว่าขนาดใหญ่จึงแห้งได้เร็วกว่า ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงพื้นที่ผิวที่สัมผัสกับอากาศที่จะเกิดการเคลื่อนย้ายไอน้ำออกไปได้ด้วย ซึ่งถ้าชิ้นเล็กมาทับถมกันการระเหยเกิดได้เฉพาะที่ผิวสัมผัสกับอากาศ และเกิดได้ช้าๆ ที่มีพื้นที่ผิวต่อหน่วยน้ำหนักมาก
3. ตำแหน่งของอาหารในเครื่องอบแห้ง อาหารที่สัมผัสกับลมร้อนได้ดีหรือสัมผัสกับลมร้อนที่มีความชื้นต่ำจะระเหยได้ดีกว่า
4. ปริมาณอากาศต่อถาดมากเกินไป อาหารส่วนล่างจะไม่ได้สัมผัสกับอากาศร้อนหรืออาจได้รับความร้อนจากถาดแล้วแต่ไอน้ำไม่สามารถแพร่กระจายผ่านผิวหน้าของชิ้นอาหารออกมาได้จึงแห้งช้า
5. ความสามารถในการรับไอน้ำของอากาศร้อน อากาศร้อนที่มีไอน้ำอยู่มากจะรับไอน้ำได้น้อยกว่าอากาศร้อนที่มีไอน้ำอยู่น้อย
6. อุณหภูมิของอากาศร้อน ถ้าอากาศมีความชื้นคงที่ การเพิ่มอุณหภูมิของอากาศร้อนเป็นการเพิ่มความสามารถในการรับไอน้ำ และอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้การกระจายของน้ำในอาหารดีขึ้นด้วย ส่งผลให้มีอัตราการอบแห้งเร็ว ช่วยใช้เวลาในการอบแห้งลดลง

7. ความเร็วของลมร้อน ลมร้อนทำหน้าที่ในการเคลื่อนย้ายไอน้ำออกจากอาหาร ดังนั้นเมื่อความเร็วของลมร้อนเพิ่มขึ้นการเคลื่อนย้ายไอน้ำเกิดได้เร็วขึ้น หากความเร็วของลมร้อนสูงจะทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนจะทำให้ความต้านทานในการถ่ายเทความร้อนและมวลลดลง ส่งผลให้การทำแห้งเกิดขึ้นได้ดี

#### 2.4 แบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง

จลนพลศาสตร์การอบแห้งเป็นลักษณะการอบแห้งในเชิงคณิตศาสตร์ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้จากข้อมูลการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของความชื้น (moisture ratio) การคำนวณหาสัดส่วนความชื้นสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (1) (Ganesapillai *et al.*, 2008) การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนความชื้นในระหว่างการอบแห้งสามารถทำนายได้โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่างๆ เช่น แบบจำลองของ Lewis, Henderson and Pabis และ Wang and Singh ดังแสดงในสมการที่ (2)-(4) ความแม่นยำในการทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถประเมินได้จากค่า  $R^2$  ที่สูงที่สุด และ RMSE (Root mean square error) ที่ต่ำที่สุด

Moisture ratio:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

Lewis equation:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \exp(-kt) \quad (2)$$

Henderson and Pabis equation:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = a \exp(-kt) \quad (3)$$

Wang and Singh equation:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = 1 + at + bt^2 \quad (4)$$

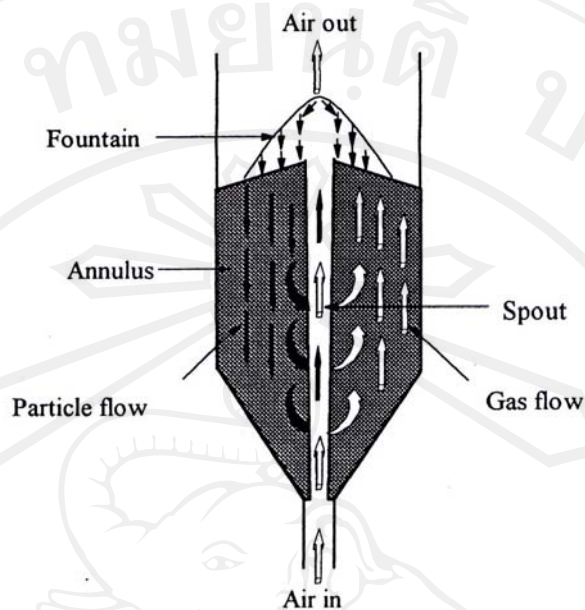
เมื่อ  $M_0$ ,  $M$ ,  $M_c$  และ  $MR$  คือ ปริมาณความชื้น (โดยน้ำหนักแห้ง) ณ จุดเริ่มต้น, ที่เวลาใดๆ, ณ จุดสมดุล และอัตราส่วนความชื้นที่เวลาใดๆ ตามลำดับ  $t$  คือ เวลาในการอบแห้ง  $k$ ,  $a$  และ  $b$  คือ ค่าคงที่ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

## 2.5 การอบแห้งโดยเทคนิคสเปาเต็ดเบด (Mathur, 1972; Arun, 2000)

สเปาเต็ดเบดคือเทคนิคในการทำให้ของไหลและอนุภาคสัมผัสกัน ซึ่งถูกพัฒนาโดย Mathur and Gishler ในปี 1955 (Takeuchi, 2008) มีหลักการคล้ายคลึงกับฟลูอิดไดซ์เบด แต่ต่างกันตรงที่สเปาเต็ดเบดของไหลจะไหลเข้าไปในหอตลอดเป็นลำตรงกลาง ในขณะที่ฟลูอิดไดซ์เบดจะป้อนผ่านแผ่นที่ช่วยกระจายของไหล ซึ่งจะทำให้ของไหลเกือบเต็มพื้นที่หน้าตัดของหอตลอดและส่วนล่างของหอตลอด ซึ่งฟลูอิดไดซ์เบดจะมีหน้าตัดเรียบ ส่วนในกรณีของสเปาเต็ดเบดจะเป็นรูปกรวยหรือโคน ซึ่งอนุภาคที่อยู่ภายในหอตลอดจะถูกเป่าขึ้นไปในแนวแกน และกระจายตัวออกเหมือนน้ำพุ และตกลงมาในแนวแกนรัศมีโดยอนุภาคจะอัดกันแล้วไหลลงไปยังล่างหอตลอดและถูกของไหลเป่าขึ้นไปอีก ซึ่งข้อดีของสเปาเต็ดเบดเมื่อเปรียบเทียบกับฟลูอิดไดซ์เบดคือ การสัมผัสกันอย่างทั่วถึงระหว่างของไหลกับอนุภาคที่ความเร็วต่ำกว่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไดซ์เบด ซึ่งเป็นความเร็วที่ทำให้เกิดการสัมผัสกันได้ดีในกรณีฟลูอิดไดซ์เบด ที่ความเร็วต่ำกว่านั้น การสัมผัสจะไม่ดีเท่าที่ควร หรืออีกนัยหนึ่งคือที่ความเร็วของของไหลเดียวกันสเปาเต็ดเบดจะเกิดการสัมผัสระหว่างของไหลและอนุภาคได้ดีกว่าฟลูอิดไดซ์เบด นอกจากนี้การที่สเปาเต็ดเบดมีส่วนล่างของหอตลอดเป็นรูปกรวยนั้นจะทำให้กำจัดการเกิดจุดอับหรือจุดที่อนุภาคเกิดการสะสมและไม่มีการไหลเวียน ซึ่งจะพบมากในกรณีของฟลูอิดไดซ์เบดที่มีส่วนล่างของหอตลอดแบบแบน (Takeuchi, 2008)

