

## บทที่ 2

### เอกสารที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 กล้วยน้ำว่า

กล้วยน้ำว่าเหลือง กล้วยใต้ กล้วยอ่อง และ กล้วยตานีอ่อง คือชื่อของกล้วยน้ำว่าที่เรียกต่างกันในแต่ละภาคของประเทศไทย กล้วยน้ำว่ามีชื่อวิทยาศาสตร์ *Musa satientum* Linn กล้วยชนิดนี้พบได้ทุกภาคในประเทศไทยแต่ที่นิยมปลูกกันมากนั้น ได้แก่ ภาคกลางแทบทุกจังหวัด และภาคเหนือตอนล่างโดยปลูกมากที่จังหวัดพิษณุโลก (พฤษภะ, 2542) กล้วยน้ำว่าเป็นพืชที่ไม่ชอบดินที่มีน้ำขัง ชอบดินร่วนซุยและดินเหนียวที่อุ้มน้ำได้ดี ลำต้นสูงไม่เกิน 3.5 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 15 เซนติเมตร กาบลำต้นด้านนอกมีสีเขียวอ่อนมีปะคำบ้างเล็กน้อย ก้านใบมีร่องค่อนข้างแคบเส้นกลางใบสีเขียว ก้านช่อดอกไม่มีขน ปลีรูปไข่ค่อนข้างป้อมปลายป้านด้านนอกสีแดงอมม่วงด้านในมีสีแดงเข้ม กล้วยให้ผลผลิตเป็นเครือโดยเครือหนึ่งมี 7 - 10 หวี หวีหนึ่งมี 10 - 16 ผล ก้านผลยาว เปลือกหนา สุกมีสีเหลืองเนื้อสีขาว รสหวานไส้กลางมีสีเหลือง ชมพู หรือขาว ทำให้แบ่งออกเป็นกล้วยน้ำว่าเหลือง กล้วยน้ำว่าแดง และกล้วยน้ำว่าขาว (พาณิชย์, 2542) การขยายพันธุ์ทำได้โดยการแยกหน่อหรือแยกเหง้า และเนื่องจากกล้วยเป็นพืชที่ปลูกกันและผลกล้วยก็นิยมนำมารับประทานกันมาก ดังนั้นกล้วยจึงมีบทบาทเกี่ยวข้องกับคนไทยเนื่องจากเป็นพืชปลูกง่ายในทุกภาคของประเทศไทย เติบโตเร็ว ให้ผลตลอดปี ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาถึงคุณค่าทางโภชนาการของผลกล้วยในประเทศไทย โดยในปี พ.ศ 2503 ชูจิตร สมบัติพานิช ได้ทำการศึกษากล้วยที่รับประทานกันอยู่เป็นประจำ และต่อมาได้มีการศึกษากล้วยชนิดอื่น ๆ มากขึ้น (เบญจมาศ, 2538) ผลกล้วยเหมาะต่อการบริโภคสำหรับทุกเพศทุกวัย เพราะเป็นผลไม้ที่อุดมด้วยคุณค่าทางอาหาร นอกจากนี้กล้วยสุกยังย่อยง่าย มีไขมันต่ำแต่ให้พลังงานสูง ช่วยลดแก๊สในกระเพาะอาหาร (Salunke and Desal, 1984) กล้วยสุกมีคุณค่าอาหารต่าง ๆ ดังตาราง 2.1 นอกจากนี้ในเปลือกกล้วยยังมีสารแพคตินที่ให้กลิ่นและรสเฉพาะของกล้วย (ภาณุพรรณ, 2544) ในเนื้อกล้วยประกอบไปด้วย Reducing sugars 3 ชนิด คือ glucose, fructose และ galactose เมื่อกล้วยสุกปริมาณน้ำตาล glucose และ fructose จะเพิ่มขึ้น (Lizana, 2002)

ตาราง 2.1 คุณค่าอาหารของกล้วยน้ำว้าจากน้ำหนักเนื้อผลกล้วยสุก 100 กรัม

องค์ประกอบ	ปริมาณ
พลังงาน	85 แคลอรี
โปรตีน	1.1 กรัม
ไขมัน	0.2 กรัม
คาร์โบไฮเดรต	22.2 กรัม
เส้นใย	0.8 กรัม
แคลเซียม	8.0 มิลลิกรัม
เหล็ก	0.7 มิลลิกรัม
โปแตสเซียม	370 มิลลิกรัม
แมกนีเซียม	33 มิลลิกรัม
วิตามิน A	190 IU
Thiamine	0.05 มิลลิกรัม
Riboflavin	0.06 มิลลิกรัม
Niacin	0.7 มิลลิกรัม
วิตามิน C	10.0 มิลลิกรัม

ที่มา : Stover and Simmonds 1987

## 2.2 เชลลูโลสที่สังเคราะห์โดยเชื้อแบคทีเรีย

เชลลูโลสคือองค์ประกอบหลักในพืชที่ถูกสังเคราะห์ขึ้น พบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1839 โดยจะอยู่ในรูปของเชลลูโลสที่บริสุทธิ์ในเส้นใยของฝ้ายเป็นส่วนใหญ่ ส่วนในพืชอื่นที่จะมีลิกนินและเฮมิเชลลูโลสปะปนอยู่ เชลลูโลสเป็นสารอินทรีย์ที่มีมากที่สุดในสิ่งมีชีวิตที่อยู่บนบก ซึ่งมนุษย์นำเชลลูโลสมาใช้ในการผลิตดินปืนที่มีวันน้อยในอดีต และในปัจจุบันได้มีการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมที่หลากหลาย เช่น ใช้เป็นส่วนประกอบหลักในกระดาษ ใช้เป็นวัสดุเสริมแรง เป็นต้น แต่เชลลูโลสก็ไม่ได้ถูกสังเคราะห์โดยพืชเท่านั้น จุลินทรีย์ก็สามารถสังเคราะห์ได้และที่รู้จักกันดี ได้แก่ *Acetobacter xylinum* โดยเชลลูโลสที่ผลิตได้จากแบคทีเรียชนิดนี้ รู้จักกันโดยทั่วไปว่า วุ้นสวรรค์ วุ้นมะพร้าว เห็ดชาแดง วุ้นน้ำส้ม เห็ดรสเค็ม และ เห็ดกัมพูชา

เส้นใยเซลลูโลสที่สังเคราะห์โดยแบคทีเรียเรียกว่า “bacterial cellulose” มีโครงสร้างทางเคมีเหมือนกับเซลลูโลสจากพืชโดยประกอบด้วยเซลลูโลสซึ่งมีน้ำตาลกลูโคสต่อกันด้วยพันธะβ(1-4) และมีคุณสมบัติทางด้านการละลาย, การเกิดผลึกและองค์ประกอบอื่น ๆ เหมือนกับเซลลูโลสที่ได้จากพืช ซึ่งเมื่อต้มที่อุณหภูมิ 100 °C ก็ยังคงลักษณะเดิม (Krsstynowicz and Belecki, 2001) แต่โครงสร้างของเส้นใยเซลลูโลสที่สังเคราะห์โดยจุลินทรีย์ประกอบด้วยเส้นใยเล็ก ๆ มากมายเชื่อมกันเป็นร่างแห ซึ่งต่างจากเส้นใยจากพืช และมีคุณสมบัติเฉพาะที่แตกต่างจากเส้นใยเซลลูโลสจากพืชเช่น เส้นผ่าศูนย์กลางของเซลลูโลสจากแบคทีเรียมีขนาดเพียง 1 ใน 100 ของเซลลูโลสจากพืช (อานนท์, 2549)

จุลินทรีย์กลุ่มที่สังเคราะห์เซลลูโลสส่วนใหญ่จะได้แก่กลุ่ม แบคทีเรียที่สามารถสร้างน้ำส้มสายชูหรือที่เรียกว่าแบคทีเรียน้ำส้มสายชู เป็นแบคทีเรียแกรมลบหรือแกรมแปรผัน เซลล์มีรูปร่างตั้งแต่รีถึงเป็นท่อน อาจเป็นท่อนตรงหรือโค้ง เซลล์อาจอยู่เดี่ยว ๆ อยู่เป็นคู่หรือต่อกันเป็นสายและอาจพบได้ในลักษณะกลม (spherical) ยืดยาว (elongation) บวม (swollen) รูปกระบอง (club shape) หรือเป็นเส้นสาย (filamentous) เคลื่อนที่ได้โดยแฟลกเจลลารอบเซลล์หรือแฟลกเจลลาที่ขั้วหรือไม่เคลื่อนที่ (อภิญา, 2526) ต้องการอากาศ (aerobe) มีเมตาบอลิซึมจากการหายใจด้วยออกซิเจน โดยมีออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายในกระบวนการเปลี่ยนอาหารให้เป็นพลังงาน (Gillis and Delay, 1980) แบคทีเรียกลุ่มนี้ เช่น *Acetobacter xylinum*, *Alcaligenes* และ *Pseudomonas* (ปราโมทย์ และ สมคิด, 2544) เป็นต้น อุณหภูมิที่เหมาะสมในการเจริญคือ 25-30 องศาเซลเซียส ความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสม 4.0-6.0 ไม่ย่อยสลายแป้งและไม่สร้างอินโดล (สุภาวดี, 2543) สามารถออกซิไดซ์เอทานอลให้เป็นกรดน้ำส้มได้ในสภาพที่เป็นกลางและกรด (Verschuren and cardona, 1999) สายพันธุ์ส่วนใหญ่เจริญในอาหารที่มี D-glucose หรือ D-xylose แล้วทำให้อาหารมี pH ต่ำกว่า 4.5 พบเชื้อกลุ่มนี้ได้ในน้ำตาลและแอลกอฮอล์ที่เป็นกรดเล็กน้อย เช่น ในดอกไม้ ผลไม้ เบียร์ ไวน์ น้ำแอปเปิ้ลหมัก น้ำส้ม น้ำผลไม้รสเปรี้ยวและ น้ำผึ้ง (Gillis and Deley, 1980)

แบคทีเรียน้ำส้มสายชูแบ่งออกเป็น 4 สกุล (genus) คือ *Acetobacter* *Acidomonas* *Frateuria* และ *Gluconobacter* (Holt et al., 1994) ความแตกต่างของเชื่อน้ำส้มสายชูซึ่งเป็นแอโรบิกแบคทีเรีย แกรมลบ ที่สามารถออกซิไดซ์แอลกอฮอล์ไปเป็นกรดอะซิติกในอาหารที่เป็นกลางหรือกรด แต่เชื้อที่สามารถผลิตเซลลูโลสได้ในปริมาณสูงคือ *Acetobacter* เป็นเชื้อที่มีความใกล้เคียงกับ *Gluconobacter* ที่อยู่ใน Family *Pseudomonadaceae* แสดงในตาราง 2.2 คือนอกจากสามารถสร้างกรดได้แล้ว ยังสามารถเปลี่ยนกรดเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ (Buchanan and Gibbons, 1975) และทั้งสองสกุลแตกต่างกันที่ปฏิกิริยาทางชีวเคมีสายพันธุ์ที่

