

## บทที่ 2

### น้ำ

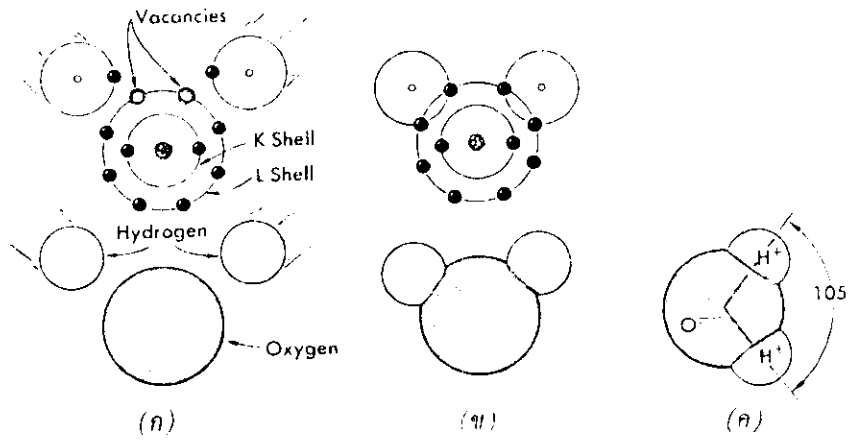
น้ำเป็นองค์ประกอบสำคัญของอาหารส่วนใหญ่ (ตารางที่ 2.1) และอาหารแต่ละชนิดจะมีปริมาณน้ำที่แตกต่างกัน น้ำมีความสำคัญต่อสิ่งมีชีวิต การสังเคราะห์แสงของพืช ต้องใช้น้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ ในคนและสัตว์ น้ำช่วยลำเลียงอาหารและของเสียในร่างกาย น้ำเป็นรีแอกแตนต์ (reactant) และเป็นตัวกลางของปฏิกิริยาต่าง ๆ ปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับน้ำ ได้แก่ การเติมน้ำ (hydration), การกำจัดน้ำ (dehydration) และการไฮโดรไลส์ (hydrolysis) ตลอดจนคุณสมบัติการเป็นตัวทำละลายของน้ำ ล้วนมีส่วนสำคัญต่อการเปลี่ยนสารอาหารไปเป็นเมตาโบไลต์ที่จำเพาะกว่า (more specific metabolites) ในพืชและสัตว์ การกำจัดน้ำออกจากอาหาร เป็นวิธีการหนึ่งซึ่งช่วยให้อาหารเก็บไว้ได้นาน ลักษณะเฉพาะตัวและบทบาทของน้ำ สามารถเข้าใจได้โดยการศึกษาโมเลกุลของน้ำในรูปของแข็ง ของเหลวและก๊าซ

### 2.1 โมเลกุลของน้ำ

โมเลกุลของน้ำประกอบด้วยออกซิเจน 1 อะตอม จับกับไฮโดรเจน 2 อะตอม โดยพันธะโคเวเลนต์ (covalent bonding) โมเลกุลของน้ำมีไดโพล (dipoles) โดยไฮโดรเจนอะตอมจะเป็นบวกเล็กน้อย และออกซิเจนอะตอมจะเป็นลบเล็กน้อย (รูปที่ 2.1) โมเลกุลของน้ำไม่เป็นเส้นตรง ไฮโดรเจน 2 อะตอม ต่างก็ก่อพันธะโคเวเลนต์กับออกซิเจน เกิดเป็นโครงสร้างที่ใกล้เคียงกับรูปเตตระฮีดรอน (tetrahedron) เราอาจมองโมเลกุลของน้ำในลักษณะที่ว่ามีออร์บิทัล (orbital) ของพันธะระหว่างไฮโดรเจนและออกซิเจน ตั้งอยู่บนแกน 2 แกนของรูปเตตระฮีดรอน ส่วนอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว 2 คู่ ของออกซิเจนก็ตั้งอยู่บนแกนอีก 2 แกนที่เหลือของรูปเตตระฮีดรอน ดังแสดงในรูปที่ 2.2 มุมระหว่างพันธะในโมเลกุลเดี่ยวของน้ำ (สถานะไอ) คือ  $104.5^\circ$  และเป็นมุมที่ใกล้เคียงกับมุมเตตระฮีดรอล (tetrahedral angle) คือ  $109.5^\circ$  ระยะระหว่างนิวเคลียสของพันธะ O—H คือ 0.96 อังสตรอม (Å) และรัศมี van de Waals สำหรับออกซิเจนและไฮโดรเจน คือ 1.40 และ 1.2 อังสตรอมตามลำดับ (รูปที่ 2.3)

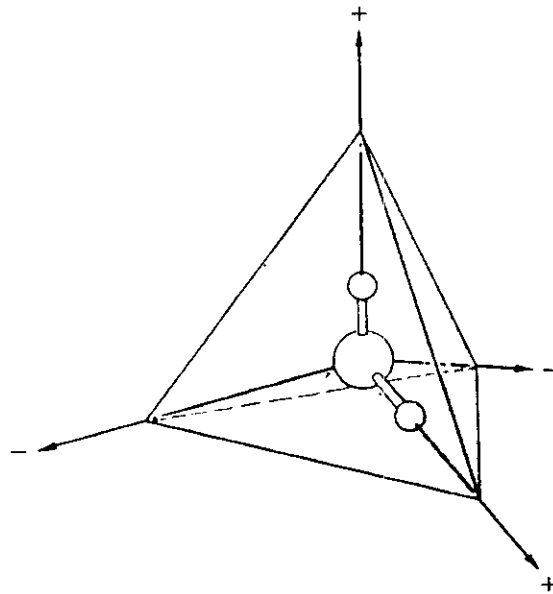
ตารางที่ 2.1 ความชื้นในอาหาร

อาหาร	ปริมาณน้ำ (%)
เนื้อ	
วัว, เนื้อ	66
หมู, เนื้อ	50
ไก่, เนื้อไก่อ่อน	66
ปลา, เนื้อ	65-81
ผลิตภัณฑ์นม	
น้ำนม	87
นมผง	4
เนยเหลว	16-18
น้ำผึ้ง	20
ขนมปัง	35
ผลไม้	
เบอร์รี่, เชอร์รี่, สาลี่	80-85
แอปเปิ้ล, พีช, ส้ม	85-90
สตอเบอร์รี่, มะเขือเทศ, แดงโม	90-95
ผัก	
เฟือก, มะเขือเปราะ, มันเทศขาว	74-80
ถั่วลันเตา, ฟักทอง, มันแกว	80-90
แตงกวา, หัวผักกาด, หน่อไม้	90-95

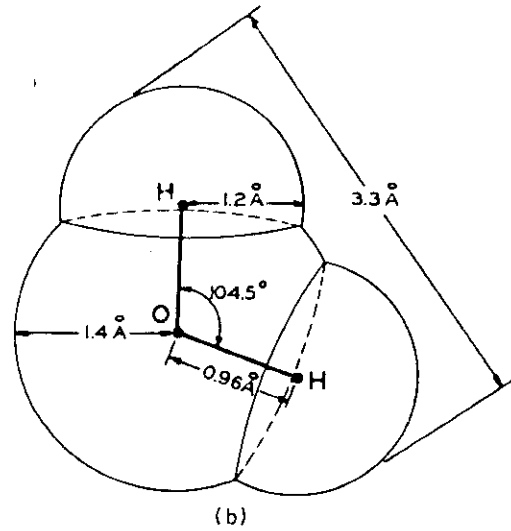


**รูปที่ 2.1** การเกิดโมเลกุลของน้ำ

- (ก) การรวมของออกซิเจน 1 อะตอม และไฮโดรเจน 2 อะตอม
- (ข) แต่ละไฮโดรเจนอะตอมต่างก็มีอิเล็กตรอนที่ใช้ร่วมกับออกซิเจนอยู่ 1 คู่
- (ค) การกระจายที่ไม่เท่ากันของประจุบวกและประจุลบในโมเลกุลของน้ำ



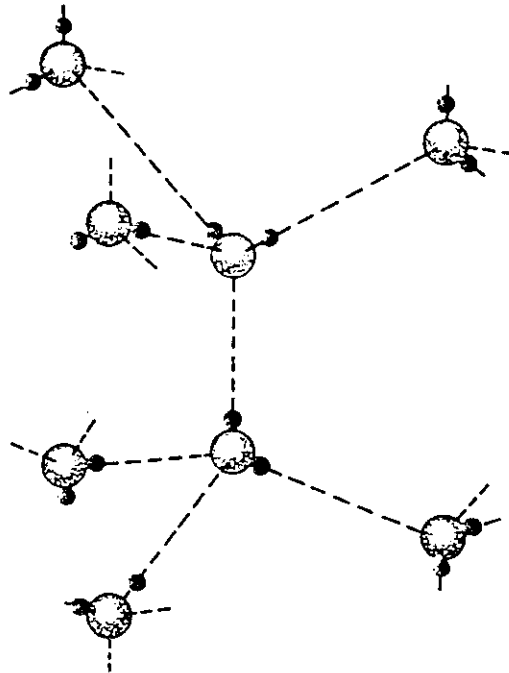
**รูปที่ 2.2** การกระจายของประจุรอบ ๆ โมเลกุลของน้ำ ทำให้มันมีรูปร่างเป็นเตตระฮีดรอน (คอนฟิ-กูเรชันแบบ  $sp^3$ )



รูปที่ 2.3 รัศมี van de Waals สำหรับโมเลกุลของน้ำในสถานะก๊าซ

## 2.2 พันธะไฮโดรเจน

น้ำมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมาก ซึ่งสามารถอธิบายได้จากความสามารถในการเกิดพันธะไฮโดรเจนของน้ำได้หลายพันธะ ในลักษณะที่เป็นรูปสามมิติ (รูปที่ 2.4) ออกซิเจน

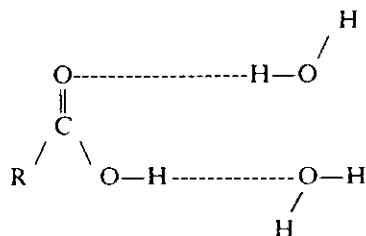


รูปที่ 2.4 การเกิดพันธะไฮโดรเจนของน้ำในรูปเตตระฮีดรอน (เส้นประ..... แสดงพันธะไฮโดรเจน)

ในโมเลกุลของน้ำมีอิเล็กโตรเนกาติวิตี (electronegativity) สูง มันจึงดึงอิเล็กตรอนเข้าหาตัวมัน ดังนั้น ออกซิเจนจึงมีประจุลบมากกว่า ส่วนไฮโดรเจนอะตอมมีประจุบวกมากกว่า โมเลกุลของน้ำ 1 โมเลกุล สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนได้ถึง 4 พันธะ และเกิดการจัดตัวแบบเตตระฮีดรอน ดังแสดงในรูปที่ 2.4 เนื่องจากน้ำมีตำแหน่งที่เป็นตัวรับพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond acceptor) และตำแหน่งที่เป็นตัวให้พันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond donor) เท่ากัน จึงทำให้มันสามารถจัดตัวเพื่อเกิดพันธะไฮโดรเจนรูปสามมิติได้ น้ำจึงมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมากผิดปกติ เมื่อเปรียบเทียบกับ  $\text{NH}_3$  ซึ่งโดยการจัดตัวแบบเตตระฮีดรอนกับไฮโดรเจน 3 อะตอม มีตำแหน่งที่รับพันธะไฮโดรเจน 1 ตำแหน่ง ส่วน HF โดยการจัดตัวแบบเตตระฮีดรอนกับไฮโดรเจน 1 อะตอม จะมีตำแหน่งที่รับพันธะไฮโดรเจน 3 ตำแหน่ง โมเลกุลเหล่านี้มีตำแหน่งที่รับและให้พันธะไฮโดรเจนไม่เท่ากัน ดังนั้น จึงสามารถเกิดโครงข่าย (networks) ของพันธะไฮโดรเจนเป็นรูปสองมิติ ซึ่งจะมีพันธะไฮโดรเจนต่อ 1 โมเลกุลน้อยกว่าน้ำ

คุณสมบัติของน้ำที่เกิดพันธะไฮโดรเจนรูปสามมิติได้ สามารถใช้อธิบายคุณสมบัติที่แตกต่างจากโมเลกุลอื่น ๆ โดยที่น้ำมีคุณสมบัติบางอย่างที่มีค่าสูงผิดปกติ เช่น ความจุความร้อน, จุดหลอมเหลว, จุดเดือด, แรงตึงผิว, ความร้อนของการหลอม (heat of fusion); ความร้อนของการระเหยและความร้อนของการระเหิด เป็นต้น (ตารางที่ 2.2) ซึ่งล้วนแต่เกี่ยวข้องกับ การใช้พลังงานสูง เพื่อทำให้พันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลแตกออก

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะทำให้เปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของพันธะไฮโดรเจนรูปสามมิติได้ จากการศึกษาโดยอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Infrared spectroscopy) พบว่า ไม่มีการเกิดพันธะไฮโดรเจนในไอน้ำ ซึ่งแตกต่างจากน้ำเหลวและน้ำแข็ง จากการศึกษาปริมาณของพันธะไฮโดรเจนที่แตกออกที่อุณหภูมิต่าง ๆ กะประมาณว่า 35% ถึง 47% ของพันธะไฮโดรเจน จะยังคงมีอยู่ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิในร่างกายคน) นี้ย่อมแสดงว่าพันธะไฮโดรเจนมีบทบาทสำคัญในปฏิกิริยาระหว่างน้ำและตัวถูกละลาย (water-solute interactions) ในขบวนการทางสรีรวิทยาในร่างกายคน น้ำนอกจากจะเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างกันแล้ว ยังเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลที่โพลาร์อื่น ๆ เช่น กรดคาร์บอกซิลิก, แอลกอฮอล์, แอลดีไฮด์และคีโตน เป็นต้น