### 2.5.1 ลักษณะของสเปาเต็ดเบด

สเปาเต็ดเบดก่อตัวจากกระแสของไหลผ่านเข้ามาในเบด กระแสของไหลนี้มีความเร็วสูงและโมเมนตัมมาก ซึ่งจะดันอนุภาคของแข็งให้ลอยขึ้นเป็นแนวตามแกนของหอตลอด เมื่อพื้นเบดล่างของแข็งก็ตกกลับลงมาใหม่ดังรูปที่ 2.4 ของไหลเป็นได้ทั้งก๊าซและของเหลว



รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะการเกิดสเปาต์เบด

ที่มา : Rami *et al.* (1995)

สเปาต์เบดแบ่งออกเป็น 2 โซน คือ โซนที่เป็นเบดเบาบางเรียกว่า spout บริเวณนี้อนุภาคของแข็งจะเคลื่อนที่ขึ้น และอีกโซนหนึ่งเป็นเบดหนาแน่น บริเวณนี้อยู่รอบผนังของหอบแห้งโดยอนุภาคของแข็งบริเวณนี้จะเคลื่อนที่ลงด้านล่าง ตรงด้านล่างของเบดจะมีลักษณะเป็นรูปกรวย เพื่อให้อนุภาคของแข็งเคลื่อนที่เข้าหากระแสของไหลได้ง่ายโดยของแข็งมิได้ยับเคลื่อนที่เลย ซึ่งของไหลหลังจากผ่านพื้นที่ขึ้นมาแล้วส่วนใหญ่อีกจะอยู่ตรงบริเวณแกนมีบางส่วนของไหลซึมผ่านไปทางรอบๆ ของเบด อัตราการไหลของของไหลยิ่งสูงการซึมผ่านของก๊าซยิ่งมากขึ้น ทั้งนี้เกิดจากแรงยับเคลื่อนที่มาก ผลต่างของปริมาณของไหลตรงกลางมากกว่าด้านข้าง โดยสิ่งที่แตกต่างอย่างชัดเจนที่บริเวณผิวหน้าของเบดคือความเร็วของอนุภาคของแข็งที่บริเวณ spout มีการเคลื่อนที่มากกว่าบริเวณเบดหนาแน่น อนุภาคของแข็งที่ลอยมาตามกระแสของไหลจะเกิดการชนกับอนุภาคของแข็งที่เคลื่อนที่ลงมาตรงบริเวณใกล้แกน ดังนั้นบริเวณที่ใกล้กับช่องทางเข้าของของไหลจะมีปริมาณของอนุภาคของแข็งน้อยกว่าที่ระดับสูงๆ ขึ้นไป

นอกจากนั้นสเปาต์เบดยังมีคุณสมบัติที่ไม่เหมือนกับฟลูอิดไดเซชันธรรมดาคือความดันต่างภายในเบดจะไม่เท่ากันตลอดทั้งหมด โดยจะมีความแตกต่างน้อยตรงบริเวณกระแสของไหลและค่อยๆ เพิ่มมากขึ้นจนมีความดันสูงสุดอยู่ที่ผิวหน้าของเบด ส่วนความดันตกคร่อมมีสองส่วนที่ขนานกันคือ ส่วนแรกเป็นส่วนของ spout เป็นบริเวณที่มีของแข็งอยู่น้อยและบริเวณเบดหนาแน่นที่



อนุภาคของแข็งเคลื่อนที่ลงสวนทางกับของไหล ความดันตกคร่อมที่ระดับต่างๆ ของเบดมักจะอยู่ในสมดุล ยกเว้นตรงบริเวณทางเข้าของของไหลซึ่งจะมีความดันตกคร่อมอยู่มาก กรณีที่ก๊าซออกจากบริเวณ spout แล้วเข้าไปในบริเวณวงแหวนรอบๆ spout มากพอที่จะเกิดเป็นฟลูอิดไดเซชันได้ สเปาเต็ดลักษณะนี้จะเป็นเบดที่มีความเสถียรมากที่สุด ความสูงของเบดที่วัดได้ในขณะนี้อาจเรียกว่า maximum spoutable bed depth เพราะถ้าความเร็วของของไหลมากกว่านี้จะทำให้อนุภาคหลุดลอยออกไปจากระบบ

### 2.5.2 ข้อดีและข้อจำกัดของสเปาเต็ดเบด

สเปาเต็ดเบดมีข้อดีและข้อจำกัดบางอย่างที่เกี่ยวกับพลศาสตร์ของอากาศและพลังงานที่ต้องใช้ ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ข้อดีและข้อจำกัดของสเปาเต็ดเบด

ข้อดี	ข้อจำกัด
1. สามารถใช้กับอนุภาคหยาบ ( $D_p > 1 \text{ mm}$ )	1. มีอัตราการไหลของก๊าซมากกว่าการถ่ายเทความร้อนหรือมวลหรือจลนศาสตร์ทางเคมี
2. สามารถพยากรณ์ลักษณะการย้อนกลับของของแข็งและการไหลของก๊าซได้	2. อัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างเบดกับผนังหรือเบดกับพื้นผิวต่ำ
3. อนุภาคของแข็งเคลื่อนที่เป็นวงกลมมีการไหลเวียนอย่างสม่ำเสมอ ทำให้ไม่เกิดการชนทับกัน	3. ก่อนการพ่นของไหลมีความดันตกคร่อมสูง
6. มีความดันตกคร่อมและ gas residence time ต่ำเมื่อเทียบกับฟลูอิดไดเซชันเบด	4. ภายในห้องอบแห้งมีอากาศไหลเวียนต่ำ
7. ลดการแยกของอนุภาค	5. มีข้อจำกัดของขนาดท่อและความสูงของเบด
9. ทำความสะอาดและดูแลรักษาง่าย	6. มีข้อจำกัดทางเรขาคณิตที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของการผลิต
10. ค่าใช้จ่ายการลงทุนต่ำ	7. การปรับระดับหรือการเพิ่มขนาดทำได้ยาก
11. ใช้พื้นที่น้อยในการติดตั้ง	8. การหมุนเวียนของของแข็งเป็นไปได้ช้า