ได้รับความนิยมนำเอาไปผลิต เชลลูโลสมากที่สุดคือ *Acetobacter xylinum* หรือ *Gluconacetobacter xylinus* (Krsstynowicz and Belecki, 2001) เชื้อแบคทีเรียสกุลนี้เป็นเชื้อที่ใช้มาแต่โบราณ โดยสายพันธุ์นี้ จะมีความสามารถในการสร้างแผ่นเชลลูโลส ได้ดีแต่สร้างกรดได้ไม่ดีและให้แผ่นเชลลูโลส ที่มีขนาดใหญ่กว่าสายพันธุ์อื่น (ปราโมทย์ และ สมคิด, 2544) โดยสภาวะที่เหมาะสมในการเจริญคือ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.0-5.0 และต้องมีออกซิเจนที่มากพอเพราะเชื้อต้องการออกซิเจนในการเจริญ ซึ่งออกซิเจนก็เป็นปัจจัยหนึ่งในการกำหนดความหนาของแผ่นเชลลูโลส (Verschuren and Cardona, 1999)

ตาราง 2.2 เปรียบเทียบลักษณะของเชื้อ *Acetobacter* และ เชื้อ *Gluconobacter*

<i>Acetobacter</i>	<i>Gluconobacter</i>
1. มีแฟลกเจลลารอบเซลล์	1. มีแฟลกเจลลาที่ขั้วเซลล์
2. เนื่องจากมี citric acid cycle เมื่อออกซิไดซ์ แอลกอฮอล์หมดแล้วจึงสามารถออกซิไดซ์ กรดอะซิติกต่อทันทีให้เป็น คาร์บอน ไดออกไซด์ จึงได้ชื่อว่า overoxidation	2. ไม่มี citric acid cycle เมื่อออกซิไดซ์ แอลกอฮอล์หมดแล้ว จะไม่สามารถ ออกซิไดซ์กรดอะซิติกให้เป็น คาร์บอน ไดออกไซด์ จึงได้ชื่อว่า underoxidation
3. เมื่อเลี้ยงในอาหารที่มี $\text{CaCO}_3$ จะสร้าง กรดอะซิติกไปละลาย $\text{CaCO}_3$ เห็นเป็นวงใส รอบโคโลนี โดยในระยะแรกวงใสจะ ขยายตัว แล้วต่อมาจะแคบลง เนื่องจากเกิด overoxidation	3. เมื่อเลี้ยงในอาหารที่มี $\text{CaCO}_3$ จะสร้าง กรดอะซิติกไปละลาย $\text{CaCO}_3$ เห็นเป็นวง ใสรอบโคโลนี โดยในระยะแรกวงใสจะ ขยายตัว แล้วจะหยุดการขยายตัว เนื่องจากไม่เกิดการ overoxidation
4. สามารถผลิตกรดอะซิติกได้มากกว่าร้อยละ 4	4. สามารถผลิตกรดอะซิติกได้ร้อยละ 2
5. จัดเป็นแลคตาไฟล์ (lactophile) คือสามารถ เจริญได้ดี โดยใช้แลคเตท เป็นแหล่งคาร์บอน	5. จัดเป็นไกลโคไฟล์ (glycophile) คือ สามารถเจริญได้ดี โดยใช้กลูโคสเป็นแหล่ง คาร์บอนแต่ไม่สามารถเจริญในแลคเตท สามารถผลิตกรดกลูโคนิกจากกลูโคสได้ดี ไม่สร้างฝ้าในอาหารเหลวและเจริญได้ไม่ดี ในอาหารที่มีเอทานอลเป็นองค์ประกอบ

ที่มา : ศิริเพ็ญ. (2546)

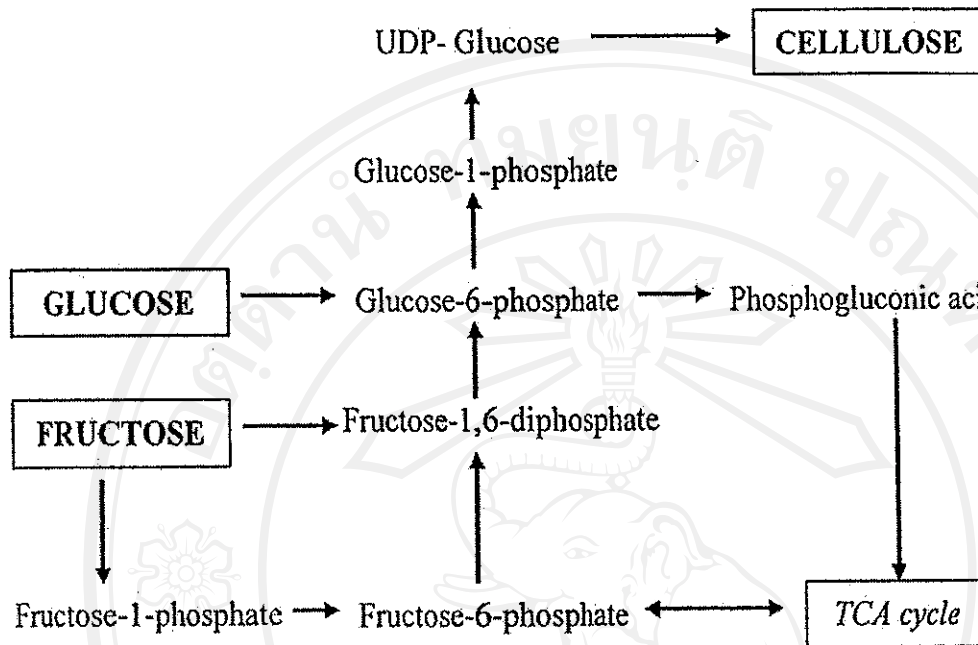
การผลิตเซลลูโลสจากแบคทีเรียที่มีวัตถุประสงค์ในการนำไปใช้อย่างมากมายขึ้นอยู่กับผู้ที่จะนำไปใช้ไม่ว่าจะเป็นการนำไปใช้ในการผลิตอาหาร , การผลิตที่เกี่ยวกับการแพทย์ และอุตสาหกรรมอื่น ๆ ที่มีการใช้เซลลูโลสเป็นวัตถุดิบ แต่การผลิตเซลลูโลสให้ได้ผลดีนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ๆ ซึ่งปัจจัยเหล่านั้นได้แก่ (อาานนท์, 2549)

1. สายพันธุ์ของแบคทีเรียและคุณภาพของเชื้อ ซึ่งแบคทีเรียที่ใช้ในการผลิตเซลลูโลสคือ *Acetobacter aceti* subspecies *xylinum* หรือ *Acetobacter xylinum* โดยเชื้อแบคทีเรียในจีนัสนี้ถูกใช้ในการผลิตน้ำส้มสายชูมาแต่โบราณ ซึ่งสายพันธุ์ที่สามารถผลิตกรดได้ (*A. aceti*) สามารถผลิตกรดอะซิติกได้มาก แต่สายพันธุ์ที่สามารถผลิตเซลลูโลสได้จะผลิตกรดอะซิติกในปริมาณที่น้อยกว่า (*A. xylinum*)

2. คุณภาพของเชื้อที่นำมาใช้ เช่น ความบริสุทธิ์ของเชื้อมีผลต่อความเร็วในการผลิตและคุณภาพเซลลูโลส ปริมาณออกซิเจน เนื่องจาก *Acetobacter xylinum* เป็นแบคทีเรียที่ต้องการออกซิเจนในการเจริญเติบโต ดังนั้นจึงพบการสร้างเซลลูโลสบนผิวหน้าของอาหารเลี้ยงเชื้อ กรดน้ำส้มสายชู (acetic acid) ช่วยในการปรับ pH ให้เหมาะสมกับการเจริญของเชื้อแบคทีเรีย ซึ่งอยู่ในช่วง pH 4.5 ถึง 5.0 ปริมาณกรดที่ใช้ควรอยู่ในช่วง 0.5 – 1.0 %

3. ปริมาณน้ำตาล เนื่องจากน้ำตาลเป็นแหล่งคาร์บอนที่สำคัญในการเปลี่ยนไปเป็นสารตั้งต้นที่ใช้ใน cellulose pathway ถ้ามีปริมาณน้อยจะทำให้ผลผลิตที่ได้น้อย แต่ถ้ามีน้ำตาลในปริมาณมากจะเกิดการสิ้นเปลืองเนื่องจากเชื้อนำไปใช้ไม่หมด ทำให้ยากต่อการบำบัดน้ำทิ้งจากการผลิต และสารประกอบไนโตรเจนช่วยในการเพิ่มผลผลิตโดยสามารถเพิ่มปริมาณการผลิตได้ 5 ถึง 30 %

นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นที่มีอิทธิพลต่อการผลิตเซลลูโลสได้แก่ Magnesium (Mg) และ ferric หรือ ferrous โดย Mg มีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการ metabolism ของเซลล์โดยเฉพาะอย่างยิ่งกระบวนการเจริญเติบโตและการสังเคราะห์ของเซลลูโลสของ *Acetobacter xylinum* โดย Mg มีผลต่อการทำงานของเอนไซม์ *Acetobacter cellulose synthase* ส่วน ferric หรือ ferrous เป็น cofactor ของเอนไซม์ oxygenase ที่จำเป็นต่อการผลิต high energy phosphorous compounds ซึ่งจะถูกนำไปใช้ในการสังเคราะห์เซลลูโลส โดยกระบวนการสังเคราะห์เซลลูโลสจากแบคทีเรียมี pathway ดังรูปที่ 2.1 เมื่อกลูโคสเข้าสู่ pathway จะมีการเติมฟอสเฟตให้กับกลูโคส โดยเอนไซม์ glucokinase ไปเป็น glucose-6-phosphate และจะเกิด isomerization ไปเป็น glucose-1-phosphate โดยเอนไซม์ phosphoglucomutase จากนั้นจะถูกสังเคราะห์ไปเป็น UDP-glucose โดยเอนไซม์ UDP- glucose pyrophosphorylase โดยจะใช้ UDP-glucose เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์เซลลูโลส (Rainer and Luiz, 1997)



รูปที่ 2.1 วิธีการสังเคราะห์เซลลูโลสในแบคทีเรีย *Acetobacter xylinum*  
ที่มา : Rainer and Luiz (1997)