### 2.3 น้ำ(ของเหลว)

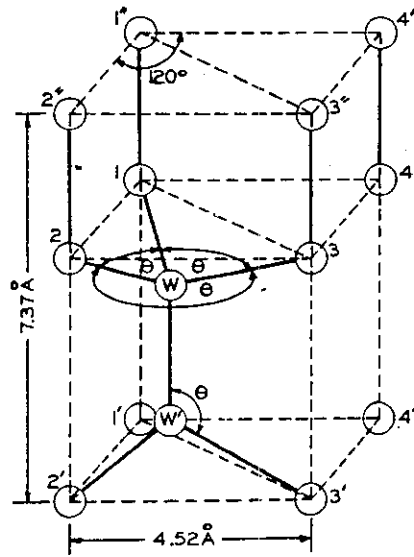
น้ำเป็นของเหลวที่อุณหภูมิ 0 ถึง 100 องศาเซลเซียส และที่ 1 ความดันบรรยากาศ น้ำที่เป็นของเหลวที่มีโครงสร้างอยู่ในช่วงสั้นๆ การเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของน้ำ ทำให้น้ำมีลักษณะโครงสร้างเป็นรูปหลายเหลี่ยม(polygonal structure) แต่โครงสร้างดังกล่าวจะแตกออกและเกิดใหม่ได้ในช่วงเวลาสั้นมาก เพราะแต่ละโมเลกุลของน้ำจะเปลี่ยนจากการก่อพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลหนึ่งไปเป็นอีกโมเลกุลหนึ่งอย่างรวดเร็ว การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวซึ่งเกิดได้ภายในเวลาเพียง  $10^{-12}$  -  $10^{-9}$  วินาทีสามารถใช้อธิบายการการไหลและความหนืดต่ำของน้ำ

### 2.4 น้ำแข็งบริสุทธิ์

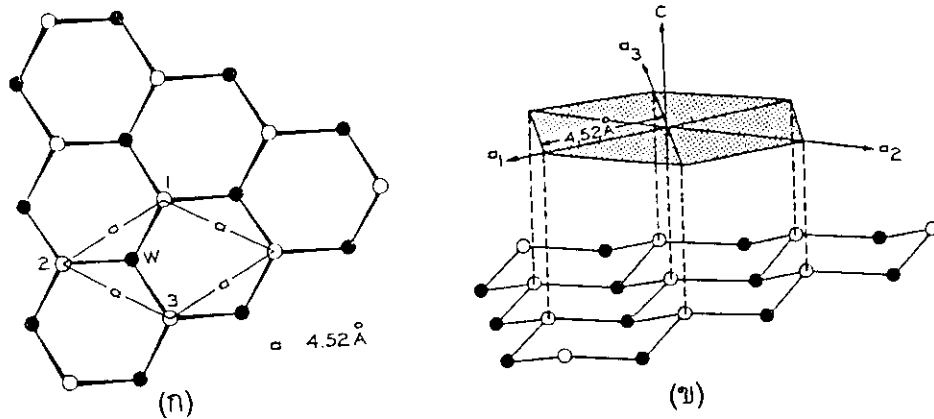
น้ำโดยการก่อพันธะไฮโดรเจนในทิศทางของเตตตระฮีดรัลเกิดเป็นผลึกน้ำแข็งโดยมีระยะห่างระหว่างนิวเคลียส O-O ของโมเลกุลน้ำข้างเคียงที่ใกล้ที่สุด(O-O internuclear nearest-neighbor distance) ในผลึกน้ำแข็งคือ 2.76 Å และมุมของพันธะ O-O-O ประมาณ  $109^\circ$  แต่ละโมเลกุลน้ำสามารถก่อพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลน้ำอีก 4 โมเลกุล (เลขโคออดิเนต คือ 4.0) ซึ่งจะเห็นได้จากหน่วยเซลล์ในรูปที่ 2.5 โมเลกุลน้ำ W ก่อพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลน้ำข้างเคียงคือ 1, 2, 3 และ W'

เมื่อหน่วยเซลล์หลายหน่วยมารวมกัน ลักษณะการจัดตัวของโมเลกุลน้ำซึ่งมองจากด้านบนลงมา(แกน C) จะเห็นการจัดตัวแบบเฮกซะโกนัลของน้ำแข็งซึ่งแสดงอยู่ในรูปที่ 2.6(ก) และรูปที่ 2.6(ข) จะเห็นการจัดตัวรูปสามมิติของโมเลกุลน้ำภายในผลึกแลททิซของน้ำแข็ง โครงสร้างของน้ำแข็งเป็นโครงสร้างที่ไม่นิ่งแต่มีพลวัต(dynamic) พันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลของน้ำแข็งจะแตกออกและเกิดใหม่อย่างรวดเร็วและต่อเนื่อง ปริมาณการเกิดพันธะไฮโดรเจนขึ้นกับอุณหภูมิ น้ำแข็งที่  $0^\circ\text{C}$  มีเลขโคออดิเนตเท่ากับ 4 (แต่ละโมเลกุลน้ำจะมีโมเลกุลน้ำข้างเคียงที่อยู่ใกล้ที่สุด 4 โมเลกุล) และระยะห่างระหว่างโมเลกุลน้ำข้างเคียงเท่ากับ 2.76 Å เมื่อน้ำแข็งหลอมเหลว พันธะไฮโดรเจนบางส่วนจะแตกออก (ระยะระหว่างโมเลกุลข้างเคียงจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากน้ำมีมุมพันธะเล็กกว่าน้ำแข็ง (น้ำมีมุมพันธะ O-O-O คือ  $105^\circ$  ส่วนน้ำแข็งมีมุมพันธะคือ  $109^\circ$ ) น้ำจึงมีจำนวนโมเลกุลที่มารวมกันหนาแน่นมากกว่า และเลขโคออดิเนตหรือจำนวนโมเลกุลข้างเคียงที่ใกล้ที่สุดของน้ำจะมีมากกว่าในน้ำแข็ง

การเปลี่ยนจากน้ำแข็งไปเป็นน้ำจะเกิดปัจจัย 2 อย่างซึ่งมีผลต่อความหนาแน่นของน้ำ คือ การเพิ่มระยะห่างระหว่างโมเลกุลของน้ำข้างเคียงที่ใกล้ที่สุด (ซึ่งลดความหนาแน่น) และ



รูปที่ 2.5 หน่วยเซลล์ของน้ำแข็งธรรมดาที่  $0^{\circ}\text{C}$  (วงกลมแทนออกซิเจนอะตอมของโมเลกุลน้ำ ระยะระหว่างนิวเคลียส O-O คือ  $2.76 \text{ \AA}$ ,  $\theta$  คือ  $109^{\circ}$ )



รูปที่ 2.6 “ระนาบฐาน”(Basal planes)ของผลึกน้ำแข็งซึ่งประกอบด้วยระนาบสองระนาบที่มีระดับต่างกัน วงกลมสีขาวและสีดำแทนออกซิเจนอะตอมที่อยู่บนระนาบสองระนาบนี้  
 (ก) โครงสร้างแบบเฮกซะโกนัลเมื่อมองลงมาจากแกน C (ตั้งบน) ตัวเลขกำกับโมเลกุลสัมพันธ์กับตัวเลขในรูปที่ 2.5  
 (ข) โครงสร้างรูปสามมิติของระนาบฐานของผลึกน้ำแข็ง

การเพิ่มโมเลกุลข้างเคียงที่อยู่ใกล้ที่สุดหรือการเพิ่มเลขโคออดิเนต(ซึ่งเพิ่มความหนาแน่น) เมื่ออุณหภูมิเพิ่มจากระหว่าง  $0^{\circ}\text{C}$  ถึง  $4^{\circ}\text{C}$  ค่าความหนาแน่นสุทธิ (net increase) ของน้ำจะเพิ่มขึ้นจนผ่านจุดสูงสุดที่  $4^{\circ}\text{C}$  เพราะช่วงอุณหภูมิดังกล่าว ผลของการเพิ่มเลขโคออดิเนตเป็นปัจจัยสำคัญทำให้ความหนาแน่นของน้ำเพิ่มขึ้น ส่วนอุณหภูมิเหนือ  $4^{\circ}\text{C}$  ปัจจัยของการเพิ่มระยะห่างระหว่างโมเลกุลข้างเคียงที่ใกล้ที่สุดมีความสำคัญมากกว่า ทำให้ความหนาแน่นของน้ำลดลงเล็กน้อย

ขณะที่อุณหภูมียิ่งเพิ่มขึ้น เลขโคออดิเนตเพิ่มจาก 4.0 ในน้ำแข็งเป็น 4.4 ในน้ำที่  $1.5^{\circ}\text{C}$  และ 4.9 ที่  $83^{\circ}\text{C}$  ในขณะเดียวกัน ระยะระหว่างโมเลกุลข้างเคียงเพิ่มจาก 2.76 Å ในน้ำแข็งที่  $0^{\circ}\text{C}$  ไปเป็น 2.9 Å ในน้ำที่  $1.5^{\circ}\text{C}$  และเป็น 3.05 Å ที่  $83^{\circ}\text{C}$  ด้วยเหตุนี้ ความหนาแน่นของน้ำ(ของเหลว)ที่  $0^{\circ}\text{C}$  (0.99984 กรัม/ซม<sup>3</sup>) จึงสูงกว่าน้ำแข็งที่  $0^{\circ}\text{C}$  (0.9168 กรัม/ซม<sup>3</sup>) ในเมื่อน้ำแข็งซึ่งมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ เพราะน้ำแข็งมีเลขโคออดิเนตน้อยกว่าน้ำ น้ำแข็งจึงลอยน้ำได้

เมื่อน้ำกลายเป็นน้ำแข็ง ความหนาแน่นจะลดลงแต่ปริมาตรจะเพิ่มขึ้นประมาณ 9% กรณีเช่นนี้สำคัญมากสำหรับอาหารแช่แข็งที่มีปริมาณความชื้นสูง ภาชนะที่จะบรรจุอาหารจะต้องออกแบบให้สามารถรับปริมาตรของอาหารที่เพิ่มขึ้นเมื่ออาหารแข็งตัว ปริมาตรที่เพิ่มขึ้นนี้ยังอาจก่อความเสียหายกับโครงสร้างของผลไม้เนื้อนุ่มที่แช่แข็งด้วย

## 2.5 ความดันไอและจุดเดือดของน้ำ (Vapor pressure and Boiling point)

เมื่อใส่ไนในแก้วน้ำแล้วตั้งทิ้งไว้ ไม่นานระดับน้ำในแก้วน้ำจะค่อยๆลดลง จนในที่สุดจะแห้งไป เพราะน้ำระเหยออกไปหมด น้ำในแก้วน้ำไม่ได้เดือด แต่โมเลกุลของน้ำแต่ละโมเลกุลจะรับพลังงานอยู่เรื่อยๆ จนมีพลังงานเพียงพอที่จะเปลี่ยนสถานะจากน้ำกลายเป็นไอ แต่ถ้าเราใส่ไนในภาชนะปิด เมื่อสมดุล โมเลกุลของน้ำจะระเหยตลอดเวลา ในขณะเดียวกัน โมเลกุลของไอน้ำก็กลั่นตัวเป็นน้ำด้วย โดยภาพรวม เราจะมองไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงใดๆ ของระบบ ที่สมดุล ความดันที่โมเลกุลของไอน้ำมีต่อผิวน้ำ เรียกว่า ความดันไอ

เมื่อน้ำแข็งอยู่ในสภาวะสุญญากาศและได้รับความร้อน มันจะถูกเปลี่ยนเป็นไอน้ำโดยไม่ผ่านสภาวะของเหลว ปรากฏการณ์เรียกว่า การระเหิด (Sublimation) หลักการระเหิดถูกนำมาใช้ในขบวนการแปรรูปอาหารที่เรียกว่า การทำให้แห้งแบบเยือกแข็ง (freeze drying) ตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารที่ใช้วิธีแปรรูปดังกล่าวได้แก่ กาแฟ โดยเมล็ดกาแฟจะถูกแช่แข็งและนำเข้าสู่ระบบสุญญากาศ ใช้รังสีความร้อนกำจัดน้ำออก



อาหารที่แช่แข็งเป็นเวลานานจะเกิดการเปลี่ยนสีที่ผิว เรียกว่า การเกิด freezer burn การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวก็เกิดจากการระเหิดของน้ำแข็งที่ผิวของอาหารแช่แข็ง เมื่อไอน้ำได้รับความเย็นจัด จะเกิดเป็นผลึกลักษณะเป็นรูปหกเหลี่ยม เช่น การเกิดเกล็ดหิมะ(snow flakes) ในฤดูหนาว

## ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำ

คุณสมบัติ	ค่าต่าง ๆ
น้ำหนักโมเลกุล	18.0153
จุดหลอมเหลวที่ 101.3 กิโลปาสคาล(kPa)หรือ 1 ความดันบรรยากาศ	0.000 °ซ
จุดเดือดที่ 101.3 กิโลปาสคาล (kPa) หรือ 1 ความดันบรรยากาศ	100.000 °ซ
อุณหภูมิวิกฤต	373.99 °ซ
ความดันวิกฤต	22.064 เมกะปาสคาล (218.6 ความดันบรรยากาศ)
Triple point	0.01 °ซ และ 611.73 ปาสคาล (4.589 มม.ปรอท)
เอนทัลปีของการหลอมเหลวที่ 0 °ซ	6.012 กิโลจูล(1.436 กิโลแคลอรี)/โมล
เอนทัลปีของการระเหยกลายเป็นไอที่ 100 °ซ	40.657 กิโลจูล(9.711 กิโลแคลอรี)/โมล
เอนทัลปีของการระเหิดที่ 0 °ซ	50.91 กิโลจูล(12.16 กิโลแคลอรี)/โมล

คุณสมบัติอื่น ๆ	อุณหภูมิ			
	20 °ซ	0 °ซ	0 °ซ(น้ำแข็ง)	-20 °ซ(น้ำแข็ง)
ความหนาแน่น(กรัม/ซม <sup>3</sup> )	0.99821	0.99984	0.9168	0.9193
ความหนืด (ปาสคาล / วินาที)	1.002x10 <sup>-3</sup>	1.793 x10 <sup>-3</sup>	-	-
แรงตึงผิวที่มีต่ออากาศ (นิวตัน/เมตร)	72.75 x 10 <sup>-3</sup>	75.64 x 10 <sup>-3</sup>	-	-
ความดันไอ (กิโลปาสคาล)(kPa)	2.3388	0.6113	0.6113	0.103
ความจุความร้อน (จูล/กรัม· แคลวิน)	4.1818	4.2176	2.1009	1.9544
การนำความร้อน(ของเหลว)	0.5984	0.5610	2.240	2.433
(วัตต์/เมตร· แคลวิน)				
การแพร่ความร้อน(ตารางเมตร/วินาที)	1.4 x 10 <sup>-7</sup>	1.3 x 10 <sup>-7</sup>	11.7 x 10 <sup>-7</sup>	11.8 x 10 <sup>-7</sup>
Permittivity(dielectric constant)	80.20	87.90	90	98

## 2.6 คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำ

คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำแสดงอยู่ในตารางที่ 2.2

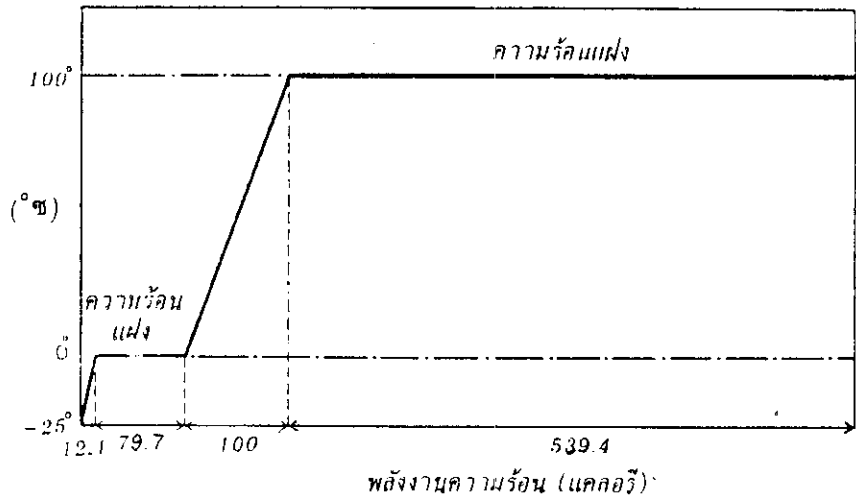
### ก. การเดือดของน้ำ

เมื่อต้มน้ำจนร้อน จะเห็นฟองอากาศเกิดขึ้นบริเวณที่น้ำสัมผัสกับภาชนะและข้างๆภาชนะ ฟองอากาศเหล่านี้เกิดขึ้นเนื่องจากอากาศละลายในน้ำร้อนได้น้อยกว่าในน้ำเย็น เมื่ออุณหภูมิใกล้เดือด จะเห็นฟองอากาศขนาดใหญ่ขึ้นที่ก้นภาชนะ ฟองอากาศเหล่านี้จะค่อยๆปุดขึ้นมาช้าๆสู่ผิวน้ำก่อนจะแตกออก เมื่อน้ำเดือด ฟองอากาศจะเกิดมากขึ้นและเร็วขึ้น และจะแตกออกก่อนจะถึงผิวน้ำ เมื่อมันหลุดออกจากน้ำ ผิวน้ำจะกระเพื่อมและน้ำจะเปลี่ยนจากของเหลวกลายเป็นไอ การที่น้ำจะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นไอ โมเลกุลของน้ำจะต้องได้รับพลังงานเพียงพอที่จะเอาชนะแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของน้ำและความดันของบรรยากาศ ความดันของบรรยากาศคือน้ำหนักของอากาศที่อยู่เหนือผิวของเหลว

น้ำบริสุทธิ์เดือดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส หรือ 212 องศาฟาเรนไฮต์ ภายใต้อุณหภูมิ 1 บรรยากาศ ( 760 มิลลิเมตรปรอท หรือ 101.3 กิโลปาสคาล)

### ข. ความร้อนจำเพาะ (specific heat) ของน้ำ

ความร้อนจำเพาะ คือ ปริมาณความร้อนที่ต้องการเพื่อทำให้สาร 1 กรัม ร้อนขึ้น 1 องศาเซลเซียส ความร้อนจำเพาะของน้ำมีค่าเท่ากับ 1 หมายถึง ปริมาณความร้อน 1 แคลอรีที่ถูกดูดกลืนโดยน้ำเพื่อทำให้น้ำ 1 กรัมร้อนขึ้น 1 องศาเซลเซียส จากรูปที่ 2.6 จะเห็นได้ว่าการทำให้น้ำ 1 กรัม (1 ml) มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 0 องศาเซลวิน (Kelvin) ไปเป็น 273 องศาเซลวิน ต้องใช้ความร้อน 273 แคลอรี น้ำมีความร้อนจำเพาะสูงกว่าสารอื่น ๆ เราจึงสามารถใช้น้ำเพื่อระบายความร้อนและป้องกันมิให้อุณหภูมิของอาหารเพิ่มเร็วเกินไป ตัวอย่างเช่น การอบสังขยาฝรั่ง (custard) จะใส่ส่วนผสมต่าง ๆ ในภาชนะแล้วใส่ในถาดที่มีน้ำอยู่แล้ว เอาไปอบในตู้อบ น้ำช่วยระบายความร้อน เพราะมันมีความร้อนจำเพาะสูง สามารถดูดและคายความร้อนได้มาก โดยอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงน้อยมาก น้ำมันโอลิฟ (olive oil) มีความร้อนจำเพาะ 0.47 ถ้าให้ความร้อนปริมาณเท่ากันและเวลาเท่ากัน น้ำมันจะมีอุณหภูมิสูงกว่าน้ำ 2 เท่า อากาศมีความร้อนจำเพาะเท่ากับ 0.3329 ซึ่งต่ำกว่าน้ำมัน โลหะ 2 ชนิดที่ใช้ทำภาชนะสำหรับหุงต้ม คือ อลูมิเนียมและเหล็กหล่อ มีความร้อนจำเพาะ 0.214 และ 0.119 ตามลำดับ



รูปที่ 2.7 กราฟแสดงความร้อนแฝงของการหลอมเหลวและความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ

ง. ความร้อนแฝง

ความร้อนแฝง (Latent heat)คือ ปริมาณความร้อนที่ต้องการเพื่อเปลี่ยนสถานะของสารจากสถานะหนึ่งไปเป็นอีกสถานะหนึ่ง จากรูปที่ 2.7 จะเห็นได้ว่า เมื่อให้ความร้อน 273 แคลอรีแก่น้ำแข็ง น้ำแข็งจะเปลี่ยนจาก 0 องศาเซลวิน (kelvin) ไปเป็น 273 องศาเซลวิน แต่น้ำแข็งยังคงอยู่ที่ 273 องศาเซลวิน ( 0 องศาเซลเซียส) จนกระทั่งมันดูดกลืนความร้อนอีก 80 แคลอรี น้ำแข็งจึงจะหลอมเหลวกลายเป็นน้ำปริมาณความร้อน 80 แคลอรีนี้ เรียกว่า ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว เนื่องจากความร้อนที่เพิ่มเข้าไปมิได้เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำแต่อย่างใด ปริมาณความร้อน 80 แคลอรีนี้ใช้เพื่อทำลายพันธะไฮโดรเจนในผลึกน้ำแข็ง ซึ่งจะทำให้ น้ำแข็ง 1 กรัมหลอมเหลวเป็นน้ำทั้งที่อุณหภูมียังคงอยู่ที่ 0 องศาเซลเซียส เมื่อน้ำแข็งหลอมเหลวหมดแล้ว อุณหภูมิของน้ำจึงจะเพิ่มขึ้นอีก และอีกครั้งหนึ่งทีน้ำจะเพิ่มขึ้น 1 องศาเซลเซียสทุกๆ 1 แคลอรีที่มันดูดกลืน

ความร้อน 100 แคลอรีจะทำให้ น้ำ 1 กรัมที่ 0 องศาเซลเซียสเปลี่ยนเป็น 100 องศา แต่ น้ำยังคงอยู่ในสภาวะของเหลวซึ่งมีโมเลกุลของน้ำเกิดพันธะไฮโดรเจนอยู่ประมาณ 40% การเปลี่ยน 1 กรัมของน้ำไปเป็นไอที่จุดเดือดของมัน ต้องใช้ความร้อนเพิ่มอีก 540 แคลอรี ปริมาณความร้อน 540 แคลอรีนี้เป็นความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอและเป็นปริมาณความร้อนที่ต้องการ เพื่อเอาชนะความดันของบรรยากาศ และแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของน้ำ (ของเหลว) ที่จุดเดือดของมัน (รูปที่ 2.7)

ค่าความร้อนจำเพาะและความร้อนแฝงของน้ำจะค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับสารอื่นที่มีขนาดโมเลกุลใกล้เคียงกัน คุณสมบัตินี้มีความสำคัญเมื่อน้ำถูกใช้เป็นตัวกลางสำหรับการถ่ายเทความร้อน เราต้องใช้พลังงานพอสมควรที่จะทำให้น้ำร้อนขึ้นและพลังงานนี้จึงถูกถ่ายเทไปสู่อาหาร อาหารที่ต้มในน้ำจะร้อนขึ้นอย่างช้าๆ ดังนั้น ถ้าใส่เนื้อเล็กน้อยในอาหารขณะที่ผัดอาหารจะช่วยทำให้อาหารไม่ไหม้ และน้ำจะต้องได้รับความร้อนมากพอควร มันจึงจะสามารถระเหยได้ น้ำจึงดึงความร้อนจากสภาพแวดล้อม ทำให้สภาพแวดล้อมเย็นลง ด้วยเหตุนี้ น้ำจึงสามารถใช้เป็นสารให้ความเย็น(cooling agent) เราสามารถทำให้อาหารเย็นลงโดยเก็บอาหารในผ้าชื้น เมื่อน้ำดึงความร้อนจากผ้า(ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ)เพื่อใช้ในการระเหยทำให้ผ้าเย็นลง ผลก็คือทำให้อาหารเย็นลง การฉีดน้ำที่ผักและผลไม้ ช่วยให้มันเย็นลงขณะที่น้ำระเหยจากผิวของผักและผลไม้ ผลไม้และผักจึงดูสดและไม่เหี่ยว นอกจากนี้ในประเทศที่มีอากาศหนาว มักนิยมวางถังน้ำในห้องใต้ถุน ในเวลากลางคืนที่อากาศหนาวจัด เพื่อป้องกันมิให้ผักและผลไม้แข็งตัว เมื่อน้ำในถังน้ำกลายเป็นน้ำแข็งจะคายความร้อนออกมาช่วยให้ห้องใต้ถุนอบอุ่นขึ้น (น้ำ 1 กรัมกลายเป็นน้ำแข็งจะคายความร้อน 80 แคลอรี)

## 2.7 บทบาทของน้ำในอาหาร

### 1. น้ำเป็นตัวนำความร้อน

น้ำเป็นตัวกลางสำหรับการถ่ายเทความร้อนจากแหล่งกำเนิดความร้อนไปสู่อาหาร ถ้าใส่อาหารในกระทะและผัดบนเตาไฟ กระทะและอาหารจะร้อนขึ้นเรื่อยๆและอาหารจะไหม้เกรียมเสียก่อนที่อาหารจะร้อนทั่วทั้งหมด แต่ถ้าระหว่างที่ผัดอาหาร เราใส่น้ำในกระทะด้วยอาหารจะไม่ไหม้ เพราะน้ำช่วยดูดความร้อน และช่วยกระจายความร้อนไปทั่วทุกส่วนของอาหาร น้ำเป็นตัวนำความร้อนที่ดีและช่วยถ่ายเทความร้อนไปสู่อาหาร

### 2. น้ำเป็นตัวทำละลาย เป็นตัวกลางให้สารแพร่กระจายและแขวนลอย

น้ำทำหน้าที่เป็นตัวทำละลาย และเป็นตัวกลางให้สารแพร่กระจาย และแขวนลอยอยู่ได้ ทั้งนี้ขึ้นกับขนาดของอนุภาคของสารและความสามารถในการละลายของสาร ถ้าโมเลกุลของสารมีขนาดเล็ก เช่น เกลือ น้ำตาล หรือวิตามินที่ละลายน้ำได้ เมื่อรวมกับน้ำจะเกิดเป็นสารละลาย