### 2.5.3 การอบแห้งอาหารโดยวิธีสเปาเต็ดเบด

เครื่องอบแห้งแบบสเปาเต็ดเบดสามารถใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดอนุภาคที่ใหญ่ ทั้งที่เป็นอนุภาคทรงกลมและไม่เป็นทรงกลมและมีปริมาณความชื้นสูง และสามารถใช้ในการอบแห้งสารแขวนลอย สารขุ่นหนืด และสารละลายได้ โดยใช้ร่วมกับอนุภาคเนื้อ (เช่น ทราย ลูกปัด เม็ด-

พลาสติกเทปอ่อน เป็นต้น) เครื่องอบแห้งแบบสเปาเต็ดเบดสามารถเทียบได้กับเครื่องอบแบบหมุน (rotary dryer) แบบสายพาน (conveyor dryer) แบบถาด (continuous tray dryer) ฟลูอิดเบดแบบเขย่า (vibrated bed dryer) และฟลูอิดเบด (fluid bed dryer) เครื่องอบแห้งแบบสเปาเต็ดเบดเป็นเครื่องอบแห้งที่มีต้นทุนการผลิตต่ำ ทนทาน แต่ในระหว่างการผลิตทำให้เกิดการขัดสีและเกิดความเสียหายเชิงกลกับอนุภาค (การแตกของอนุภาค) เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคอย่างต่อเนื่อง แต่ก็เป็นเครื่องอบแห้งที่สามารถให้ความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพมากและสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องเช่นเดียวกับเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดเบด

Wachiraphansakul *et al.* (2007) ศึกษาจลนศาสตร์การอบแห้งและคุณภาพของกากถั่วเหลืองอบแห้งโดยเทคนิคสเปาเต็ดเบดร่วมกับอนุภาคเฉื่อยคือ ซิลิกาเจล ซึ่งกากถั่วเหลืองมีความชื้นเริ่มต้น 550 g water/100 g solid หลังการอบแห้งพบว่า กากถั่วเหลืองมีความชื้นเท่ากับ 10 g water/100 g solid มีพฤติกรรมการอบแห้งคล้ายกับผลิตภัณฑ์อาหารอื่นๆ กากถั่วเหลืองอบแห้งที่ได้เป็นน้ำตาลอ่อน โดยค่าสีแดงมีค่าสูงกว่าค่าความสว่างและค่าสีเหลือง และเทคนิคนี้สามารถช่วยปรับปรุงจลนพลศาสตร์ในการทำแห้งและคุณภาพของกากถั่วเหลืองอบแห้งได้ เช่น ความสามารถในการคืนรูป และความสามารถในการละลาย เป็นต้น

Almeida *et al.* (2010) ได้ศึกษาการเคลื่อนที่ของของไหล ความร้อนและพฤติกรรมการถ่ายเทมวลในระหว่างกระบวนการอบแห้ง pasty material โดยเทคนิคสเปาเต็ดเบดร่วมกับอนุภาคเฉื่อยคือ ลูกปัดแก้ว มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 2.18 mm มีความหนาแน่น 2,512.70 kg/m<sup>3</sup> ใช้ความเร็วลมร้อนแตกต่างกัน 2 ระดับคือ ร้อยละ 15 และ 30 สูงกว่าความเร็วการพ่นลมร้อนต่ำสุดที่อุณหภูมิ 80 และ 100 องศาเซลเซียส พบว่าเวลาที่ใช้ในการอบแห้งมีความจำเป็นมากต่อสภาวะการคงที่ของเครื่องสเปาเต็ดเบด ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความเร็วลมมาเข้า และอัตราการป้อน ซึ่งพฤติกรรมเคลื่อนที่ของของไหลและพฤติกรรมการถ่ายเทมวลขึ้นอยู่กับชนิด ความเข้มข้น และอัตราการป้อน paste เป็นต้น

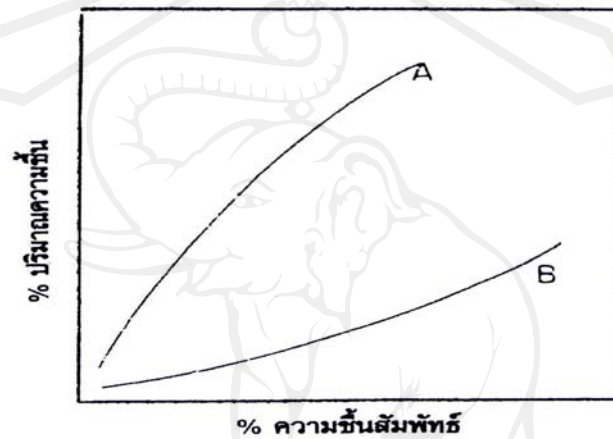
Benali *et al.* (2006) ศึกษาเทคนิคสเปาเต็ดเบดร่วมกับอนุภาคเฉื่อยคือ เม็ดพลาสติกเทปอ่อนในการอบแห้งสารละลายแป้งฝัก โดยวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำแห้งและคุณภาพของผลิตภัณฑ์พบว่า สามารถควบคุมความชื้นสุดท้ายของผงได้ ซึ่งอุณหภูมิขาออกเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์และประสิทธิภาพการทำแห้ง สำหรับการศึกษานี้สภาวะที่เหมาะสมคือ อุณหภูมิมาเข้า 180 องศาเซลเซียส มีปริมาณของแข็งเริ่มต้นเท่ากับร้อยละ 36 โดยน้ำหนัก มีค่า starch damage index ต่ำกว่าร้อยละ 2.5 มีค่าความสว่างอยู่ในช่วง 94.1–96.1 ซึ่งค่าความสว่างที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นเริ่มต้น และมีประสิทธิภาพการทำแห้งเท่ากับร้อยละ 90

Shuhama *et al.* (2003) ได้การศึกษาการผลิตแอนเนตโต้ผง การอบแห้งโดยใช้เทคนิคสเปาเต็คเบค วิเคราะห์ผลของสภาวะในการอบแห้ง เช่น อุณหภูมิอากาศขาเข้าและอัตราการป้อนสารสกัดที่มีต่อสมบัติของผง ซึ่งสมบัติของผงเป็นปัจจัยบ่งชี้ในด้านคุณภาพคือ ปริมาณบิซึน ปริมาณความชื้น และการกระจายตัวของขนาดอนุภาค พบว่า ผลิตภัณฑ์มีปริมาณบิซึนสูงเมื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ทางการค้า ปริมาณบิซึนที่ได้สามารถบ่งบอกได้ว่าการอบแห้งโดยเทคนิคสเปาเต็คเบคประสบผลสำเร็จและยังมีความสามารถในการผลิตสูง และผลิตภัณฑ์ที่ได้มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 60 ไมโครเมตร อีกทั้งยังพบว่าอุณหภูมิการอบแห้งที่สูงกว่า 80 องศาเซลเซียสทำให้ปริมาณบิซึนลดลงอย่างมาก บ่งชี้ได้ว่าสารสกัดนี้ไม่สามารถทำให้แห้งได้ที่อุณหภูมิสูงกว่า 80 องศาเซลเซียส

