

## บทที่ 2

### ทฤษฎีพื้นฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับใบเตย

ใบเตย หรือเตยหอม จัดอยู่ในวงศ์ Pandanaceae และชนิด *P. amaryllifolius* Roxb. เป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยวลักษณะแตกออกเป็นพุ่มขนาดเล็ก ใบเรียวยาว ขอบใบเรียบ ผิวใบบนเป็นมันมีสีเขียวเข้มกว่าผิวใบล่าง ใบสดมีกลิ่นหอมเหมือนข้าวใหม่ โดยปกติมักนำใบเตยมาประกอบอาหารเป็นสารให้สีและกลิ่นที่ใช้ได้อย่างปลอดภัย (Lechat *et al.*, 1996)



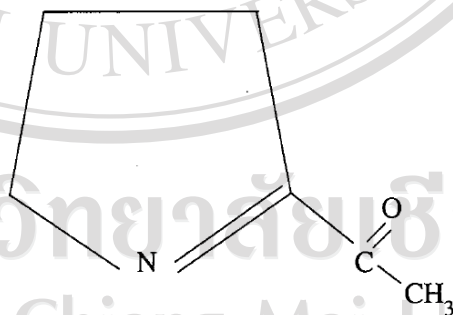
ภาพ 2.1 ใบเตย

##### 2.1.1 สารหอมหลักจากใบเตย

Buttery *et al.* (1983) ได้ค้นพบว่าสารที่ให้กลิ่นหอมหลักในใบเตยคือสารประกอบ 2-Acetyl-1-Pyrroline (ACPY) ซึ่งสกัดได้จากใบเตยที่ผ่านการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (freeze drying) ด้วยชุดสกัดไอน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์แบบต่อเนื่อง (simultaneous steam distillation/solvent extraction apparatus) ซึ่งสารประกอบ ACPY ดังกล่าวเป็นสารประกอบ

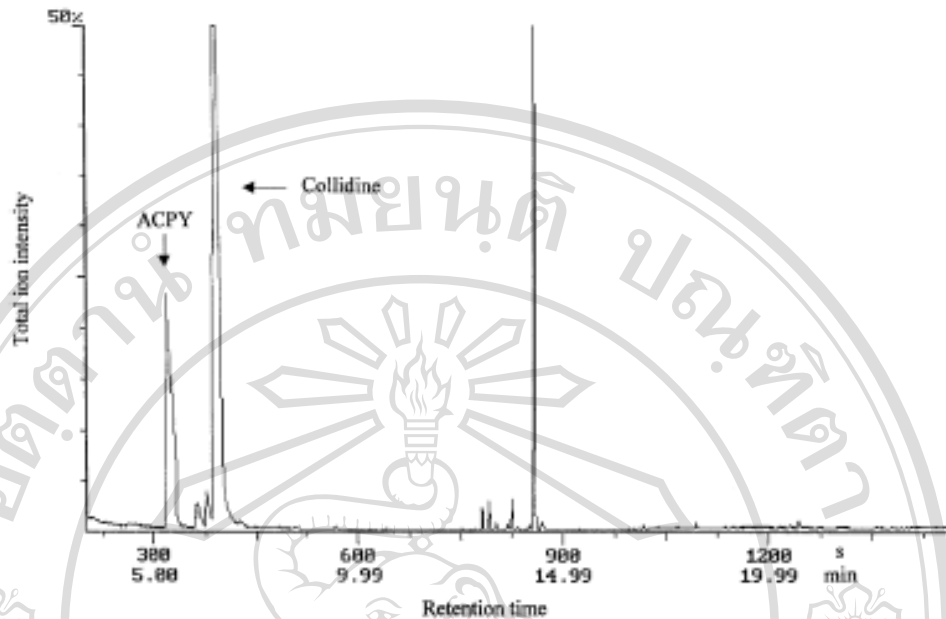
ประเภท heterocyclic มีโครงสร้างและลักษณะเป็นสารประกอบในกลุ่ม pyrrole ซึ่งเป็นวงขนาด 5 เหลี่ยมที่มีอะตอมไนโตรเจนอยู่ในวง มีพันธะคู่ระหว่างคาร์บอนกับไนโตรเจน (C=N) และมีหมู่ acetyl เกาะกับคาร์บอนที่เกิดพันธะดังกล่าวที่ 2.2 สารประกอบ ACPY จะมีลักษณะทางกายภาพเป็นของเหลวใสไม่มีสี มีสมบัติเป็นด่างเล็กน้อยสามารถระเหยได้ง่าย และไม่เสถียรเมื่ออยู่ในรูปสารบริสุทธิ์ (จริยาพร, 2544) สาร ACPY นอกจากจะเป็นสารประกอบหลักที่พบได้ในใบเตยแล้วยังสามารถพบได้ในข้าวโพดคั่ว ข้าวโพดหวานสด ข้าวโพดหวานแช่แข็ง ข้าวโพดหวานบรรจุกระป๋อง ข้าวหอมมะลิ ขนมปังจากแป้งสาลี แป้งข้าวไรน์ที่ผ่านการอบใหม่ และในดอกชมนาด (Schieberle and Grosch, 1985; Buttery *et al.*, 1994; Buttery and Ling, 1995; สุกัญญา, 2540) นอกจากนี้ยังพบสาร ACPY ในกระบวนการผลิตต่างๆ โดยเฉพาะในกระบวนการทำอาหารให้สุกด้วยความร้อน เช่น ใน Baguette crusts (Zehentbauer and Grosch, 1998) กุ้งนางสายพันธุ์ *Procambarus clarkii* (Cadwallader and Baek, 1998) มันฝรั่งต้ม (Mutti and Grosch, 1999) เมล็ดมะม่วงหิมพานต์อบ สายพันธุ์ *Irvingia gabonensis* (Tairu *et al.*, 2000) ไม้กระถอกกระเทียมสไตล์ อิตาลีและแฮมที่ผ่านความร้อน (Blank *et al.*, 2001) และกุ้งก้ามกราม (*Homarus americanus*) (Lee *et al.*, 2001) เป็นต้น

Apintanapong and Noomhorm (2003) ได้ตรวจสอบสารประกอบ ACPY ที่สกัดได้จากใบเตยด้วยวิธีการกลั่นด้วยไอน้ำ และใช้เทคนิค Gas chromatography - Mass spectrometry (GC-MS) วิเคราะห์พบว่ามีความเร็วในการเคลื่อนที่เท่ากับ 5.33 นาทีดังภาพที่ 2.3



ภาพ 2.2 โครงสร้างของสารประกอบ 2-Acetyl-1-Pyrroline

ที่มา : Buttery *et al.* (1982)

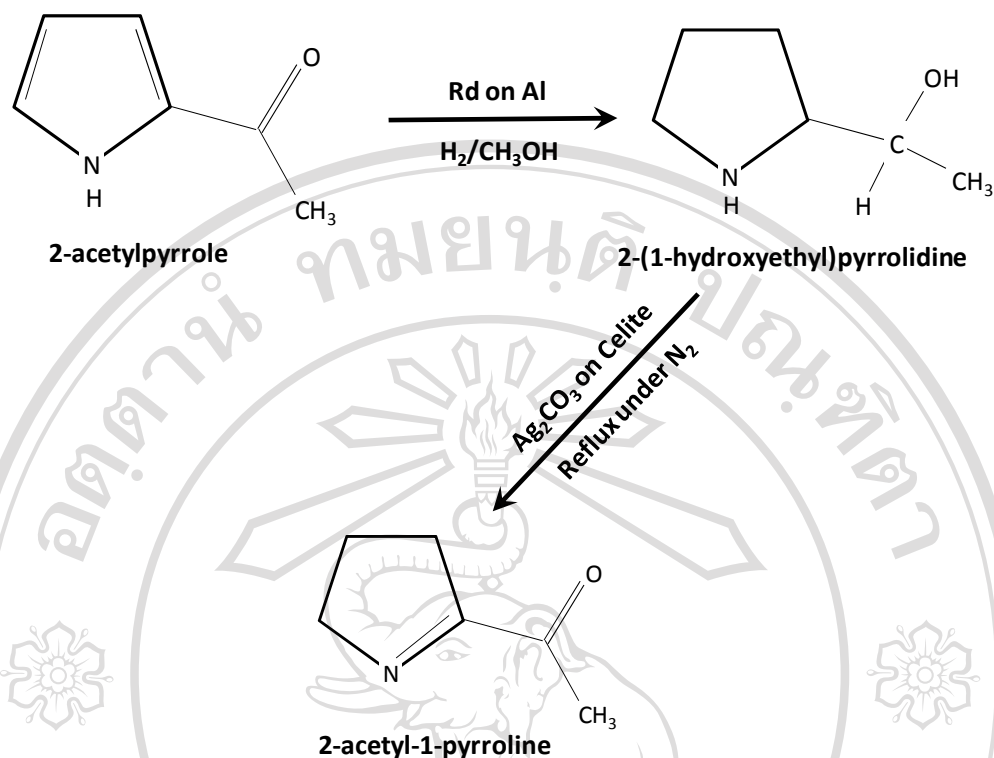


ภาพ 2.3 โครมาโตแกรมที่ได้จากสารสกัดจากใบเตยด้วยวิธีการกลั่นด้วยไอน้ำ  
ที่มา : Apintanapong and Noomhorm (2003)

#### 2.1.2 การสังเคราะห์สาร 2-Acetyl-1-Pyrroline

Buttery *et al.* (1982) ได้ทำการสังเคราะห์สาร ACPY โดยใช้สาร 2-acetyl-pyrrole เป็นสารตั้งต้นทำปฏิกิริยา reduction โดยมี rhodium-on-alumina เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ผลิตภัณฑ์คือ 2-(1-hydroxyethyl)-pyrrolidine และสารดังกล่าวจะเกิดปฏิกิริยา oxidation กับ silver carbonate (on celite) ในสารละลายเบนซีนภายใต้บรรยากาศที่มีไนโตรเจน และจะได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายคือสาร ACPY ดังภาพที่ 2.4

มีงานวิจัยจำนวนมากที่นำสาร ACPY ทั้งที่สกัดได้จากใบเตย และจากการสังเคราะห์มาใช้ประโยชน์ โดยมักนำสารดังกล่าวมาเพิ่มความหอมให้กับผลิตภัณฑ์ เช่น ข้าวขาวกลุ่มที่ไม่ใช่ข้าวสายพันธุ์หอม เจลน้ำยาปรับอากาศ และการพัฒนาสารตรึงกลิ่นในบุหงา (ณัฐฐา และคณะ, 2546; ปานทิพย์ และคณะ 2550; Laohakunjit and Kerdchoechuen, 2007)



ภาพ 2.4 การสังเคราะห์สาร 2-Acetyl-1-Pyrroline

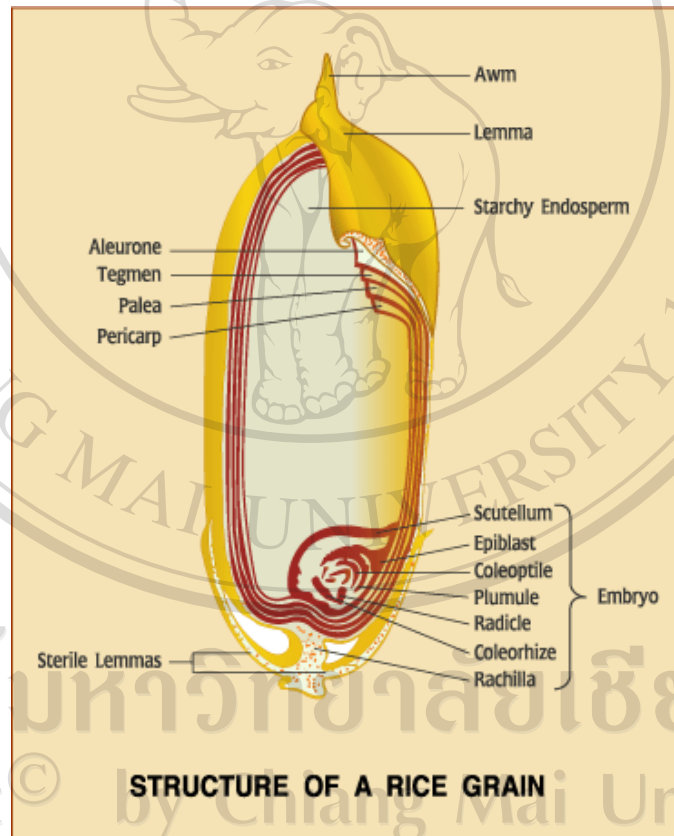
## 2.2 ข้าว

ข้าวจัดเป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยว วงศ์หญ้า (Family: Grammineae หรือ Poaceae) สกุลออริซา (Genus: *Oryza*) เจริญเติบโตได้ดีในเขตร้อนและอบอุ่น ข้าวเป็นพืชอาหารที่สำคัญชนิดหนึ่งของโลก โดยเฉพาะในภูมิภาคเอเชีย โดยข้าวที่นำมาปลูกเป็นอาหารนั้นแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ ข้าวที่ปลูกในแถบเอเชียสายพันธุ์ *Oryza sativa* Linn. และ ข้าวที่ปลูกในแถบแอฟริกาสายพันธุ์ *Oryza glaberrima* Steud. มีจำนวนพันธุ์มากกว่า 120,000 พันธุ์ ที่มีชื่อและลักษณะที่แตกต่างกัน

เมล็ดข้าวประกอบด้วย เปลือกหุ้มเมล็ด (Hull) ซึ่งจะหุ้มข้าวกล้อง ในเมล็ดข้าวกล้องประกอบด้วยจมูกข้าว (Germ) รำข้าว (bran) และเมล็ดข้าวขาวหรือเมล็ดข้าวสาร (Endosperm) แสดงดังภาพที่ 2.5 และ 2.6



ภาพ 2.5 a) ข้าวเปลือก b) ข้าวกล้อง c) ข้าวขาว



ภาพ 2.6 องค์ประกอบของเมล็ดข้าว

ที่มา : [www.teksengricemill.com/knowled/structure.htm](http://www.teksengricemill.com/knowled/structure.htm)

เมล็ดข้าวมีองค์ประกอบต่างๆดังนี้ (อรอนงค์, 2547)

- ก. แกลบ ประกอบไปด้วย โปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต เถ้า สารซิลิกา แคลเซียม ฟอสฟอรัส ลิกนิน เซลลูโลส เพนโตแซน เฮมิเซลลูโลส และอื่นๆสามารถนำแกลบไปใช้ประโยชน์ได้

หลายอย่าง เช่น ทำปุ๋ย นำไปเผาใช้เป็นพลังงานความร้อนได้ หรือใส่ในนาข้าวเพื่อปรับสภาพดิน

