

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปลากะตัก (Anchovy)

ปลากะตัก มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Encrasicholina sp.* และ *Stolephorus sp.* เรียกได้หลายชื่อ เช่น ปลาไส้ตัน ปลาหัวอ่อน ปลามะลิ ปลาอยู่เกีย ปลาเกีย และ ปลากล้วย เป็นปลาผิวน้ำขนาดเล็กที่อยู่รวมกันเป็นฝูง ลำตัวยาวเรียว ความยาวประมาณ 3-10 เซนติเมตร ด้านข้างแบน ท้องเป็นสัน เกือบบริเวณหน้าครีบท้องแข็งเป็นหนาม หัวโต จมอยปากสั้น คาโด ปากกว้างและเฉียงขึ้นข้างบน ครีบหลังและครีบก้นมีลักษณะใกล้เคียงกัน ครีบท้องเป็นแฉก ครีบหูและครีบท้องมีขนาดเล็ก มีแถบสีขาวคาดที่ข้างลำตัว กินแพลงก์ตอน สัตว์ ลูกกุ้ง ลูกเคยเป็นอาหาร แพร่กระจายอยู่ทั่วไป บริเวณอ่าวไทยและบริเวณห่างฝั่งประมาณ 10-20 ไมล์ ตามบริเวณชายฝั่งและหมู่เกาะต่าง ๆ ทั้งในน่านน้ำไทยและในเขตอินโด (กรมประมง, 2550) ตลอดจนหมู่เกาะต่าง ๆ ในมหาสมุทรอินเดีย ทะเลอาหรับและทะเลแดง เป็นต้น (ไพโรจน์ ชัยเกลี้ยง, 2533)

ในปี พ.ศ. 2531 องค์การอาหารและการเกษตรแห่งสหประชาชาติ ได้แยกปลาในสกุล *Stolephorus* ที่พบทั่วโลก 24 ชนิด ออกเป็นสกุล *Encrasicholina* หรือปลากะตักตัวกลม 5 ชนิด และ *Stolephorus* หรือปลากะตักตัวแบน 19 ชนิด ต่อมาในปี พ.ศ. 2539 กรมประมงได้รายงานเพิ่มเติมว่าปลากะตักในประเทศไทยมีทั้งหมด 14 ชนิด แบ่งเป็นปลากะตักตัวกลม 3 ชนิด ปลากะตักตัวแบน 11 ชนิด (ศูนย์พัฒนาประมงทะเลฝั่งอันดามัน จังหวัดภูเก็ต, 2539) ได้แก่

<i>Encrasicholina devisi</i>	<i>E. heteroloba</i>
<i>E. punctifer</i>	<i>Stolephorus andhraensis</i>
<i>S. bagenensis</i>	<i>S. brachycephalus</i>
<i>S. chinensis</i>	<i>S. commersonii</i>
<i>S. dubiosus</i>	<i>S. indicus</i>
<i>S. insularis</i>	<i>S. ronquilloi</i>
<i>S. tri</i>	<i>S. waitei</i>

จากการสำรวจของ กองเศรษฐกิจการประมง กรมประมง (2548) ในปี พ.ศ. 2543 มีปริมาณการจับปลากะตัก 141,157 ตัน ต่อมาในปี พ.ศ. 2547 มีปริมาณการจับปลากะตักสูงถึง 157,151 ตัน จะเห็นได้ว่ามีแนวโน้มในการจับเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ คนไทยนำปลากะตักมาแปรรูปเป็น

ผลิตภัณฑ์หลายชนิด เช่น น้ำปลา ปลากระดักต้มตากแห้ง ปลากระดักตากแห้ง น้ำบูดูและปลาป่น เป็นต้น การผลิตปลากระดักต้มตากแห้งในประเทศไทยพบได้ทั่วไปตามจังหวัดชายทะเลทั้งฝั่งอ่าวไทยและฝั่งอันดามัน ซึ่งได้รับความนิยมจากผู้บริโภคทั้งในและต่างประเทศ ธุรกิจการผลิตและการส่งออกปลากระดักต้มตากแห้งจึงขยายตัวอย่างรวดเร็วทำให้มีการนำปลากระดักมาผลิตเป็นปลากระดักต้มตากแห้งมากขึ้น จากการสอบถามผู้ผลิตและผู้จัดจำหน่าย ปลากระดักที่ดีจะต้องมีลักษณะสมบูรณ์คือ ท้องไม่แตก ตัวไม่งอ สีขาวออกเทาใส ไม่มีปลาชนิดอื่นปะปน ขนาดสม่ำเสมอ กลิ่นไม่เหม็นเปรี้ยวหรือเหม็นอับ (บริษัท ทีทีไอเอส จำกัด, 2540)