## 2.6 ซอร์ปชันไอโซเทอร์ม (Sorption isotherm)

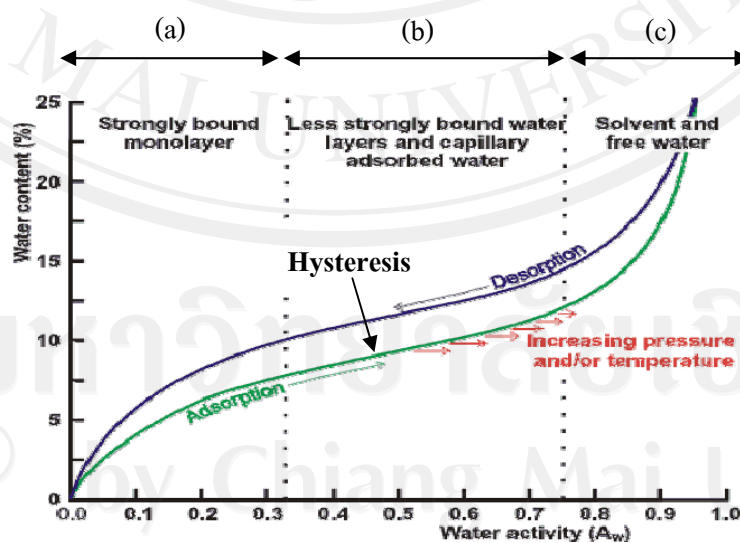
ซอร์ปชันไอโซเทอร์ม คือ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำสมดุลในอาหารและค่า  $a_w$  (นิธิยา, 2549) ซอร์ปชันไอโซเทอร์มเป็นข้อมูลที่สำคัญสำหรับอาหารที่มีความชื้นต่ำ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์เพื่อหาปริมาณความชื้นที่เหมาะสมในการทำแห้งหรือการดูดน้ำกลับ (rehydration) ใช้ในการประเมินเสถียรภาพของอาหารระหว่างการเก็บรักษา (Goula *et al.*, 2008) ซอร์ปชันไอโซเทอร์มโดยทั่วไปจะมีลักษณะเป็นรูปซิกมอยด์ (sigmoidal shape) สามารถแบ่งเป็น 2 แบบคือ desorption isotherm และ adsorption isotherm โดยกระบวนการ desorption คือกระบวนการลดความชื้นในขณะที่กระบวนการ adsorption คือกระบวนการเพิ่มความชื้น ซึ่งกระบวนการทั้งสองจะเกิดขึ้นได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศและจะมีผลต่อค่า  $a_w$  ด้วย การศึกษา desorption isotherm ทำโดยการให้ความชื้นแก่อาหารที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์สูงและหลังจากนั้นกำจัดความชื้นในภาชนะปิดที่มีสารละลายเกลืออิ่มตัวอยู่ ซึ่งกราฟ desorption isotherm ใช้แสดงระดับความแห้งของอาหารที่ค่อยๆ เพิ่มขึ้นหรือความชื้นของอาหารที่ค่อยๆ ลดต่ำลงจนถึงจุดสมดุลกับสภาวะแวดล้อมหรือความชื้นของอากาศขณะนั้น ดังนั้นจึงใช้ desorption isotherm สำหรับกระบวนการทำแห้ง สำหรับการศึกษา adsorption isotherm จะต้องทำให้ตัวอย่างอาหารแห้งก่อน หลังจากนั้นนำไปปรับความชื้นในภาชนะปิดที่มีสารละลายเกลืออิ่มตัวที่เหมาะสม (Bell and Labuza, 2000) ซึ่งกราฟ adsorption หรือ resorption isotherm ใช้แสดงความชื้นของอาหารที่ค่อยๆ เพิ่มขึ้นเนื่องจากอาหารนั้นมีความสามารถในการดูดความชื้นจากอากาศได้ หากความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย หากอาหารมีความสามารถในการดูดความชื้นได้มาก เส้นกราฟ adsorption isotherm จะมีความชันมาก อาหารประเภทนี้เรียกว่า hygroscopic product และถ้าอาหาร

ไม่ว่าในการดูดซับความชื้น เส้นกราฟจะมีความชันน้อย อาหารประเภทนี้เรียกว่า non-hygroscopic product ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ความแตกต่างระหว่าง adsorption และ desorption isotherm คือ ที่ความชื้นหนึ่งๆ ของอาหารค่า  $a_w$  ของ desorption isotherm จะต่ำกว่า adsorption isotherm หรือที่ค่า  $a_w$  หนึ่งๆ ปริมาณความชื้นของ desorption จะมากกว่า adsorption เสมอ ซึ่งกระบวนการทั้งสองจะไม่สามารถย้อนกลับได้ (irreversible process) จึงทำให้เกิดปรากฏการณ์ฮิสเตอร์เรซิส (hysteresis) ซึ่งแสดงถึงความแตกต่างระหว่าง isotherm 2 ชนิดนี้ ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.5 adsorption isotherm ของสารประเภท hygroscopic product (A) และ non-hygroscopic product (B)

ที่มา: นิธิยา (2549)



รูปที่ 2.6 ซอร์ปชันไอโซเทอร์ม

ที่มา: Chaplin (2009)

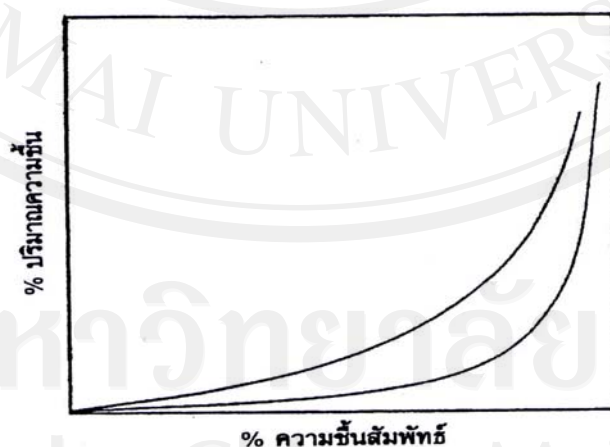
จากรูปที่ 2.6 สามารถแบ่งซอร์ปชันไอโซเทอร์มออกได้เป็น 3 ส่วนซึ่งจะแตกต่างกันตามปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในอาหารหรือค่า  $a_w$  (นิธิยา, 2549)

ส่วนที่ 1 (a) เส้นกราฟจะค่อนข้างชัน ปริมาณความชื้นส่วนใหญ่เป็นน้ำชั้นเดี่ยว (monomolecular layer) ซึ่งเป็นน้ำที่เกาะอยู่กับสารประกอบในอาหารอย่างเหนียวแน่น และมีค่า  $a_w$  อยู่ในช่วง 0-0.25 หรือ 0.3

ส่วนที่ 2 (b) เส้นกราฟค่อนข้างราบ สอดคล้องกับ capillary water ที่มีอยู่ในอาหารซึ่งเป็นน้ำที่กำจัดออกได้แต่ค่อนข้างยาก ถ้าปริมาณน้ำส่วนนี้ลดลงจะทำให้ค่า  $a_w$  ลดลงและยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์และปฏิกิริยาทางเคมีส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นในอาหารได้ ปริมาณความชื้นจะลดลงเหลือประมาณร้อยละ 3-7 ขึ้นอยู่กับชนิดของอาหารและอุณหภูมิ โดยมีค่า  $a_w$  อยู่ในช่วง 0.3-0.8