- ข. ข้าวกล้อง เมื่อนำข้าวกล้องมาขัดเอาผิวออกจะได้รำหยาบและจมูกข้าว (5 – 8%) รำละเอียดและจมูกข้าว (2–3%) และข้าวสาร (60-73%) องค์ประกอบหลักของเมล็ดข้าวคือคาร์โบไฮเดรตหรือแป้งข้าว (Starch)
- ค. คาร์โบไฮเดรตหรือแป้งข้าว ข้าวจะมีแป้งอยู่ 90% ของน้ำหนักแห้ง แป้งข้าวสามารถแยกออกเป็นองค์ประกอบย่อย 2 ชนิด ได้แก่ อมิโลเพคติน (amylopectin) และอมิโลส (amylose) อมิโลเพคตินประกอบด้วยโมเลกุลของกลูโคสจัดเรียงตัวเป็นพอลิเมอร์ที่มีแขนง 96% ต่อกันด้วยพันธะ  $\alpha$ -1,4 อีก 4% ต่อกันด้วยพันธะ  $\alpha$ -1,6 สำหรับอมิโลส ประกอบด้วยโมเลกุลของกลูโคสจัดเรียงตัวเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้น (linear chains) ด้วยพันธะ  $\alpha$ -1,4 มีโซ่กิ่ง (branched chain) 3-4 กิ่งด้วยพันธะ  $\alpha$ -1,6
- ง. โปรตีน เมล็ดข้าวมีส่วนประกอบของโปรตีนอยู่ประมาณ 4.3 – 18.2 % หรือเฉลี่ย 9.5 % เป็นอันดับสองรองจากแป้ง โดยปริมาณโปรตีนที่พบในเมล็ดข้าวจะขึ้นอยู่กับสถานที่ปลูกและสภาพแวดล้อม
- จ. ไขมัน ไขมันที่อยู่ในเมล็ดข้าวมักจะอยู่ในสภาพเป็นหยดไขมันเล็กๆ ขนาดเล็กกว่า 1.5 ไมครอนอยู่บริเวณเยื่อหุ้มผิวเมล็ด และจมูกข้าว เมล็ดข้าวมีไขมัน 1.6 – 2.8 % ส่วนใหญ่อยู่ในรำข้าว ไขมันที่ได้จากข้าวเป็นไขมันที่มีคุณภาพดี โดยมีปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูง ได้แก่ Linoleic acid, Oleic acid และ Palmitoleic acid มีสารแกมมา ออไรซานอล (Gamma Oryzanol) ที่ช่วยในการควบคุมระดับโคเลสเตอรอลในเส้นเลือด และช่วยในการเจริญเติบโตของทารกในครรภ์ เด็กแรกเกิด และเด็กเล็ก

ข้าวสารที่มีอายุมากจะมีความแข็งแรงมากกว่าข้าวสารใหม่ เมื่อเก็บข้าวเป็นระยะเวลาานขึ้นอมิโลสและกรดไขมันในข้าวจะจับตัวกันเป็นสารประกอบขึ้น ทำให้เมล็ดแป้งสามารถพองตัวในน้ำได้ลดลง และกรดไขมันไม่อิ่มตัวในแป้งจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเป็นสารประกอบคาร์บอนิล ซึ่งจะไปทำปฏิกิริยากับโปรตีนทำให้ความสามารถในการละลายของโปรตีนลดลง ส่งผลให้ข้าวสารเก่าใช้ระยะเวลาในการหุงนานขึ้น

ข้าวที่ค้าขายกันในตลาดโลกเกือบทั้งหมดเป็นข้าวที่ปลูกจากแถบเอเชีย ซึ่งสามารถแบ่งได้ตามแหล่งปลูก คือข้าวอินดิกา (Indica) มีลักษณะเมล็ดยาวรี ต้นสูง เป็นข้าวที่ปลูกในเอเชียเขตรมรุ่ม ตั้งแต่ จีน เวียดนาม ฟิลิปปินส์ ไทย อินโดนีเซีย อินเดีย และศรีลังกา ข้าวพันธุ์นี้ค้นพบครั้งแรกในอินเดียและต่อมาได้พัฒนาไปปลูกที่ทวีปอเมริกา ข้าวจาปอนิกา (Japonica) เป็นข้าวที่ปลูก

ในเขตอบอุ่น เช่น จีน ญี่ปุ่น เกาหลี มีลักษณะเมล็ดป้อมกลมรี ต้นเตี้ย และข้าวจาวานิกา (Javanica) ปลูกในอินโดนีเซียและฟิลิปปินส์ มีเมล็ดป้อมใหญ่แต่ไม่ได้รับความนิยมเพราะให้ผลผลิตต่ำ สำหรับข้าวที่ปลูกในไทยเป็นพันธุ์ข้าวเมล็ดยาวคือ ข้าวอินดิกา แต่ประกอบด้วยหลายพันธุ์ทั้งที่มีการพัฒนาขึ้นมาใหม่ และข้าวพันธุ์พื้นเมืองซึ่งมีอยู่ประมาณ 3,500 พันธุ์ ซึ่งมีข้าวป่า ข้าวพื้นเมือง และข้าวพันธุ์ที่ผสมโดยมนุษย์ขึ้นมาใหม่ แต่ข้าวพันธุ์ที่สร้างชื่อเสียงให้กับไทยมากที่สุด คือ ข้าวหอมมะลิ (อรอนงค์, 2547; Thai FTA, 2551)

### 2.2.1 ข้าวหอมมะลิ

ข้าวหอมมะลิ (Thai jasmine rice) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Oryza sativa* Linn. เป็นสายพันธุ์ข้าวที่มีถิ่นกำเนิดในประเทศไทย เป็นข้าวที่มีความไวต่อช่วงแสงโดยออกดอกในวันที่กลางคืนยาวกว่ากลางวันเท่านั้นคือในช่วงฤดูหนาวทำให้สามารถปลูกได้เฉพาะนาปีเท่านั้น สำหรับชื่อเรียกว่าข้าวหอมมะลินั้น มีที่มาจากสีของข้าวที่ขาวเหมือนดอกมะลิแต่มีกลิ่นหอมเหมือนใบเตย ไม่ได้หมายความว่าข้าวนั้นหอมเหมือนมะลิ โดยมีลักษณะที่สำคัญคือเมื่อหุงหรือหนึ่งสุกแล้วเมล็ดข้าวสุกจะอ่อนนุ่มมากกว่าข้าวเจ้าทั่วไปแต่ร่วนน้อยกว่า และมีกลิ่นหอมตามธรรมชาติ สายพันธุ์ที่สำคัญ ได้แก่ พันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 (Kao Dawk Mali 105) เป็นข้าวที่ได้จากการคัดเลือกพันธุ์จากข้าวพื้นเมือง และพันธุ์กข 15 ได้จากการนำข้าวขาวดอกมะลิ 105 มาอบรังสีแกมมา ให้มีผลผลิตใกล้เคียงกับข้าวขาวดอกมะลิ 105 และมีอายุเก็บเกี่ยวที่สั้นลง (กรมการข้าวกระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2551; Buttery *et al.*, 1983; Laksanalamai and Ilangantileke, 1993; อรอนงค์, 2547; Thai FTA, 2551)

### 2.2.2 สารหอมหลักในข้าวหอมมะลิ

สารหอมหลักที่พบในข้าวหอมมะลิคือสาร ACPY ค้นพบครั้งแรกโดย Buttery *et al.* (1982) โดยสาร ACPY นี้จะไม่พบในข้าวที่ไม่ใช่สายพันธุ์หอม มีความไวต่อแสง และอุณหภูมิ ซึ่งจะส่งผลให้มีปริมาณสารหอมลดลง จนใกล้เคียงกับข้าวพันธุ์ไม่หอมหากเก็บรักษาไว้นานเกินไป

### 2.3 การสกัดสารให้กลิ่น

การสกัดสารให้กลิ่นมีอยู่หลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีย่อมมีความเหมาะสมต่อสารที่จะทำการสกัดแตกต่างกัน โดยต้องคำนึงถึงความสามารถในการระเหย และจุดเดือดของสารให้กลิ่นนั้น วัตถุประสงค์ที่จะทำการสกัดว่าต้องการสกัดเชิงปริมาณ หรือเชิงคุณภาพ ความเสถียรของสารให้

กลิ่น ความซับซ้อนโครงสร้าง และความเข้มข้นของสารให้กลิ่นจากวัตถุดิบ ในการสกัดสารให้กลิ่นจากวัตถุดิบโดยตรงมีด้วยกันหลายวิธี เช่น การหีบหรืออัด (pressing) การกลั่น (distillation) การสกัด (extraction) และการสกัดด้วยตัวทำละลายอย่างต่อเนื่อง (simultaneous steam distillation and extraction: SDE)

### 2.3.1 การหีบหรืออัด (pressing)

การหีบหรือบีบ เป็นวิธีการแยกสารให้กลิ่นที่ใช้กับพืชชนิดที่มีน้ำมันหอมระเหยอยู่ในเปลือก เช่นผลไม้ตระกูลส้ม (ส้ม มะนาว และมะกรูด) ทำได้ 3 วิธี คือ Sponge process, Ecuelle method และ Machine process (น้องนุชและคณะ, 2545)

Sponge process จะใช้เครื่องมือที่ประกอบด้วยไม้ 2 แผ่น มีบานพับติดอยู่ด้านหนึ่ง ด้านตรงข้ามมีด้านสำหรับกดยกขึ้นลง บริเวณตรงกลางของไม้จะบุด้วยฟองน้ำ ซึ่งเป็นบริเวณที่จะนำผลไม้ที่ต้องการบีบอัดมาวางจากนั้นใช้แรงกด น้ำมันจะถูกบีบออกจากเปลือกและฟองน้ำจะดูดซับไว้ เมื่อได้น้ำมันมากพอ น้ำมันจะไหลออกมาสู่ภาชนะรองรับ น้ำมันที่ได้จะต้องตั้งทิ้งไว้เพื่อแยกน้ำมันออกจากน้ำของผลไม้ จากนั้นต้องไปผ่านขั้นตอนการทำให้บริสุทธิ์ต่อไป

Ecuelle method ใช้ถังกลมที่มีเข็มเล็กๆอยู่บริเวณด้านในของถัง วิธีนี้จะนำผลไม้มาใส่ในถังแล้วหมุนให้รอบ เพื่อให้เข็มที่แทงเซลล์ต่อมน้ำมันของผลไม้ที่กึ่งอยู่ในถัง น้ำมันจะซึมออกมาทางช่องที่จัดไว้ วิธีการนี้จะได้ปริมาณน้ำมันน้อยกว่าวิธีการบีบอัด

Machine process คือจะใช้เครื่องมือที่มีกำลังสูงเพื่อคั้นทิ้งลูก จะได้ทั้งน้ำผลไม้และน้ำมันออกมา จากนั้นกรองน้ำมันที่ได้แล้วนำไปกลั่นภายใต้สุญญากาศ จะได้น้ำมันที่บริสุทธิ์

### 2.3.2 การกลั่น (distillation)

การกลั่นเป็นกระบวนการแยกสารที่สามารถระเหยออกจากสารตัวอย่างได้น้อย โดยให้สารตัวอย่างนั้นๆเดือดจนกลายเป็นไอแล้วทำให้ไอนั้นควบแน่นกลับมาเป็นของเหลวอีกครั้งหนึ่งของเหลวที่ได้เรียกว่า distillate สำหรับของเหลวที่เหลือ เรียกว่า residue ซึ่งเป็นสารที่ไม่ระเหยหรือมีความดันสูงกว่า distillate การกลั่นมีข้อดีกว่าการสกัดคือ จะไม่มีสารที่ไม่ระเหยปนออกมา แต่หากสารระเหยที่ได้จะมีความเข้มข้นน้อยมากและจะต้องมีกระบวนการทำให้เข้มข้นต่อไปอีก ซึ่งสามารถแบ่งการกลั่นออกได้ 3 วิธีได้แก่ วิธีการกลั่นด้วยน้ำ (water distillation) การกลั่นด้วยไอน้ำ (steam distillation) และการกลั่นภายใต้สุญญากาศ (vacuum steam distillation)

การกลั่นด้วยน้ำ (water distillation) เป็นวิธีที่ง่ายที่สุดของการกลั่นน้ำมันหอมระเหย โดยการให้ความร้อนโดยตรงต่อตัวอย่างซึ่งจุ่มอยู่ในน้ำเดือด การกลั่นน้ำมันหอมระเหยด้วยวิธีนี้ใช้กับ



ของที่ติดกันได้ง่ายเช่น ใบไม้บางๆ หรือกลีบดอกไม้อ่อนๆ สำหรับการเลือกใช้วิธีการกลั่นนี้ต้องดูชนิดของพืชที่จะนำมากลั่นด้วย (จูไรรัตน์, 2545; นื่องนุชและคณะ, 2545)

การกลั่นด้วยไอน้ำ (steam distillation) ตัวอย่างจะวางอยู่บนตะแกรงในหม้อกลั่น โดยจะผ่านให้ไอน้ำสัมผัสกับตัวอย่างบนตะแกรงและแยกสารให้กลั่นออกมากับไอน้ำ การกลั่นด้วยไอน้ำในห้องปฏิบัติการ ทำได้ 2 วิธีคือ กลั่นโดยผ่านไอน้ำจากภายนอกเข้าสู่ขวดบรรจุสาร (external steam source) นิยมใช้กันมาก เช่น ใช้แยกสารที่ความดันไอต่ำๆ เพราะต้องใช้น้ำในปริมาณมาก หรือใช้กลั่นแยกของผสมที่เป็นตะกอนหรือเป็นยางเหนียวซึ่งถ้านำไปกลั่นด้วยไอน้ำแบบวิธีที่ 2 โดยผสมน้ำและสารในขวดเดียวกัน แล้วจะทำให้เกิดการเดือดอย่างรุนแรงหรือทำให้สารไหม้ได้ การกลั่นด้วยไอน้ำอีกวิธี คือ กลั่นโดยผสมน้ำกับสารที่ต้องการแยกในขวดเดียวกัน (internal steam source) เป็นวิธีการที่สามารถใช้กับสารที่มีปริมาณน้อยๆ โดยทั่วไปการกลั่นแยกด้วยไอน้ำวิธีนี้ ปริมาณน้ำที่ใช้ต้องบรรจุลงไปในช่วงกลั่นในระดับที่เหมาะสม การกลั่นด้วยไอน้ำมีข้อดีคือ สารที่ต้องการกลั่นจะออกมาที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $100^{\circ}\text{C}$  จึงเหมาะกับการแยกสารอินทรีย์ที่ไม่เสถียร มีจุดเดือดสูง หรือสลายได้ที่อุณหภูมิสูงๆ ในทางอุตสาหกรรมนิยมใช้การกลั่นด้วยไอน้ำแยกสารจากผลิตภัณฑ์ธรรมชาติ เช่น แยกน้ำมันหอมระเหยจากดอกไม้ ใบไม้ ผล หรือรากของต้นไม้บางชนิด

การกลั่นภายใต้ความดันหรือสุญญากาศ (vacuum steam distillation) การกลั่นวิธีนี้คล้ายกับการกลั่นด้วยไอน้ำ แต่จะมีการลดความดันด้วยการทำให้เป็นสถานะสุญญากาศ เพื่อป้องกันการสูญเสียกลั่นและลดการเกิดสารแปลกปลอมในระหว่างกระบวนการกลั่น (ขวัญชัย และคณะ, 2523)

### 2.3.3 การสกัด (extraction)

การสกัดจะใช้ประสิทธิภาพของการละลายในตัวทำละลายของสารให้กลั่น ซึ่งจะต้องใช้ตัวทำละลายที่จำเพาะต่อสารให้กลั่นที่ต้องการสกัด ให้การแยกสารที่ดี และไม่มีสารอื่นเจือปนขณะแยกสาร ตัวทำละลายที่มักใช้ในการสกัดคือ diethyl ether สารผสมระหว่าง diethyl ether และ pentane, hydrocarbon, methylene chloride การสกัดของเหลวด้วยของเหลว อาศัยหลักการใช้ตัวทำละลายของเหลวชนิดหนึ่งสกัดตัวถูกละลายออกจากของเหลวอีกชนิดหนึ่ง มีด้วยกัน 2 วิธีคือ การสกัดแบบกะ และการสกัดอย่างต่อเนื่อง ส่วนการสกัดของแข็งด้วยของเหลว อาศัยหลักการใช้ตัวทำละลายสกัดตัวถูกละลายออกจากของแข็ง การสกัดวิธีนี้ขึ้นอยู่กับ การละลายของตัวถูกละลายในตัวทำละลายและเวลาที่ใช้ในการสกัด เวลาที่ใช้จะช้าหรือเร็วขึ้นอยู่กับลักษณะของตัวถูกละลายที่อยู่ในตัวอย่างของแข็ง ถ้าตัวถูกละลายเพียงดูดซับที่ผิวของแข็งการสกัดก็จะใช้เวลาสั้น แต่ถ้าตัวถูกละลายอยู่ในโครงร่างผลึกของแข็งก็ต้องใช้เวลามากกว่า (นื่องนุชและคณะ, 2545)