Bacterial cellulose (BC) ที่สร้างจากแบคทีเรีย *Acetobacter xylinum* มีความบริสุทธิ์สูงกว่าเซลลูโลสจากพืชและมีคุณสมบัติในการดูดซับน้ำสูงมากและสามารถทนแรงดึงได้มากจึงถูกนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตของอุตสาหกรรมซึ่งสามารถจำแนกได้ดังนี้(Brown, 1989)

อุตสาหกรรมอาหารเพื่อสุขภาพ (health food industries) เป็นการนำเซลลูโลสไปเป็นส่วนประกอบอาหารและเครื่องดื่มเนื่องจากมีใยอาหารสูงช่วยในการขับถ่าย เช่น คุกกี้ผลไม้ผสมในโยเกิร์ตและเซลลูโลสในเครื่องดื่มประเภท dietary drink

อุตสาหกรรมเครื่องเสียง (audio industries) ได้นำคุณสมบัติในเรื่องความยืดหยุ่น และทนต่อแรงดึงของเซลลูโลสไปใช้เป็นแผ่น diaphragm ของลำโพงและหูฟังซึ่งให้คุณภาพเสียงที่ดีเยี่ยมให้ความถี่เสียงที่กว้างกว่าวัสดุอื่น ๆ

อุตสาหกรรมกระดาษและผลิตภัณฑ์จากกระดาษ (paper and products industries) ใช้คุณสมบัติของเซลลูโลสที่มีความคงทนและมีโครงสร้างที่แข็งแรง เพื่อนำมาทำกระดาษคุณภาพสูงที่ผิวกระดาษมีความเหนียวและแข็งแรงขึ้นจากกระดาษปกติ ใช้ทำกระดาษกรองที่มีความละเอียดสูงและแผ่นบางมากกว่ากระดาษกรองปกติ

อุตสาหกรรมเกี่ยวกับการรักษาและตกแต่งบาดแผล (wound Care products) ใช้ทำ  
พลาสติกปิดแผลในช่องปากเนื่องจากเซลลูโลสนั้นไม่ละลายน้ำ ใช้ทำหลอดเลือดหัวใจเทียมและ  
ผิวหนังเทียม

### 2.3 น้ำในอาหาร

น้ำเป็นส่วนประกอบหลักของอาหารทุกชนิด โดยอยู่ในน้ำอิสระ (free water) และที่เกาะ  
เกี่ยวกับสารอื่น ๆ (bound water) น้ำอิสระเป็นน้ำที่แทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างอาหาร อาจมี  
การเกาะกับองค์ประกอบของอาหารบ้างด้วยแรงที่ไม่แข็งแรงมากนัก มีคุณสมบัติเหมือนกับน้ำ  
ปกติ สามารถเป็นตัวทำละลายได้ มีส่วนเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมีและจุลินทรีย์สามารถที่จะ  
นำไปใช้ได้ แต่น้ำส่วนนี้ยังมีองค์ประกอบไม่เหมือนน้ำในธรรมชาติที่แท้จริง จึงมักเรียกน้ำอิสระ  
นี้ว่า แอคทีฟวอเตอร์ ซึ่งหมายถึงน้ำที่ยังคงสามารถที่จะดึงน้ำอิสระไว้ได้ (วิล, 2543)

ส่วนน้ำที่เกาะติดอยู่กับสารอื่น ๆ นั้นเป็นน้ำที่เกาะติดกับสารด้วยพันธะที่แข็งแรงมาก อาจ  
เป็นพันธะโคเวเลนต์หรือพันธะอื่น ๆ ไม่มีคุณสมบัติเป็นตัวทำละลาย ไม่มีส่วนในปฏิกิริยาเคมี  
และจุลินทรีย์ไม่สามารถที่จะนำไปใช้ประโยชน์ได้ ในอาหารมีองค์ประกอบที่ละลายหรือเกิด  
คอลลอยด์ของน้ำได้มากมาย องค์ประกอบเหล่านี้จะมีพันธะกับน้ำในสถานะเกาะเกี่ยวพันธะอื่น  
ส่วนที่เหลือเป็นน้ำอิสระ น้ำอาจถูกดูดซับด้วยสารคอลลอยด์และอยู่ในสภาพเจลที่พองตัว  
เนื่องจากคุณสมบัติการมีขั้วของน้ำ น้ำชนิดนี้เรียกว่า ไฮโดรชัน หรือน้ำอาจจับกับเกลือบางชนิดซึ่ง  
ไม่สามารถที่จะไล่ออกด้วยวิธีธรรมดา เช่นใช้ NaOH ถ้าองค์ประกอบของอาหารหรืออุณหภูมิ  
เปลี่ยนแปลงจะมีผลต่อน้ำอิสระ โดยทางอ้อมทำให้ปริมาณน้ำอิสระไม่คงที่ ดังนั้นอาหารต่างชนิด  
กันเมื่อมีความชื้นเท่ากันจึงไม่จำเป็นต้องมีน้ำอิสระเท่ากัน ถ้าอาหารมีน้ำอิสระมากจะเน่าเสียได้ง่าย  
เนื่องจากจุลินทรีย์สามารถที่จะเจริญเติบโตได้ดี

อย่างไรก็ตามการวัดปริมาณน้ำอิสระโดยตรงสามารถทำได้ยาก แต่น้ำอิสระมี  
ความสัมพันธ์กับความดันไอตามกฎของเรอ์ ก้าวก็คือความดันไอเป็นปฏิภาคโดยตรงกับน้ำอิสระ  
ด้วยเหตุนี้จึงใช้ค่าความดันไอไปเป็นตัววัดความอิสระของน้ำ เมื่อความอิสระของน้ำและวอเตอร์  
แอคทีวิตี (water activity) ของน้ำมีค่าเท่ากับอัตราส่วนของน้ำที่เป็นอิสระต่อน้ำที่มีอยู่ทั้งหมด  
ในอาหาร

น้ำในอาหารทำให้เกิดความดันไอ ขนาดของความดันไอจะขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่มีอยู่ใน  
อาหาร อุณหภูมิ และ ความเข้มข้นของตัวถูกละลาย โดยเฉพาะเกลือและน้ำตาลในน้ำ จำจำกัด

ความของ  $a_w$  คืออัตราส่วนระหว่างความดันไอของน้ำในอาหารต่อความดันไอของน้ำที่อุณหภูมิเดียวกัน

$$a_w = \frac{P/P_0}{ERH/100}$$

หรือ  $a_w = \frac{ERH}{100}$

เมื่อ  $P$  คือ ความดันไอของอาหาร (Pa)  
 $P_0$  คือ ความดันไอน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิเดียวกัน (Pa)

ถ้าความชื้นรอบ ๆ อาหารต่ำกว่าในอาหารจะทำให้  $a_w$  ที่ผิวหน้าลดลงและในทางกลับกัน  $a_w$  ที่ผิวหน้าของเราจะเพิ่มขึ้น ถ้าความชื้นรอบ ๆ อาหารมีค่าสูงกว่าในอาหาร ดังนั้นในการทดลองเพื่อหา  $a_w$  จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำภาชนะที่ปิดสนิทและจะต้องหาความชื้นสัมพัทธ์เหนืออาหารด้วย โดยค่าที่ได้เรียกว่า ความชื้นสัมพัทธ์สมดุล (equilibrium relative humidity, ERH) เมื่อนำ ERH หารด้วย 100 ก็จะเป็นค่า  $a_w$  ซึ่งค่า  $a_w$  ของน้ำบริสุทธิ์จะเป็น 1.00 และ จุลินทรีย์ก็ไม่สามารถที่จะเจริญได้ในน้ำบริสุทธิ์

สมการ Brunauer-Emmett-Teller (BET) แสดงค่า  $a_w$  ในรูปความสัมพันธ์ของปริมาณความชื้นดังต่อไปนี้

$$\frac{a_w}{M(1-a_w)} = \frac{1}{M_1C} + \frac{C-1}{M_1C}$$

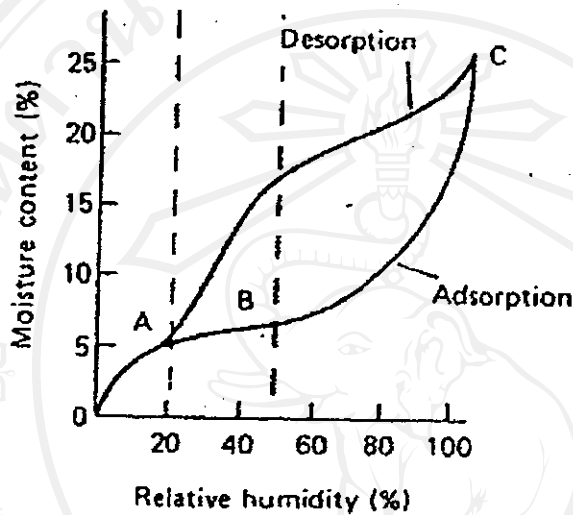
- ขณะที่  $a_w$  คือ ค่าวอเตอร์แอททิวิตี  
 $M$  คือ ปริมาณความชื้น (% ฐานแห้ง)  
 $M_1$  คือ ปริมาณความชื้นของโมเลกุลชั้นเดียว (% ฐานแห้ง)  
 $C$  คือ ค่าคงที่

น้ำส่วนหนึ่งในอาหารจะเกาะแน่นที่ตำแหน่งเฉพาะ เช่น หมู่ไฮดรอกซิลในโพลีแซคคาไรด์ หมู่คาร์บอนิลและหมู่อะมิโนในโปรตีนและไฮโดรเจนบอนด์ เมื่อทุกตำแหน่งถูกดูดซับด้วยน้ำทั้งหมด และปริมาณความชื้นที่ได้เรียกว่า BET monolayer value ตัวอย่างที่สำคัญได้แก่ เจลลาติน (11 %) แป้ง (11 %) เป็นต้น ดังนั้น BET monolayer value จึงหมายถึง ความชื้นที่อาหารมีความเสถียรและคงที่มากที่สุด ที่ปริมาณความชื้นต่ำกว่านี้จะเกิดอัตราการออกซิเดชันของไขมันสูงขึ้น ปฏิกริยามลลาร์ด หรือ กิจกรรมของเอนไซม์จะสูงขึ้นที่ปริมาณความชื้นสูงขึ้น

การเคลื่อนที่ของไอน้ำไปยังอากาศรอบ ๆ ขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นและองค์ประกอบของอาหารรวมทั้งอุณหภูมิและความชื้นของอากาศ ที่อุณหภูมิต่ำ ปริมาณความชื้นของอากาศ