ส่วนที่ 3 (c) เป็นน้ำอิสระที่มีอยู่ในเนื้อเยื่ออาหารทั้งจากพืชและสัตว์ สามารถกำจัดออกได้ง่าย น้ำเหล่านี้จะทำหน้าที่เป็นตัวทำละลาย ถูกใช้สำหรับการเจริญของจุลินทรีย์และการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี อาหารจะมีความชื้นประมาณร้อยละ 12-25 และมีค่า  $a_w$  อยู่ในช่วง 0.8-1.0

อาหารหลายชนิดมีลักษณะ adsorption isotherm ต่างจากรูปที่ 2.6 คือเส้นกราฟจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ในช่วงแรก เมื่อค่า  $a_w$  เพิ่มขึ้นเป็นพวก low hygroscopicity และเส้นกราฟจะชันขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงปลายเป็นพวก high hygroscopicity ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งลักษณะ adsorption isotherm เช่นนี้เป็นสมบัติของอาหารที่มีปริมาณน้ำตาลหรือเกลือสูงเนื่องจากมี capillary adsorption ต่ำ ดังนั้นอาหารใดที่มีสมบัติเป็น hygroscopic เมื่อมีความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย จะทำให้ปริมาณความชื้นในอาหารเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (นิธิยา, 2549)



รูปที่ 2.7 ซอร์ปชันไอโซเทอร์มของอาหารที่มีปริมาณน้ำตาลหรือเกลือสูงและมี

Capillary adsorption ต่ำ

ที่มา: นิธิยา (2549)



การวิเคราะห์หาซอร์ปชันไอโซเทอร์มของอาหารมักทำที่อุณหภูมิห้อง อย่างไรก็ตามผลของอุณหภูมิต่อซอร์ปชันไอโซเทอร์มจะให้ข้อมูลที่สำคัญ โดยแสดงให้เห็นช่วงอุณหภูมิระหว่างการเก็บรักษา รวมถึงในช่วงกระบวนการผลิต อีกทั้งยังทราบการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำอิสระกับอุณหภูมิ ณ ปริมาณความชื้นที่เท่ากัน อุณหภูมิส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลน้ำในอาหาร และสมดุลไดนามิกสระหว่างไอน้ำและวัฏภาคที่ดูดซับ (adsorbed phase) สมดุลของน้ำจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่ค่า  $a_w$  คงที่ จากการวิจัยพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิเป็นผลให้โมเลกุลน้ำได้รับการกระตุ้นไปสู่ระดับพลังงานที่สูงกว่าและแตกพันธะออกจากส่วนที่น้ำยึดกับอาหารเป็นผลทำให้สมดุลของความชื้นลดลง อย่างไรก็ตามมีรายงานวิจัยพบว่าน้ำตาลที่ตกผลึกเช่นน้ำตาลกลูโคสในอาหารแห้งเป็นสาเหตุให้สมดุลของปริมาณความชื้น ณ อุณหภูมิต่างๆ แตกต่างกันที่ระดับค่า  $a_w$  สูงๆ Myhara and Sablani (2001) รายงานว่าปริมาณความชื้นสมดุลของลูกเกดที่มีน้ำตาลกลูโคสสูงหรือผลอินชผาลัมที่ระดับ  $a_w$  ต่ำจนถึง 0.55 จะลดลงเมื่ออุณหภูมิการเกิดซอร์ปชันเพิ่มขึ้นและที่ระดับค่า  $a_w$  สูงๆ ปริมาณความชื้นจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

การศึกษาซอร์ปชันไอโซเทอร์มจะทำในระบบปิดซึ่งมีการควบคุมสภาวะบรรยากาศให้มีความชื้นสัมพัทธ์คงที่ ซึ่งสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ถูกสร้างโดยการใช้สารละลายเกลืออิมิตัวต่างๆ ดังตารางที่ 2.4 ตัวอย่างอาหารที่ทราบน้ำหนักเริ่มต้นจะถูกเก็บไว้ในระบบนี้ความชื้นของอาหารปรับตัวจนกว่าจะสมดุลกับความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศที่เก็บรักษา โดยอาหารจะไม่มีน้ำหนักเพิ่มขึ้นหรือลดลงภายใต้การเก็บรักษาในสภาวะดังกล่าว (Ramaswamy and Marcotte, 2006)

ตารางที่ 2.4 ค่า  $a_w$  ของสารละลายเกลือที่แตกต่างกันที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

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

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

โดยซอร์ปชันไอโซเทอร์มจะใช้ทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้น การกำหนดสภาวะการอบแห้ง การคัดเลือกบรรจุภัณฑ์ เพื่อลดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมี และให้ปลอดภัยจากการเจริญของจุลินทรีย์ (นักสิทธิ์, 2546)

อาหารที่ถูกลดปริมาณความชื้นจะถูกเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทำให้มีรูปร่างที่ไม่แน่นอนหรืออยู่ในรูปอสัณฐาน (amorphous) หรือกลาส (glass) ซึ่งการเปลี่ยนสภาพจากกลาส (glassy state) ไปเป็นของเหลวหนืดคล้ายยาง (rubbery state) เกิดขึ้นที่อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน ( $T_g$ ) ซึ่งค่า  $T_g$  นี้จะเป็นค่าเฉพาะสำหรับอาหารแต่ละชนิด โดย  $T_g$  จะเป็นดัชนีบ่งชี้การเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพของอาหารระหว่างการแปรรูปและระหว่างการเก็บรักษา เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเหนือ  $T_g$  จะมีการเปลี่ยนแปลงหลายอย่าง เช่น ปริมาตร (free volume) เพิ่มขึ้น ความหนืดลดลง ความร้อนจำเพาะเพิ่มขึ้น การขยายตัวเนื่องจากความร้อนเพิ่มขึ้น (thermal expansion) การเปลี่ยนแปลงที่สำคัญเหล่านี้มีผลต่อพฤติกรรมของอาหารซึ่งเกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของโมเลกุลอาหารที่เพิ่มขึ้นและการลดลงของความหนืด ซึ่งปัจจัยเหล่านี้เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้าง เช่น เกิดความเหนียว การยุบตัว (collapse) และการตกผลึกระหว่างกระบวนการผลิตอาหารและการเก็บรักษา นอกจากนี้ปฏิกิริยาทางเคมีสามารถเกิดได้ง่ายขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของสารในอาหารสามารถเคลื่อนที่ได้มากขึ้น ซึ่งส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางเคมีของอาหาร มักจะใช้ค่า  $a_w$  และอุณหภูมิกลาสทรานซิชันเพื่อพิจารณาเสถียรภาพของอาหารในระหว่างการเก็บรักษา ผลิตภัณฑ์อาหารจะเสถียรมากที่สุดเมื่อความชื้นอยู่ในระดับความชื้นขั้นเดี่ยวนี มีค่า  $a_w$  0.1-0.3 หรือต่ำกว่า อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (Goula *et al.*, 2008) อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของคาร์โบไฮเดรตมักจะมีสัดส่วนผกผันกับน้ำหนักโมเลกุล โดย  $T_g$  ของกลูโคส กาแลคโตส ฟรักโตส มอลโทส และซูโครส มีค่าเท่ากับ 31, 32, 14, 87 และ 62 องศาเซลเซียส ตามลำดับ (Bhandari, 1998)