### 2.3.4 การสกัดด้วยไอน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์อย่างต่อเนื่อง (simultaneous steam distillation and extraction: SDE)

การสกัดด้วยไอน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์ในเวลาเดียวกันได้ค้นพบจาก Likens-Nickerson (1964) ซึ่งวิธีการนี้จะใช้ในการสกัดกลิ่นรส และต้องใช้เครื่องแก้วชุดสกัดที่ออกแบบพิเศษ ซึ่งใช้หลักการของการกลั่นด้วยไอน้ำของตัวทำละลายพร้อมกับ การสกัดด้วยไอน้ำของตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น methylene chloride หรือ diethyl ether และระบบการสกัดสามารถทำภายใต้การลดความดันเพื่อป้องกันการสูญเสียกลิ่นจากความร้อน สำหรับข้อดีของวิธีการนี้คือได้สารประกอบที่ให้กลิ่นในระดับสูงและใช้ตัวทำละลายปริมาณน้อย แต่มีข้อเสียคือต้องการเครื่องแก้วชุดสกัดที่เฉพาะซึ่งราคาค่อนข้างแพง (น้องนุชและคณะ, 2545)

## 2.4 กระบวนการห่อหุ้ม (Encapsulation)

กระบวนการห่อหุ้มเป็นเทคนิคในการนำสารชนิดหนึ่ง หรือ หลายชนิด นำมาทำการห่อหุ้มด้วยวัสดุอีกชนิดหนึ่ง โดยสารที่เป็นวัสดุแกนและต้องการถูกห่อหุ้มนั้นเรียกว่า active หรือ core material สำหรับวัสดุที่ใช้เป็นตัวห่อหุ้มนั้นจะเรียกว่า shell, wall material, carrier หรือ encapsulant ซึ่งปัจจุบันเทคนิคนี้ได้รับการพัฒนา และได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางทางเภสัชกรรม อุตสาหกรรมเคมี เครื่องสำอาง และ อุตสาหกรรมอาหาร โดยผลิตภัณฑ์อาหารที่นิยมใช้เทคนิคเอนแคปซูลเลชันได้แก่ สารประกอบให้กลิ่น วิตามิน เกลือแร่ สารให้สี และเอนไซม์ หลักการของกระบวนการ เอนแคปซูลเลชัน ประกอบด้วยสองขั้นตอนที่สำคัญดังนี้ ขั้นแรก นำอนุภาคสารให้กลิ่นที่ต้องการห่อหุ้ม มาทำการห่อหุ้มด้วยสารที่มีความสามารถในการห่อหุ้ม เช่น โพลีแซคคาไรด์ (polysaccharide) หรือโปรตีน (protein) ขั้นตอนที่สอง คือ การทำแห้ง โดยเทคนิคนี้จะช่วยรักษาความหอมให้กับอาหารในระหว่างการเก็บรักษา และป้องกันการเกิดปฏิกิริยาระหว่างกลิ่นหอมกับสิ่งที่ไม่พึงประสงค์ เช่น ลดการเหนียว นำการเกิดปฏิกิริยากับสถานะแวดล้อม (น้ำ แสง ออกซิเจน) ลดการเกิดออกซิเดชัน (oxidation) ช่วยยืดอายุของกลิ่นรส ควบคุมอัตราการระเหย หรืออัตราการส่งผ่านสู่สิ่งแวดล้อม และช่วยให้ทำการขนส่งได้ง่ายขึ้น (Reineccius, 1991; Ribeiro *et al.*, 2004) ความสามารถในการกักเก็บกลิ่นได้นั้นขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางเคมีของ core material ซึ่งได้แก่ น้ำหนักโมเลกุล ความพรุน และค่าการระเหยสัมพัทธ์ ที่มีต่อคุณลักษณะของ wall material ซึ่งความคงทนของสารประกอบที่ผ่านกระบวนการห่อหุ้มนั้นถือเป็นส่วนสำคัญในการทำเอนแคปซูลเลชัน และการคงความหอมของผลิตภัณฑ์นั้นก็ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ชนิดและสัดส่วนของ core material ต่อ wall material วิธีการในการทำเอนแคปซูลเลชัน สภาพในการเก็บ

รักษาผลิตภัณฑ์ รวมถึงกระบวนการทำแห้งซึ่งอาจใช้เทคนิค spray drying, spray chilling, extrusion หรือ fluidization เป็นวิธีในการเคลือบผิวและทำแห้ง ซึ่งการเลือกใช้กระบวนการเอนแคปซูเลชันแบบต่าง ๆ นั้นขึ้นอยู่กับสภาวะของกระบวนการผลิต และลักษณะของผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ต้องการ (Madene *et al.*, 2006)

#### 2.4.1 วิธีการที่ใช้ในการทำ เอนแคปซูเลชัน

เทคนิคเอนแคปซูเลชันสามารถทำได้หลายวิธี เช่น coacervation, Molecular inclusion, spray-drying, fluid bed coating, absorption และ freeze drying (Madene *et al.*, 2006)

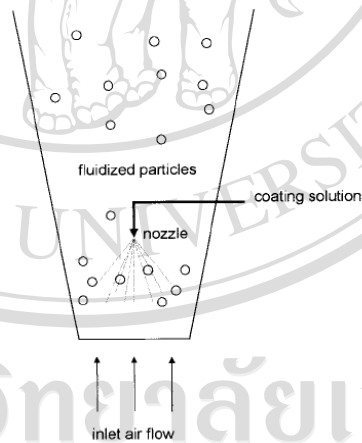
Coacervation มักเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในสารละลายคอลลอยด์ และเป็นเทคนิคแรกที่ใช้ศึกษากระบวนการ เอนแคปซูเลชัน วิธีการนี้จะประกอบด้วยสองส่วน ส่วนแรกคือส่วนที่ประกอบด้วยพอลิเมอร์ อีกส่วนคือตัวทำละลายที่เป็นวัสดุห่อหุ้ม โดยทั่วไปแล้ววัสดุห่อหุ้มที่ใช้จะต้องใช้วัสดุที่สามารถรวมเข้ากับ วัสดุแกนได้แต่ไม่ละลายเข้าด้วยกัน หรือละลายได้น้อยมาก ซึ่งสารที่เป็นตัวทำละลายจะถูกดูดซับไว้ที่ผิวของวัสดุแกน และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิหรือ pH ก็จะทำให้สารห่อหุ้มดังกล่าวจะถูกดึงไว้ที่ผิวของวัสดุแกนเหมือนตาข่าย โดยกระบวนการ coacervation นั้นมีทั้งแบบง่ายและแบบซับซ้อน กระบวนการแบบง่ายนั้นจะประกอบไปด้วยพอลิเมอร์ ชนิดผสมกับสารที่มีความเป็น hydrophilic อย่างแรง กลายเป็นสารละลายคอลลอยด์ ส่วนกระบวนการแบบซับซ้อนนั้นก็จะประกอบไปด้วย พอลิเมอร์สองชนิด หรือมากกว่า เทคนิคนี้ไม่ค่อยนิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ยุ่งยากและมีราคาแพง อีกทั้งยังหาความเข้มข้นของสารห่อหุ้มที่เหมาะสมในการทำอิมัลชันยาก

Molecular inclusion หรือ Inclusion complexation เป็นกระบวนการที่ใช้ความสามารถในการเป็นสารที่ชอบน้ำ (hydrophilic) และไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ของสารเบต้า-ไซโคลเดกซ์ตริน ( $\beta$ -cyclodextrin) มาใช้เพื่อเป็นวัสดุห่อหุ้ม โดยไซโคลเดกซ์ตรินเป็นแป้งัดแปรที่เกิดจากการไฮโดรไลซิสแป้งโดยเอนไซม์ หลังจากนั้นปลายทั้งสองด้านของโครงสร้างจะเชื่อมเข้าด้วยกันจนมีลักษณะเป็นวงกลมทำให้เกิดโครงสร้างภายในเป็นส่วนใหญ่ที่ไม่ชอบน้ำ และส่วนนอกของโมเลกุลเป็นส่วนที่ชอบน้ำ ทำให้สารที่ไม่มีขั้วถูกเก็บกักไว้ภายในโครงสร้างของไซโคลเดกซ์ตรินได้ แต่อย่างไรก็ตามการใช้วิธีการดังกล่าวก็มีข้อจำกัดเนื่องจากไซโคลเดกซ์ตรินเป็นสารที่มีราคาค่อนข้างแพง (Madene *et al.*, 2006)

Spray drying เป็นวิธีการที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในการทำเอนแคปซูเลชัน สารให้กลิ่นรสในอุตสาหกรรมอาหาร มีข้อดีคือ ต้นทุนกระบวนการผลิตต่ำสามารถเลือกใช้วัสดุห่อหุ้มได้หลายชนิด ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความคงตัวที่ดี และสามารถใช้ผลิตในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ได้ แต่มี

ข้อจำกัดคือ ผลิตภัณฑ์มีขนาดอนุภาคที่ค่อนข้างละเอียดมาก เป็นวิธีการที่ใช้ความร้อนสูงในกระบวนการผลิต จึงอาจมีการสูญเสียสารให้กลิ่นที่มีจุดเดือดต่ำไปในระหว่างกระบวนการผลิตได้ และวัสดุห่อหุ้มนั้นอาจเพียงแค่อะตัวอยู่บนผิวของสารให้กลิ่นเท่านั้น ซึ่งอาจเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารให้กลิ่นและสามารถทำให้เกิดกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ได้ (Reineccius, 1989; Dziezak, 1988; Desobry *et al.*, 1997)

Fluidized bed coating เป็นกระบวนการทำแอนแคปซูลชั้น ที่หลีกเลี่ยงข้อจำกัดของวิธีการ spray drying โดยจะมีกระบวนการอยู่ 3 ขั้นตอน ขั้นแรกอนุภาคที่จะทำการเคลือบนั้นจะถูกฉีดพ่นในโถที่มีอุณหภูมิสูง หลังจากนั้นอนุภาคที่ถูกฉีดพ่นจะก่อตัวเป็นฟิล์ม ซึ่งจะเกาะติดอยู่กับวัสดุที่ต้องการนำมาเคลือบผิว จากนั้นจะถูกทำให้แห้งด้วยลมร้อน ซึ่งจะทำให้วัสดุเคลือบผิวนั้นเกาะติดกับวัสดุที่ต้องการนำมาเคลือบผิว (Jacquot and Perneti, 2003) โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีขนาดอนุภาคอยู่ที่ 0.3 ถึง 10 mm มีอัตราการทำแห้งสูง ใช้พื้นที่ในการกระจายตัวน้อย ต้นทุนการผลิตและค่าบำรุงรักษาต่ำ ง่ายต่อการควบคุมและเป็นที่ยอมรับใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมเคมี และเครื่องสำอาง (Chua & Chou, 2003) โดยเฉพาะประเทศที่กำลังพัฒนาเพราะเป็นวิธีการที่ใช้ต้นทุนการผลิตต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้อุปกรณ์การทำแห้งชนิดอื่นๆ เช่น spray-dryer



ภาพ 2.7 Top-spray fluidized bed

ที่มา: Dewettinck and Huyghebaert (1999)

Absorption และ Adsorption เป็นเทคนิคที่อาศัยการดูดซึมและดูดซับ เทคนิคแอนแคปซูลชั้นที่อาศัยการดูดซึมสารให้กลิ่นจะถูกดูดซึมเข้าสู่วัสดุห่อหุ้ม แต่สำหรับเทคนิคที่อาศัยการดูดซับนั้น สารให้กลิ่นจะถูกดูดซับไว้บริเวณผิวของสารห่อหุ้มเท่านั้น ดังนั้นวิธีการที่ใช้เทคนิคการดูดซับนั้น สารห่อหุ้มควรจะต้องมีอนุภาคขนาดใหญ่หรือมีรูพรุนเพื่อให้มีพื้นที่ผิวมากพอสำหรับดูดซับ

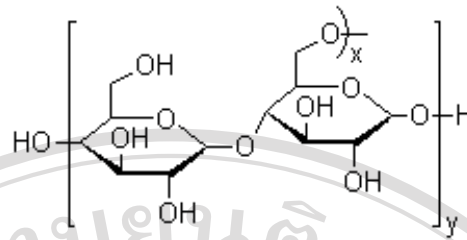
สารให้กลิ่นที่ต้องการเก็บกักไว้ โดยสารห่อหุ้มจะสามารถกักเก็บสารให้กลิ่นและใช้ประโยชน์จากโครงสร้างที่เป็นรูพรุนนี้ในการควบคุมการปลดปล่อยสารให้กลิ่นด้วย (Zeller *et al.*, 1999)

#### 2.4.2 วัสดุห่อหุ้ม (wall material)

สำหรับคุณสมบัติของวัสดุห่อหุ้มที่เหมาะสมในการห่อหุ้มสารให้กลิ่นที่สำคัญคือ ต้องไม่ทำปฏิกิริยากับสารให้กลิ่นที่ต้องการห่อหุ้มมีความหนืดต่ำที่ความเข้มข้นสูง และให้ประสิทธิภาพในการปกป้องสูง ซึ่งคุณสมบัติต่างๆเหล่านี้จะพบได้ในสารกลุ่ม ลิพิด โพลีแซคคาไรด์ และ โปรรตีน (Madene, *et al.*, 2006)

##### 2.4.2.1 มอลโตเดกซ์ตริน (Maltodextrin)

มอลโตเดกซ์ตรินเป็นสารประกอบคาร์โบไฮเดรต ซึ่งได้จากการไฮโดรไลส์แป้งข้าวโพด ด้วยกรด หรือ เอนไซม์ (Kenyon and Anderson, 1988; Shahidi and Han, 1993) มีโครงสร้าง ดังภาพที่ 2.8 มอลโตเดกซ์ตรินมักถูกเลือกใช้เป็นวัสดุในการใช้ทำเอนแคปซูลชั้นเพราะ ต้นทุนต่ำ ไม่มีรส และมีความหนืดต่ำ (Apintanapong and Noomhorm, 2003) ทั้งนี้ Yoshii *et al.* (2001) ระบุว่า มอลโตเดกซ์ตรินที่มีค่า Dextrose equivalent (DEs) ที่สูงขึ้นจะมีความสามารถในการรักษากลิ่นหอมที่ลดลง ซึ่งจากการทดลองใช้มอลโตเดกซ์ตรินที่มีค่า DE 10, 20, 25 และ 36.5 พบว่ามอลโตเดกซ์ตรินที่ DE 10 จะมีประสิทธิภาพในการรักษาความหอมได้ดีที่สุด Duangmal *et al.* (2008) ได้ศึกษาความคงตัวของสีและสารแอนโทไซยานิน (anthocyanin) ในกระเจี๊ยบที่ผ่านการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งโดยเติมมอลโตเดกซ์ตริน และทรีฮาโลส (trehalose) เป็นสารเพิ่มความคงตัวพบว่า การเติมมอลโตเดกซ์ตริน และทรีฮาโลสจะช่วยให้สารแอนโทไซยานินสลายตัวได้ช้าลง ซึ่งเป็นผลมาจาก การที่มีปริมาณน้ำอิสระ ( $a_w$ ) ต่ำในผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งและการถูกห่อหุ้มด้วยสารเพิ่มความคงตัว



ภาพ 2.8 แสดงโครงสร้างมอลโตเดกซ์ตริน

ที่มา: molecular structure maltodextrin.