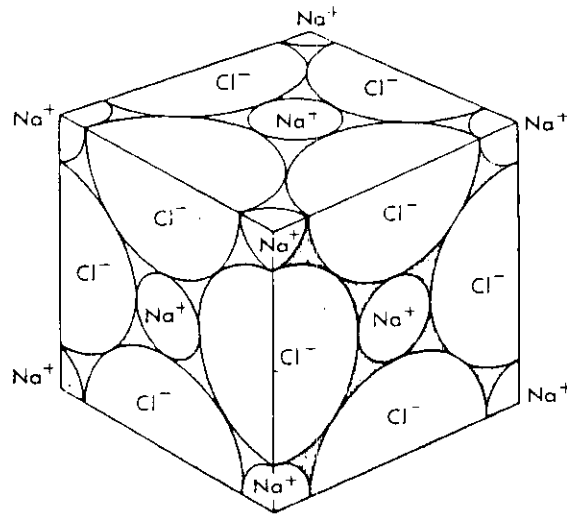
สารละลายอาจจำแนกออกได้เป็น 2 ประเภทคือ สารละลายไอออนิก และ สารละลายโมเลกุล

## สารละลายไอออนิกและสารละลายโมเลกุล

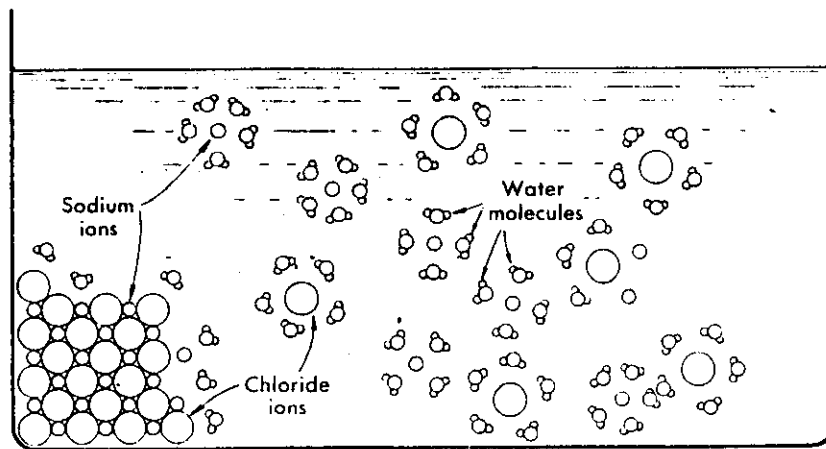
สารละลายไอออนิกเกิดจากการละลายสารที่สามารถแตกตัวเป็นไอออนในน้ำ เช่น เกลือ กรดหรือเบส ตัวอย่างเช่น โซเดียมคลอไรด์ซึ่งประกอบด้วยโซเดียมไอออน ( $\text{Na}^+$ ) และคลอไรด์ไอออน ( $\text{Cl}^-$ ) น้ำจะช่วยลดแรงดึงดูดระหว่างไอออนที่มีขั้วต่างกัน พันธะไอออนิกของโซเดียมคลอไรด์จึงแตกออก ไอออนแต่ละชนิดจะถูกห้อมล้อมด้วยโมเลกุลของน้ำหรือถูกไฮเดรต(hydrated) แต่ละไอออนจะถูกห้อมล้อมด้วยโมเลกุลของน้ำ โซเดียมไอออนและคลอไรด์ไอออนจึงเคลื่อนที่เป็นอิสระต่อกัน(รูปที่ 2.9)

ส่วนสารละลายโมเลกุลเกิดจากโมเลกุลที่มีสภาพขั้วสูง เช่น น้ำตาล ซึ่งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมาก เมื่อละลายน้ำ พันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของน้ำตาลจะแตกออกและถูกแทนที่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของน้ำและน้ำตาล แต่ละโมเลกุลของน้ำตาลจะถูกห้อมล้อมด้วยโมเลกุลของน้ำหรือถูกไฮเดรต เกิดสารละลายโมเลกุล

ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความร้อนจะทำให้พันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของน้ำและระหว่างโมเลกุลของน้ำตาลแตกออก แต่จะช่วยให้การเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างน้ำและน้ำตาลเพิ่มขึ้น ดังนั้น น้ำตาลจึงละลายในน้ำร้อนได้ดีกว่าในน้ำเย็น ตัวถูกละลาย(น้ำตาล) จะทำให้จุดเดือดของน้ำเพิ่มขึ้นและน้ำตาลจะละลายได้มากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดโดยเฉพาะเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า  $100^\circ\text{C}$  (จุดเดือดของน้ำ)



รูปที่ 2.8 โซเดียมไอออนและคลอไรด์ไอออนในผลึกแลททิซของโซเดียมคลอไรด์



รูปที่ 2.9 การละลายของผลึกโซเดียมคลอไรด์ในน้ำ โซเดียมไอออนและคลอไรด์ไอออนถูกห้อมล้อมด้วยโมเลกุลของน้ำ

### การกระจายแบบคอลลอยด์ (Colloidal dispersion)

โมเลกุลที่ใหญ่เกินไปที่จะเกิดเป็นสารละลายที่แท้จริง(true solution)ในน้ำ อาจแพร่กระจายในน้ำ ทั้งนี้ขึ้นกับขนาดของอนุภาคของสาร โมเลกุลที่มีขนาดอนุภาคในช่วง 1 นาโนเมตรถึง 100 นาโนเมตร จะกระจายในน้ำเกิดเป็นคอลลอยด์หรือซอล (Sol) ตัวอย่างของโมเลกุลประเภทนี้ ได้แก่ เซลลูโลส แป้งสูก สารจำพวกเพกติกและอาหารโปรตีนบางชนิด การกระจายตัวเป็นคอลลอยด์มักจะไม่เสถียร นักวิทยาศาสตร์การอาหารจึงต้องหาวิธีช่วยให้มันเสถียรเมื่อเกิดในผลิตภัณฑ์อาหาร คอลลอยด์หรือซอลจะไม่เสถียรโดยเฉพาะกับปัจจัยต่อไปนี้ คือ ความร้อน การแช่แข็ง หรือการเปลี่ยน pH การเปลี่ยนแปลงสภาวะในขณะที่การกระจายตัวเสถียร อาจนำไปสู่การตกตะกอนหรือเกิดเจล(gelation) ซึ่งในบางกรณีก็เป็นที่ต้องการ ดังเช่นในกรณีของการทำเพกตินเยลลี่(pectin jelly)

### การแขวนลอย (Suspension)

ขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่า 100 นาโนเมตรเป็นขนาดที่ใหญ่เกินกว่าที่จะเกิดเป็นคอลลอยด์ อนุภาคเหล่านี้จะแขวนลอยขณะที่ผสมกับน้ำและจะแยกตัวออกเมื่อเวลาผ่านไป ตัวอย่างเช่น การใส่แป้งดิบ(ไม่สุก)ลงในน้ำแล้วกวน แป้งจะแขวนลอยอยู่ขณะที่กวน แต่ถ้าปล่อยให้ทิ้งไว้ สารจะแยกตัวและตกตะกอนนอนกัน

## 2.8 น้ำอิสระและ Bound water

น้ำเป็นองค์ประกอบที่มีมากที่สุด ในอาหาร เซลล์ของพืชและสัตว์ประกอบด้วยน้ำเป็นส่วนใหญ่ เช่น ผักใบเขียวมีน้ำถึง 90 %หรือมากกว่านี้ แม้แต่เนื้อสัตว์ที่ต้มสุกแล้ว น้ำระเหยไปบางส่วน ก็ยังมีน้ำเหลืออยู่ 50-65 % น้ำส่วนนี้อยู่ในช่องว่างระหว่างเซลล์หรือเป็นน้ำที่ไหลวนภายในเนื้อเยื่อของพืชและสัตว์ มีคุณสมบัติเป็นตัวทำละลายสำหรับองค์ประกอบของอาหารและเป็นตัวแพร่กระจายสารคอลลอยด์ ถ้าสกัดหรือคั้นอาหาร น้ำส่วนนี้จะถูกสกัดออกได้ง่าย เราเรียกน้ำส่วนนี้ว่า น้ำอิสระ

น้ำที่ถูกดูดซับบนผิวของโมเลกุลขนาดยักษ์ เช่น แป้ง เพกติน เซลลูโลสและโปรตีน โดยแรงกระทำแบบแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals force)และโดยพันธะไฮโดรเจน น้ำส่วนนี้มีแรงยึดเกาะกับสารที่แน่นพอควร และกำจัดออกได้ยากกว่าน้ำอิสระ ส่วนน้ำบางส่วนที่เกิดแรงกระทำแบบไดโพล-ไอออน(dipole-ion interaction) เช่น แรงกระทำระหว่างน้ำกับไอออนอิสระหรือน้ำกับกลุ่มที่มีประจุบนสารประกอบอินทรีย์ ตัวอย่างได้แก่ น้ำที่ก่อบพันธะเคมีกับองค์ประกอบของอาหารเกิดเป็นไฮเดรต หรืออิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวของน้ำเกิดพันธะโคออดิเนตกับไอออน คาร์โบไฮเดรต โปรตีนหรือเกลืออนินทรีย์ น้ำที่อยู่ในโมโนแคลเซียมฟอสเฟตโมโนไฮเดรต  $[CaH_4(PO_4)_2 \cdot H_2O]$  ในส่วนผสมที่ใช้ทำขนมปัง และน้ำในกลูโคสโมโนไฮเดรต เป็นต้น น้ำที่เกิดแรงกระทำแบบนี้จะถูกยึดไว้แน่นที่สุด และถูกกำจัดออกได้ยากมาก เราเรียกน้ำส่วนนี้ว่า Bound water Bound water มีคุณสมบัติที่แตกต่างจากน้ำอิสระคือ

1. ไม่มีคุณสมบัติเป็นตัวทำละลายสำหรับองค์ประกอบของอาหาร
2. แข็งตัวที่อุณหภูมิต่ำมากหรือไม่แข็งตัวเลย
3. ไม่มีความดันไอ
4. มีความหนาแน่นมากกว่าน้ำอิสระมาก

Bound waterมีโครงสร้างที่ก่อบพันธะมากกว่าน้ำอิสระ มันจึงไม่สามารถทำหน้าที่เป็นตัวทำละลาย ความร้อนสูงและความเย็นจัดไม่มีผลต่อBound water Bound waterไม่ระเหย จึงไม่มีความดันไอ และโมเลกุลของ Bound water ก็เกาะกันอย่างแน่นหนามากกว่า (more closely packed)น้ำในสภาวะของเหลว Bound water จึงมีความหนาแน่นมากกว่าน้ำอิสระ

น้ำที่ถูกกักอยู่ในอาหาร เช่น น้ำในเจลเพกติน ในผักและผลไม้และน้ำในทอรูซิมและในเซลล์ น้ำส่วนนี้ไม่ไหลแต่ถ้าเราหั่นอาหารหรืออาหารเกิดความเสียหาย น้ำจะถูกปล่อยออกมาและไหลได้อย่างอิสระ น้ำที่ถูกกักไว้นี้เป็นน้ำอิสระไม่ใช่ Bound water น้ำในอาหารมีส่วนต่อความสดของอาหาร ถ้า น้ำอิสระระเหยออกไป อาหารจะเกิดการเหี่ยวเฉา

การจำแนกประเภทของน้ำตามที่ถูกกล่าวมาแล้วเป็นวิธีง่าย ๆ และไม่มีหลักเกณฑ์ แต่วิธีที่ดีที่สุดที่จะศึกษาการยึดเกาะของน้ำ (water binding) กับองค์ประกอบของอาหาร คือการศึกษาเส้นแสดงการดูดซับความชื้นที่อุณหภูมิคงที่ หรือไอโซเทอร์มของการดูดซับความชื้นซึ่งเป็นการพลอตระหว่างแอกติวิตีน้ำ (water activity,  $a_w$ ) กับปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับโดยอาหาร

## 2.9 แอกติวิตีน้ำ (Water activity, $a_w$ )

ตามกฎของ Raoult  $a_w$  คืออัตราส่วนของความดันไอของน้ำในสารละลาย(P) ต่อความดันไอน้ำบริสุทธิ์( $P_0$ ) ที่อุณหภูมิเดียวกัน

$$a_w = \frac{P}{P_0}$$

แอกติวิตีน้ำเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของสารละลาย(อาหาร) และสัมพันธ์กับความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity) ของบรรยากาศ ความชื้นสัมพัทธ์เป็นอัตราส่วนความดันย่อย (partial pressure)ของไอน้ำในอากาศต่อความดันไอน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิเดียวกัน ที่สภาวะสมดุล(equilibrium condition)  $a_w$  มีค่าเท่ากับความชื้นสัมพัทธ์หารด้วย 100

$$a_w = \frac{E.R.H.}{100}$$

E.R.H. = ความชื้นสัมพัทธ์สมดุล (Equilibrium relative humidity)