### 2.6.1 ความสำคัญของซอร์ปชันไอโซเทอร์มต่อเสถียรภาพของอาหาร

ซอร์ปชันไอโซเทอร์มเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการทำนายความคงตัวของอาหาร โดยซอร์ปชันไอโซเทอร์มจะเกี่ยวข้องกับความคงตัวของอาหารดังนี้

#### ก. ปฏิกิริยาทางเคมีและเอนไซม์ในอาหาร

ปฏิกิริยาทางเคมีของอาหาร เช่น การเกิดสีน้ำตาลจากปฏิกิริยาที่ไม่ใช่เอนไซม์ การเกิดออกซิเดชันของไขมัน การเสื่อมสลายของวิตามิน กิจกรรมของเอนไซม์ การเสถียรภาพของโปรตีน การเกิดเจลลิตีในเซชัน (gelatinization) ของแป้ง และการเกิดรีโทรกราเดชัน (retrogradation) ของแป้ง ความชื้นขั้นเดี่ยวนีในอาหารสามารถทำนายได้จากข้อมูล Brunauer Emmett Teller isotherm (BET isotherm) ซึ่งนิยมใช้ในการพิจารณาเสถียรภาพของอาหารแห่งที่ระดับความชื้นดังกล่าว

อัตราการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี เช่น การเกิดออกซิเดชันของไขมัน การเกิดสีน้ำตาลเนื่องมาจากปฏิกิริยาที่ไม่ใช่เอนไซม์จะเกิดขึ้นน้อยมาก ตัวอย่างปริมาณความชื้นขั้นต่ำของอาหารที่วิเคราะห์จาก BET adsorption isotherm ณ อุณหภูมิต่างๆ แสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ปริมาณความชื้นขั้นต่ำของอาหารบางชนิด

ชนิดอาหาร	$M_0$	T (°C)
อรุ่น	0.019	60
ซูโครส	0.057	47
บีทรูท	0.055	20
บีทรูท	0.045	35

ที่มา: Rahman (1995)

ความชื้นขั้นต่ำในอาหารจะทำให้มีค่า  $a_w$  อยู่ในช่วง 0.2-0.4 ถ้าความชื้นขั้นต่ำสูงกว่านี้ผลิตภัณฑ์อาหารจะสูญเสียคุณภาพได้ เนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมีส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นเมื่อ  $a_w$  มากกว่า 0.3 โดยน้ำจะมีอิทธิพลต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีดังต่อไปนี้

1. เป็นสารที่เข้าร่วมทำปฏิกิริยา (reactant) เช่น การไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ของซูโครส
2. น้ำทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่ของสารที่เข้าร่วมทำปฏิกิริยา โดยส่งผลต่อความหนืดของอาหาร

3. น้ำทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนหรืออาจเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับสารตัวอื่นๆ เช่น ส่งผลให้เกิดการออกซิเดชันของไขมันโดยการเข้าล้อมรอบโลหะที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาหรือเกิดพันธะไฮโดรเจนของ ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (hydroperoxides) กับน้ำ

4. อาจก่อให้เกิดการรวมตัวของโปรตีน และการเปลี่ยนแปลงสภาพของน้ำตาลและแป้งจาก amorphous ไปเป็น crystalline ปฏิกิริยาทางเคมีเกี่ยวข้องกับการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำอิสระ เนื่องจากจะเพิ่มการเคลื่อนที่ของสารตั้งต้นที่เข้าทำปฏิกิริยา ยกเว้นปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน อัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ต่ำที่สุดในอาหารจะมีค่า  $a_w$  ในช่วง 0.2-0.4 (Rahman, 1995)

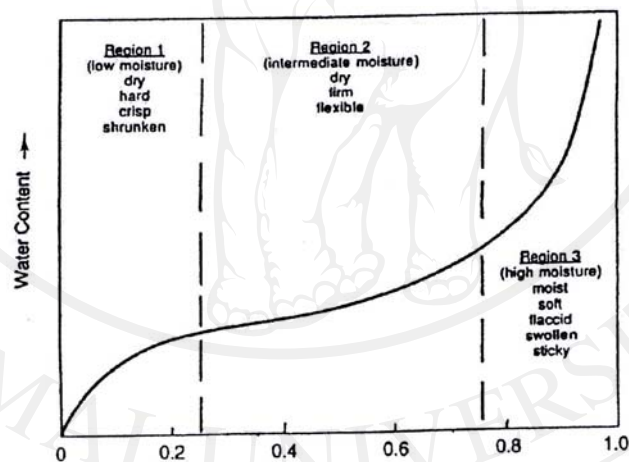
#### ข. เสถียรภาพของรงควัตถุในอาหาร

เสถียรภาพของรงควัตถุในอาหารขึ้นอยู่กับปริมาณออกซิเจน แสง ปฏิกิริยาออกซิเดชัน ปริมาณโลหะหนัก ค่า  $a_w$  ความเป็นกรด-ด่าง และอุณหภูมิ เป็นต้น โดยรงควัตถุที่มีผลต่อสีของอาหาร

เช่น คลอโรฟิลล์ แคโรทีนอยด์ แอนโทไซยานิน และบีตาเลน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงสีหรือการเกิดสีน้ำตาลของอาหารแห้งในระหว่างการเก็บรักษาจะขึ้นอยู่กับค่า  $a_w$  และอุณหภูมิในการเก็บรักษา โดยอัตราการเกิดสีน้ำตาลเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อมีค่า  $a_w$  เพิ่มขึ้นหรือความชื้นสูง และอุณหภูมิในการเก็บรักษาเกิน 38 องศาเซลเซียส (Rahman, 1995) การควบคุมค่า  $a_w$  ในอาหารและอุณหภูมิการเก็บรักษาจึงเป็นวิธีที่ดีในการควบคุมปัญหาการเปลี่ยนแปลงของรงควัตถุและการเกิดสีน้ำตาลเนื่องจากปฏิกิริยาเมลลาร์ด (maillard reaction) (วิไล, 2546)

### ค. ลักษณะด้านเนื้อสัมผัสของอาหาร

เนื้อสัมผัสของอาหารสัมพันธ์กับซอร์ปชันไอโซเทอร์ม ดังรูปที่ 2.8 โดยส่วนที่ 1 มีค่า  $a_w$  ต่ำ อาหารจะมีลักษณะแห้ง แข็ง กรอบและหดตัว ส่วนที่ 2 มีค่า  $a_w$  ปานกลาง อาหารจะมีลักษณะแห้ง แน่นเนื้อ และยืดหยุ่น ส่วนที่ 3 มีค่า  $a_w$  สูง อาหารจะมีลักษณะค่อนข้างชื้น อ่อนตัว ฉ่ำน้ำ (juicy) บวมน้ำ (swollen) และเกาะตัวกัน (Rahman, 1995)