<http://www.lookchem.com/cas-905/9050-36-6.html>

#### 2.4.2.2 กัมมอคาเซีย (Gum Acacia) หรือกัมอาราบิก (Gum Arabic)

กัมมอคาเซียเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของแซคาไรด์ได้แก่ D-glucuronic acid, L-rhamnose, D-galactose และ L-arabinose และประกอบด้วย glycoprotein ประมาณ 2% ซึ่งเป็นสารประกอบที่นิยมใช้มากที่สุดในการทำแอนแคปซูลชั้นสารให้กลืน เพราะมีคุณสมบัติที่สำคัญคือ ไม่มีกลิ่นรสสามารถละลายได้ง่าย ให้อิมัลชันที่ค่อนข้างเสถียร มีความหนืดต่ำ และให้การปกป้องที่ดีต่อสารมีกลืน แต่มีราคาที่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับ มอลโตเดกซ์ตริน (Kenyon, 1995; Shiga *et al.*, 2001)

การใช้สารผสมระหว่างมอลโตเดกซ์ตริน และ กัมมอคาเซียนั้นจะให้ค่าความหนืดที่เหมาะสมมากกว่าการใช้สารตัวใดตัวหนึ่งโดย Apintanapong and Noomhorm (2003) ได้ทำการทดลองใช้สารผสมระหว่าง กัมมอคาเซีย : มอลโตเดกซ์ตริน ที่สัดส่วนต่างๆและพบว่าสัดส่วน กัมมอคาเซีย : มอลโตเดกซ์ตริน ที่ 70 : 30 ในการห่อหุ้มสารหอม ACPY และใช้วิธี spray drying ในการทำให้แห้งจะสามารถเก็บกักสารหอมได้มากที่สุดในช่วงเวลา 72 วัน Yoshii *et al.* (2001) ได้ทำการทดลองใช้ กัมมอคาเซีย : มอลโตเดกซ์ตริน ในการเก็บรักษากลิ่นหอม พบว่าสารหอมจะมีการปลดปล่อยสาร ethyl butyrate ที่ลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ มอลโตเดกซ์ตริน

#### 2.4.2.3 สตาร์ช (Starch)

แป้งเป็นสารอีกชนิดที่มีคุณสมบัติที่ดีต่อการใช้เป็นวัสดุห่อหุ้ม เช่น แป้งจากข้าว แป้งมันฝรั่ง แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพด ซึ่งจะมีคุณสมบัติที่สำคัญคือ สามารถขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ มีคุณสมบัติแข็ง เหนียว ยืดหยุ่น มีคุณสมบัติทางกลที่ดี สามารถป้องกันการแพร่ผ่านของออกซิเจนให้ลักษณะผิวที่เรียบ และยังเป็นตัวป้องกันการระเหยของสารหอมได้ หรือป้องกันการเกิดออกซิเดชันได้ ซึ่งปัจจัยที่สำคัญต่อการเก็บกักกลิ่นสารหอมไว้ได้นั้นขึ้นอยู่กับปริมาณอมิโลส หากมีปริมาณอมิโลสที่มากขึ้นการกักเก็บกลิ่นก็จะดีขึ้น แป้งสามารถเกิดพันธะกับสารให้กลืนสอง

ลักษณะ ได้แก่ การเกิด hydrophobic bonding ของสารหอมกับอิมัลชันเฮลิกซ์ (amylose helix) และการพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl) กับสารให้กลิ่น (Hau *et al.*, 1996 ; Madene *et al.*, 2006) โดยงานวิจัยของ ปานทิพย์ และคณะ (2550) ได้ศึกษาการพัฒนาการตรึงกลิ่นในบุหงาและดอกไม้แห้งโดยใช้ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังร่วมกับน้ำมันหอมระเหยจาก ใบเตย กระวาน กานพลู อบเชย และ จิง และพบว่าฟิล์มมันสำปะหลังที่มีการเติมซอร์บิทอล (sorbitol) 35% (w/v) นั้นจะมีความยืดหยุ่นสูง มีค่าการซึมผ่านของไอน้ำ และออกซิเจนต่ำและสามารถทำการตรึงสารระเหยได้ดีกว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ได้เติมซอร์บิทอล Laohakunjit and Kerdchoechuen (2007) ได้ทำการสกัดสารหอมจากใบเตยด้วย supercritical carbon dioxide และนำมาทำการห่อหุ้มด้วยแป้งข้าวที่มีการเติมซอร์บิทอล 30% โดยใช้วิธีการเคลือบผิว และนำสารที่ได้มาทำการเคลือบลงบนข้าวขาวที่ไม่มีกลิ่น ด้วย modified spouted bed และทำการบรรจุในถุงพลาสติกชนิด nylon15/PE20/LLDPE 75 เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C เป็นระยะเวลา 6 เดือน พบว่าทำให้ข้าวขาวมีกลิ่นหอมใกล้เคียงกับข้าวสายพันธุ์หอม พันธุ์ปทุมธานี 1 (PTT1) และ พันธุ์ KDML และยังช่วยลดระดับการเกิดกลิ่นหืนในข้าวระหว่างระยะเวลาการเก็บรักษาได้อีกด้วย

#### 2.4.2.4 Protein

สารประกอบประเภทโปรตีน เป็นวัสดุอีกชนิดที่เหมาะสมต่อการใช้เป็นวัสดุห่อหุ้ม เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ดีในด้านการละลาย ความหนืด และคุณสมบัติการเกิดฟิล์ม โปรตีนที่นิยมใช้มากในการทำแอนแคปซูลเช็ชชั่น ได้แก่ whey protein isolates และ whey protein concentrate (Madene *et al.*, 2006)

Weinbreck *et al.*(2004) ศึกษาการใช้เวย์โปรตีนไอโซเลต (whey protein isolates) และ กัมอราบิกในการทำแอนแคปซูลเช็ชชั่นน้ำมันหอมระเหยจากผิวมะนาว และพบว่าสัดส่วนของเวย์โปรตีนไอโซเลตต่อกัมอราบิกที่ 2 : 1 และที่สภาวะการเตรียมสารละลายที่ pH = 4 จะทำให้ผลิตภัณฑ์มีผิวที่เรียบ และมีปริมาณน้ำมันภายในแคปซูลถึง 80% และยังได้มีการนำ whey protein isolates มาใช้ร่วมกับมอลโตเดกซ์ตรินในการทำแอนแคปซูลเช็ชชั่น น้ำมันจากผลอโวคาโดโดยใช้ spray drying และพบว่าเมื่อใช้ เวย์โปรตีนไอโซเลต : มอลโตเดกซ์ตริน ที่สัดส่วน 10 : 0 และ 9 : 1 ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นทรงกลมที่ผิวเรียบ เปรียบเทียบกับสัดส่วนอื่นๆที่มีลักษณะผิวที่แตกร้าว มีประสิทธิภาพในการผลิตอยู่ในช่วง 45 - 66% และยังสามารถต้านทานการเกิดออกซิเดชันได้เมื่อเก็บรักษาในอุณหภูมิต่ำ และที่อุณหภูมิห้อง (Bae and Lee, 2008)

นักวิทยาศาสตร์หลายท่านได้ใช้กระบวนการเอนแคปซูลเลชัน ในการปรับปรุงและพัฒนาผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น Apintanapong and Noomhorm (2003) ได้ศึกษาการใช้กัมมอคาเซีย และมอลโตเดกซ์ตรินเพื่อใช้เป็นวัสดุห่อหุ้มในการทำเอนแคปซูลเลชันของสาร ACPY ด้วยวิธี spray drying พบว่า การทำเอนแคปซูลเลชันโดยใช้สัดส่วน กัมมอคาเซีย : มอลโตเดกซ์ตริน (70 : 30) จะให้ผลในการเก็บรักษาสาร ACPY ที่ดีที่สุดคือ มีการสลายตัวเพียง 27.7% จากเริ่มต้น Fuchs *et al.* (2006) ได้ผลิตผลิตภัณฑ์น้ำมันพืชชนิดผงด้วยวิธีการ spray drying โดยใช้กัมมอคาเซียและ มอลโตเดกซ์ตรินเป็นวัสดุห่อหุ้มในการทำเอนแคปซูลเลชันน้ำมันพืช และพบว่าผลิตภัณฑ์สามารถต้านทานการเกิดออกซิเดชันของน้ำมันได้ดีเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันที่ไม่ได้ทำเอนแคปซูลเลชัน และผงน้ำมันที่ได้จากการทำ agglomerate ยังมีค่าความสามารถในการไหล (flowability) และค่าความสามารถในการดูดซับน้ำบนพื้นผิวของอนุภาค (wettability) ที่ดี Laohakunjit and Kerdchoechuen (2007) ได้ศึกษาการสกัดสารจากใบเตยด้วย supercritical carbon dioxide และนำสารที่สกัดได้มาเคลือบผิวข้าวพันธุ์ที่ไม่มีกลิ่น 3 ชนิด คือ กข 23 สุพรรณบุรี 1 และสุพรรณบุรี 90 โดยสารผสมที่นำมาเคลือบข้าวประกอบด้วยแป้งข้าว 5 % ซอบิทอล 30 % และ สารสกัดใบเตย 25 % เคลือบโดยวิธีการใช้ modified spouted bed และบรรจุในถุงพลาสติกที่มีโครงสร้าง 3 ชั้น ประกอบด้วย nylon15, PE20 และ LLDPE75 ทำการเก็บที่อุณหภูมิ 25 °C เป็นเวลา 6 เดือน แล้ววัดหาปริมาณสาร ACPY ที่เปลี่ยนแปลงไปเปรียบเทียบกับข้าวพันธุ์มีกลิ่นหอมได้แก่ ข้าวขาวดอกมะลิ 105 และข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 พบว่าข้าวพันธุ์ไม่มีกลิ่นและผ่านการเคลือบด้วยสารหอมจะมีปริมาณสาร ACPY น้อยกว่าข้าวพันธุ์ที่มีกลิ่น และปริมาณสาร ACPY จะลดลงตามระยะเวลาในการเก็บรักษา โดยข้าวพันธุ์ไม่มีกลิ่นและผ่านการเคลือบผิวจะมีปริมาณสาร ACPY ที่เหลืออยู่มากกว่าข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1

Melina *et al.* (2007) ได้ใช้เทคนิคเอนแคปซูลเลชันในการห่อหุ้มสารแอลฟาโทโคเฟอรอล ( $\alpha$ -tocopherol) โดยใช้สารละลายผสมระหว่างมอลโตเดกซ์ตริน (DE 20) และเจลาติน (gelatin) แล้วนำไปทำแห้งด้วยวิธี quick freeze และ freeze-drying เพื่อป้องกันการสูญเสียจากการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน และเพื่อให้เป็นวิตามินที่สามารถละลายในน้ำได้ Nunes and Mercadante (2007) ได้ใช้เทคนิคเอนแคปซูลเลชันเพื่อผลิตไลโคพีน (lycopene) ในรูปแบบผงโดยใช้เบต้า-ไซโคลเดกซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้มด้วยวิธีการ spray-drying และ inclusion-freeze-drying โดยพบว่าไลโคพีนมีความบริสุทธิ์เพิ่มขึ้นจาก 96.4 เป็น 98.1% หลังจากการทำ spray-drying ในขณะที่ปริมาณไลโคพีนมีความบริสุทธิ์ลดลงจาก 97.7% เป็น 91.3% หลังจากการทำ freeze-drying และพบว่าจากทั้งสองกระบวนการทำแห้งจะได้ผลผลิตไลโคพีนในรูปแบบผงที่มีสีชมพูสด แห้ง และมีอนุภาคการไหลที่เป็นอิสระ



## 2.5 บรรจุภัณฑ์

สารหอม ACPY สามารถสลายตัวได้ง่าย มีความไวต่อแสง และอุณหภูมิ จากผลการทดลอง เก็บข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 10°C, 15°C และอุณหภูมิห้อง (ประมาณ 30°C) พบว่าการเก็บรักษาที่ 15°C เป็นเวลา 4 เดือน จะได้ข้าวสารที่รักษาความหอมไว้ได้ก่อนข้างคงที่ (เมธินี และ คณะ, 2548) จึงควรเก็บรักษาข้าวไว้ในบรรจุภัณฑ์และสภาวะที่เหมาะสมเพื่อชะลอการสูญเสียดังกล่าว

อลูมิเนียมฟอยล์ (Aluminum foil) เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติในการป้องกันการแพร่ผ่านของความชื้น ออกซิเจน สารหอมระเหย ก๊าซชนิดอื่นๆ รวมไปถึงสารมีกลิ่นที่สามารถระเหยได้ และยังมีคุณสมบัติที่ดีในการป้องกันแสงอีกด้วย ดังนั้นจึงมักใช้ อลูมิเนียมฟอยล์ และ ลามิเนทอลูมิเนียมฟอยล์ (laminated aluminum foil) เมื่อต้องการให้อาหารมีอายุการเก็บรักษานานขึ้น (Manuela and Felix, 2007) พรชัย และ วิรงรอง (2550) พบว่าการใช้บรรจุภัณฑ์แบบ aluminum foil และ PVDC ร่วมกับการใช้สารดูดซับออกซิเจน (oxygen absorber) สามารถยืดอายุการเก็บรักษาของข้าวซ้อมมือได้มากกว่า 180 วัน

โพลีเอทิลีน (polyethylene: PE) เป็นพลาสติกที่มีความยืดหยุ่นดี มีทั้งแบบอ่อนและแบบแข็งได้แก่ โพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (low density polyethylene: LDPE) และ โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง (high density polyethylene: HDPE) โพลีเอทิลีนที่มีความหนาแน่นต่ำจะมีความต้านทานการกัดกร่อนดี กันความชื้นได้ดี ความแข็งแรงต่ำ และมีความยืดหยุ่นสูง นิยมใช้ในการผลิตกระเป๋าก หรือขวดน้ำ สำหรับโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงเป็นกลุ่มที่นิยมใช้มากที่สุดเพราะรับแรงกระแทกได้ดี น้ำหนักเบา ดูดซับความชื้นน้อย มีความแข็งแรงสูง ไม่เป็นพิษ สามารถใช้บรรจุอาหารได้

โพลีโพรพิลีน (polypropylene: PP) มีคุณสมบัติคล้ายกับโพลีเอทิลีน ทนความร้อนได้สูงกว่าแต่มีความเปราะที่อุณหภูมิต่ำ ใช้ในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ ชิ้นส่วนรถยนต์ได้จากกระบวนการ โพลีเมอไรเซชัน (polymerization) ของโพลีโพรพิลีน สำหรับโพลีเอไมด์ (polyamide: PA หรือ nylon) นั้นจะมีความโปร่งใส ทนต่อการขีดข่วน สามารถทนอุณหภูมิที่เย็นจัด หรือร้อนจัดได้ดี แต่นิยมใช้ประภร่วมกับพลาสติกชนิดอื่นด้วยเนื่องจากน้ำสามารถซึมผ่านได้ดี ส่วนโอเรียนท์โพลีโพรพิลีน (oriented polypropylene: OPP) เป็นฟิล์มโพลีโพรพิลีนชนิดที่ผ่านการจัดเรียงตัวของโมเลกุลโพลีเมอร์ให้เป็นระเบียบก่อนที่จะเย็นตัวลงรูป ซึ่งจากการเรียงตัวของโมเลกุลทำให้ฟิล์ม OPP มีคุณสมบัติดีขึ้น คือมีลักษณะใส สว่างมากขึ้น บางขึ้น สามารถใช้งานที่อุณหภูมิต่ำลงกว่าเดิมได้ ป้องกันความชื้นได้ดีขึ้น มีความคงรูป ทนทานความร้อนและไขมันได้ดี (สืบศักดิ์, 2547)

ประไพพิศกัตร์ และคณะ (2545) ศึกษาข้าวเม่าอ่อนที่บรรจุในบรรจุภัณฑ์แบบถุง 4 side seal แบบฟิล์มประกบหลายชั้น (PET/PE/Al/LLDPE) และทำการเก็บรักษาที่  $-18^{\circ}\text{C}$  จะมีความเหมาะสมที่สุดต่อการบรรจุข้าวเม่าอ่อนที่ระยะเวลาการเก็บรักษา 90 วัน จากเดิมที่ทำการเก็บรักษาได้เพียง 2-3 วัน ที่อุณหภูมิห้อง นนทวัชร (2544) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสารระเหยในเมล็ดกาแฟคั่วในบรรจุภัณฑ์แบบต่างๆ และที่สภาวะการเก็บรักษาแบบต่างกัน พบว่าสารระเหยในกาแฟมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่น้อยที่สุดเมื่อเก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์แบบ PET/PE/Al/LLDPE ร่วมกับการเก็บรักษาที่สภาวะสุญญากาศและอุณหภูมิ  $8^{\circ}\text{C}$