จะเปลี่ยนไปจนกว่าความชื้นในอาหารจะสมดุลกับน้ำในอากาศรอบ ๆ นั่นคืออาหารจะไม่มีน้ำหนักเพิ่มขึ้นหรือลดลงภายในสภาวะดังกล่าวเราเรียกปริมาณความชื้นดังกล่าวว่า ปริมาณความชื้นสมดุลของอาหารและเรียกความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศว่า ความชื้นสัมพัทธ์สมดุลเมื่อนำค่าความชื้นสัมพัทธ์มาพล็อตกราฟกับปริมาณความชื้นสมดุลจะได้กราฟ ซอฟชั่นไอโซเทอมของน้ำดังรูป 2.2



รูปที่ 2.2 ซอฟชั่นไอโซเทอมของน้ำ ที่มา : วิล (2543)

อาหารแต่ละชนิดจะมีซอฟต์แวร์ไอโซเทอมของน้ำแตกต่างกันขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ รูปร่างของซอฟต์แวร์ไอโซเทอมของน้ำที่แตกต่างกันขึ้นกับโครงสร้างทางกายภาพ องค์ประกอบทางเคมีและปริมาณน้ำที่ถูกยึดอยู่ในอาหาร อย่างไรก็ตามซอฟต์แวร์ไอโซเทอมของน้ำทั้งหลายก็มีลักษณะคล้ายกับรูปที่ 2.1 ส่วนแรกเส้นโค้งถึงจุด A แสดงน้ำชั้นเดียวซึ่งมีเสถียรภาพมาก ไม่เยือกแข็งไม่ถูกจำกัดโดยการทำแห้ง ส่วนที่ 2 AB คือน้ำที่ถูกดูดซับหลาย ๆ ชั้นโมเลกุลภายในอาหารและสารละลายขององค์ประกอบที่ละลายน้ำได้ ส่วนที่ 3 เหนือ B น้ำอิสระจะถูกกลั่นตัวภายในโครงสร้างคาปิลลารีและเซลล์ในอาหาร น้ำอิสระนี้จะถูกยึดด้วยแรงอ่อน ๆ ในอาหารและถูกจำกัดได้ง่าย ทั้งนี้สังเกตได้จากความชันของกราฟ จุดลื่นไถลและปฏิกิริยาของเอนไซม์ที่จะใช้น้ำได้ อาหารที่ปริมาณความชื้นสูงกว่าจุด B นั้นจะเน่าเสียได้ง่าย

ซอฟต์แวร์ไอโซเทอมของน้ำแสดงถึง  $a_w$  ที่อาหารจะมีความคงตัวและสามารถทำให้การคาดคะเนการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นต่อ  $a_w$  และต่อความคงตัวในระหว่างการเก็บรักษา กราฟนี้มีประโยชน์ในการกำหนดอัตราและปริมาณการอบแห้ง

อัตราการเปลี่ยนแปลง  $a_w$  ของซอฟต์แวร์ไอโซเทอมของน้ำมีความแตกต่างกันขึ้นกับการกำจัดความชื้นจากอาหาร หรือเป็นการให้ความชื้นกับอาหารแห้ง ดังที่รู้จักกันในชื่อ ฮิสเทอรีซิสลูป (hysteresis loop) ความแตกต่างนี้สูงมากในอาหารบางชนิด เช่น ข้าว

การลดค่า  $a_w$  หรือน้ำอิสระเพื่อมิให้จุลินทรีย์สามารถนำน้ำไปใช้ในการเจริญเติบโตได้หลายวิธีเช่น

1. การกำจัดน้ำในหน่วยปฏิบัติการต่างๆ เช่น การทำแห้ง การระเหย การอบแห้ง และการระเหิด
2. การทำให้น้ำตกผลึกกลายเป็นน้ำแข็ง ค่า  $a_w$  ของน้ำและน้ำแข็งจะยิ่งลดลงถ้าอุณหภูมิยิ่งลดต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียสและลดลงเรื่อย ๆ ถ้าน้ำแข็งเกิดขึ้นมากความเข้มข้นของตัวถูกละลายในน้ำส่วนที่เหลือจะยิ่งเพิ่มมากขึ้นเป็นผลทำให้  $a_w$  ยิ่งลดต่ำลงไปอีก
3. การตรึงน้ำในอาหาร เช่น การใช้สารคอลลอยด์ที่ชอบรวมกับน้ำ ทำให้น้ำนำไปใช้ไม่ได้ เช่น การใส่วุ้นลงไปในอาหารเพียง 3-4 % จะสามารถป้องกันการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ได้ หรือการใช้ไอออนหรือตัวถูกละลายเป็นตัวดึงน้ำในสารละลายไม่ให้ เป็นอิสระเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย เช่น เกลือ น้ำตาล ทำให้อาหารนั้นแห้งลง นอกจากจะดึงน้ำจากสารละลายแล้ว น้ำในเซลล์จะถูกดึงมาด้วยวิธีออสโมซิสเนื่องจากความเข้มข้นของตัวถูกละลายข้างนอกสูงกว่าภายในเซลล์

ในกรณีที่อาหารมีค่า  $a_w$  สูง อาหารจะเกิดการเสื่อมเสียโดยแบคทีเรียเนื่องจากแบคทีเรียสามารถเจริญได้ดีกว่า ยีสต์และรา ถ้าอาหารถูกควบคุมค่า  $a_w$  ให้ต่ำลงเชื้อราหรือยีสต์จะเจริญได้ดีกว่าแบคทีเรีย ผลิตภัณฑ์ที่มีค่า  $a_w$  ต่ำเนื่องจากมีการเติมน้ำตาล เช่น แยม จะเกิดการเสื่อมเสียเนื่องจากยีสต์กลุ่มที่ชอบความดันออสโมติกที่สูง ส่วนอาหารที่มีเกลือสูงจะเสียเนื่องจากแบคทีเรียที่ชอบความเข้มข้นของเกลือสูง ๆ

ปฏิกิริยาของเอนไซม์จะลดลงอย่างมากที่ค่า  $a_w$  ต่ำกว่า BBT monolayer value ทั่วไป เนื่องจากสารตั้งต้นหรือซับสเตรทสามารถเคลื่อนที่ได้น้อยและไม่สามารถที่จะแพร่ไปยังตำแหน่งที่ไวต่อปฏิกิริยาของเอนไซม์ แต่การเปลี่ยนแปลงทางเคมียังซับซ้อน สิ่งสำคัญที่สุดที่เกิดขึ้นในอาหารที่มี  $a_w$  ต่ำนั้นคือปฏิกิริยาเมลลาร์ดและการออกซิเดชันของไขมัน ค่า  $a_w$  ที่ทำให้เกิดอัตราการเกิดสีน้ำตาลเร็วสูงสุดจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของอาหาร โดยทั่วไปการเคลื่อนที่ของสารที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาจะต่ำ การเกิดสีน้ำตาลจึงลดลง ปฏิกิริยาจะสูงสุดเมื่อ  $a_w$  เพิ่มขึ้นน้ำเป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล ซึ่งที่ปริมาณความชื้นสูง ๆ ปฏิกิริยา

สีน้ำตาลจะถูกยับยั้งโดยผลิตภัณฑ์สุดท้าย และน้ำที่ปริมาณความชื้นสูงจะทำให้สารมีความเข้มข้นต่ำลงมีผลทำให้ปฏิกิริยาสีน้ำตาลต่ำลง

การออกซิเดชันของไขมันเกิดที่ค่า  $a_w$  ต่ำเนื่องจากการทำงานของอนุมูลอิสระ สารยับยั้งการเกิดออกซิเดชันและสารคีเลตที่จับกับคะตะลิสต์โลหะจะกลับมาละลายได้ใหม่ จึงทำให้อัตราการออกซิเดชันลดลง ที่ค่า  $a_w$  สูง ๆ นั้นปฏิกิริยาการเร่งโลหะจะลดลงเนื่องจากการรวมตัวกับน้ำและเกิดสารไฮดรอกไซด์ซึ่งไม่ละลายน้ำ แต่ที่  $a_w$  สูงคะตะลิสต์จะกลับมาละลายได้ใหม่และโครงสร้างของอาหารจะพองขึ้นทำให้ตำแหน่งที่ไวต่อปฏิกิริยาสามารถที่จะสัมผัสกับอาหาร ได้มาก

## 2.4 การทำแห้ง

การกำจัดน้ำหรือการทำให้แห้ง (drying) หมายถึง การใช้ความร้อนภายใต้สภาวะควบคุมเพื่อกำจัดน้ำส่วนใหญ่ที่อยู่ในอาหาร โดยการระเหยน้ำหรือการระเหิดของแข็งในการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (freeze drying) คำจำกัดความนี้จะไม่รวมถึงการกำจัดน้ำออกจากอาหารอื่น ๆ เช่น การแยกโดยทางกลไก การทำให้ขึ้น โดยการใส่เมมเบรน การระเหย และการอบ เนื่องจากในกระบวนการเหล่านี้จะมีการกำจัดน้ำน้อยกว่าการทำให้แห้ง วัตถุประสงค์ของการกำจัดน้ำคือการยืดอายุการเก็บรักษาอาหารโดยการลดค่า  $a_w$  ซึ่งมีผลยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์และการนำเอนไซม์ โดยทั่วไปอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ในระหว่างกระบวนการมักจะไม่สูงพอที่จะยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ นอกจากนี้การลดน้ำหนักของปริมาณของอาหารยังช่วยลดค่าใช้จ่ายในการเก็บรักษาและขนส่ง เพิ่มความหลากหลายและความสะดวกให้แก่ผู้บริโภค

การอบแห้ง โดยทั่วไปมักกล่าวว่าเป็นกระบวนการที่แยกเอาน้ำหรือของเหลวออกจากวัสดุของแข็งด้วยการให้พลังงานความร้อนกับวัสดุของแข็งนั้นด้วยแต่ความเป็นจริงไม่ต้องให้ความร้อนก็สามารถทำให้วัสดุแห้งได้โดยวิธีฝังลมหรือใช้พัดลมเป่าผ่านวัสดุนั้นนาน ๆ อากาศที่พัดผ่านก็จะช่วยพาเอาน้ำหรือของเหลวหลุดติดไปด้วย (นักเศรษฐ์, 2547)