รูปที่ 2.8 ลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหารที่ระดับวอเตอร์แอกทิวิตี ( $a_w$ ) ต่างๆ

ที่มา: Rahman (1995)

การเกาะตัวกันของอาหารเกิดจากการเปลี่ยนแปลงสภาพจากกลาส (amorphous glass) ไปเป็นของเหลวหนืด (amorphous rubber) ปริมาณความชื้นหรือค่า  $a_w$  มีผลต่อการเกาะติดกันของอนุภาค โดยทั่วไปอาหารที่มีปริมาณน้ำตาลสูงหากมีความชื้นเพิ่มขึ้นจนกระทั่งมีค่า  $a_w$  มากกว่า 0.4 การเชื่อมโยงระหว่างอนุภาคจะเกิดขึ้นเป็นผลทำให้เกิดการเกาะตัวกันของอนุภาค ดังนั้นเพื่อป้องกันปัญหาการเกาะตัวกันจึงต้องมีการศึกษาซอร์ปชันไอโซเทอร์มของส่วนผสมอาหาร (Bell and Labuza, 2000) และควบคุมค่า  $a_w$  ของอาหารให้ต่ำกว่าระดับที่มีการเกาะติดของอนุภาคของอาหาร

### ง. การเจริญของจุลินทรีย์และการผลิตสารพิษในอาหาร

อาหารโดยส่วนใหญ่จะมีค่า  $a_w$  อยู่ในช่วง 0.6-0.7 โดยแบคทีเรียส่วนใหญ่ ยีสต์และราจะเจริญเมื่อค่า  $a_w$  ของอาหารอยู่ในช่วง 0.9 (ตารางที่ 2.5) ดังนั้นซอร์ปชันไอโซเทอร์มสามารถทำนายปริมาณความชื้นระดับสูงสุดของอาหารที่สามารถเก็บรักษาได้โดยไม่เกิดการเสื่อมเสียเนื่องจากจุลินทรีย์ โดยค่า  $a_w$  ของอาหารควรจะต่ำพอที่จะยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ ดังตารางที่ 2.6 (Rahman, 1995)

ตารางที่ 2.6 ระดับของค่า  $a_w$  ที่สามารถยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์

$a_w$	$a_w$ ที่สามารถยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ในอาหาร
0.95	<i>Bacillus, Clostridium perfringens, Escherichia, Klebsiella, Proteus, Pseudomonas, Shigella</i> , ยีสต์บางชนิด
0.91	<i>Clostridium botulinum, Lactobacillus, Pediococcus, Salmonella, Serratia, Vibrio parahaemolyticus</i> ราและยีสต์บางชนิด
0.87	<i>Micrococcus</i> , ยีสต์ทุกชนิด
0.80	<i>Debaryomyces, Saccharomyces, Staphylococcus aureus</i>
0.75	แบคทีเรีย halophilic ส่วนใหญ่
0.65	ราจำพวก Xerophilic
0.60	ยีสต์จำพวก osmophilic ราบางชนิด
น้อยกว่า 0.5	ไม่มีจุลินทรีย์ชนิดใดเจริญได้

ที่มา: Bell and Labuza (2000)

#### 2.6.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของซอร์ปชันไอโซเทอร์ม

อาหารแต่ละชนิดจะมีซอร์ปชันไอโซเทอร์มแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางกายภาพ องค์ประกอบทางเคมี และปริมาณน้ำที่ยึดอยู่ในอาหาร (วิล, 2546) การศึกษาซอร์ปชันไอโซเทอร์มนั้นเป็นกระบวนการที่ค่อนข้างซับซ้อนและใช้เวลานาน ดังนั้นจึงมีนักวิจัยคิดค้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการทำนายซอร์ปชันไอโซเทอร์ม ซึ่งจะช่วยให้มีการประหยัดเวลา และนำไปใช้ในการทำนายและควบคุมการเก็บรักษาของอาหารได้อย่างเหมาะสม แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายซอร์ปชันไอโซเทอร์ม สามารถจำแนกได้ตามจำนวนตัวแปรที่มีในสมการ ดังต่อไปนี้ (Rahman, 1995)



### 2.6.2.1. Isotherms ประเภท 2 ตัวแปร ได้แก่

ก. แบบจำลองของ Smith

Smith (1947) เป็นแบบจำลองอย่างง่ายที่ใช้อธิบาย water sorption isotherm ของพอลิเมอร์ชีวภาพ (bio-polymers) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ซึ่ง Becker and Sallans (1956) พบว่าสมการนี้ใช้ได้ดี ในกรณี desorption ของข้าวสาลี ที่มีค่า  $a_w$  อยู่ระหว่าง 0.5-0.95 อย่างไรก็ตาม Young (1976) แนะนำว่าสมการนี้มีข้อจำกัดที่ว่าค่า  $a_w$  ต้องมากกว่า 0.31 หรือเหมาะสำหรับ  $a_w$  ช่วง 0.3-0.9 (Kumar and Siddaramaiah, 2007) สมการของ Smith ดังสมการ (5)

$$M_w = A + B \ln(1 - a_w) \quad (5)$$

เมื่อ  $M_w$  = ความชื้น (g น้ำ/g ของแข็งแห้ง)

A, B = ค่าคงที่

ข. แบบจำลองของ Oswin

Oswin (1946) ได้พัฒนาสมการอย่างง่าย เป็นสมการ polynomial ดังสมการ (6)

$$M_w = A \left[ \frac{a_w}{1 - a_w} \right]^B \quad (6)$$

เมื่อ  $M_w$  = ความชื้น (g น้ำ/g ของแข็งแห้ง)

A, B = ค่าคงที่

Boquet *et al.* (1978) กล่าวว่า สมการของ Oswin ใช้ได้ดีที่สุดสำหรับการอธิบายไอโซเทอร์มของอาหารที่มีโปรตีน และคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบ และใช้ได้ดีสำหรับอาหารประเภทเนื้อ และผักต่างๆ

ค. แบบจำลองของ Henderson

$$M_w = \left[ \frac{\ln(1 - a_w)}{-A} \right]^{1/B} \quad (7)$$

เมื่อ  $M_w$  = ความชื้น (g น้ำ/g ของแข็งแห้ง)

A, B = ค่าคงที่

ง. แบบจำลองของ Brunauer-Emmett-Teller (BET)

แบบจำลอง BET ถูกค้นพบโดย Brunauer *et al.* (1938) ไอโซเทอร์มของ BET ส่วนใหญ่จะใช้ที่ค่า  $a_w$  อยู่ระหว่าง 0.05-0.45 หรือเป็นช่วงซอร์ปชันไอโซเทอร์มที่เป็นเส้นตรง ดังสมการ (8)

$$M_w = \frac{M_0 k a_w}{(1 - a_w)[1 + (k - 1)a_w]} \quad (8)$$

$M_0$  = ปริมาณความชื้นชั้นเดียว (monolayer moisture)