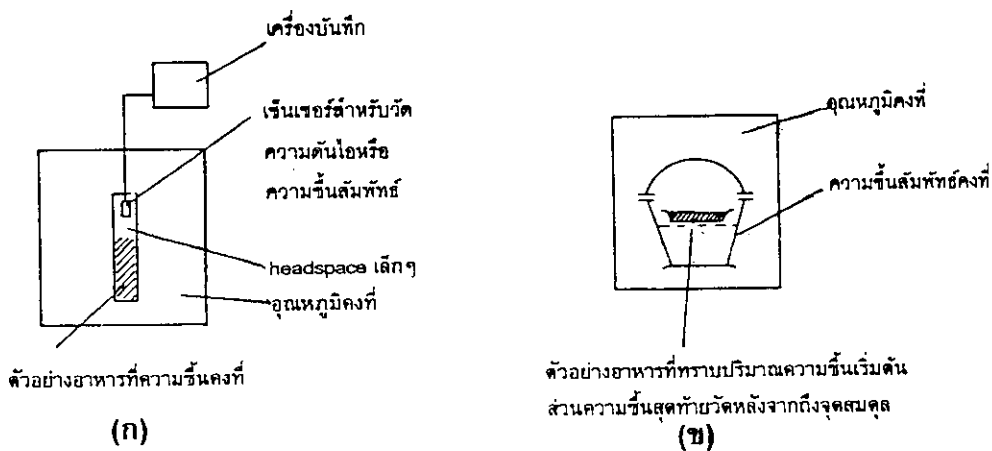
สมการดังกล่าวนี้จะเป็นจริงก็ต่อ เมื่อความชื้นในอาหารอยู่ในสมดุลกับความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศรอบ ๆอาหาร แต่การที่อาหารจะบรรลุสภาวะสมดุลต้องใช้เวลาานาน แม้กับอาหารที่มีปริมาณเพียงเล็กน้อย (< 1 กรัม) และเกือบจะเป็นไปไม่ได้ในอาหารที่มีปริมาณมาก โดยเฉพาะที่อุณหภูมิต่ำกว่า 50°ซ

การหาแอกติวิตีน้ำทำได้โดยการนำตัวอย่างอาหารที่ทราบปริมาณความชื้นมาใส่ในตู้ที่ปิดสนิทและมีอุณหภูมิคงที่ ปล่อยให้ความชื้นของอาหารสมดุลกับความชื้นใน headspace เหนือตัวอย่างอาหาร เมื่อบรรลุสมดุล น้ำหนักของอาหารจะคงที่ วัดความดันไอ หรือความชื้นสัมพัทธ์ใน headspace [ รูปที่ 2.10 (ก)]



อีกวิธีหนึ่งคือ นำตัวอย่างอาหารที่ทราบปริมาณความชื้นมาใส่ในคู่มือปิดสนิทและมีอุณหภูมิคงที่ ปรับความชื้นสัมพัทธ์ใน headspace โดยใช้สารละลายเกลือมาตรฐานหรือกรดอิมิตัว (สารละลายกลีเซอรอลหรือกรดซัลฟูริกสามารถใช้ปรับความชื้นสัมพัทธ์ตามที่ต้องการได้) ปลอຍให้ความชื้นในอาหารสมดุลกับความชื้นสัมพัทธ์ใน headspace (ทราบได้เมื่อน้ำหนักอาหารคงที่) วัดความชื้นสุดท้ายของอาหารที่สมดุล [ รูปที่ 2.10 (ข) ] เมื่อหารค่าความชื้นสัมพัทธ์ด้วย 100 จะได้ค่าแอกติวิตีน้ำ

ถ้าพลอตค่าแอกติวิตีน้ำหรือความชื้นสัมพัทธ์สมดุล กับ ปริมาณความชื้นของอาหาร จะได้ไอโซเทอร์มความชื้นของอาหาร



รูปที่ 2.10 วิธีพื้นฐานสองวิธีสำหรับวัดไอโซเทอร์มความชื้น

เป็นที่ยอมรับกันมานานแล้วว่า การเสื่อมเสียของอาหารเกี่ยวข้องกับปริมาณน้ำที่อยู่ในอาหาร การลดปริมาณน้ำหรือการเพิ่มความเข้มข้นของตัวถูกละลาย(solute)ในอาหารสามารถลดการเสื่อมเสียของอาหารได้

อย่างไรก็ตาม เป็นที่น่าสังเกตว่า อาหารหลายชนิดที่มีปริมาณน้ำเท่ากันแต่มีอัตรา การเสื่อมเสียแตกต่างกัน ดังนั้น ปริมาณน้ำในอาหารเพียงอย่างเดียวจึงไม่อาจเป็นเครื่องบ่งชี้ว่า อาหารนั้นจะเสื่อมเสียง่ายหรือไม่ ทั้งนี้เพราะอาหารแต่ละชนิดมีน้ำที่เกิดแรงกระทำกับองค์ประกอบของอาหารแตกต่างกัน น้ำที่เกิดแรงกระทำที่แข็งแกร่งกับองค์ประกอบของอาหารมีส่วนสนับสนุนปฏิกิริยาต่างๆ เช่น ไฮโดรลิซิสและการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์น้อยกว่าน้ำที่เกิดแรงกระทำอ่อนๆกับองค์ประกอบของอาหาร ดังนั้น อาหารซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบของอาหารที่แตกต่างกัน จึงมีน้ำอิสระและน้ำที่ก่อกวนระในปริมาณที่แตกต่างกัน ทำให้อาหารเกิดการเสื่อมเสียจากปฏิกิริยาเคมี เอนไซม์และเชื้อจุลินทรีย์ในระดับแตกต่างกัน

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น จึงมีการนำ “แอกติวิตีน้ำ” มาพิจารณาเกี่ยวกับความเสถียร ความปลอดภัยและคุณสมบัติอื่นๆของอาหาร แม้ว่าวิธีนี้จะไม่ใช่วิธีที่ดีที่สุด แต่ค่า  $a_w$  ก็สามารถใช้อธิบายเกี่ยวกับการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ตลอดจนปฏิกิริยาต่างๆที่ก่อความเสียหายกับอาหารได้ค่อนข้างดี ค่า  $a_w$  จึงถูกนำมาใช้เป็นมาตรฐานอย่างหนึ่งในการตัดสินเกี่ยวกับความเสถียรและความปลอดภัยของอาหารจากเชื้อจุลินทรีย์ ความจริงกฎหมายบางข้อของสหรัฐอเมริกาได้มีการกำหนดค่า  $a_w$  สำหรับผลิตภัณฑ์อาหารต่างๆ เพื่อใช้เป็นมาตรฐานในการผลิตผลิตภัณฑ์อาหารต่างๆ ตารางที่ 2.3 แสดงค่า  $a_w$  สำหรับอาหารหลายชนิด

ตารางที่ 2.3 ค่า  $a_w$  โดยประมาณของอาหารบางชนิด

$a_w$	อาหาร
1.00-0.95	ผลไม้, ผัก, ผลไม้กระป๋อง, เนื้อสด, ปลา, นมสด, ไข่กรอกสุก, ขนมปัง, อาหารประกอบด้วยน้ำตาลซูโครส 40%(w/w)หรือ เกลือ 7% (w/w)
0.95-0.91	เนยแข็งแปรรูป (เชดดาร์, สวิส เป็นต้น), ลูกพรุนความชื้นสูง, น้ำผลไม้เข้มข้นบางชนิด, อาหารที่มีน้ำตาลซูโครส 55%หรือเกลือ12%
0.91-0.87	ไข่กรอกหมัก(ซาลามิ), เค้กฟู(sponge cake), เนยแข็งแห้ง, มาร์การีน, อาหารประกอบด้วยน้ำตาลซูโคร 65%หรืออิมัตัว หรือเกลือ 15%
0.87-0.80	น้ำผลไม้เข้มข้นส่วนใหญ่, นมข้นหวาน, ซอกโกเลตไซริป, ผลไม้ไซริป, เมล็ดถั่วความชื้น 15-17%, แป้ง, ข้าว, เด็กผลไม้
0.80-0.75	แยม, มาร์มาเลด, ผลไม้แช่น้ำแข็ง,ขนมหวานฟู(marshmellow)บางชนิด
0.75-0.65	rolled oatsความชื้นประมาณ 10%, เมล็ดดั่งเม (grained nougats), ขนมหวาน(fudge), ขนมหวานฟู, เยลลี่, กากน้ำตาล(molasses), น้ำตาลทรายดิบ, ผลไม้แห้งบางชนิด, ผลไม้เปลือกแข็ง
0.65-0.60	ผลไม้แห้งความชื้น 15-20%, ลูกกวาดบางชนิดและคาราเมล, น้ำผึ้ง
0.50	พาสต้า(pasta)ความชื้น 12%, เครื่องเทศความชื้น 10%
0.40	ไข่ผงความชื้น 5%
0.30	คุกกี้, แครกเกอร์ เป็นต้นความชื้น 3-5%
0.20	นมผงไขมันเต็มความชื้น 2-3 %, ผักแห้งความชื้นประมาณ 5%, คอรันเฟลคความชื้นประมาณ 5%

อาหารที่มีความชื้นสูง และมีตัวถูกละลาย(solute)น้อย เช่น ผัก ผลไม้ และเนื้อสด การเสื่อมเสียของอาหารเหล่านี้ มีสาเหตุมาจากเชื้อจุลินทรีย์เป็นส่วนใหญ่ วิธีถนอมอาหารเหล่านี้สามารถทำได้โดยหลักของการลดแอกติวิตีน้ำ จนถึงจุดที่เชื้อจุลินทรีย์หยุดการเจริญเติบโต การลดแอกติวิตีน้ำทำได้หลายวิธี เช่น การกำจัดน้ำออก(การทำให้แห้ง), การแช่แข็ง, การใช้น้ำตาลที่มีความเข้มข้นสูง(การทำแยมและเยลลี่), และการใช้น้ำเกลือเข้มข้น เป็นต้น

ส่วนอาหารที่มีค่า  $a_w$  ระหว่าง 0.6 – 0.9 จัดเป็นอาหารที่มีความชื้นปานกลาง(Intermediate moisture foods หรือ IMF) อาหารเหล่านี้จำเป็นต้องมีความชื้นในอาหารสูงพอควรเพื่อรักษาเนื้อสัมผัสที่ดีของอาหารไว้ อาหารประเภทนี้มักไม่พบความเสียหายที่เกิดจากแบคทีเรีย แต่ไม่สามารถป้องกันเชื้อราในระยะยาวได้ การลดแอกติวิตีน้ำจึงมิใช่การกำจัดน้ำออก แต่ใช้สารที่สามารถเพิ่มความเข้มข้นของตัวถูกละลาย เช่น ซูโครส กลีเซอรอล โซเดียมคลอไรด์ และแคลเซียมคลอไรด์ เป็นต้น (ตารางที่ 2.4) การหาความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ตรงกับค่า  $a_w$  ใดๆ สามารถทำได้โดยใช้กฎของ Raoult กฎนี้ใช้ได้เฉพาะกับสารละลายที่มีพฤติกรรมเป็นสารละลายในอุดมคติ เช่น สารละลายซูโครส 1 โมลล(molal)ประกอบด้วย ซูโครส 1 โมล และน้ำ 55.5 โมล (1000 กรัม / 18 กรัม) ค่า  $a_w$  ที่หาได้คือ  $55.5 / 56.5 = 0.98$  สารละลายที่ใช้การคำนวณลักษณะนี้ได้ ต้องเป็นสารละลายที่เจือจางมากพอควร ถ้าสารละลายเข้มข้นหรือซับซ้อนมากขึ้น สารละลายจะไม่มีพฤติกรรมเป็นสารละลายในอุดมคติ ค่า  $a_w$  ที่คำนวณได้จะมีค่าคลาดเคลื่อน ซูโครสและกลีเซอรอลไม่แตกตัวในสารละลาย เป็นสารละลายที่ใกล้เคียงกับสารละลายในอุดมคติ ส่วนโซเดียมคลอไรด์และแคลเซียมคลอไรด์ซึ่งแตกเป็นไอออน 2 และ 3 ไอออนตามลำดับ เมื่อรวมความเข้มข้นของไอออนเหล่านี้แล้ว ยังคงใกล้เคียงกับสารละลายในอุดมคติถ้าหากเป็นสารละลายเจือจาง แต่ถ้าเป็นสารละลายเข้มข้น ตัวถูกละลายเหล่านี้จะมีประสิทธิภาพในการลดค่า  $a_w$  ได้มากกว่าที่ทำนายไว้โดยใช้หลักสารละลายในอุดมคติ ค่าที่คลาดเคลื่อนนี้ไม่ได้เกิดจากการแตกตัวของสารลดลง แต่เนื่องจากโมเลกุลของตัวถูกละลายที่เพิ่มขึ้นจะจับกับน้ำ เกิดไฮเดรชัน (hydration) เพิ่มขึ้น สารละลายซูโครสและกลีเซอรอลก็ให้ผลเช่นเดียวกันเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น ดังนั้น การใส่สารเหล่านี้ในผลิตภัณฑ์อาหารจึงช่วยลด  $a_w$  ของอาหารได้ เนื่องจากสารเหล่านี้ส่วนใหญ่สามารถจับหรือดูดซับน้ำไว้ได้มาก เราเรียกสารเหล่านี้ว่า “ฮิวเมคแตนต์”(Humectants) เช่น การใส่กลีเซอรอลในส่วนผสมที่ใช้ทำขนมปังจะช่วยลดแอกติวิตีน้ำในขนมปังที่อบแล้ว อย่างไรก็ตาม สารเหล่านี้บางชนิดมีรสหวานและรสเค็มด้วย จึงต้องคำนึงถึงความเข้มข้นที่จะใช้เพื่อลดแอกติวิตีน้ำในอาหาร