เมื่ออากาศถูกเป่าบนชิ้นอาหารที่เปียกชื้นความร้อนจะถ่ายเทไปที่ผิวด้านนอกของชิ้นอาหารความร้อนแฝงของกลายเป็นไอ (latent heat of vaporization) จะทำให้น้ำระเหยกลายเป็นไอน้ำและแพร่กระจายผ่าน boundary film ของอากาศแล้วพาไอน้ำระเหยออกไปดังรูปที่ 2.3 โดยมีอากาศแห้งเข้ามาแทนที่ ทำให้บริเวณที่ผิวของอาหารจะมีความดันไอน้ำลดลง เกิดความแตกต่างของความดันไอน้ำระหว่างอากาศภายนอกกับความชื้นภายในชิ้นอาหาร จึงเป็นแรงขับให้น้ำจากภายในเคลื่อนย้ายออกมาที่ผิวของอาหารด้วยกลไกดังนี้ (นิริยา, 2545)

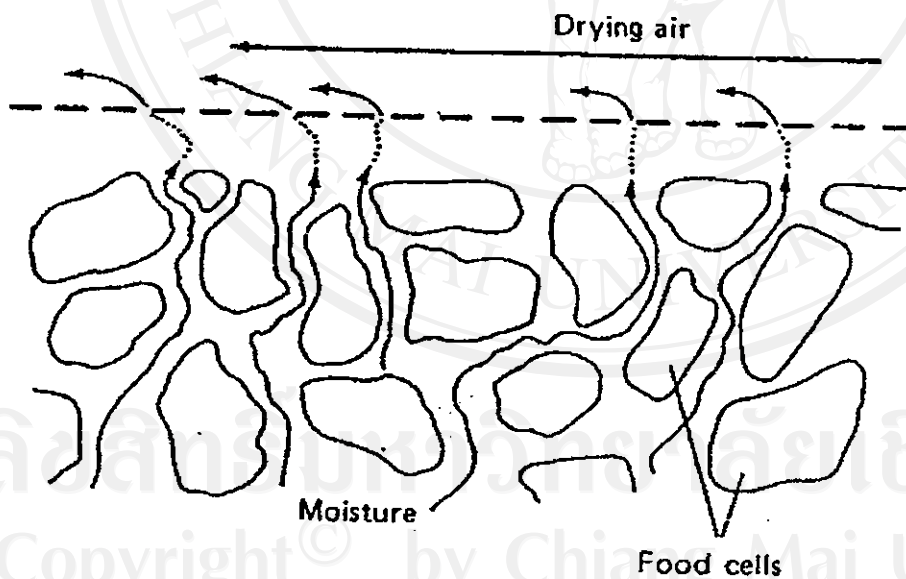
1. เคลื่อนที่โดย capillary force

2. เคลื่อนที่โดยการแพร่กระจายของน้ำเนื่องจากตัวถูกละลายมีความเข้มข้นแตกต่างกันที่บริเวณต่างๆกันในชิ้นอาหาร
3. น้ำจะถูกดูดซับด้วยชั้นของตัวถูกละลายออกมาอยู่ที่ผิวหน้าของอาหาร
4. ไอน้ำที่ระเหยออกไปในอากาศจะทำให้เกิดความแตกต่างของความดันไอ

อาหารที่มีสมบัติเป็นทั้งสารที่ดูดความชื้น (hygroscopic) และสารที่ไม่ดูดความชื้น (non hygroscopic) อาหารประเภทที่ดูดความชื้น คือ อาหารที่ความดันย่อย (partial pressure) ของไอน้ำผันแปรไปตามความชื้น แต่อาหารประเภทที่ไม่ดูดความชื้นเป็นอาหารที่มีความดันไอน้ำคงที่ที่ความชื้นต่าง ๆ กันซึ่งมีความแตกต่างนี้แสดงได้โดยซอฟต์แวร์ไอโซเทอม ที่แตกต่างกัน

สมบัติของอากาศขณะที่มีอัตราการระเหยน้ำคงที่ คือ

1. อุณหภูมิของกระเปาะแห้ง ค่อนข้างสูง
2. มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ
3. มีความเร็วลมสูง



รูปที่ 2.3 การเคลื่อนที่ของความชื้นออกจากชิ้นอาหารระหว่างการอบแห้งที่มา : นิธิยา (2545)

อย่างไรก็ตามการทำแห้งก็ทำให้เกิดการสูญเสียคุณภาพการบริโภคและคุณค่าทางโภชนาการของอาหารซึ่งข้อดีและข้อเสียที่สำคัญของการอบแห้งหรือตากแห้ง พอสรุปได้ดังนี้ (ไพบูลย์, 2529)

#### ข้อดีของการอบแห้ง

1. น้ำหนักเบา เพราะน้ำหนักประมาณร้อยละ 60 – 90 ของอาหารสดยกเว้นธัญพืช ประกอบด้วยน้ำ และน้ำส่วนนี้เองจะถูกกำจัดออกไปโดยกระบวนการอบแห้งหรือตากแห้ง
2. มีความกระชับและลดค่าขนส่ง กล่าวคือ ผลิตภัณฑ์อาหารอบแห้งต้องการเนื้อที่น้อยกว่าของอาหารสด อาหารแช่เยือกแข็ง หรืออาหารกระป๋อง โดยเฉพาะถ้าสามารถจัดเก็บในหีบห่อภาชนะ
3. ความคงตัวที่สภาวะการเก็บ ผลิตภัณฑ์อาหารอบแห้งไม่จำเป็นต้องใช้ตู้เย็นในระหว่างการเก็บ

#### ข้อเสียของการอบแห้ง

1. ความไวต่อความร้อน เนื่องจากอาหารส่วนมากมีความไวต่อความร้อนในระดับหนึ่งและสามารถทำให้เกิดกลิ่นรสใหม่ขึ้นได้ ถ้าควบคุมสภาวะไม่เหมาะสม
2. เกิดการสูญเสียกลิ่นรสที่ระเหยได้
3. เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง ซึ่งรวมถึงการเกิดการแห้งกรอบอันเนื่องจากการหดตัวของผลิตภัณฑ์
4. เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่ไม่ใช่เกิดจากเอนไซม์ ทั้งนี้เนื่องจากความเข้มข้นของสารเพิ่มขึ้น และนอกจากนี้ยังเกิดออกซิเดชันของไขมัน
5. เกิดการเสื่อมเสียอันเนื่องจากจุลินทรีย์ได้ ถ้าหากว่าอัตราการอบแห้งเริ่มต้นช้าหรือปริมาณความชื้นสุดท้ายมีค่าสูง หรือเก็บผลิตภัณฑ์ไว้ที่บรรยากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูง
6. ความสามารถในการคืนตัว ปัจจัยคุณภาพของอาหารแห้งที่สำคัญได้แก่ ลักษณะเนื้อสัมผัสและความสามารถในการคืนตัว ลักษณะเนื้อสัมผัสที่เหนียว ลักษณะเป็นเส้นใย การคืนตัวอย่างช้า ๆ หรือไม่สมบูรณ์ เหล่านี้ถือเป็นคำนิยามทางคุณภาพของอาหารอบแห้ง เช่น กรณีการสูญเสียความนุ่มของเนื้ออบแห้ง อาจเนื่องมาจากการจับตัวของโปรตีนในกล้ามเนื้อ เช่น ได้มีการศึกษาว่า ถ้าเก็บเนื้อเยื่อพืชหรือสัตว์ไว้ที่อุณหภูมิสูง เป็นระยะเวลาหนึ่ง การเปลี่ยนแปลงแบบไม่คืนตัวจะเกิดขึ้นเสมอ แม้ว่าอุณหภูมินั้นจะไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดอาหารเกิดสีน้ำตาลหรือไหม้ได้ก็ตาม ความยืดหยุ่นของผนังเซลล์และความสามารถในการพองตัวของแป้ง เป็นปัจจัยสำคัญต่อการคืนตัว แต่ปัจจัยทั้งสองลดลงเมื่ออาหารถูก

กับความร้อน เช่น เนื้ออบแห้งสามารถดูดซับน้ำได้เพียงส่วนหนึ่งของน้ำเริ่มต้นเท่านั้น และถึงแม้ว่าจะสามารถดูดซับน้ำได้จนมีน้ำหนักเท่าเดิม ก็ไม่ใช่ความหมายว่าเนื้อนั้นจะมีโครงสร้างเหมือนเดิม ผลิตภัณฑ์คินตัวจะไม่มีลักษณะน้ำ และมีลักษณะเนื้อร่วนกว่าเนื้อสดแต่การแช่เยือกแข็งและการละลายก่อนการอบแห้งอาจช่วยปรับปรุงคุณสมบัติการคินตัวของผลิตภัณฑ์ได้ ทั้งนี้เป็นที่เข้าใจว่าการแช่เยือกแข็งจะทำให้เกิดรูช่องว่างอันเนื่องจากผลึกน้ำแข็ง แม้ว่าคุณสมบัติการดูดซับน้ำของผักอาจจะดีขึ้น การทำอาหารอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติคินตัวได้ดี เพราะสามารถคินตัวได้อย่างรวดเร็ว และมีลักษณะใกล้เคียงกับของเดิมมากที่สุด ไม่ว่าจะปริมาณความชื้นหรือคุณสมบัติทางกายภาพ

7. การสูญเสียสารระเหย น้ำกลายเป็นไอระเหยไปจากสารอาหารจะพาสารที่ระเหยได้ไปด้วยในบริเวณปริมาณที่ต่าง ๆ กัน โดยทั่วไปปรากฏการณ์นี้เป็นสิ่งที่ไม่ต้องการ จึงได้มีการใช้สารบางชนิด เช่น ผงถ่าน หรือตัวดูดกลืนอื่น ๆ ที่สามารถจับสารระเหยนี้ไว้ ด้วยจุดประสงค์ก็เพื่อจะนำกลิ่นนี้กลับมายังอาหารอีก

8. การเกิดสีน้ำตาลหรือความเสียหายเนื่องจากความร้อน ปัญหาที่สำคัญและเห็นได้ชัดที่เกิดขึ้นในกระบวนการอบแห้ง ก็คือการเปลี่ยนแปลงสีซึ่งเรียกชื่อต่าง ๆ เช่น การเกิดสีน้ำตาล การเกิดสีไหม้ หรือความเสียหายอันเนื่องจากความร้อน การเปลี่ยนแปลงนี้บางครั้งเป็นความต้องการ เช่น การเกิดสีน้ำตาลไหม้บนผิวหน้าของขนมปังแต่ในแง่ของการอบแห้งถือว่าเป็นตำหนิทางคุณภาพ ถ้าการเปลี่ยนแปลงสีเกิดขึ้นมากจะทำให้กลิ่นรสความสามารถในการคินตัว และปริมาณกรดแอสคอร์บิก ถูกกระทบกระเทือนไป ด้วย