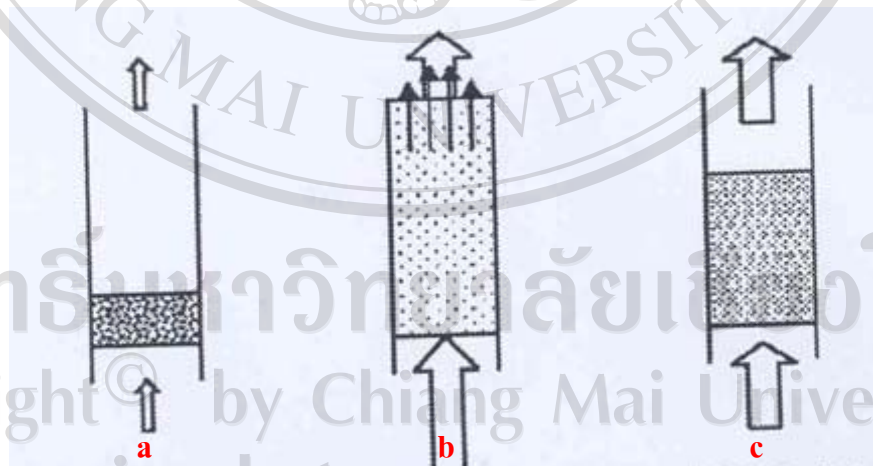
Tulyathan *et al.* (2007) ศึกษาปริมาณสาร ACPY ของข้าวกล้องหอมมะลิที่บรรจุแบบสุญญากาศในบรรจุภัณฑ์ประเภทชนิด OPP/Al/LLDPE พบว่าสามารถรักษาความหอม (ปริมาณสาร ACPY) ได้ดีกว่าการใช้บรรจุภัณฑ์ชนิด PP โดยจะมีปริมาณสาร ACPY เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ที่บรรจุในบรรจุภัณฑ์ประเภทชนิด OPP/Al/LLDPE 57% และในบรรจุภัณฑ์ชนิด PP 41% หลังจากทำการเก็บรักษาไว้หกเดือน Laohakunjit and Kerdchoechuen (2007) กล่าวว่า ไม่เพียงแต่กระบวนการเคลือบผิวข้าวเท่านั้นที่จะส่งผลในการลดระดับการเกิดกลิ่นหืนของข้าว (สาร n-hexanal) ที่ทำการเก็บรักษาไว้เป็นระยะเวลานาน แต่สภาวะการเก็บรักษาก็ยังมีผลต่อคุณภาพของข้าวด้วย เพราะสภาวะการเก็บรักษาที่สามารถป้องกันการซึมผ่านออกซิเจนได้ จะช่วยลดกระบวนการเกิดลิพิดออกซิเดชัน (lipid oxidation) ในข้าวได้ ดังนั้นจึงควรนำข้าวขาวที่ผ่านกระบวนการเคลือบสารหอมแล้วมาเก็บรักษาในสภาวะที่เหมาะสม เพื่อป้องกันการสลายตัวของสารหอม และชะลอการเกิดกลิ่นหืนที่อาจเกิดในข้าวที่ผ่านการเก็บรักษาไว้นาน

## 2.6 ฟลูอิดไดซ์เซชัน (Fluidization)

ฟลูอิดไดซ์เซชันเป็นวิธีการที่นำมาประยุกต์ใช้ในการทำแห้ง โดยจะมีลักษณะเป็นการพ่นลมร้อนผ่านหอ ซึ่งภายในบรรจุด้วยอนุภาคหรือเม็ดของแข็ง ที่พื้นของหอจะมีแผ่นรองรับ ซึ่งเกาะเป็นรูปพูนไว้เพื่อให้ลมร้อนสามารถเป่าผ่านชั้นของเม็ดของของแข็งที่บรรจุอยู่ข้างบนได้ เมื่อปล่อยลมที่มีความเร็วต่ำผ่านเบดที่บรรจุด้วยอนุภาคของแข็ง ลมจะไหลผ่านช่องว่างของของแข็ง โดยของแข็งจะไม่มีเคลื่อนไหว ดังภาพที่ 2.9 a) เรียกว่าเบดนิ่ง (fixed bed) ถ้าเพิ่มความเร็วของลมให้มากขึ้นทีละน้อย จนกระทั่งค่าความดันลดคร่อมเบดมีค่าเท่ากับแรงโน้มถ่วงเนื่องจากน้ำหนักของอนุภาค ซึ่งจะทำให้อนุภาคของของแข็งที่บรรจุในเบดเริ่มมีการเคลื่อนที่จนถึงความเร็วระดับหนึ่ง เม็ดของแข็งจะเริ่มขยับตัว และจัดตัวอย่างเป็นระเบียบเรียกว่าฟลูอิดไดซ์เซชันต่ำสุด (minimum fluidization) ฟลูอิดไดซ์เบดที่ของไหลเป็นของเหลว เมื่อเพิ่มความเร็วจนกระทั่งการ

ขยายตัวของเบดเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ การลอยตัวและหมุนรอบตัวเองของของแข็งเป็นไปอย่างช้าๆจะเรียกว่าเบดสม่ำเสมอ (smooth fluidized bed) และหากยังเพิ่มความเร็วของของไหลอีกจนกระทั่งถึงค่าหนึ่ง อนุภาคของของแข็งจะเกิดลักษณะที่เรียกว่าเกิดการฟลูอิดไดซ์เซชันอย่างสมบูรณ์ คืออนุภาคมีการเคลื่อนที่อย่างไม่มีทิศทางแน่นอน (random direction) อนุภาคจะสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ระหว่างอนุภาค (mean free distance) และคงรูปอยู่ได้ด้วย drag force ดังภาพที่ 2.9 c) ซึ่งอนุภาคของของแข็งนี้ก็ยังจะมีลักษณะดังนี้อีกหากความเร็วของของไหลยังคงเพิ่มขึ้น แต่เมื่อของไหลมีความเร็วมากขึ้นถึงค่าหนึ่งจะทำให้อนุภาคของของแข็งมีลักษณะดังภาพที่ 2.9 b) คือ อนุภาคจะเคลื่อนที่ด้วยแรงลมและอาจหลุดออกไปจากภาชนะ ซึ่งการเคลื่อนที่ในลักษณะนี้เราใช้เป็นการขนส่งของแข็งจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งได้ เรียกว่าการขนส่งด้วยของเหลว (hydraulic transport) ปรัชญาการฟลูอิดไดซ์เซชันขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง ตัวแปรที่สำคัญได้แก่ความเร็วของของไหลขณะที่เบดเริ่มเกิดเป็นฟลูอิดไดซ์เบด เม็ดของแข็งก็เริ่มยับตัวจัดระเบียบของตัวเองให้อยู่ในแนวเดียวกันหรือจัดเรียงเม็ดต่อเม็ดอย่างสวยงาม จากนั้นแต่ละเม็ดก็ค่อยๆแยกห่างกันออกไปเป็นอิสระตามความเร็วของของไหลที่เพิ่มขึ้น (ประเสริฐศักดิ์, 2545)

งานวิจัยฉบับนี้จึงได้มีการนำเอาเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชันนี้มาประยุกต์ใช้ในการเคลื่อนย้ายข้าวขาวด้วยสารสกัดจากไบโอดีทูกห่อหุ้มด้วยวัสดุห่อหุ้มที่เหมาะสม และทำแห้งไปพร้อมๆกัน

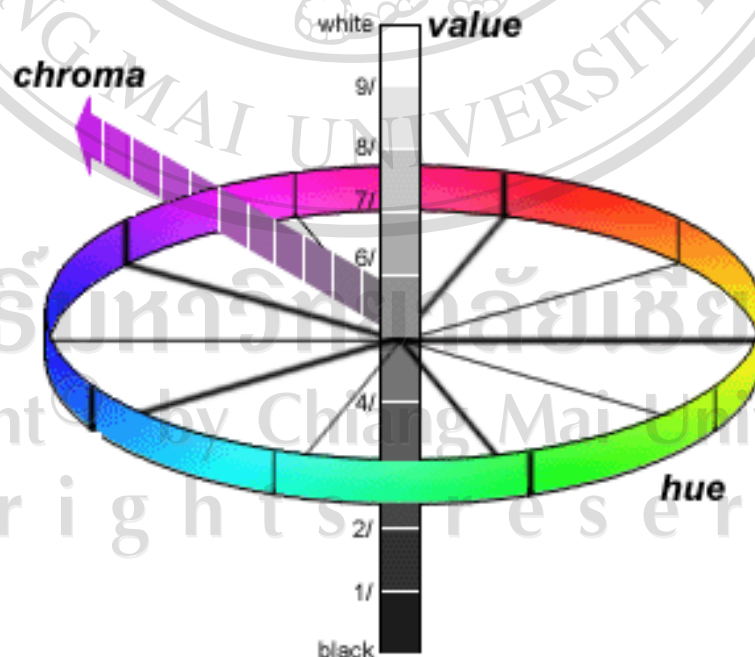


ภาพ 2.9 ลักษณะของการเคลื่อนที่ของของแข็งภายในเบดด้วยวิธีการฟลูอิดไดซ์เซชัน

## 2.7 การวิเคราะห์สีระบบ CIE L\*a\*b\* (CIELAB)

สีแสดงถึงคุณภาพของอาหารและผลิตผลทางการเกษตร เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อคุณภาพการยอมรับหรือไม่ยอมรับของผู้บริโภค หากมีสีที่ผิดปกติผู้บริโภคส่วนใหญ่อาจไม่ยอมรับ และอาจไม่คำนึงต่อคุณภาพด้านอื่นต่อไป เช่น กลิ่น รสชาติ และเนื้อสัมผัส ในธรรมชาติแสงเป็นพลังงานที่มีสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยมีความยาวคลื่นที่ตามองเห็นในช่วง 380-780 nm โดยทั่วไปมนุษย์จะระบุลักษณะสีของวัตถุที่มองเห็นเป็น 3 ลักษณะคือ Hue, Value และ Chroma

- Hue หมายถึง สีที่ปรากฏให้เห็น(เฉดสี) เป็นชื่อของสีหลักที่แตกต่างกัน ในระบบ munsell จะแบ่งออกเป็น 5 สี คือ แดง เหลือง เขียว น้ำเงิน ม่วง
- Value (Lightness) หมายถึง ความสว่างของสี หรือปริมาณแสงที่สะท้อนออกมาจากวัตถุหากมีปริมาณแสงที่สะท้อนออกมามากจะทำให้เห็นสีสว่าง ถ้าปริมาณแสงสะท้อนน้อยจะทำให้เห็นสีเข้ม หรือมีค่าตั้งแต่ 0 = black (หมายถึงวัตถุดำสมบูรณ์) ถึง 10 = white (หมายถึง วัตถุขาวสมบูรณ์)
- Chroma (Saturation) หมายถึง ค่าที่แสดงความบริสุทธิ์ (purity) ของสี สีที่บริสุทธิ์มากที่สุด คือสีที่ไม่มีมีแสงสีเทาผสมเลย ซึ่งได้แก่สีหลัก (Hue) ทั้ง 100 สี แบ่งสเกลเป็น 0 ถึง 18 เป็นการวัดความแตกต่างของสีหลักจากสีเทาที่ lightness เดียวกัน



ภาพ 2.10 แผนภาพสีแสดง value chroma และ hue

ที่มา: Kanthamoon (no date)

ระบบสี CIE  $L^*a^*b^*$  เป็นระบบสีที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง โดย กำหนดค่าต่างๆดังนี้

- $L^*$  ใช้กำหนดค่าความสว่าง (Lightness)

$L = 0$  = perfect black sample

$L = 100$  = perfect white sample

- $a^*$  ใช้กำหนดสีแดง หรือสีเขียว

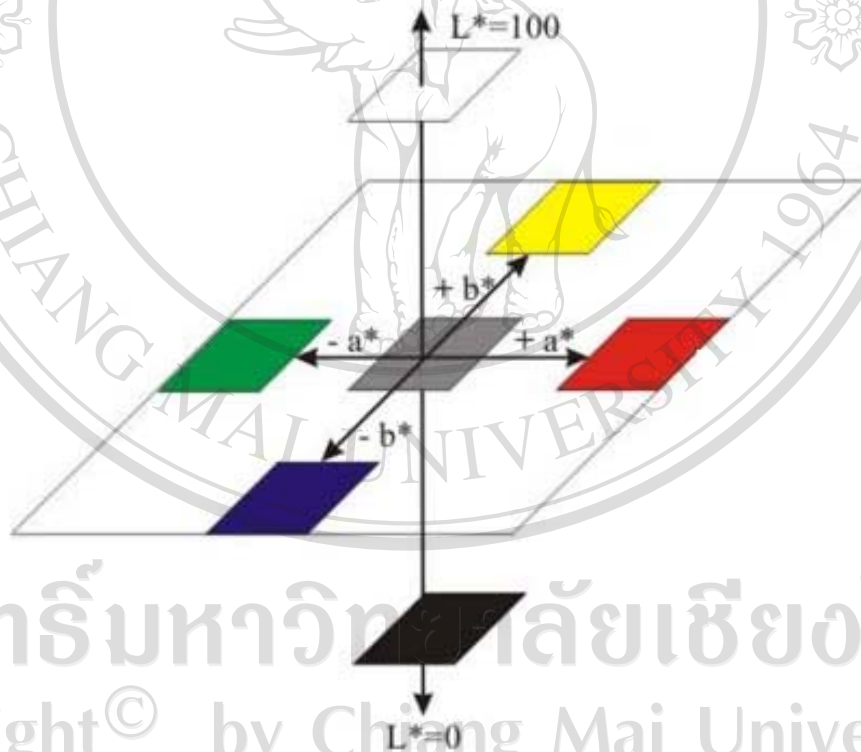
$a$  เป็น +      วัตถุที่มีสีแดง

$a$  เป็น -      วัตถุที่มีสีเขียว

- $b^*$  ใช้กำหนดสีเหลือง หรือสีน้ำเงิน

$b$  เป็น +      วัตถุที่มีสีเหลือง

$b$  เป็น -      วัตถุที่มีสีน้ำเงิน



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Copyright© by Chiang Mai University

All rights reserved

ภาพ 2.11 CIE Lab แสดง  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  color space

ที่มา: Kanthamoon (no date)

นอกจากนี้ในระบบ CIE LAB ยังมีการปรับปรุงต่อไป โดยการเชื่อมค่า “a” และ “b” เข้ากับ “hue” และ “chroma” โดยกำหนด color term อีก 2 ตัว คือ hue angle ( $h^*$ ) และ chroma ( $C^*$ ) hue angle เป็นตัวเลขที่ระบุว่ามีตำแหน่งอยู่ที่ใดในกราฟ มีหน่วยเป็นองศา ดังสมการที่ 2.1 และ 2.2

$$\text{โดย } h^* = \tan^{-1}\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad \text{สมการ (2.1)}$$

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad \text{สมการ (2.2)}$$

ค่า hue angle เป็นค่ามุมที่ทำกับแกน  $+a^*$  โดยค่า  $0^\circ$  เท่ากับ  $+a^*$  (red), ค่า  $90^\circ$  เท่ากับ  $+b^*$  (yellow), ค่า  $180^\circ$  เท่ากับ  $-a^*$  (green) และค่า  $270^\circ$  เท่ากับ  $-b^*$  (blue) สำหรับ chroma เริ่มจาก 0 ซึ่งเป็นค่าที่ศูนย์กลางและเพิ่มมากขึ้นตามระยะที่ห่างจากศูนย์กลางมากขึ้น  $C^*$  จะใช้บอกค่าความสดใสของสีที่ค่าความสว่างหนึ่งๆ (Kanthamoon, no date)