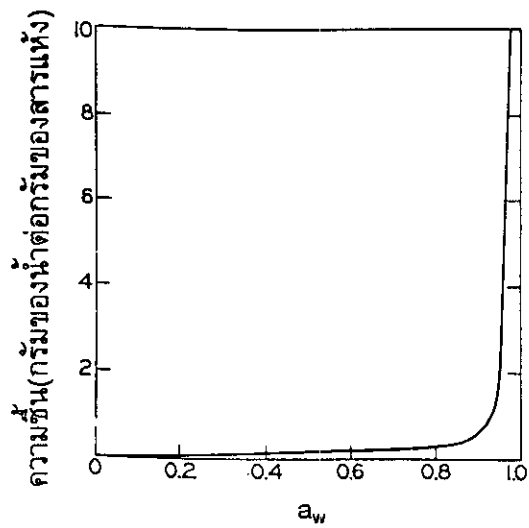
ตารางที่ 2.4 ค่าของ  $a_w$  สำหรับสารละลายเอควิวสของตัวถูกละลายต่างๆที่มีความเข้มข้น 1 โมเลล

ตัวถูกละลาย	$a_w$
ตัวถูกละลายในอุดมคติ	0.9823
กลีเซอรอล	0.9816
ซูโครส	0.9806
โซเดียมคลอไรด์	0.967
แคลเซียมคลอไรด์	0.946

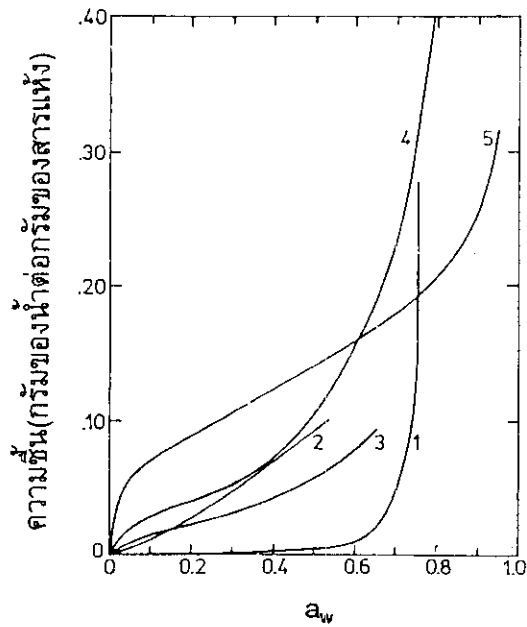
2.10 ไอโซเทอร์มของการดูดซับความชื้น หรือ เส้นแสดงการดูดซับความชื้นที่อุณหภูมิคงที่ (Moisture sorption isotherm หรือ MSI)

ไอโซเทอร์มของการดูดซับความชื้นเป็นการพลอตระหว่างแอกติวิตีน้ำและปริมาณความชื้นของอาหารที่อุณหภูมิหนึ่งที่กำหนดให้ รูปที่ 2.11 แสดงไอโซเทอร์มของการดูดซับความชื้นของอาหารในช่วงความชื้นกว้าง การพลอตแบบนี้ครอบคลุมช่วงความชื้นกว้าง จึงไม่ค่อยมีประโยชน์นัก เพราะข้อมูลที่นำเสนออยู่ในช่วงความชื้นต่ำ ทำให้ไม่เห็นรายละเอียดที่ชัดเจน ถ้าตัดช่วงความชื้นสูงออกไปและขยายช่วงความชื้นต่ำเป็นวิธีที่นิยมทำมากกว่า และได้ไอโซเทอร์มที่มีประโยชน์มากกว่า ทั้งนี้เพราะบริเวณความชื้นต่ำ(ปริมาณความชื้นต่ำกว่า25%) ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นเพียงเล็กน้อย ค่า  $a_w$  จะมีการเปลี่ยนแปลงที่เห็นได้ชัด ไอโซเทอร์มที่พลอตในช่วงความชื้นต่ำแสดงอยู่ในรูปที่ 2.14

อาหารหลายชนิดมีไอโซเทอร์มของการดูดซับความชื้น (resorption isotherm) ที่แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 2.12 ไอโซเทอร์มเหล่านี้ เตรียมโดยการเติมน้ำไปยังตัวอย่างอาหารแห้ง ไอโซเทอร์มของการคายความชื้น (Desorption isotherm) ก็มีเช่นกัน ลักษณะไอโซเทอร์มของอาหารส่วนใหญ่เป็นรูปโค้งกลับ (sigmoid shape) สภาวะน้ำที่เป็นน้ำอิสระหรือเป็น Bound waterมีส่วนต่อรูปโค้งกลับของไอโซเทอร์ม อาหารประเภทผลไม้ ลูกกวาดและกาแฟสกัด (coffee extract) ซึ่งมีปริมาณน้ำตาลสูง ยังมีโมเลกุลเล็กๆที่ละลายน้ำได้และไม่ค่อยมีสารพอร์ลิเมอร์อยู่ จะมีไอโซเทอร์มเป็นรูปตัว J (เส้นที่ 1 ในรูปที่ 2.11) ลักษณะและตำแหน่งของไอโซเทอร์มขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น องค์ประกอบของอาหาร, โครงสร้างทางกายภาพของอาหาร เช่น เป็นรูปผลึกหรืออสัณฐาน, วิธีการจัดแจงตัวอย่างอาหารล่วงหน้า (sample pretreatment) อุณหภูมิและระเบียบวิธีการเตรียมอาหาร รูปที่ 2.13 แสดงไอโซเทอร์มความ

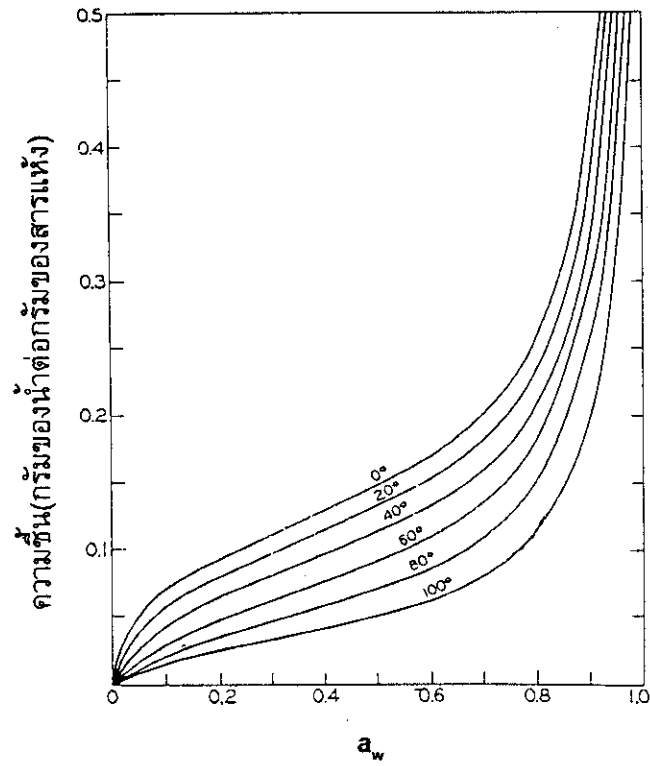


รูปที่ 2.11 ไอโซเทอร์มของการดูดซับความชื้นของอาหารที่ครอบคลุมช่วงความชื้นกว้าง

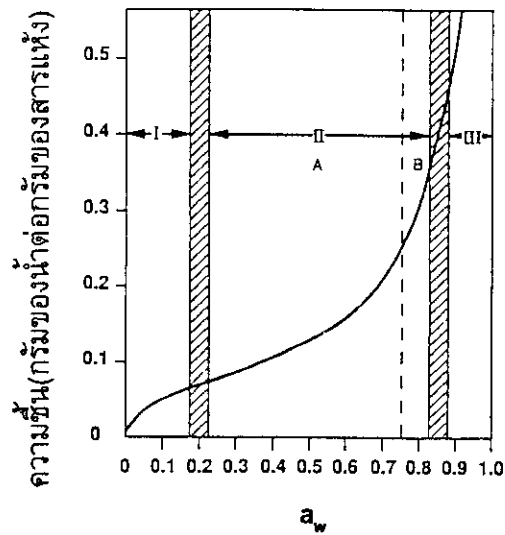


รูปที่ 2.12 ไอโซเทอร์มของการดูดซับความชื้นของอาหารทั่วไป (20° ซ)

- (1) ขนมอบ(องค์ประกอบสำคัญคือน้ำตาลผง) (2) หัวน้ำสกัดจากต้นชิโครี(chicory extract)  
 (3) กาแฟโคลัมเบียคั่ว (4) ผงสกัดตับหมู (5) แป้งข้าวเจ้า (อาหารในข้อ 2-5 วัดที่อุณหภูมิ  
 20° ซ ส่วนข้อ 1 วัดที่ 40° ซ)



รูปที่ 2.13 ไอโซเทอร์มคายความชื้นของไขมันฝรั่งที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 2.14 ไอโซเทอร์มดูดซับความชื้นในช่วงความชื้นต่ำของอาหารชนิดหนึ่ง (20 °ซ)

ชั้นของมันฝรั่งที่หั่นเป็นแว่น จะเห็นได้ว่า ไอโซเทอร์มความชื้นขึ้นกับอุณหภูมิ ที่ปริมาณความชื้นที่กำหนดให้ ค่า  $a_w$  จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

เพื่อให้เข้าใจความหมายและประโยชน์ของไอโซเทอร์มของการดูดซับความชื้นจะแบ่งไอโซเทอร์มออกเป็นโซน (zones) ดังแสดงในรูปที่ 2.14

ในขณะที่ค่อยๆเติมน้ำในอาหารแห้ง แอกติวิตีน้ำจะเลื่อนจากโซน I (แห้ง) ไปยังโซน III (ความชื้นสูง) คุณสมบัติของน้ำในแต่ละโซนจะแตกต่างกัน

น้ำที่อยู่ในโซน I ของไอโซเทอร์ม เป็นน้ำที่ถูกดูดซับแน่นหนาที่สุดและเคลื่อนไหวน้อยที่สุด น้ำส่วนนี้เกิดแรงกระทำกับตำแหน่งที่โพลาร์ (polar sites) ของอาหารโดยแรงกระทำแบบ น้ำ-ไอออน (water-ion) หรือโดยแรงกระทำ น้ำ-ไดโพล (water-dipole) น้ำส่วนนี้ไม่แข็งตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $-40^{\circ}\text{C}$  ไม่มีคุณสมบัติเป็นตัวทำละลาย และมีพฤติกรรมคล้ายกับของแข็ง

ปลายด้านความชื้นสูงของโซน I (เขตแดนระหว่างโซน I และโซน II) ตรงกับปริมาณความชื้นส่วนที่เป็น "BET monolayer" ของอาหาร BET monolayer เป็นปริมาณน้ำส่วนแรกที่ถูกดูดซับในอาหารแห้ง น้ำส่วนนี้ปกคลุมผิวด้านในของอาหารแห้ง มีความหนาหนึ่งชั้นโมเลกุล (monomolecular layer) น้ำส่วนนี้มีปริมาณน้อยนิด เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณน้ำทั้งหมดในอาหารที่มีความชื้นสูง น้ำส่วนนี้เป็นน้ำที่ไม่สามารถกำจัดออกโดยวิธีอบแห้งธรรมดา ไม่มีการเคลื่อนที่และไม่ใช่แหล่งเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์

น้ำที่ถูกเติมเข้าไปในโซนที่ II เป็นน้ำหนาหลายชั้นโมเลกุล (multimolecular layer) น้ำส่วนนี้จะเกิดแรงกระทำกับโมเลกุลน้ำข้างเคียง และโมเลกุลของตัวถูกละลาย (solutes) โดยพันธะไฮโดรเจนเป็นส่วนใหญ่ น้ำส่วนนี้มีการเคลื่อนไหวน้อย และไม่แข็งตัวที่  $-40^{\circ}\text{C}$  ขณะที่น้ำถูกเติมเข้าด้านที่มีความชื้นต่ำของโซน II มันจะมีผลต่อคุณสมบัติของตัวถูกละลาย ช่วยลดความแข็งเปราะ ตัวถูกละลายจะอมน้ำและบวมมากขึ้น แรงกระทำต่างๆเหล่านี้ควบคู่กับขบวนการละลายที่เพิ่งจะเริ่มขึ้น นำไปสู่การเร่งปฏิกิริยาส่วนใหญ่

ปริมาณน้ำในโซน I และ II คิดเป็นปริมาณน้ำเพียงประมาณ 5% ของปริมาณน้ำทั้งหมดในอาหารที่มีความชื้นสูง ปลายของโซน II ที่ต่อกับโซน III น้ำมีปริมาณเพียงพอที่เกิดชั้นไฮเดรชันหนึ่งชั้น (monolayer hydration shell) ดังเช่นที่พบในโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น โกลบูลาร์โปรตีน น้ำในชั้นไฮเดรชันไม่เคลื่อนที่และไม่แข็งตัวที่อุณหภูมิต่ำ

น้ำส่วนสุดท้ายที่ถูกดูดซับในโซน III เป็นน้ำที่ถูกจับอยู่ในเซลล์ เช่น น้ำในเจล น้ำส่วนนี้เป็นน้ำอิสระ ไหลได้ แข็งตัวได้ เป็นตัวทำละลายและเป็นแหล่งเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ ปริมาณน้ำในโซนนี้มีมากกว่า 95% ของน้ำทั้งหมดในอาหารที่มีความชื้นสูง