อย่างไรก็ดีแม้การอบแห้งหรือตากแห้งแม้จะมีข้อเสียอยู่บ้างแต่ข้อเสียบางส่วนก็สามารถแก้ไขได้ด้วยวิธีอบแห้งสมัยใหม่และการปฏิบัติก่อนการอบแห้งที่เหมาะสมในแต่ละผลิตภัณฑ์

## 2.5 การอบแห้งแบบสุญญากาศ

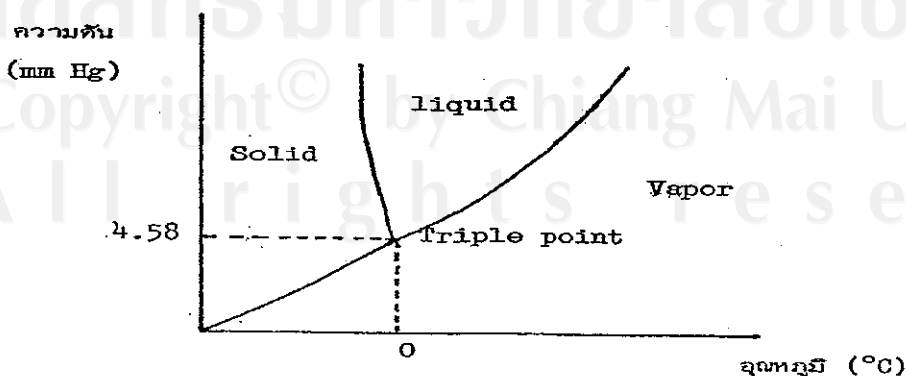
ระบบนี้เป็นตู้ปิดสนิท ใช้ความร้อนเป็นตัวทำให้น้ำระเหย ชั้นวางอาหารเป็นแผ่นให้ความร้อน มีระบบสุญญากาศดูดอากาศออกจากตู้อบ น้ำระเหยออกจากอาหารภายใต้สภาวะสุญญากาศ ทำให้อุณหภูมิของอาหารได้ต่ำกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งที่อุณหภูมิเดียวกัน ณ ความดันบรรยากาศ ทั้งนี้เนื่องจากความดันไอน้ำในอากาศลดลงทำให้ผลต่างระหว่างความดันไอน้ำที่อาหารกับในอากาศมีค่ามากขึ้นจึงทำให้อัตราการถ่ายเทของไอน้ำจะมากขึ้นและช่วยให้ไอน้ำที่อาหารออกมาสู่อากาศได้ดีขึ้นด้วย ดังนั้นเมื่อใช้ระบบนี้ทำให้อุณหภูมิในการทำแห้งลดต่ำลงและ

ระยะเวลาอาจลดต่ำลง ทำให้คุณค่าทางโภชนาการทางอาหารไม่สูญเสียไปรวมทั้งเนื้อสัมผัสของอาหารจะสูญเสียน้อยกว่าวิธีที่ทำแห้งโดยการให้ความร้อนด้วยวิธีอื่น ๆ แต่คุณภาพของผลิตภัณฑ์อาจจะต่ำกว่าการทำแห้งแบบเยือกแข็ง เพราะในระหว่างการระเหยน้ำออกจากได้สภาวะสุญญากาศจะทำให้น้ำระเหยเร็วมาก ทำให้ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์แห้ง เกิดการแข็งและหดตัว ดังนั้นจะทำให้ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์แข็ง ซึ่งเป็นข้อเสียของการทำแห้งโดยวิธีนี้ (จิตรนา, 2539)

## 2.6 การอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze drying หรือ Lyophilization)

ความร้อนที่ใช้ในการทำให้อาหารแห้งจะช่วยกำจัดน้ำและเป็นการถนอมรักษาอาหารโดยการลดค่า  $a_w$  อย่างไรก็ตามความร้อนดังกล่าวยังเป็นต้นเหตุทำให้เกิดการสูญเสียคุณภาพทางประสาทสัมผัสหรือคุณค่าทางโภชนาการ ในกรรมวิธีการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งจะให้ผลในการเก็บรักษาอาหารคล้ายคลึงกันคือการลดค่า  $a_w$  ไม่ต้องให้ความร้อนแก่อาหาร ดังนั้นจึงได้คุณภาพทางประสาทสัมผัสหรือคุณค่าทางโภชนาการดีกว่า อย่างไรก็ตามกระบวนการดังกล่าวจะใช้เวลานานกว่าการกำจัดน้ำ ค่าใช้จ่ายสำหรับพลังงานในการทำให้อุ่นมีราคาสูงบวกกับค่าใช้จ่ายในการทำสุญญากาศในการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งร่วมกับเงินลงทุนที่ค่อนข้างสูงทำให้ค่าใช้จ่ายในการผลิตอาหารแห้ง หรืออาหารเข้มข้นโดยวิธีอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีราคาแพง การอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งเป็นกระบวนการที่ใช้ในอุตสาหกรรมการทำแห้งที่มีราคาแพง ซึ่งต้องการรักษากลิ่นหรือลักษณะเนื้อสัมผัสค่อนข้างประบาง เช่น กาแฟ เห็ด เครื่องเทศและสมุนไพร น้ำผลไม้ เนื้ออาหารทะเล ผัก และอาหารพร้อมรับประทานสำหรับกองทัพ รวมทั้งใช้ในการเก็บรักษาหัวเชื้อจุลินทรีย์เป็นระยะเวลานาน ๆ เพื่อใช้เป็นหัวเชื้อในการแปรรูปอาหาร (วิไล, 2543)

การทำแห้งในสภาพแช่แข็ง (freeze drying) เป็นขบวนการนำน้ำออกจากวัตถุโดยการระเหิดโดยตรง จากสถานะที่เป็นของแข็ง (น้ำแข็ง) กลายเป็นไอ (ไอน้ำ) โดยที่น้ำนี้จะไม่ผ่านการเป็นของเหลว ขบวนการนี้จะเกิดภายใต้ สภาวะที่เหมาะสม คือ อุณหภูมิและความดันต่ำ



รูปที่ 2.4 phase diagram ของน้ำบริสุทธิ์ ที่มา : วิไล (2543)

พิจารณา phase diagram ของน้ำรูปที่ 2.4 น้ำบริสุทธิ์จะประกอบด้วย 3 สถานะ คือ ของแข็ง (น้ำแข็ง), ของเหลว (น้ำ) และก๊าซ (ไอน้ำ) ซึ่งอยู่ในสมดุลกัน และเขียนแทนด้วย เส้นกราฟ 3 เส้น ซึ่งจะตัดกันที่จุด triple point ( $0^{\circ}\text{C}$  , 4.58 mm Hg) ถ้าน้ำอยู่ในสภาวะที่มีความดันสูงและอุณหภูมิต่ำกว่า  $0^{\circ}\text{C}$  จะมีสถานะเป็นของแข็ง ถ้าลดความดันรอบ ๆ น้ำแข็งจนมีค่าต่ำมาก (ต่ำกว่า 4.58 mm Hg) น้ำในสภาวะของน้ำแข็งจะเปลี่ยนเป็นไอน้ำ คือเกิดการระเหิดขึ้น

จากหลักการนี้สามารถนำมาใช้ทำอาหารให้แห้งได้ โดยการนำอาหารมาแช่แข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของสารละลายในอาหารนั้น สารละลายในอาหารจะมีจุดเยือกแข็งต่างจากน้ำบริสุทธิ์ เพราะมีเกลือหรือโมเลกุลชีวภาพละลายอยู่ ทั้งโมเลกุลของน้ำบางส่วนยังสามารถยึดติดกับโมเลกุลหรือโครงสร้างของอาหารได้ด้วย สารละลายดังกล่าวจึงมีจุดเยือกแข็งต่ำกว่าน้ำบริสุทธิ์ ซึ่งต้องใช้อุณหภูมิต่ำมาก ๆ เพื่อให้สารละลายในอาหารกลายเป็นน้ำแข็ง จากนั้นนำอาหารนี้ไปไว้ในสภาวะที่ความดันต่ำ จะทำให้น้ำแข็งในเนื้ออาหารเกิดการระเหิดอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งน้ำแข็งที่มีอยู่ในอาหารเกือบทั้งหมดถูกถ่ายเทออกไปอาหารจะแห้ง การระเหิดของน้ำแข็งนี้จะต้องใช้ความร้อนจำนวนหนึ่งซึ่งเราเรียกว่า heat of Sublimation ซึ่งของน้ำมีค่าเท่ากับ 675.6 cal/gm

การทำแห้งในสภาพแช่แข็งประกอบด้วย 2 ขั้นตอนคือการแช่แข็งและการทำแห้งซึ่งใน ส่วนของการแช่แข็ง เป็นการทำให้สารละลายที่มีอยู่ในอาหารเปลี่ยนสถานะกลายเป็นของแข็ง การแช่แข็งแบ่งได้เป็น 2 วิธี คือ การแช่แข็งอย่างรวดเร็ว เป็นการทำให้อาหารแข็งใน 30 นาที หรือน้อยกว่า นั้น อุณหภูมิที่ใช้อ้อยู่ระหว่าง  $-18^{\circ}\text{C}$  ถึง  $-40^{\circ}\text{C}$  และ การแช่แข็งอย่างช้า โดยเวลาที่ใช้ในการทำให้อาหารแข็งใน 3 – 72 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $-15^{\circ}\text{C}$  การแช่แข็งอย่างเร็วมีข้อดีกว่าการแช่แข็งอย่างช้าเพราะสามารถชะงักการทำงานของเอนไซม์และการเจริญของจุลินทรีย์ได้ดีกว่าและผลึกน้ำแข็งที่ได้ก็มีขนาดเล็กกว่าซึ่งการเกิดผลึกเร็วมาก โอกาสที่โมเลกุลของมันจะเคลื่อนที่มีน้อยกว่า การเกิดผลึกอย่างช้า

การแช่แข็ง จึงเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการรักษาคุณค่าของอาหาร ดังนั้นขบวนการทำแห้งในสภาพแช่แข็งจึงนิยมใช้การแช่อย่างรวดเร็ว เพราะทำให้อาหารที่ได้มีรูพรุนขนาดเล็ก ๆ และอาหารไม่เสียโครงสร้าง การแช่แข็งอย่างรวดเร็วอาจใช้สารทำความเย็นพวกไนโตรเจนเหลวหรือซิโตนกับน้ำแข็งแห้ง (dry ice) ในขณะที่ทำการแช่แข็ง จะมีน้ำบางส่วนที่ไม่กลายเป็นผลึกน้ำแข็ง ถึงแม้ว่าจะลดอุณหภูมิให้ต่ำลงมาก ๆ น้ำส่วนนี้จะอยู่ในรูป bound water ถ้าดึง bound water ออกจะด้วยการทำให้เป็นน้ำแข็ง หรือด้วยวิธีอื่นใดก็ตาม โมเลกุลของโปรตีนที่อยู่ใกล้ ๆ กันจะรวมกันด้วยแรงดึงดูดไฟฟ้าสถิต (electrostatic force) และทำให้เกิดพันธะไฮออนิกขึ้นระหว่างโมเลกุลของโปรตีน ผลคือทำให้อาหารเกิดการหดตัว มีลักษณะเหนียว ดังนั้นการแช่แข็งจึงมีเฉพาะน้ำที่เป็นอิสระ (free water) เท่านั้นที่กลายเป็นน้ำแข็ง ซึ่งน้ำในอาหารส่วนมากจะอยู่ในรูปสารละลาย ซึ่งมี