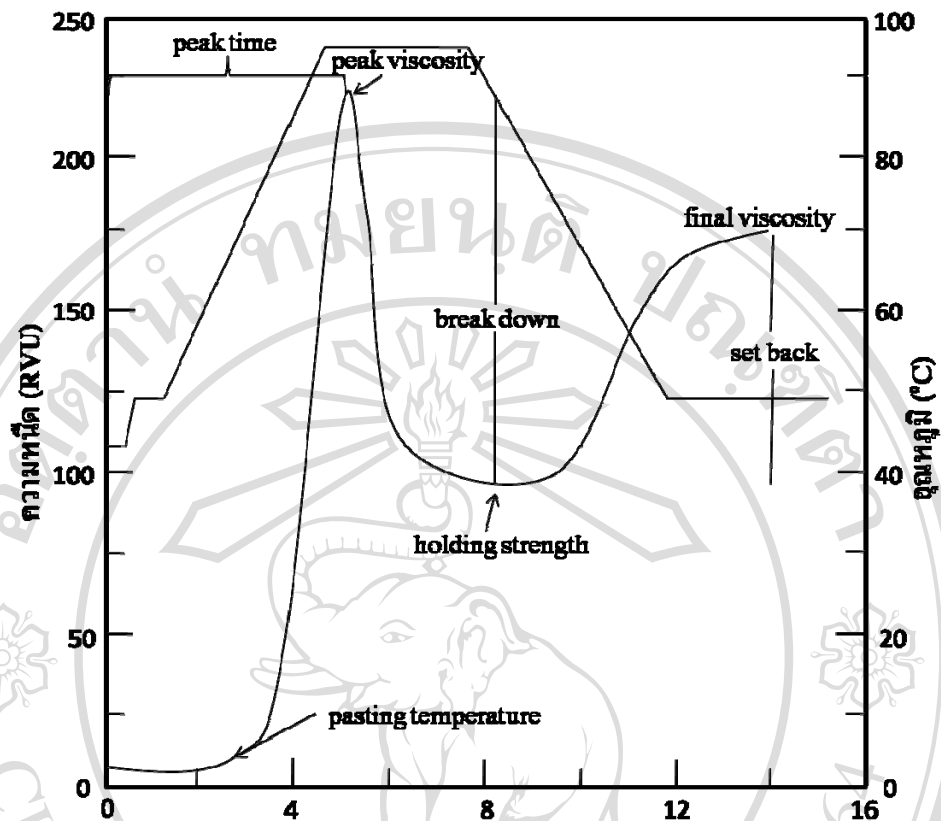
## 2.8 การวัดความหนืดของแป้งข้าวโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ความหนืดอย่างรวดเร็ว (Rapid Visco Analyser, RVA)

การวัดความหนืดของแป้งข้าวโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ความหนืดอย่างรวดเร็ว (ภาพที่ 2.12) หรือ RVA นั้นสามารถใช้วิเคราะห์ความหนืดได้อย่างรวดเร็วกว่าเครื่องวัดความหนืดแบบบราเวนเดอร์ ใช้ตัวอย่างน้อย โดยคิดคำนวณน้ำหนักแป้งที่เปอร์เซ็นต์ความชื้นคงที่ (14%) และเวลาสั้น (13 นาที) โดยใส่ตัวอย่างแป้ง (ขนาด 100 mesh) ลงในถ้วยอลูมิเนียมที่มีน้ำ (25 มล.) และใส่ใบพายเพื่อกวนตัวอย่างแป้งกับน้ำ เริ่มให้ความร้อนที่ถ้วยร้อนจาก  $50^\circ\text{C}$  คงอุณหภูมิไว้ 1 นาที ไปถึง  $95^\circ\text{C}$  และคงอุณหภูมิไว้ระยะหนึ่ง แล้วลดอุณหภูมิลงถึง  $50^\circ\text{C}$  อีกครั้งโดยคงอุณหภูมิไว้ที่  $50^\circ\text{C}$  ประมาณ 2 นาที โดยระยะแรกใบพายจะหมุนเร็ว 960 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 10 นาที แล้วหมุนด้วยความเร็ว 160 รอบต่อนาทีต่อไปจนจบการทำงาน ค่าความหนืดที่เปลี่ยนแปลงบันทึกเป็นกราฟลงเครื่องคอมพิวเตอร์ดังภาพที่ 2.13 และอ่านค่าได้ดังนี้

เมื่อ	pasting temperature	หมายถึง ค่าอุณหภูมิเริ่มต้นของความหนืด วัดที่ความหนืดเริ่มต้น เป็น 2 RVU (Rapid Visco Unit) ในเวลา 20 นาที มีหน่วยเป็น °C
	peak viscosity	หมายถึงค่าความหนืดสูงสุด มีหน่วยเป็น RVU
	peak time	หมายถึงเวลาที่เกิดความหนืดสูงสุดมีหน่วยเป็น นาที
	break down	หมายถึงความหนืดลดลงหลังจากที่คงอุณหภูมิไว้ 95°C มีหน่วยเป็น RVU
	holding strength	หมายถึง ความคงทนต่อการกวน มีหน่วยเป็น RVU
	set back	หมายถึง ความหนืดเพิ่มขึ้นอีกครั้ง มีหน่วยเป็น RVU
	final viscosity	หมายถึง ความหนืดสุดท้าย มีหน่วยเป็น RVU



ภาพ 2.12 เครื่องวิเคราะห์ความหนืดอย่างรวดเร็ว



ภาพ 2.13 ลักษณะเส้นกราฟที่อ่านได้จากเครื่องวิเคราะห์ความหนืดอย่างรวดเร็ว

เมื่อผสมแป้งข้าวกับน้ำ เม็ดสตาร์ชจะเริ่มเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่เม็ดสตาร์ชพองตัวเต็มที่ซึ่งเป็นจุดที่ส่วนผสมมีความหนืดสูงสุด (pasting temperature) แสดงถึงการเกิดเจลาตินในเซชัน (gelatinization) ซึ่งเม็ดสตาร์ชพองเต็มที่คืนกลับไม่ได้ และเมื่อเครื่องยังคงกวนอยู่ทำให้เครื่องกวนทำลายโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชทำให้เม็ดสตาร์ชแตกออก ซึ่งจะปลดปล่อยอไมโลส และอไมโลเพคตินออกมาส่งผลทำให้ความหนืดในเครื่องกวนลดลง แต่เมื่อลดอุณหภูมิลงจะทำให้โมเลกุลของสตาร์ชที่กระจายตัวอยู่ในส่วนผสมที่มีทั้งอไมโลส (amylose) และอไมโลเพคติน (amylopectin) จัดเรียงตัวกันใหม่ทำให้ส่วนผสมเกิดความหนืดขึ้นอีกครั้ง และเกิดความข้นของการตกตะกอน หรือเจลเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า รีโทรเกรเดชัน (retrogradation) หรือการคืนตัวมาเป็นผลึกอีกครั้ง (recrystallization) ซึ่งการเกิดรีโทรเกรเดชันนั้นจะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ ชนิดหรือแหล่งของสตาร์ช ความเข้มข้นของส่วนผสม ปริมาณอไมโลส อุณหภูมิที่ลดลง ระยะเวลาการเก็บรักษา และส่วนประกอบอื่นที่ผสมอยู่ในแป้งหรือสตาร์ชนั้น โดยผลที่เกิดขึ้นทำให้ลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลงไป เช่น คุณภาพของข้าวหุงสุกมีผลโดยตรงจากคุณสมบัติของ



สตาร์ช สังเกตได้จากการทิ้งข้าวหุงสุกให้เย็นตัวลง ข้าวจะแข็งขึ้นซึ่งเป็นผลจากการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชในข้าว (อรอนงค์, 2547)

## 2.9 Adsorption Isotherms

น้ำเป็นองค์ประกอบหลักในอาหาร ซึ่งมีอิทธิพลต่อคุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของอาหาร โดยน้ำจะสามารถรวมกับส่วนประกอบอาหารอื่นๆด้วยพันธะทางเคมี เช่นพันธะไอออนิก พันธะโควาเลนต์ และพันธะไฮโดรเจนซึ่งมีผลต่อความสามารถในการละลายของอาหาร นอกจากนี้ น้ำยังมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางคุณภาพในระหว่างกระบวนการผลิต การเก็บรักษา กระบวนการขนส่งและการกระจายสินค้าสู่ผู้บริโภค ทั้งนี้เพราะน้ำมีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการถ่ายเทมวล (mass transfer) ปฏิกิริยาทางเคมี (chemical reactivity) และกิจกรรมของเชื้อจุลินทรีย์ โมเลกุลของน้ำประกอบไปด้วยอะตอมของไฮโดรเจน และออกซิเจนเกิดพันธะโควาเลนต์ หรือพันธะไฮโดรเจนกับองค์ประกอบของอาหาร เช่น หมู่ไฮดรอกซิลของโพลีแซคคาไรด์ หมู่คาร์บอกซิลและอมิโนของโปรตีน และกลุ่มมีซิวขององค์ประกอบอื่นๆ โมเลกุลของน้ำสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ น้ำเกาะเกี่ยว (bound water) และน้ำอิสระ (free water) โดยน้ำเกาะเกี่ยวนั้นจะมีพลังงานยึดเหนี่ยวพันธะระหว่างน้ำและองค์ประกอบของอาหารสูง เช่นเกิดพันธะไอออนิก หรือ พันธะไฮโดรเจน ส่วนน้ำอิสระนั้นจะเกิดพันธะอย่างหลวมๆ หรือมีพลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างพันธะต่ำกว่าน้ำเกาะเกี่ยวซึ่งปริมาณของ free water นั้นสามารถใช้เป็นเครื่องมือสำหรับการทำนายการเน่าเสียของอาหารได้ (Rockland and Beuchat, 1987)

### 2.9.1 กิจกรรมของน้ำ (Water activity, $a_w$ )

กิจกรรมของน้ำ คือปริมาณทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่เป็นตัวชี้ถึงศักยภาพที่น้ำจะถูกนำไปใช้เพื่อการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ในอาหารและปฏิกิริยาเคมีต่างๆ และมีนิยามว่าเป็นความชื้นสัมพัทธ์สมดุล (Equilibrium Relative Humidity, ERH) ณ จุดที่อาหารไม่มีการดูดซับหรือสูญเสียน้ำ สามารถหาได้จากอัตราส่วนระหว่างความดันไอของน้ำในอาหาร (P) ต่อความดันไอน้ำบริสุทธิ์ ( $P_0$ ) ที่อุณหภูมิเดียวกัน (Labuza *et al.*, 1985) ดังสมการที่ 2.3

$$a_w = \frac{P}{P_0} = \frac{ERH(\%)}{100} \quad \text{สมการ (2.3)}$$

น้ำที่มีอยู่ในอาหารประกอบด้วย 2 ส่วนได้แก่ น้ำที่เกาะเกี่ยวกับองค์ประกอบของอาหารด้วยพันธะต่าง ๆ เช่น พันธะไอออนิก พันธะไฮโดรเจน และน้ำอิสระที่ไม่ได้เกิดพันธะใด ๆ โดยจะถูกนำไปใช้ในการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ รวมทั้งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์และจะอยู่ภายในช่องว่างของอาหาร ปริมาณความชื้น (moisture content) เป็นปริมาณน้ำทั้งหมดที่มีอยู่ในอาหาร คือ รวมทั้งสองส่วนดังกล่าว โดยสามารถหาปริมาณความชื้นของวัตถุได้สองแบบ คือ ความชื้นฐานเปียกและความชื้นฐานแห้ง ซึ่งมีนิยามดังนี้

ความชื้นฐานเปียก (wet basis)

$$M_w = \frac{W_w - W_d}{W_w} \times 100$$

สมการ (2.4)

ความชื้นฐานแห้ง (dry basis)

$$M_d = \frac{W_w - W_d}{W_d} \times 100$$

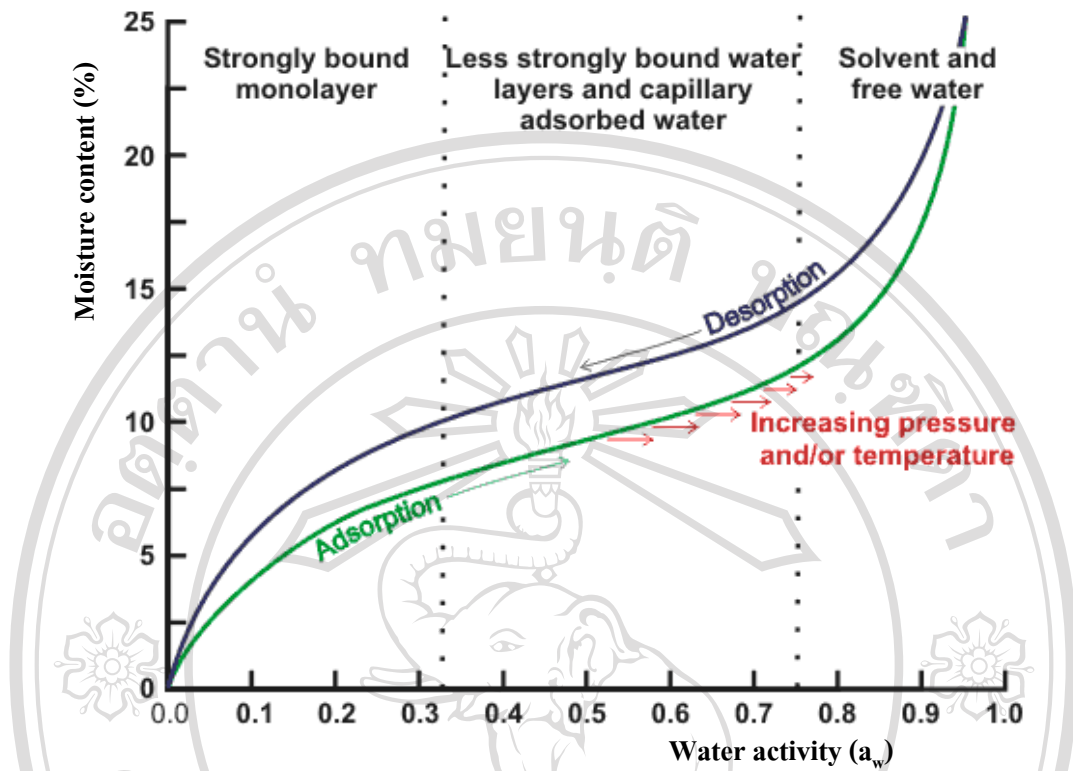
สมการ (2.5)

เมื่อ	$M_w$	คือ	ความชื้นฐานเปียก
	$M_d$	คือ	ความชื้นฐานแห้ง
	$W_w$	คือ	มวลผลิตภัณฑ์เปียก (kg)
	$W_d$	คือ	มวลผลิตภัณฑ์แห้ง (kg)

น้ำอิสระเป็นโมเลกุลของน้ำที่พร้อมจะเปลี่ยนสภาวะจากของเหลวไปเป็นไอ ซึ่งในการทำให้อาหารชื้นหรือแห้งเป็นการระเหยน้ำอิสระออกไป ส่วนการเติมเกลือ น้ำตาล หรือส่วนผสม (Ingredient) อื่น ๆ ลงไป โมเลกุลของสารเหล่านั้นจะก่อพันธะกับน้ำอิสระทำให้ค่ากิจกรรมของน้ำลดลงไปด้วย สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและค่ากิจกรรมของน้ำของผลิตภัณฑ์หนึ่ง ๆ ได้จากการทดลองวัดค่าทั้งสองของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด ณ อุณหภูมิที่คงที่ค่าหนึ่ง เรียกกราฟความสัมพันธ์ที่ได้ว่า sorption isotherms ดังภาพที่ 2.14 ซอร์พชันไอโซเทิร์มโดยทั่วไปจะมีลักษณะเป็นรูปซิกมอยด์ (sigmoidal shape) สามารถแบ่งเป็น 2 แบบคือ adsorption และ desorption ซึ่งกระบวนการทั้งสองมีความสำคัญต่อผลิตภัณฑ์อาหาร กระบวนการ adsorption คือ กระบวนการเพิ่มความชื้นเป็นที่ต้องการสำหรับอาหารแห้ง โดยในการศึกษาจะต้องทำตัวอย่างอาหารให้แห้งก่อน แล้วจึงนำไปปรับความชื้นในภาชนะปิดสนิทที่มีสารละลายเกลืออิ่มตัวที่เหมาะสม ในขณะที่ desorption เป็นกระบวนการลดความชื้นและมีความสำคัญต่ออาหารที่มี