$k$  = ค่าคงที่ที่สัมพันธ์กับความร้อนสุทธิทั้งหมดของ sorption

จ. แบบจำลองของ Halsey

Halsey (1948) ได้พัฒนาสมการนี้เพื่อใช้ทำนายในช่วงที่ BET ทำนายไม่ได้ โดยสามารถใช้ได้กับอาหารหลายชนิด ซึ่งองค์ประกอบของอาหารมีค่า  $a_w$  อยู่ในช่วง 0.1-0.8 ซึ่งสมการของ Halsey (1948) ดังสมการ (9) หรือ (10)

$$M_w = \left[ -\frac{A}{\ln a_w} \right]^{1/B} \quad (9)$$

$$\ln(M_w) = A + B \{ \ln[-\ln(a_w)] \} \quad (10)$$

เมื่อ  $M_w$  = ความชื้น (g น้ำ/g ของแข็งแห้ง)

$A, B$  = ค่าคงที่

ฉ. แบบจำลองของ Chung and Pfof

Chung and Pfof (1967) เป็นแบบจำลองที่แสดงการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระสำหรับ sorption isotherms ที่สัมพันธ์กับปริมาณความชื้น ดังสมการ (11)

$$M_w = -\frac{1}{B} \ln \left[ -\frac{\ln a_w}{A} \right] \quad (11)$$

เมื่อ  $M_w$  = ความชื้น (g น้ำ/g ของแข็งแห้ง)

$A, B$  = ค่าคงที่

ช. แบบจำลองของ Iglesias and Chirife

Iglesias and Chirife (1978) เป็นแบบจำลองที่ออกแบบมาเพื่อใช้อธิบายลักษณะอาหารที่มีน้ำตาลสูง ดังสมการ (12)

$$\ln[ M_w + (M_w^2 + M_{0.5w})^{1/2} ] = Aa_w + B \quad (12)$$

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

ซ. แบบจำลองของ Caurie ดังสมการ (13)

$$\frac{1}{M_w} = \frac{1}{C_c M_0} \left( \frac{1 - a_w}{a_w} \right)^{(2C_c / M_m)} \quad (13)$$

เมื่อ  $C_c$  = ค่าคงที่ของ Caurie

$M_0$  = ปริมาณความชื้นชั้นเดี่ยว (monolayer moisture)

### 2.6.2.2. Isotherms ประเภท 3 ตัวแปร ได้แก่

ก. แบบจำลองของ Cubic

สมการโพลิโนเมียลกำลังสาม ใช้สำหรับอธิบาย กราฟซอร์ปชันไอโซเทอร์มรูปโค้งกลับอย่างง่าย ดังสมการที่ 14

$$M_w = p_1 + p_2 a_w + p_3 a_w^2 + p_4 a_w^3 \quad (14)$$

กำหนดให้  $P_i$  = ค่าคงที่ของ sorption isotherms

ข. แบบจำลองของ Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB) เป็นสมการที่ใช้สำหรับวัตถุดิบอาหารหลากหลายชนิดที่มีค่า  $a_w$  อยู่ในช่วงกว้าง ดังสมการ (15)

$$M_w = \frac{M_{gm} Y k a_w}{(1 - k a_w)(1 - k a_w + Y k a_w)} \quad (15)$$

เมื่อ  $M_{gm}$  = GAB monolayer moisture (kg water/kg dry solid)

Y และ K = ค่าคงที่ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากอุณหภูมิ

### 2.4.2.3. Isotherms ประเภท 4 ตัวแปร ได้แก่

ก. แบบจำลองของ Peleg เป็นสมการ 4 ตัวแปรอย่างง่ายที่สุด ดังสมการ (16)

$$M_w = Aa_w^C + Ba_w^D \quad (16)$$

เมื่อ A, B, C และ D คือค่าคงที่ โดย  $C < 1$  และ  $D > 1$  สมการนี้ใช้ได้ทั้งกราฟ isotherm ที่เป็น polynomial และไม่เป็น polynomial เป็นสมการที่ดีกว่าสมการ GAB

ดังนั้นการศึกษาชอร์ปชันไอโซเทอร์มของผลิตภัณฑ์เนื้อลำไยคอบแห้งเพื่อใช้ทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของผลิตภัณฑ์เนื้อลำไยคอบแห้งเมื่ออยู่ในระดับความชื้นสัมพัทธ์หรือค่า  $a_w$  และอุณหภูมิต่างๆ จึงมีความสำคัญในการประเมินความคงตัวหรือแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของอาหารในระหว่างการเก็บรักษา และสามารถนำข้อมูลไปวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการทำนายลักษณะชอร์ปชันไอโซเทอร์มของผลิตภัณฑ์ ซึ่งจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการควบคุมคุณภาพระหว่างการผลิตและการเก็บรักษาต่อไป

## 2.7 อุณหภูมิกลาสทรานซิชันและสมบัติการเกาะติดของอาหารแห้ง

อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (Glass transition temperature;  $T_g$ ) หมายถึง อุณหภูมิที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของอาหารจากที่มีโครงสร้างอสัณฐาน (amorphous) หรือมีสถานะคล้ายแก้ว (glassy state) ไปเป็นสถานะของเหลวหนืดคล้ายยาง (rubbery state) ซึ่งความสามารถในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลในสถานะคล้ายแก้วนั้นต่ำ เนื่องจากของผสมมีความหนืดสูง (ประมาณ  $10^{12}$  Pa) (Silva *et al.*, 2006) โดยสามารถวิเคราะห์อุณหภูมิดังกล่าวได้ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อน เช่น เครื่องสแกนนิ่ง แคลอริมิเตอร์ เป็นต้น ซึ่งการเปลี่ยนรูปแบบโครงสร้างที่สัมพันธ์กับความหนืด เช่น การเกาะติด (stickiness), การยืดหยุ่น (elasticity), การยุบตัว (collapse), การหดตัว (shrinkage) และการตกผลึก (crystallization) ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (Sopade *et al.*, 2007)

ระดับอุณหภูมิกลาสทรานซิชันขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุล และโครงสร้างเฉพาะของตัวถูกละลายและยังขึ้นอยู่กับปริมาณของตัวทำละลายที่ปรากฏ (Rahman, 1995) ค่า  $T_g$  ถูกใช้เป็นดัชนีคุณภาพทางเคมีกายภาพที่สามารถวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการผลิต คุณภาพ ความคงตัว และความปลอดภัยของอาหาร (Barbosa-Cánovas and Vega-Mercado, 1996) อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของอาหารที่ผ่านการทำให้แห้ง เป็นตัวแปรสำคัญในการอธิบายกลไกของกระบวนการเปลี่ยนรูปในอาหาร และการควบคุมอายุการเก็บรักษาของอาหารนั้น (Omar and Roos, 2007)