## 2.11 แอกติวิตีน้ำและความเสถียรของอาหาร

### 1. แอกติวิตีน้ำและการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์

ตารางที่ 2.5 แสดงช่วง  $a_w$  ที่เชื้อจุลินทรีย์ชนิดต่างๆสามารถเจริญเติบโตได้ แยกที่เรียในอาหารส่วนใหญ่จะไม่เจริญเติบโตที่  $a_w$  ต่ำกว่า 0.91 แต่แบกที่เรียที่ทนความเข้มข้นของเกลือสูง (halophilic bacteria) และแบกที่เรียบางชนิดยังคงเจริญเติบโตได้จนถึง  $a_w$  0.75 ยีสต์ส่วนใหญ่จะไม่เจริญเติบโตที่  $a_w$  ต่ำกว่า 0.87 แต่ยีสต์ที่ทนความเข้มข้นของน้ำตาลสูง (osmophilic yeast) ยังคงอยู่ได้จนถึง  $a_w$  0.6 อย่างไรก็ตาม ยีสต์เหล่านี้ไม่ใช่สาเหตุสำคัญทำให้อาหารเสีย ราส่วนใหญ่ซึ่งทนความแห้งแล้งได้ดีกว่าแบกที่เรียและยีสต์จะเจริญเติบโตได้ดีที่  $a_w$  ประมาณ 0.87-0.80 และยังเจริญเติบโตได้อย่างช้าๆเป็นเวลาหลายเดือนที่อุณหภูมิห้องในอาหารที่มี  $a_w$  ต่ำถึง 0.70 ส่วนราที่ทนความแห้งแล้งสูง (xerophilic molds)เจริญเติบโตได้ดีในช่วง  $a_w$  0.70-0.75 และยังคงอยู่ได้จนถึง  $a_w$  0.65 ที่  $a_w$  ต่ำกว่า 0.65 ว่าจะหยุดเจริญเติบโตโดยสิ้นเชิง

ตารางที่ 2.5 ช่วง  $a_w$  และค่า  $a_w$  ขั้นต่ำที่เชื้อจุลินทรีย์สามารถเจริญเติบโตได้

จุลินทรีย์	ช่วง $a_w$	$a_w$ ขั้นต่ำ
แบกที่เรียส่วนใหญ่	1.00 – 0.91	0.91
ยีสต์ส่วนใหญ่	0.91 – 0.87	0.87
ราส่วนใหญ่	0.87 – 0.80	0.80
แบกที่เรียที่ทนความเข้มข้นของเกลือสูง (Halophilic bacteria)	0.80 – 0.75	0.75
ราที่ทนความแห้งแล้งสูง (Xerophilic molds)	0.75 – 0.65	0.65
ยีสต์ที่ทนความเข้มข้นของน้ำสูง (Osmophilic yeast)	0.65 – 0.60	0.60
ไม่มีการแพร่ของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด	0.50 – 0.25	–

### 2. แอกติวิตีน้ำและปฏิกิริยาของเอ็นไซม์

น้ำที่อยู่ในไซทอน I เป็นน้ำหนาหนึ่งชั้นโมเลกุล ปฏิกิริยาที่เกิดจากเอ็นไซม์มีน้อยหรือไม่เกิดเลย ทั้งนี้เนื่องจากซับสเตรต (substrate) มีการเคลื่อนไหวน้อยมาก จึงไม่สามารถ



แพร่เข้าไปที่ active site ของเอนไซม์ แม้แต่ปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสซึ่งมีน้ำเป็นสารตั้งต้น เพราะน้ำเกิดแรงกระทำกับบ่งประกอบของอาหารจนไม่เคลื่อนที่ ทำให้การเข้าทำปฏิกิริยาในสถานะสารตั้งต้นเกิดยาก และแอกติวิตีของเอนไซม์ก็ถูกจำกัดถ้าไม่เคลื่อนที่

ถึงแม้ว่า active site ของเอนไซม์จะยังคงใช้การได้แม้ค่า  $a_w$  จะต่ำมาก แต่สารตั้งต้นไม่ว่าจะเป็นน้ำหรือสารอื่น จะต้องมีการเคลื่อนที่พอสมควร จะได้เข้าไปใกล้ active site ของเอนไซม์เพื่อเกิดปฏิกิริยาได้

### 3. แอกติวิตีน้ำและการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่มีเอนไซม์เกี่ยวข้อง

อาหารส่วนใหญ่ที่กำจัดน้ำออก และอาหารที่มีความชื้นปานกลาง (Intermediate moisture foods) ทั้งหมด เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่ไม่มีเอนไซม์เกี่ยวข้องได้ดี อัตราการเกิดปฏิกิริยานี้ขึ้นกับปริมาณน้ำและอัตราการเกิดจะสูงสุดที่ความชื้นปานกลาง ผลดังกล่าวนี้เกิดจากน้ำมีบทบาทสองอย่างคือ เป็นตัวทำละลายและเป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยา กรณีที่น้ำเป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยา ผลที่ตามมาคือ น้ำกลายเป็นตัวยับยั้งปฏิกิริยา (product inhibitor) ที่  $a_w$  ต่ำ ปฏิกิริยาดังกล่าวนี้เกิดยากเนื่องจากน้ำไม่มีการเคลื่อนไหว ดังนั้น การเติมน้ำจะช่วยเร่งปฏิกิริยา และเนื่องจากน้ำเป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยา (ในปฏิกิริยาคอนเดนเซชันของปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่มีเอนไซม์เกี่ยวข้อง) น้ำจึงเป็นตัวยับยั้งปฏิกิริยาได้ด้วย

นอกจากนี้ ที่ความชื้นสูง ความเงาของอาหารกลายเป็นปัจจัยสำคัญทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยานี้ลดลง ปัจจัยนี้มีความสำคัญต่อปฏิกิริยาทั้งหมดที่มีอัตราเร็วของปฏิกิริยาขึ้นกับความเข้มข้น [ปฏิกิริยาทั้งหมดที่มีลำดับปฏิกิริยา (reaction order) มากกว่าศูนย์]

ปฏิกิริยานี้จะเกิดได้ดีมากกับอาหารบางชนิด เช่น น้ำผลไม้เข้มข้นและอาหารที่มีความชื้นปานกลาง เช่น ลูกพรุน เกิดปฏิกิริยาประเภทนี้ได้ดีที่สุด

อิทธิพลของแอกติวิตีน้ำต่อปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่มีเอนไซม์เกี่ยวข้องตลอดจนปฏิกิริยาอื่น ๆ ที่ก่อความเสื่อมเสียแก่อาหารแสดงอยู่ในรูปที่ 2.14

### 4. แอกติวิตีน้ำและออกซิเดชันของลิปิด

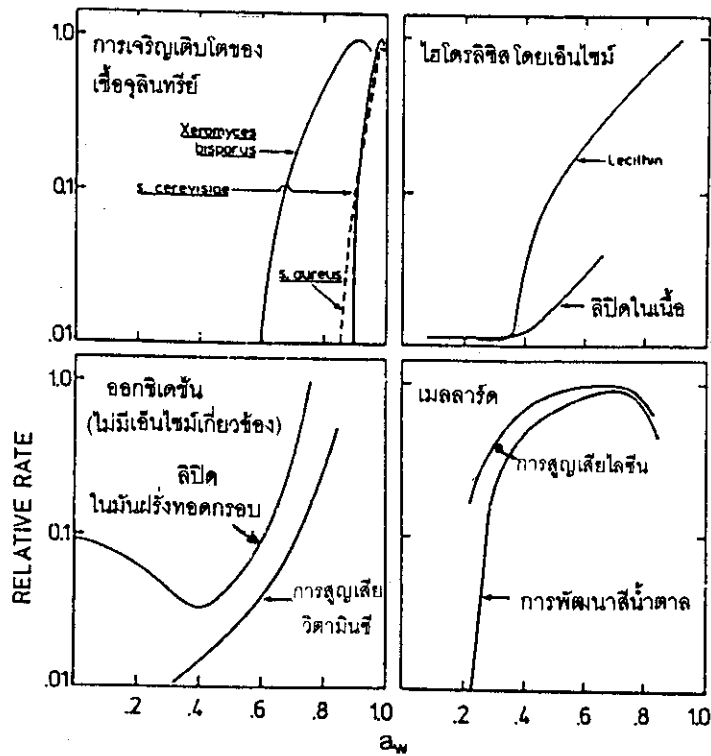
น้ำมีผลต่อการเกิดออกซิเดชันของลิปิด และปฏิกิริยานี้เกี่ยวข้องกับอนุมูลอิสระ (free radical reactions) ในอาหาร ผลดังกล่าวนี้ซับซ้อนมาก

ในการศึกษาระบบลิปิดจำลองและอาหารที่มีไขมันสูงพบว่า อัตราเร็วของปฏิกิริยานี้ขึ้นกับแอกติวิตีน้ำ ในอาหารแห่งที่มีความชื้นต่ำมาก (ค่า  $a_w$  ต่ำกว่า  $\sim 0.1$ ) ออกซิเดชันของลิปิดเกิดเร็วมาก แต่เมื่อ  $a_w$  เพิ่มขึ้น 0.3 ออกซิเดชันกลับลดลงและอัตราการเกิดออกซิเดชันมักจะต่ำสุด แสดงว่า การมีน้ำในอาหารเล็กน้อยสามารถป้องกันออกซิเดชันของลิปิดได้

กลไกการป้องกันการเกิดลิวปิดออกซิเดชันของน้ำคือ

1. น้ำช่วยทำลายอนุมูลอิสระ และ/หรือ ป้องกันมิให้ออกซิเจนเข้าถึงลิวปิด
2. บนผิวของอาหาร น้ำเกิดพันธะไฮโดรเจนกับไฮโดรเปอร์ออกไซด์ที่เกิดในปฏิกิริยาลิวปิดออกซิเดชัน พันธะไฮโดรเจนช่วยให้ไฮโดรเปอร์ออกไซด์เสถียรและไม่แตกตัวเป็นผลิตภัณฑ์อื่นๆ
3. โลหะปริมาณเล็กน้อย (trace element) ที่เร่งปฏิกิริยาเริ่มต้นของลิวปิดออกซิเดชันจะจับกับน้ำ (hydrated) ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาจึงลดลง

ที่ปริมาณความชื้นต่ำมาก ปฏิกิริยาลิวปิดออกซิเดชันจะเกิดได้ดี เนื่องจากความเข้มข้นของลิวปิดเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำถูกกำจัดออก การเติมน้ำจะช่วยป้องกันปฏิกิริยาดังกล่าวได้พอควร ที่ความชื้นสูงหรือที่  $a_w$  สูงขึ้น ( $a_w = 0.55-0.85$ ) อัตราการเกิดออกซิเดชันจะเพิ่มขึ้น เหตุผลเนื่องจากการแพร่ของโลหะที่ยังมีฤทธิ์ในการเร่งปฏิกิริยาอยู่ อีกทั้งมีการบวมของเนื้อเยื่อส่วนที่พอลของอาหารแห้ง ทำให้เกิดการดูดซับออกซิเจนอย่างรวดเร็ว

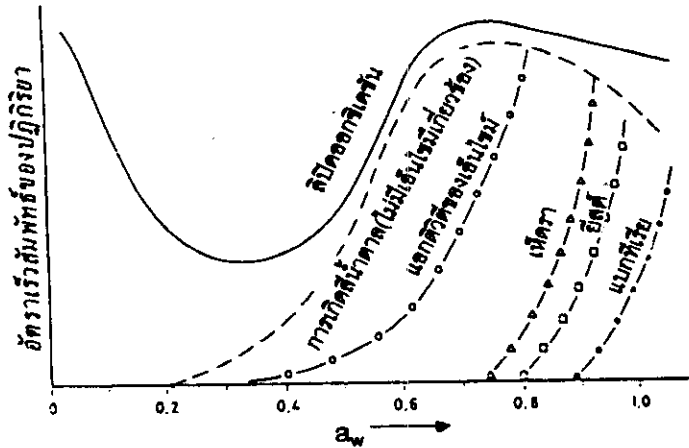


รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างแอกติวิตีน้ำและความเสถียรของอาหาร

- (ก)  $a_w$  ต่อการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ (ข)  $a_w$  ต่อไฮโดรลิซิสของเอนไซม์  
 (ค)  $a_w$  ต่อออกซิเดชัน (ไม่มีเอนไซม์เกี่ยวข้อง) (ง)  $a_w$  ต่อปฏิกิริยาเมลลาร์ด

ค่า  $a_w$  ที่มีผลกระทบต่อขบวนการต่างๆที่ก่อปัญหาต่อคุณภาพของอาหารแสดงอยู่ในรูปที่ 2.15 จะเห็นได้ว่าการลดค่า  $a_w$  ในอาหารสามารถลดการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ ปฏิกิริยาที่มีเอนไซม์เป็นตัวเร่ง(โดยเฉพาะเอนไซม์ประเภทไฮโดรเลส)จะเกิดช้าลง และสุดท้ายลดการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่มีเอนไซม์เกี่ยวข้อง ในทางตรงข้ามที่  $a_w$  ต่ำ อัตราการเกิดลิปิดออกซิเดชันจะกลับเพิ่มขึ้นในระบบอาหารแห้ง

จากรูปที่ 2.15 จะเห็นได้ว่า อาหารที่มีเสถียรภาพสูงสุด (อายุการเก็บยาวนานที่สุด) มีค่า  $a_w$  อยู่ในช่วง 0.2-0.4 อาหารที่มี  $a_w$  อยู่ในช่วงนี้ไม่จำเป็นต้องใช้สารกันบูดเพื่อป้องกันเชื้อจุลินทรีย์ และยังสามารถป้องกันการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่ไม่มีเอนไซม์เกี่ยวข้อง ปฏิกิริยาที่เกิดจากเอนไซม์ตลอดจนลิปิดออกซิเดชันได้ด้วย