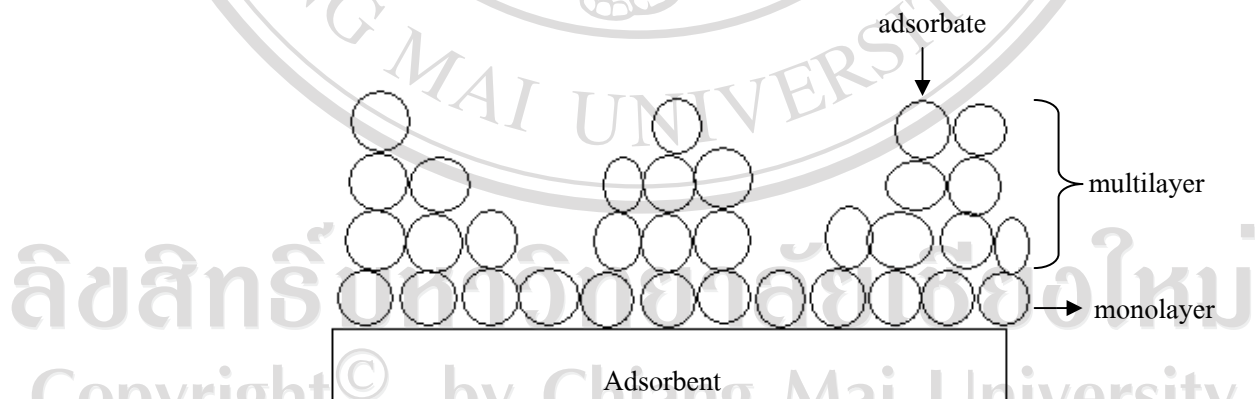
ความชื้นสูง ในการศึกษาจะให้ความชื้นกับตัวอย่างที่ระดับปริมาณน้ำอิสระสูงๆ จากนั้นจึงกำจัดความชื้นในภาชนะปิดสนิทที่มีสารละลายเกลืออิ่มตัวที่เหมาะสม (Bell and Labuza, 2000) จากภาพที่ 2.14 จะสังเกตได้ว่าที่ค่า  $a_w$  หนึ่งๆ ปริมาณความชื้นของ desorption จะมากกว่า adsorption เสมอ ซึ่งโดยปกติแล้วจะเป็นเป็นกระบวนการที่ไม่สามารถผันกลับได้จึงเกิดปรากฏการณ์ดังกล่าว เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าฮิสเทอเรซิส (hysteresis) ขนาดของฮิสเทอเรซิสนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของอาหาร อุณหภูมิการเก็บรักษา ซึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น โดยขนาดของฮิสเทอเรซิสสามารถนำมาคาดคะเนการเสื่อมสลายของอาหารจากปฏิกิริยาเคมีของเชื้อจุลินทรีย์ได้

โดยทั่วไป sorption isotherms จะแบ่งออกได้ 3 ส่วนแตกต่างกันตามปริมาณความสัมพันธ์ระหว่างน้ำและการเปลี่ยนแปลงทางเคมีกายภาพ (physiochemical) ส่วนที่ 1 ส่วนที่มีปริมาณความชื้นต่ำ (low moisture zone) มีค่า  $a_w$  0-0.25 เส้นกราฟจะมีลักษณะค่อนข้างชัน บริเวณนี้จะเกิดปฏิกิริยาระหว่างน้ำและอาหารโดยตรง และมีพลังงานจากการเกิดปฏิกิริยามากที่สุดเกิดเป็นน้ำชั้นเดี่ยวบนผิวอาหาร (monolayer) ดังภาพที่ 2.15 โดยที่โมเลกุลของน้ำจะไม่มีการเคลื่อนที่จึงไม่มีปริมาณน้ำอิสระเพียงพอต่อการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ ส่วนที่ 2 ส่วนที่มีปริมาณน้ำปานกลาง (intermediate moisture zone) มีค่า  $a_w$  0.25-0.75 เส้นกราฟจะมีลักษณะค่อนข้างราบ ในส่วนนี้จะประกอบด้วยน้ำจากส่วนที่ 1 รวมกับน้ำที่ก่อกันระหว่างน้ำเอง (water-water interaction) และน้ำที่ก่อกันระหว่างน้ำกับอาหาร (water-solid interaction) เกิดเป็นมัลติเลเยอร์ (multilayer) บนผิวของอาหาร และจะมีพลังงานระหว่างพันธะน้อยกว่าส่วนที่ 1 สำหรับส่วนที่ 3 เป็นส่วนที่มีความชื้นสูง (high moisture zone) มีค่า  $a_w > 0.75$  จะประกอบด้วยน้ำอิสระจำนวนมากเพราะในส่วนนี้ความแข็งแรงของพันธะระหว่างน้ำและอาหารน้อยที่สุด สามารถกำจัดออกได้ง่ายซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวทำละลาย ใช้สำหรับการเกิดปฏิกิริยาเคมีและการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์



ภาพ 2.14 sorption isotherms

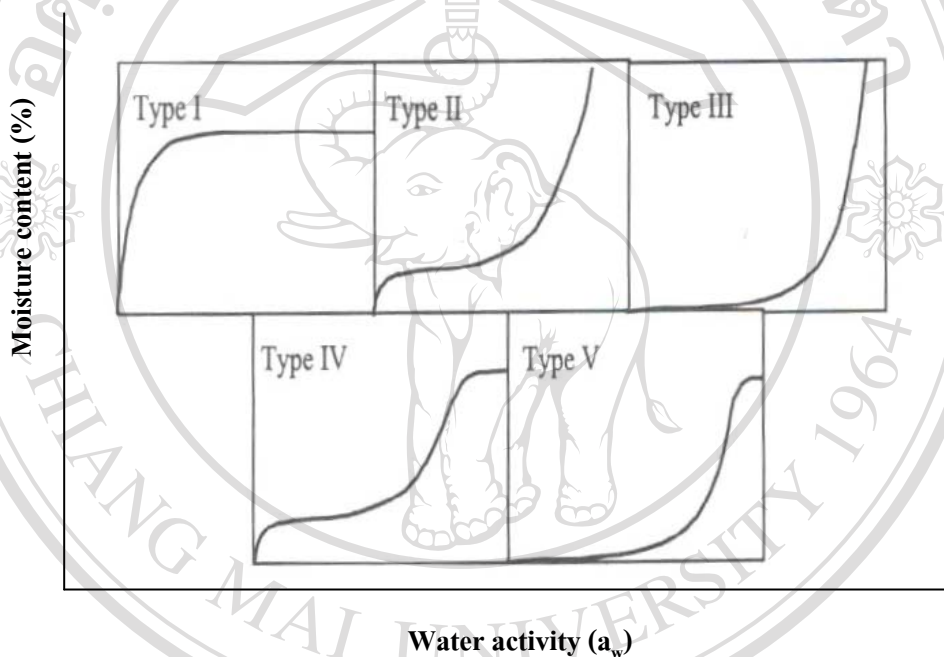
ที่มา: Chaplin (2009)



ภาพ 2.15 monolayer และ multilayer adsorption

วิธีการหาซอร์พชันไอโซเทอรัม สามารถทำได้โดยนำอาหารใส่ลงในภาชนะที่ทราบค่าความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งควบคุมความชื้นสัมพัทธ์โดยใช้สารละลายเกลืออิ่มตัวชนิดต่าง ๆ ใส่ลงในภาชนะแต่ละใบ ภาชนะที่ใช้ต้องสามารถควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ได้เป็นอย่างดี เพื่อให้มีความชื้นสัมพัทธ์ ณ จุดต่าง ๆ จากนั้น ตั้งอาหารทิ้งไว้จนเข้าสู่ภาวะสมดุล ซึ่ง ณ จุดสมดุลนี้จะทราบค่า

กิจกรรมของน้ำ จากนั้นวัดค่าปริมาณความชื้น (moisture content) แล้วนำค่าทั้งสองไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ จากกราฟจะพบว่าเมื่อค่าปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้นค่ากิจกรรมของน้ำก็เพิ่มขึ้นด้วย แต่จะเพิ่มแบบไม่เป็นเส้นตรง นอกจากนี้กราฟ moisture sorption isotherms ของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดจะมีลักษณะที่แตกต่างกัน Brunauer *et al.* (1938) ได้แบ่งประเภทไอโซเทิร์มออกเป็น 5 ประเภทดังภาพที่ 2.16 โดยอาหารส่วนมากจะมีคุณลักษณะแบบไอโซเทิร์มประเภทที่ 2 ที่มีรูปร่างแบบ sigmoid



ภาพ 2.16 isotherms ประเภทต่างๆของอาหาร

ที่มา: ปิยภรณ์, (2550)

### 2.9.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ moisture sorption isotherms

มีสมการทางคณิตศาสตร์หลายสมการที่ใช้ในการอธิบายซอร์พชันไอโซเทิร์มในอาหารดังตารางที่ 1 เช่น สมการของ BET พัฒนาโดย Brunauer, Emmett & Teller (BET) model หรือ Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB) model โดย Lomauro *et al.* (1985) กล่าวว่า moisture adsorption isotherm ของอาหารชนิดหนึ่งสามารถอธิบายด้วยสมการซอร์พชันมากกว่าหนึ่งสมการ โดยสมการที่เหมาะสมที่สุดคือสมการที่สามารถให้การทำนายข้อมูลได้แม่นยำที่สุด

ตาราง 2.1 สมการรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของซอร์พชันไอโซเทอรั่ม (sorption isotherms)

Model	Equation
BET (Brunauer, Emmett & Teller, 1938)	$M = \frac{M_o C a_w}{(1 - a_w)((1 - a_w) + C a_w)}$ สมการ (2.6)
GAB	$M = \frac{M_o C K a_w}{[(1 - K a_w) + (1 - K a_w + C K a_w)]}$ สมการ (2.7)
(Guggenheim-Anderson-de Boer)	$C = C_0 \exp\left(\frac{\Delta H_c}{RT}\right)$ สมการ (2.8)
(Van den Berg, 1984)	$K = K_0 \exp\left(\frac{\Delta H_k}{RT}\right)$ สมการ (2.9)
Modified Chung-Pfost (Chung & Pfost 1967)	$a_w = \exp\left[-\frac{A}{B+T} \exp(-BM)\right]$ สมการ (2.10)
Modified Halsey (Iglesias and Chirife, 1976)	$a_w = \exp\left[-\frac{\exp(A+BT)}{M^c}\right]$ สมการ (2.11)
Modified Henderson (Henderson, 1952)	$a_w = 1 - \exp[-A(T+k)M^c]$ สมการ (2.12)
Modified Oswin (Oswin, 1946)	$a_w = \left[\left(\frac{A+BT}{C}\right)^c + 1\right]^{-1}$ สมการ (2.13)

เมื่อ A, B, C, M<sub>0</sub> คือค่าคงที่ M คือ ปริมาณความชื้นฐานแห้ง a<sub>w</sub> คือค่ากิจกรรมของน้ำ และ T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์

ที่มา: Kaymak-Ertekin *et al.* (2004)

แบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวจะนำมาใช้ในการทำนายความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นของตัวอย่างที่ระดับแอกทิวิตีของน้ำต่าง ๆ กัน ผลการทำนายแต่ละสมการจะนำมาคำนวณหาค่าความเหมาะสมของสมการ เปรียบเทียบโดยใช้พารามิเตอร์ทางสถิติได้แก่ ค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยเป็นร้อยละ (mean relative error, MRE) สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination, R<sup>2</sup>) และค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (standard error of estimate, SEE) ดังสมการที่ 2.14 ถึง 2.16

$$MRE = \frac{100}{N} \sum \left| \frac{M_e - M_p}{M_e} \right| \quad \text{สมการ (2.14)}$$

$$R^2 = \frac{\sum (M_e - M_p)^2}{\sum M_e^2 \sum M_p^2} \quad \text{สมการ (2.15)}$$

$$SEE = \sqrt{\frac{\sum (M_e - M_p)^2}{df}} \quad \text{สมการ (2.16)}$$

- เมื่อ  $M_e$  = ปริมาณความชื้นจากการทดลอง (moisture content : experiment)  
 $M_p$  = ปริมาณความชื้นจากการทำนาย (moisture content : predicted value)  
 $df$  = Degree of freedom  
 $N$  = จำนวนชุดข้อมูล (number of experimental data)

คุณภาพของข้าวขึ้นอยู่กัปริมาณความชื้นขณะเก็บเกี่ยว สภาวะแวดล้อมในการขนส่ง กระบวนการเก็บรักษา และขึ้นอยู่กัพฤติกรรมการดูดซับความชื้นของข้าว (moisture sorption) น้ำเป็นตัวแปรสำคัญที่มีอิทธิพลต่อความคงตัวของผลิตภัณฑ์เกษตรในระหว่างกระบวนการเก็บรักษา เพราะน้ำจะมีผลต่อองค์ประกอบทางเคมี และโครงสร้างทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ เมื่อข้าวเกิดการดูดซับน้ำ หรือความชื้นจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบ ขนาด ลักษณะของสภาวะในกระบวนการผลิต และสภาวะการเก็บรักษา ซึ่งการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้มีความสำคัญมากต่อสภาวะการเก็บรักษา และอายุการเก็บรักษา เนื่องจากสถานที่เก็บรักษาแต่ละที่ข้อมีปริมาณความชื้น และอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ดังนั้นการทราบถึงพฤติกรรมการดูดซับความชื้นของข้าวจึงเป็นสิ่งสำคัญต่อการออกแบบกระบวนการทำแห้ง การเลือกใช้อุปกรณ์ในกระบวนการผลิต การคาดคะเนอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ และการเลือกใช้บรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสม (Gal, 1987; Ajisegiri and Chukwu, 2004)