จุดเยือกแข็งต่ำกว่าปกติ โดยเฉพาะถ้าประกอบด้วยน้ำตาล เกลือ หรือความเป็นกรดสูง จะยังมีจุดเยือกแข็งต่ำกว่าปกติคือประมาณ  $-40^{\circ}\text{C}$

หลังจากอาหารถูกแช่เย็นแล้ว จะเป็นการกำจัดน้ำเกือบทั้งหมดที่มีอยู่ในอาหารออกไปภายใต้สภาวะที่ควบคุม โดยอาศัยขบวนการระเหิด ซึ่งต้องอาศัย 2 ขบวนการ คือ

- การลดความดันรอบ ๆ ชิ้นอาหารให้ต่ำลง
- การเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ชิ้นน้ำแข็ง (freezing core) ในอาหาร โดยที่อุณหภูมิจะต้องไม่สูงกว่า freezing point ของน้ำแข็ง

ในขณะที่ขบวนการทำแห้งเกิดขึ้น น้ำแข็งที่ผิวของชิ้นอาหารจะระเหิดไปก่อน เกิดเป็นชั้นแห้งรอบ ๆ ชิ้นอาหาร ตรงใจกลางของอาหารยังคงเป็นน้ำแข็งอยู่ ตามอุดมคติแล้ว จะมีการถ่ายเทไอน้ำจากระดับความชื้นเริ่มต้น ในชั้นน้ำแข็งไปยังระดับความชื้นต่ำสุด ในชั้นแห้ง แต่ในความเป็นจริงจะมีส่วนต่อระหว่างน้ำแข็งและชั้นแห้ง ซึ่งเรียกว่า “transition region” หรือ “interface” ส่วนนี้จะเป็นส่วนที่มีระดับความชื้นต่ำกว่าน้ำแข็งและสูงกว่าชั้นแห้ง ส่วนนี้จะเป็นส่วนที่แคบมาก ถ้าอาหารมีลักษณะสม่ำเสมอ intertace จะลดลงจนถือว่ามีความหนาเป็นศูนย์ ซึ่งก็ไม่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนมากนัก(พรธณี, 2526)

ลักษณะการแห้งของอาหารเกิดจากการถ่ายเทไอน้ำจากผิวหน้าของแกนน้ำแข็ง (freezing core) ไปยังผิวหน้าของอาหาร โดยขบวนการระเหิด และจะเกิดเป็นชั้นแห้งของอาหารล้อมรอบส่วนที่เป็นน้ำแข็ง การระเหิดจะเกิดบริเวณผิวหน้าแข็งเท่านั้น ไอน้ำที่ระเหิดต้องซึมผ่านชั้นแห้งออกสู่ภายนอก คือผิวของน้ำแข็งจะเคลื่อนเข้าหาศูนย์กลางของอาหารแต่ลักษณะการแห้งนี้อาจไม่สม่ำเสมอเนื่องจาก

1. ความแตกต่างของชั้นแห้งในอาหารที่จะให้ไอน้ำซึ่งเกิดการระเหิดผ่านออกไป อัตราส่วนเร็วของการถ่ายเทไอน้ำขึ้นอยู่กับแรงดันที่เกิดจากผลต่างของความดันย่อยของไอน้ำระหว่างผิวหน้าแข็งและผิวหน้าของอาหาร และลักษณะโครงสร้างของชั้นแห้ง ถ้าอัตราเร็วของการถ่ายเทไอน้ำที่ตำแหน่งต่าง ๆ ไม่เท่ากัน จะทำให้ผิวของชั้นน้ำแข็งเคลื่อนถอยเข้าไปได้ไม่เท่ากัน ความแตกต่างของสภาวะการเคลื่อนที่ของไอน้ำภายนอกชิ้นอาหารที่ตำแหน่งต่าง ๆ ก็จะทำให้ผลเช่นกัน

2. ค่าการนำความร้อน (thermal conductivity) ของชั้นแห้งไม่สม่ำเสมอโดยตลอด และสภาวะการนำความร้อนภายนอกที่แต่ละตำแหน่งไม่เท่ากัน ความดันย่อยของไอน้ำที่ผิวหน้าแข็งซึ่งอยู่ในสมดุลกับอุณหภูมิเหล่านี้ จะแตกต่างกันด้วย มีผลทำให้อัตราเร็วของการถ่ายเทไอน้ำผ่านชั้นแห้งออกไปไม่เท่ากัน

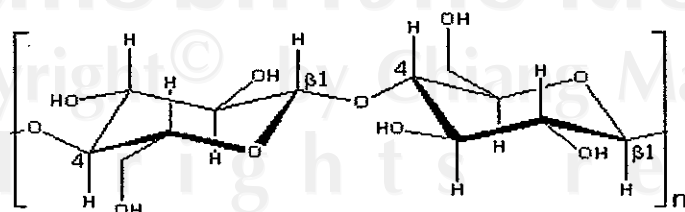
เนื่องจากการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งจะได้ผลิตภัณฑ์หลังอบที่มีสภาพใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ก่อนอบมากคือ สามารถรักษา กลิ่น สี และ รูปร่าง ให้ใกล้เคียงกับก่อนอบได้ดีว่าการอบแห้งแบบใช้ลมร้อนดังนั้นจึงมีการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งและวิธีการทำให้แห้งโดยใช้ลมร้อนดังในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ความแตกต่างระหว่างการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งและวิธีการทำให้แห้งโดยใช้ลมร้อน

วิธีอบแห้งแบบใช้ลมร้อน	วิธีอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง
1. ได้ผลดีกับอาหารแห้งง่าย เช่น ผัก เมล็ดพืช	1. ได้ผลดีสำหรับอาหารส่วนใหญ่ แต่การใช้จำกัดอยู่กับอาหารที่อบแห้งยากด้วยวิธีอื่น
2. โดยทั่วไปไม่เหมาะกับผลิตภัณฑ์เนื้อ	2. ได้ผลดีกับเนื้อสุกหรือสด
3. ความดันบรรยากาศ	3. ลดความดันให้ต่ำลง
4. อาศัยการระเหยน้ำจากผิวของอาหาร	4. อาศัยการระเหยของน้ำแข็ง
5. เกิดการเคลื่อนที่ของตัวถูกละลายและอาจเกิดเปลือกแข็งแรงแน่นในอาหารทำให้เกิดความเสียหายของโครงสร้างและเกิดการหดตัว	5. มีการเคลื่อนที่ของตัวถูกละลายน้อยที่สุดเกิดความเสียหายของโครงสร้างและเกิดการหดตัวน้อยที่สุด
6. เกิดการกำจัดน้ำอย่างช้า ๆ และไม่สมบูรณ์	6. เกิดการกำจัดน้ำขึ้นอย่างรวดเร็วและสมบูรณ์
7. กลิ่นรสมักผิดปกติ	7. กลิ่นรสมักไม่เปลี่ยน
8. สีมักจะคล้ำลง	8. สีไม่ค่อยเปลี่ยน
9. คุณค่าทางโภชนาการลดลง	9. คุณค่าทางโภชนาการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

ที่มา : วิไล. (2543)

## 2.7 เซลลูโลส



รูปที่ 2.5 โครงสร้างเซลลูโลสในรูป chair conformation ที่มา : ธรณี. (2524)

เซลลูโลสเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ขนาดใหญ่โดยโมเลกุลของเซลลูโลสประกอบด้วยหน่วยแอนไฮโดรกลูโคส มาเรียงกันเป็นในรูป chair conformation (ดังรูปที่ 2.5) ด้วยพันธะ B-1,4 ไกลโคซิดิกเข้าเป็นพอลิเมอร์ มีลักษณะเป็นเส้นยาว ๆ โดยมีความยาวประมาณ 6000 – 12000 หน่วยน้ำตาล (มี น.น. โมเลกุล ตั้งแต่ 1–2 ล้านโมเลกุล) เป็นสายยาวไม่มีสายแขนง สายยาวจะมาเกาะกันตามแนวราบด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลใน โมเลกุลน้ำตาลกลูโคส ซึ่งทำให้โครงสร้างโมเลกุลของเซลลูโลสเป็นพอลิคริสตัลไลน์ (polycrystalline) ที่แข็งแรง ยึดกันเป็นเส้นใย (นิธิยา, 2545) และเนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลของเซลลูโลสในแต่ละหน่วยย่อยของน้ำตาลกลูโคสยังมีหมู่ไฮดรอกซิลอิสระเหลืออยู่ ซึ่งจะเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายของพอลิเมอร์ ทำให้บางส่วนของโครงสร้างเป็นผลึก ส่วนที่เกิดผลึกนี้จะมีความหนาแน่นมากกว่า จึงทนทานต่อการถูกไฮโดรไลซ์ด้วยเอนไซม์และสารเคมีมากกว่าส่วนที่ไม่เป็นผลึก (noncrystalline หรือ amorphous) นอกจากนี้ส่วนที่เป็นผลึกยังดูดน้ำได้น้อยกว่าด้วย ทำให้ไม่สามารถละลายน้ำได้ สำหรับส่วน โมเลกุลเซลลูโลสที่เป็นผลึกหรือไม่มีรูปร่าง โมเลกุลจะเรียงตัวกันไม่เป็นระเบียบและจับตัวกันอย่างหลวม ทำให้สามารถดูดน้ำซับไว้ได้มากและเกิดการพองตัวออกมีผลทำให้กากอาหารมีลักษณะนุ่ม เซลลูโลสส่วนใหญ่เป็นของเหลือทิ้งจากการเกษตร เช่น ฟางข้าว ใบไม้ ลำต้นพืช แกลบ เปลือกผลไม้ และเปลือกต้นไม้ เป็นต้น (ธรรณี, 2524)