รูปที่ 2.15 อัตราเร็วของปฏิกิริยาในอาหารเป็นฟังก์ชันกับแอกติวิตีของน้ำ

### 2.12 ฮิสเทเรซิส (Hysteresis)

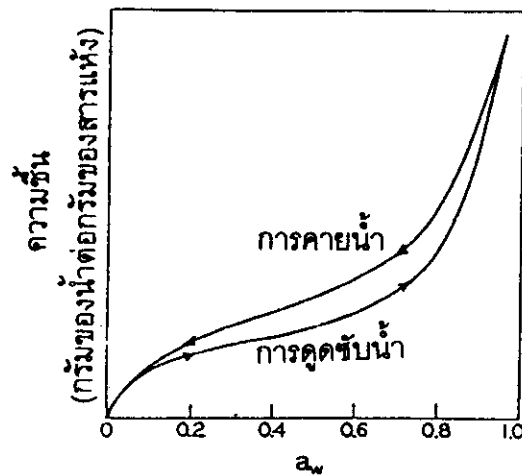
ปรากฏการณ์อย่างหนึ่งที่ซับซ้อนเกี่ยวกับไอโซเทอร์มความชื้นคือ ไอโซเทอร์มของการดูดซับน้ำ(resorption isotherm) และไอโซเทอร์มของการคายน้ำ(desorption isotherm) จะไม่ซ้อนทับกันดังแสดงในรูปที่ 2.15 ปกติ ที่ค่า  $a_w$  ใดๆ ปริมาณความชื้นในอาหารในขณะที่คายน้ำจะมีมากกว่าขณะที่ดูดซับน้ำ ปรากฏการณ์เช่นนี้ เรียกว่า การเกิดฮิสเทเรซิส

ขนาดของฮิสเทเรซิส รูปร่างของไอโซเทอร์ม จุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของห่วงฮิสเทเรซิส (hysteresis loop) ขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ธรรมชาติของอาหาร การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของอาหารเมื่อน้ำถูกกำจัดออกหรือถูกเติมเข้า อุณหภูมิ อัตราการคายน้ำ และระดับของน้ำที่ถูกกำจัดออกระหว่างคายน้ำ อิทธิพลของอุณหภูมิมีความเด่นชัด ฮิสเทเรซิสมักจะไม่มีที่อุณหภูมิสูง (~80° ซ) และโดยทั่วไปจะตรวจพบมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง เนื่องจากปริมาณน้ำในอาหารขณะคายน้ำจะมีมากกว่าขณะดูดซับน้ำ สาเหตุเกิดจาก

1. ระหว่างที่ทำให้อาหารแห้ง(ขบวนการคายน้ำ) ท่อรูเข็มบางส่วนจะปิด ทำให้พื้นผิวอิสระขึ้นในที่ดูดซับน้ำลดน้อยลง
2. การบรรจุน้ำเข้าท่อรูเข็มส่วนที่เหลือ(ขบวนการดูดซับน้ำ)ต้องการความดันย่อยของไอน้ำสูงกว่ากรณีกำจัดน้ำออกจากท่อรูเข็ม

ดังนั้น ที่  $a_w$  เท่ากัน อาหารที่คายน้ำมีความหนืดต่ำกว่า (ปริมาณความชื้นสูงกว่า) ผลที่ตามมาคือตัวเร่งปฏิกิริยามีการเคลื่อนไหวมากกว่าและเนื้อเยื่อที่บวมทำให้ตำแหน่งที่ถูกเร่งปฏิกิริยาเปิดเผยมากขึ้น ออกซิเจนแพร่ซึมเข้าไปได้ดีกว่าในอาหารที่มีความชื้นต่ำกว่า (อาหารที่ดูดซับน้ำ)

นอกจากนี้ ยังพบว่า ค่า  $a_w$  ที่ต้องการเพื่อหยุดยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ก็มีค่าต่ำลงอย่างเห็นได้ชัดถ้าผลิตภัณฑ์อาหารนั้นเตรียมโดยการคายน้ำแทนการดูดซับน้ำเป็นการยืนยันว่า วิธีการเตรียมอาหารก็มีผลต่อไอโซเทอร์มความชื้นของอาหาร



รูปที่ 2.16 ฮิสเทเรซิสของไอโซเทอร์มความชื้น

### 2.13 การหาปริมาณของน้ำในอาหาร

วิธีหาปริมาณน้ำในอาหารเป็นวิธีง่าย ๆ กล่าวคือ ชั่งตัวอย่างอาหารและอบในตู้อบจนมีน้ำหนักคงที่ ความแตกต่างของน้ำหนักของตัวอย่างอาหารก่อนและหลังอบ ก็คือน้ำที่ระเหยไป สารตัวอย่างมักจะใส่ในจานกันแบนทำจากอะลูมิเนียมหรือโลหะอื่น ที่ไม่ทำปฏิกิริยากับอาหารหรือไม่ดูดน้ำไว้ ตู้อบมักจะปรับให้มีอุณหภูมิประมาณ 100°ซ หรือ 105°ซ อาจใส่ทรายหิน หรือแอสเบสทอสรองอาหารไว้เพื่อให้ น้ำระเหยเร็วขึ้น

อาหารหลายประเภทจะไหม้และสลายตัวเมื่อเผาจนถึง 100°ซ เช่น อาหารที่มีฟรุกโตส (fructose) อาหารประเภทนี้จึงต้องอบโดยใช้ตู้อบสุญญากาศ ซึ่งจะรักษาอุณหภูมิให้ต่ำไว้และลดความดันด้วย อีกวิธีหนึ่งสำหรับอาหารที่ไม่ทนต่อความร้อน อาจใช้เคซิเคเตอร์

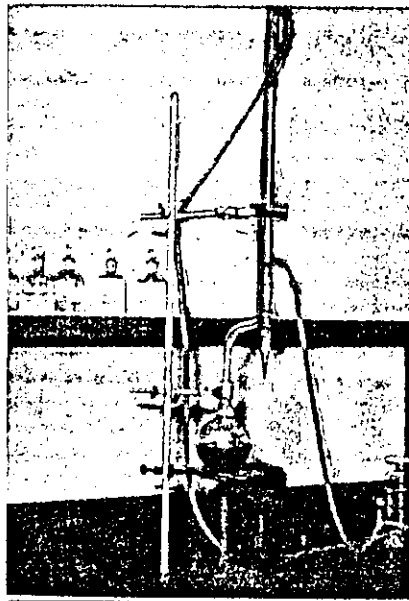
(desicator) สุลฟูริกที่มีกรดซัลฟูริก (sulfuric acid) เป็นตัวทำให้แห้ง โดยวิธีที่กล่าวมานี้ ตัวอย่างอาหารจะถูกทำให้แห้งจนมีน้ำหนักคงที่

ในอาหารอาจมีสารที่ระเหยง่ายตัวอื่น ๆ เพื่อให้แน่ใจว่าน้ำหนักที่ลดลงเป็นของน้ำเพียงอย่างเดียว เราอาจใช้อีกวิธีหนึ่งคือ การกลั่นโดยใช้ตัวทำละลายที่ไม่ละลายซึ่งกันและกัน ใส่ตัวอย่างอาหารในขวดกันกลมและต่อกับ reflux condenser และมีที่ดัก (trap) สำหรับดักสารที่กลั่นออกมา ตัวอย่างอาหารจะใส่อยู่ในตัวทำละลายที่เหมาะสม และในที่ดักมีตัวทำละลายนั้นบรรจุอยู่ด้วย ตัวทำละลายจะต้องไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกับน้ำ เพื่อว่าเมื่อกั่นแล้วจะสามารถแยกของเหลว 2 ชนิดออกจากกันได้ ตัวทำละลายที่ใช้มากที่สุดคือ โทลูอิน (toluene) แต่อาจใช้ไซลีน (xylene) หรือเฮปเทน (heptane) ก็ได้ เมื่อให้ความร้อนแก่ขวดกันกลม น้ำและตัวทำละลายจะกลายเป็นไอและกลั่นตัวโดยคอนเดนเซอร์ตกลงไปในที่ดัก ตัวทำละลายที่เบากว่าจะลอยอยู่ชั้นบนและสันตกลงมาในขวดกันกลมใหม่ ส่วนน้ำจะถูกดักไว้ ถ้ามีการแบ่งชนิดบนหลอดที่ใช้ดักเก็บน้ำไว้แล้ว เราจะสามารถอ่านปริมาณน้ำที่กลั่นออกมาได้โดยตรง (รูปที่ 2.14)

วิธีของนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์เป็นวิธีที่ง่ายและรวดเร็ว สำหรับหาความชื้นในตัวอย่างอาหารโดยเฉพาะอาหารที่เป็นของแข็ง เครื่องมือที่ใช้ค่อนข้างแพง แต่ผู้ไม่ชำนาญก็สามารถใช้เครื่องมือนี้ได้ภายในเวลาอันสั้น เครื่องมือนี้มีตัวเลขปรับไว้ที่เครื่อง สามารถอ่านค่าเปอร์เซ็นต์ของความชื้นได้โดยตรง

การวัดความชื้นโดยวิธีนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ อาศัยคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กของนิวเคลียสของอะตอม นิวเคลียสทั้งหมดมีประจุบวกเนื่องจากมีโปรตอนอยู่ และนิวเคลียสหลายชนิดสปินได้ ซึ่งจะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็ก เฉพาะนิวเคลียสที่มีโปรตอนและนิวตรอนเป็นจำนวนคู่ ( ${}_{6}C^{12}$ ,  ${}_{8}O^{16}$  และ  ${}_{16}S^{32}$ ) ที่ไม่มีโมเมนตัมเชิงมุม (angular momentum) และไม่สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กเล็ก ๆ ถ้านิวเคลียสสปินในสนามแม่เหล็ก มันจะสปินในทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็ก ความถี่ของพลังงานที่นิวเคลียสดูดกลืนเพื่อเปลี่ยนทิศทาง สปินของนิวเคลียสจะขึ้นกับแต่ละนิวเคลียส ในสนามแม่เหล็กที่มีความเข้ม 1,700 แก๊ส (gauss) ไฮโดรเจนจะดูดกลืนพลังงานที่ 7.25 เมกะเฮิร์ตซ์ (megahertz) และจะเปลี่ยนระดับพลังงานไปสู่อีกระดับพลังงานหนึ่ง ความถี่ของพลังงานที่ถูกดูดกลืนจะเป็นสัดส่วนกับปริมาณของไฮโดรเจนในสารตัวอย่าง

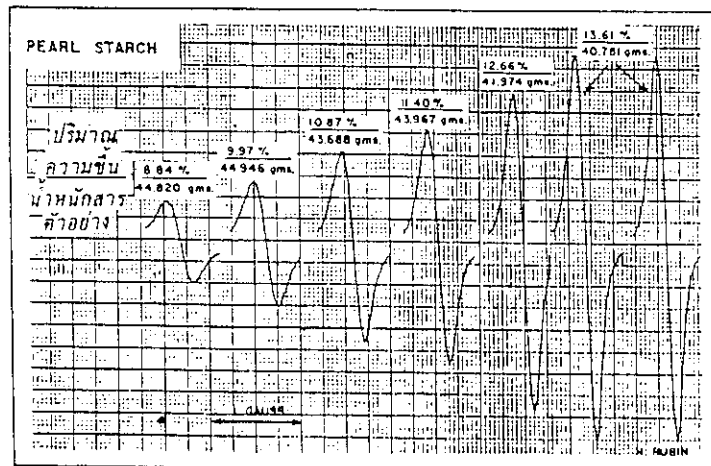
เครื่องมือนี้ถูกออกแบบให้วัดการดูดกลืนพลังงานเมื่อสารตัวอย่างใส่อยู่ระหว่างขดลวดที่ส่งคลื่นความถี่วิทยุ (radiofrequency) ออกมา ขดลวดนี้อยู่ระหว่างแม่เหล็กใหญ่ ความเข้มสนามแม่เหล็กจะค่อย ๆ เปลี่ยนไป เมื่อตรงกับค่าความถี่ที่นิวเคลียสสปิน นิวเคลียสจะดูดกลืนพลังงานและเปลี่ยนระดับพลังงาน ปริมาณพลังงานที่ถูกดูดกลืนโดยนิวเคลียสจะถูกบันทึกไว้



รูปที่ 2.17 อุปกรณ์สำหรับหาความข้นในอาหาร

ยังมีสารประกอบอื่น ๆ อีกมากนอกเหนือจากน้ำที่ประกอบด้วยไฮโดรเจน แต่ธรรมชาติของสารประกอบและสภาวะทางฟิสิกัล (physical state) ของสารประกอบ มีผลต่อความกว้างของเส้นและรูปร่างของสัญญาณ ในของเหลวการเคลื่อนไหวของโมเลกุลเกิดเร็วมากจนทำให้อิทธิพลของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากนิวเคลียสข้างเคียงถูกเฉลี่ยออกไป ในสารตัวอย่างหลายชนิด น้ำเป็นของเหลวเพียงชนิดเดียวที่มีอยู่ในสารตัวอย่างนั้น

รูปที่ 2.18 แสดงนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ของความข้นในแป้งเฟิร์ล (Pearl starch)



รูปที่ 2.18 นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ กราฟของความข้นในแป้งเฟิร์ล (Pearl starch)