### 2.9.3 ความสำคัญของซอร์พชันไอโซเทอร์มต่อเสถียรภาพของอาหาร

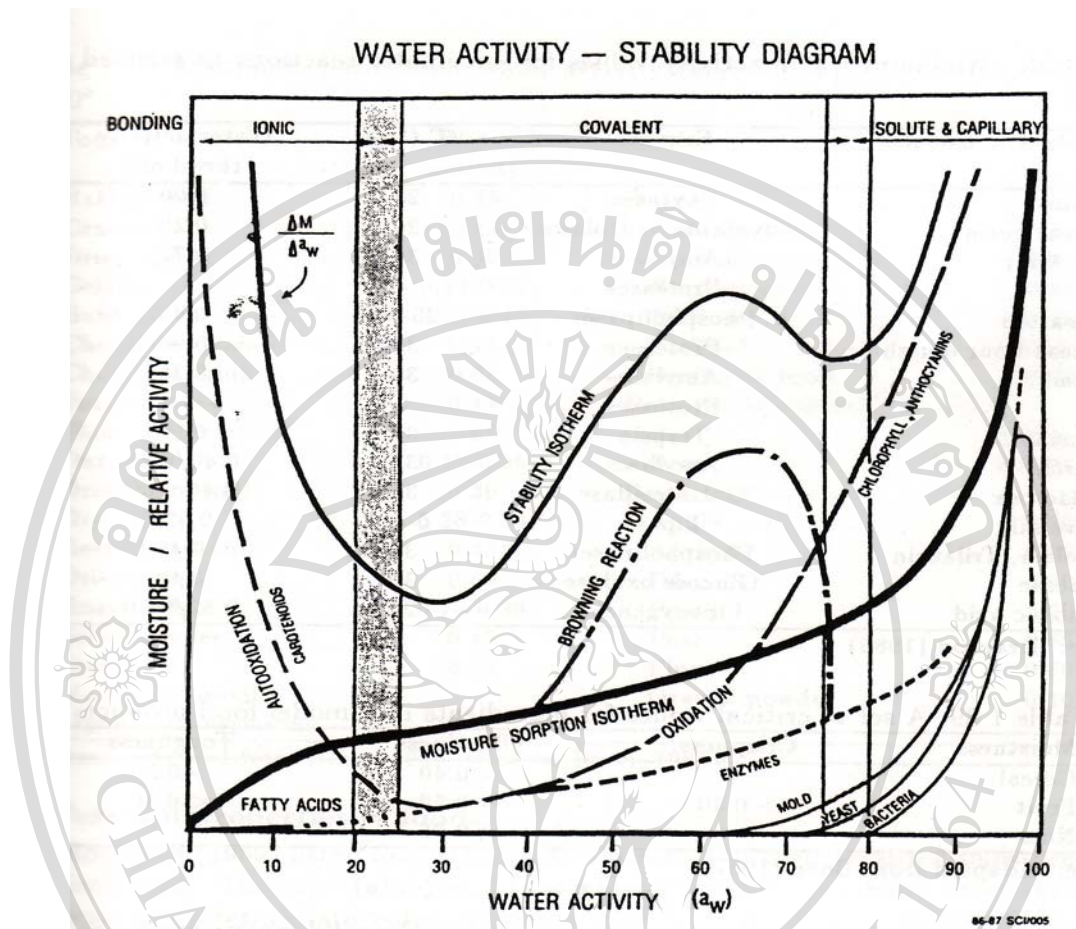
ก. ปฏิกริยาทางเคมีและกิจกรรมของเอนไซม์ในอาหาร  
 ปฏิกริยาทางเคมีของอาหารเช่น การเกิดสีน้ำตาลเนื่องมาจากปฏิกริยาที่ไม่ใช่เอนไซม์ การเกิดออกซิเดชันของไขมัน การเสื่อมสลายของวิตามิน กิจกรรมของเอนไซม์ การเสี่ยสภาพของโปรตีน การเกิดเจลลาคิโนเซชัน และการเกิดครีโทรแกรเดชันของแป้ง โดยทั่วไปมักใช้สมการ BET ไอโซเทอร์มในการทำนายค่าโมโนเลเยอร์ ซึ่งความชื้นที่ต่ำกว่าระดับ BET โมโนเลเยอร์ ปฏิกริยา

เคมีของเอนไซม์จะลดลงอย่างมากหรือแทบจะหยุดกิจกรรมลง เนื่องจากสารตั้งต้นหรือซับสเตรทสามารถเคลื่อนที่ได้น้อยลง จึงไม่สามารถแพร่ผ่านไปยังตำแหน่งที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาของเอนไซม์ (active site) ได้ Labuza (1984) กล่าวว่าค่าโมโนเลเยอร์ของน้ำที่ทำนายได้จากสมการของ BET ไอโซเทอร์มจะมีค่ากิจกรรมของน้ำอยู่ระหว่าง 0.2-0.4 ซึ่งการเสื่อมสลายทางคุณภาพของอาหารแห้ง และปฏิกิริยาเคมีส่วนมากจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีค่ากิจกรรมของน้ำมากกว่า 0.3 และค่ากิจกรรมของน้ำที่เพิ่มขึ้น 0.1 จะทำให้อายุการเก็บรักษาของอาหารลดลง 2-3 เท่า (Salwin, 1959; Labuza 1984) Leung (1987) กล่าวว่าน้ำมีอิทธิพลต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีได้หลายทาง คือ (1) เป็นสารตั้งต้นการเกิดปฏิกิริยา เช่น ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของซูโครส (2) เป็นตัวทำลาย เช่น reaction rate retardation (3) น้ำทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนไหวของสารที่เข้าทำปฏิกิริยาโดยมีผลต่อค่าความหนืดของอาหาร (4) น้ำทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจน หรือเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับสารชนิดอื่นๆ เช่น ส่งผลต่ออัตราการเกิดออกซิเดชันของไขมันโดยการเข้าล้อมรอบโลหะที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา หรือเกิดพันธะไฮโดรเจนกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogenperoxide) (5) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของของแข็ง เช่น การรวมตัวของโปรตีน (protein conformation) และการเปลี่ยนแปลงสภาพของน้ำตาลและแป้งจาก amorphous เป็น crystalline

ปฏิกิริยาเมลลาร์ด หรือปฏิกิริยาสีน้ำตาล และปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันเป็นปฏิกิริยาที่สำคัญที่สุดที่เกิดขึ้นในอาหารที่มีค่า  $a_w$  ต่ำ ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลจะขึ้นอยู่กับน้ำและมีจะอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงสุดที่ระดับความชื้นปานกลาง เนื่องจากน้ำมีบทบาททั้งเป็นตัวทำลายและเป็นสารยับยั้งปฏิกิริยาดังกล่าว โดยขีดจำกัดของปฏิกิริยาที่ค่า  $a_w$  ต่ำคือ การไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ของสาร และหากมีปริมาณน้ำที่มากเกินไปจะทำให้สารมีความเข้มข้นต่ำลง การเกิดปฏิกิริยาจึงลดต่ำลง (วิลโล, 2546)

ค่ากิจกรรมของน้ำที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีเพิ่มขึ้นเนื่องจากสารที่เข้าทำปฏิกิริยามีการเคลื่อนที่มากขึ้น ยกเว้นการเกิดออกซิเดชันของไขมัน (ภาพ 2.17) โดยจะมีอัตราการเกิดออกซิเดชันที่ต่ำที่สุดในอาหารที่มีค่ากิจกรรมของน้ำในช่วง 0.2-0.4 เนื่องจากเมื่ออาหารมีค่ากิจกรรมของน้ำต่ำ น้ำจะก่อพันธะไฮโดรเจนกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ หรือเข้าล้อมรอบโลหะที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สำหรับในส่วน of intermediate moisture zone และ high moisture zone อัตราการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีจะลดลงเมื่อค่ากิจกรรมของน้ำเพิ่มมากขึ้น เนื่องมาจากผลของการเป็นตัวทำลายจากการมีน้ำมากเกินไปต่อการเกิดปฏิกิริยา





ภาพ 2.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากิจกรรมของน้ำ ปริมาณความชื้น และอัตราการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของอาหาร  
ที่มา: Rockland (1987)

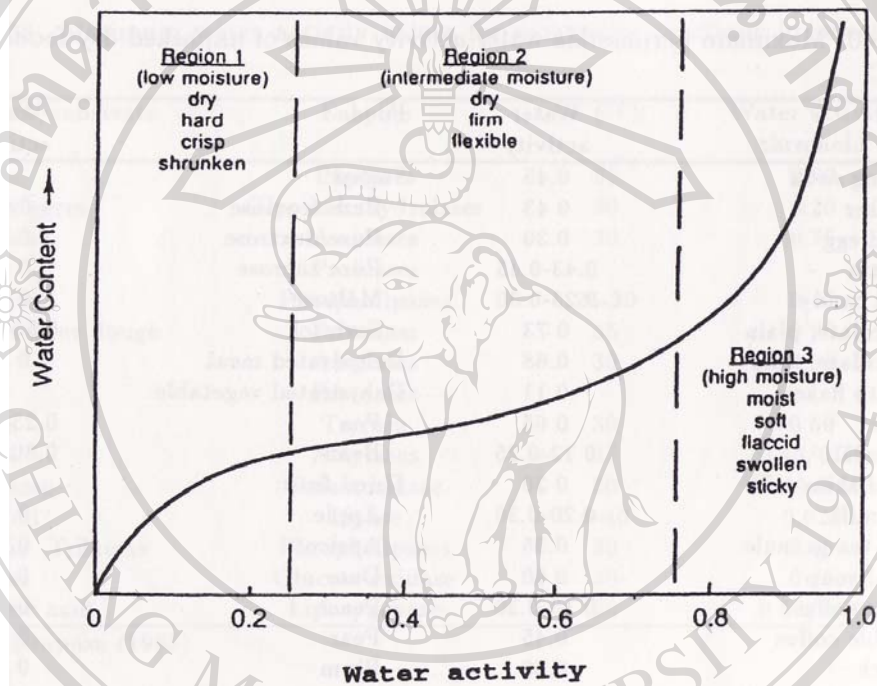
ข. ความเสถียรของรงควัตถุในอาหาร

ความเสถียรของรงควัตถุในอาหารนั้นได้รับอิทธิพลจากปริมาณออกซิเจน การสัมผัสกับแสง ปริมาณสารออกซิไดส์ซิง (oxidizing) หรือรีดิวส์ซิง (reducing) ปริมาณโลหะหนัก ค่ากิจกรรมของน้ำ ความเป็นกรดต่าง และอุณหภูมิ Von Elbe (1987) กล่าวว่าค่ากิจกรรมของน้ำจัดเป็นปัจจัยลำดับต้นๆที่ส่งผลต่อความเสถียรของรงควัตถุ และสีของผลิตภัณฑ์อาหาร

ค. คุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสของอาหาร

Rockland (1969) ได้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างเนื้อสัมผัสของอาหารกับค่ากิจกรรมของน้ำดังภาพที่ 2.18 ในส่วนที่ 1 ค่ากิจกรรมของน้ำต่ำ (low water activity) ได้แก่ อาหารแห้ง แข็งกรอบ และหัดตัว ส่วนที่ 2 ค่ากิจกรรมของน้ำปานกลาง (intermediate water activity) ได้แก่ อาหาร

แน่นเนื้อและยืดหยุ่น และส่วนที่ 3 ค่ากิจกรรมของน้ำสูง (high water activity) อาหารจะค่อนข้างชื้น อ่อนตัว น้ำน้ำ (juicy) บวมน้ำ (swollen) และค่อนข้างเกาะตัวกัน โดยการเกาะตัวของอาหารเกิดจากการเปลี่ยนแปลงสภาพจากกลาส (amorphous glass) ไปเป็นของเหลวหนืด (amorphous rubber) ปริมาณความชื้นมีผลต่อการเกาะติดกันของอนุภาค ถ้าอาหารมีน้ำตาลสูงจะเห็นได้ถึงการเปลี่ยนแปลงของวัฏภาคที่ชัดเจนที่อุณหภูมิห้อง



ภาพ 2.18 ลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหารที่ค่ากิจกรรมของน้ำต่างๆ

ที่มา: Bourne *et al.* (1987)

### ง. อัตราการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์และการผลิตสารพิษในอาหาร

Labuza (1984) ศึกษาถึงชนิดของเชื้อจุลินทรีย์ที่สามารถเจริญเติบโต และสามารถผลิตสารพิษได้เมื่ออาหารมีค่ากิจกรรมของน้ำต่ำ และพบว่าที่ระดับกิจกรรมของน้ำต่ำมากๆจะไม่มีเชื้อจุลินทรีย์ชนิดใดสามารถเจริญได้ โดยอาหารส่วนมากจะมีค่ากิจกรรมของน้ำอยู่ในช่วง 0.6-0.7 ซึ่งเชื้อแบคทีเรียจะสามารถเจริญได้เมื่อมีค่ากิจกรรมของน้ำมากกว่า 0.90 สำหรับยีสต์และราจะสามารถเจริญได้เมื่อมีค่ากิจกรรมของน้ำมากกว่า 0.80 (Okos *et al.*, 1992) ดังนั้นจากความรู้เรื่องซอร์พชันไอโซเทอรั่ม จะสามารถใช้ทำนายปริมาณความชื้นในอาหารมากที่สุดที่สามารถจะมีอยู่ในอาหารได้ในระหว่างกระบวนการเก็บรักษา โดยที่อาหารสามารถมีค่ากิจกรรมของน้ำสูงได้แต่ต้อง

ใช้ปัจจัยอื่นๆร่วมในการเก็บรักษาด้วย เช่น เกลือ ความเป็นกรดต่าง อุณหภูมิ หรือสารป้องกันการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์

#### จ. อัตราการตายของเชื้อจุลินทรีย์ในอาหาร

อัตราการมีชีวิตรอดและอัตราการตายของเชื้อจุลินทรีย์ขึ้นอยู่กับค่ากิจกรรมของน้ำของอาหาร โดยทั่วไปอัตราการทำลายเชื้อจุลินทรีย์จะลดลงเมื่อค่ากิจกรรมของน้ำลดลง เนื่องจากไม่มีปริมาณน้ำที่เพียงพอต่อการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งกิจกรรมของเชื้อจุลินทรีย์ส่วนใหญ่จะถูกยับยั้งที่  $a_w$  ต่ำกว่า 0.6 เชื้อราส่วนใหญ่ถูกยับยั้งการเจริญที่  $a_w$  ต่ำกว่า 0.7 ส่วนยีสต์และแบคทีเรียส่วนใหญ่ถูกยับยั้งการเจริญที่  $a_w$  ต่ำกว่า 0.8 และ 0.9 ตามลำดับ ในขณะที่อาหารสด เช่น ผักผลไม้ เนื้อสัตว์รวมทั้งสัตว์ปีกและปลา มีค่า  $a_w$  อยู่ระหว่าง 0.97-1.00 ซึ่งเป็นสภาพที่เหมาะสมต่อการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ส่วนใหญ่ (Banwart, 1983) การลดค่า  $a_w$  เพื่อไม่ให้เชื้อจุลินทรีย์สามารถนำน้ำไปใช้ในการเจริญได้มีหลายวิธี เช่น

1. การกำจัดน้ำในหน่วยปฏิบัติการต่างๆ เช่น การทำแห้ง การระเหย และการทำแห้งแบบระเหิด
2. การทำให้น้ำในอาหารตกผลึกกลายเป็นน้ำแข็ง ค่า  $a_w$  ของน้ำและน้ำแข็งจะต่ำลงถ้าอุณหภูมิลดต่ำกว่า  $0^{\circ}\text{C}$  โดยน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ  $0^{\circ}\text{C}$  จะมีค่า  $a_w$  เท่ากับ 1.00 และมีค่า 0.953 ที่  $-5^{\circ}\text{C}$  0.907 ที่  $-10^{\circ}\text{C}$  และ 0.823 ที่  $-20^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ และจะลดลงไปเรื่อยๆในอาหาร ถ้าเกิดน้ำแข็งมากขึ้นความเข้มข้นของตัวถูกละลายในน้ำส่วนที่เหลือก็จะเพิ่มมากขึ้นเป็นผลทำให้ค่า  $a_w$  ลดต่ำลงไปอีก
3. การตรึงน้ำในอาหาร การใช้สารคอลลอยด์ที่ชอบรวมกับน้ำ เช่น วุ้น ทำให้จุลินทรีย์หรือปฏิกิริยาทางเคมีต่างๆ ไม่สามารถนำน้ำไปใช้ได้ ดังนั้นการใส่วุ้นในอาหารเพียง 3 หรือ 4% จะสามารถป้องกันการเจริญของเชื้อแบคทีเรียได้ การตรึงน้ำด้วยวิธีอื่นๆ ได้แก่ การใช้ไอออนหรือตัวถูกละลายเป็นตัวดึงน้ำในสารละลายไม่ให้เป็นอิสระ การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย เช่น เกลือ หรือน้ำตาล มีผลทำให้อาหารนั้นแห้งลง ซึ่งนอกจากจะดึงน้ำจากสารละลายแล้ว น้ำที่อยู่ในเซลล์จะถูกดึงออกมาด้วยวิธีออสโมซิสเนื่องจากความเข้มข้นของตัวถูกละลายข้างนอกสูงกว่าภายในเซลล์