หน่วยย่อยของ เซลลูโลส เรียกว่า แอนไฮโดรกลูโคส ( $C_6H_{10}O_5$ ) เพราะเกิดการเอาน้ำออกจากกลูโคส ( $C_6H_{12}O_6$ ) ในแต่ละแอนไฮโดรกลูโคส มีอนุกรมไฮดรอกซิล 3 หมู่โดยในแต่ละหมู่ไฮดรอกซิล สามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลได้ ทำให้เซลลูโลสมีแรงดึงดูดแบบ cohesive อย่างแข็งแรง และอยู่ในรูปผลึก (สุมิตรา, 2523)

จากโครงสร้างโมเลกุล เซลลูโลสจัดอยู่ในพวกแอลกอฮอล์ซึ่งจะทำปฏิกิริยาภายใต้สภาวะที่เป็นกรดได้เอสเทอร์ และ ภายใต้สภาวะที่เป็นเบสจะได้อีเทอร์ทั้งเอสเทอร์ และ อีเทอร์เป็นอนุพันธ์ของเซลลูโลสที่มีความสำคัญยิ่งในทางอุตสาหกรรม (อรอนงค์, 2547)

การเกิดปฏิกิริยาของเซลลูโลสมีองค์ประกอบต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องได้แก่ (สุมิตรา, 2523)

### 1. โครงสร้าง(structure)

ปฏิกิริยาของเซลลูโลส กับสารอินทรีย์หรืออนินทรีย์มีความเกี่ยวข้องกับ โครงสร้างของเซลลูโลส คือ

#### 1.1 สายโมเลกุลเซลลูโลส (cellulose chain molecule)

#### 1.2 ผลึก (crystalline)

1.3 จำนวนแอนไฮโดรกลูโคสไพแรนโนส และ ไฮดรอกซิล 3 หมู่ ซึ่งไฮดรอกซิล 3 หมู่นี้ มีความสำคัญมากในการทำปฏิกิริยาคือ reagent จะต้องสามารถเจาะทะลุผลึกเข้าไปถึงหมู่ไฮดรอกซิลได้

## 2. การพองตัว (swelling)

การพองตัวของเซลลูโลสเป็นการที่จะทำให้สาร reagent ต่าง ๆ เข้าไปทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลในเซลลูโลส ได้ง่ายขึ้นการพองตัวของเซลลูโลส แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ

2.1 Intercrystalline swelling คือการพองตัวของเซลลูโลส ในน้ำหรือในสารละลายอินทรีย์บางชนิด เช่น เมทานอล, เอทานอล, เบนซิลแอลกอฮอล์และอื่น ๆ

2.2 Intracrystalline swelling คือ การพองตัวของเซลลูโลสในสารละลายกรดแก่ เบสแก่ และสารละลายเกลือบางชนิด เช่น ซิงค์คลอไรด์

ปฏิกิริยาทั้งสองชนิดหมายถึงการที่ swelling agent เจาะทะลุเข้าไปในผลึกของไมโครไฟเบอร์เซลลูโลส และ crystalline region swelling ที่รู้จักกันดี คือ น้ำ

การเกิด cellulose addition หรือ swelling compound เป็นส่วนที่สำคัญในการเกิดปฏิกิริยาของเซลลูโลสซึ่งขึ้นกับการแตกออกของพันธะไฮโดรเจนที่อยู่ระหว่างสายเซลลูโลสที่อยู่ติดกัน (adjacent cellulose chain) ในระหว่างการพองของเซลลูโลสจะทำให้สารเคมีสามารถแพร่เข้าไปเกิดปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลทุกตำแหน่งได้ง่ายขึ้นและทำให้เกิดปฏิกิริยารวดเร็วขึ้น

## 2.8 สารอนุพันธ์ของเซลลูโลส

ปฏิกิริยาการแทนที่ไฮโดรเจนในหมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลสมี 2 ชนิด คือ Esterification และ Etherification ซึ่งทั้ง 2 ปฏิกิริยาจะให้อนุพันธ์ของเซลลูโลสที่มีความสำคัญยิ่งในอุตสาหกรรมเส้นใยสังเคราะห์ พลาสติกฟิล์ม วัสดุระเบิด สี แล็กเกอร์และอื่น ๆ

Esterification แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ inorganic ester และ organic ester

Inorganic esters เป็นเอสเทอร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างกรดอินทรีย์กับเซลลูโลสกรดเหล่านี้ ได้แก่ ไนตริกแอซิก, ซัลฟูริกแอซิก และ ฟอสโฟริกแอซิก แต่กรดแก่ต่าง ๆ เช่น ฮาโลเจนแอซิกจะไม่ใช่ inorganic esters สาร inorganic ester ที่สำคัญมาก คือ เซลลูโลสไนเตรต

Organic esters เป็นเอสเทอร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างเซลลูโลสและกรดอินทรีย์กรดเหล่านี้ ได้แก่ แอซิกแอนไฮไดรด์ และ แอซิกคลอไรด์ organic ester ที่สำคัญมากในอุตสาหกรรม คือ เซลลูโลสอะซิเตรต

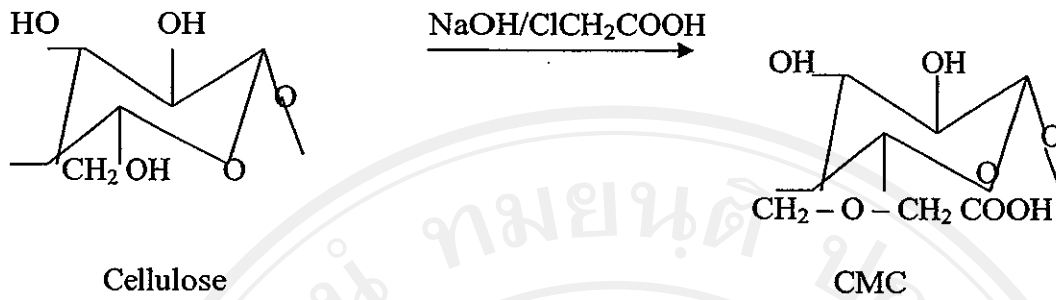
Etherification คือปฏิกิริยาที่ไฮโดรเจนในหมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลสถูกแทนที่ การ etherification ของเซลลูโลสเริ่มจากการทำปฏิกิริยาของเซลลูโลสกับเบสได้เป็น alkali cellulose แล้วจึงเกิดการ etherify กับ etherifying agent เช่น เมทิล, เอทิลคลอไรด์ ตัวเซลลูโลสเองไม่สามารถทำปฏิกิริยาโดยตรงกับ etherifying agent ดังนั้นจึงต้องทำให้ active ก่อน โดยใช้ swelling agent และ solvating agent โดยทั่ว ๆ ไปคือโซเดียมไฮดรอกไซด์ สาร cellulose ethers ที่สำคัญ ได้แก่ เมทิลเซลลูโลส, เอทิลเซลลูโลส, เบนซิลเซลลูโลส, ไฮดรอกซีเอทิลเซลลูโลส, คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และ ไฮยาโนเอทิลเซลลูโลส (ชรณี, 2524)

โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นสารจำพวกเซลลูโลสอีเทอร์ชนิดหนึ่งสามารถสังเคราะห์ได้ มีความหมายที่ใช้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม คือ โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส หรือ คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส หรือ ซีเอ็มเซลลูโลส หรือ ซีเอ็มซี หมายถึง กัมดัดแปร หรือ กัมกึ่งสังเคราะห์ ละลายตัวได้ในน้ำเป็นคอลลอยด์ ไม่ละลายตัวในสารละลายอื่น เช่น เอทานอล และ อีเทอร์ โดยทั้งหมดของสารเซลลูโลสอีเทอร์สารโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส มีบทบาทสำคัญมากในอุตสาหกรรมหลายชนิด โดยสารโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเมื่อนำมาละลายน้ำจะได้สารละลายหนืดใส ไม่มีกลิ่น และไม่มีอันตรายต่อร่างกาย ประกอบด้วยคุณสมบัติที่เป็นตัวอิมัลชัน และ สารก่อโฟม ดังนั้นสารโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส จึงสามารถนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมสารฟอกขาว สี กาว สิ่งทอ กระดาษ เซรามิก อาหาร และ ยา เป็นต้น (สุนันท์, 2532)

## 2.9 การสังเคราะห์สารโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC) เตรียมจากปฏิกิริยาระหว่างด่างเซลลูโลสกับ คลอโรอะซิติกแอซิดหรือเกลือโซเดียมของกรดนี้ การเกิดปฏิกิริยาในขั้นแรกเป็นการ preswell ด้วยด่างได้ด่างเซลลูโลส ปฏิกิริยาขั้นที่ 2 ด่างเซลลูโลสที่ได้ ทำปฏิกิริยากับ etherifying agent ได้เซลลูโลสอีเทอร์หรือโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส(สุมิตรา, 2523) ดังรูปที่ 2.4 คุณสมบัติที่สำคัญของเซลลูโลสอีเทอร์ คือ เป็นสารที่ละลายในน้ำ (water soluble)

All rights reserved



รูปที่ 2.6 การเกิดสารคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส ที่มา : สุมิตรรา. (2523)

มีการศึกษาวิธีการผลิตสาร โซเดียมคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส (CMC) จากเปลือกมะละกอบ โดยนำเปลือกมะละกอบแห้งมาใช้สกัดเซลลูโลสเพื่อนำเซลลูโลสที่ได้มาผลิตสาร CMC โดยเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 40 %, คลอโรอะซิติก 15 กรัม แล้วนำมาอบแห้งที่ 55 °C นาน 3 ชั่วโมง แล้วนำมาเติมกรดอะซิติกให้มีค่าความเป็นกรดเป็นด่างเท่ากับ 7 ล้างด้วยเอทานอล 70% ตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้องนาน 24 ชั่วโมง (นริวิชัย, 2549)

ศึกษาการเตรียมแป้งถั่วเขียวคัดแปร โซเดียมคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส (CMC) เพื่อใช้ในทางเภสัชกรรมทดลอง 15 สภาวะ ได้สภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือ แป้งถั่วเขียว 231 กรัม สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ 50 %, คลอโรอะซิติก 59 กรัม แล้วนำมาอบแห้งที่ 81 °C นาน 30 นาที (อรอนงค์, 2547)

สังเคราะห์สาร โซเดียมคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส (CMC) จากรากเทียมของต้นกล้วย สกัดเซลลูโลสจากรากเทียมเพื่อนำมาผลิตสาร CMC ทดลอง 10 สภาวะ ได้สภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือ เซลลูโลสผง 5 กรัม สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15 %, คลอโรอะซิติก 6 กรัมแล้วนำมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 55 °C นาน 3 ชั่วโมง (Adinugraha *et al.*, 2005)