ปลากระดักต้มตากแห้ง

แหล่งผลิตปลากระดักต้มตากแห้งพบได้ทั่วไปตามจังหวัดชายทะเลทั้งฝั่งอ่าวไทยและฝั่งอันดามัน โดยฝั่งทะเลด้านอ่าวไทยมีการผลิตตั้งแต่ชายฝั่งทะเลในจังหวัดตราด จันทบุรี ระยอง ชลบุรี เพชรบุรี ประจวบคีรีขันธ์ ชุมพร นครศรีธรรมราช สุราษฎร์ธานี สงขลา ปัตตานีจนถึงนราธิวาส ส่วนทางฝั่งทะเลอันดามันมีการผลิตตั้งแต่ชายฝั่งทะเลในจังหวัดระนอง พังงา กระบี่ ตรัง จนถึงสตูล ลักษณะการผลิตส่วนใหญ่จะเป็นอุตสาหกรรมขนาดเล็กในครัวเรือนของชาวประมงที่อาศัยอยู่ตามชายฝั่งทะเล สถานที่ผลิตปลากระดักต้มตากแห้งส่วนใหญ่จะตั้งอยู่บริเวณชายหาด ซึ่งสะดวกในการผลิตเนื่องจากไม่ต้องขนย้ายปลาสดไปไกล ๆ เมื่อนำปลาขึ้นจากเรือก็ขนถ่ายมายังสถานที่ผลิตทันที นอกจากนี้ในการตากแห้งปลากระดักใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งความร้อนจึงจำเป็นต้องใช้เนื้อที่ในการตากแห้งมาก ชายหาดจึงเป็นสถานที่ที่เหมาะสมสำหรับการผลิตของชาวบ้าน การก่อสร้างสถานที่ผลิตปลากระดักต้มตากแห้งมักทำกันอย่างง่าย ๆ โดยสร้างเป็นโรงเรือนที่มุงหลังคาด้วยจาก ด้านข้างเปิดโล่งไม่มีฝาผนัง ไม่มีการปูพื้นโรงเรือนดังนั้นพื้นจึงเป็นพื้นของหาดทราย ส่วนลานตากปลาใช้เสาไม้ดักยึดกับพื้นทรายแล้วใช้ไม้อีกแผ่นตีทับเพื่อใช้เป็นที่วางตะแกรงปลา อุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการผลิตปลากระดักต้มตากแห้ง ได้แก่

- กระตะต้มปลา นิยมใช้กระทะอลูมิเนียมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1 เมตร
- กระชอนดักปลาทำจากไม้ไผ่ที่นำมาสานเป็นวงกลม
- ตะแกรงตากปลาทำจากมุ้งเขียวที่นำมาขึงให้ตึง โดยใช้โครงไม้ยึด
- ก๊าซเป็นแหล่งพลังงานความร้อนในการต้มปลา

การผลิตปลากระดักต้มตากแห้งทำทั้งในเวลากลางวันและกลางคืน ขึ้นกับเวลาที่ปลาสดมาถึงฝั่งเนื่องจากปลากระดักเสื่อมเสียเร็ว ดังนั้นโดยทั่วไปจะทำการผลิตทันทีที่ปลามาถึงชายฝั่ง

กระบวนการผลิตปลากะตักคัมตากแห้งมีกรรมวิธีการผลิต ดังมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

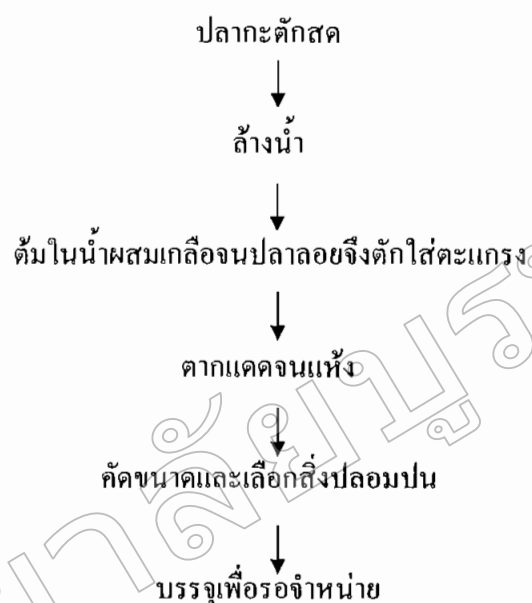
1.1 การเตรียมวัตถุดิบ หลังจากจับปลากะตักขึ้นมาจากทะเลชาวประมงจะเก็บรักษาปลาในถังที่มีฉนวนโดยการใส่น้ำแข็งผสมน้ำทะเล ดังนั้นเมื่อขนส่งมาถึงแหล่งผลิตต้องนำปลามาล้างน้ำก่อน น้ำที่ล้างปลาใช้ทั้งน้ำสะอาด น้ำเกลือและน้ำทะเล

1.2 การเตรียมน้ำเกลือคัมปลา ใส่น้ำสะอาดลงไปในกระทะประมาณ 20 ลิตร เติมน้ำเกลือประมาณ 1 กิโลกรัม คัมจนเกลือละลายและน้ำเดือด

1.3 การคัมปลากะตัก ใส่ปลากะตักลงไปในน้ำเดือดครั้งละประมาณ 3 กิโลกรัม รอจนปลาลอยขึ้นมา (เวลาประมาณ 5-10 นาที แล้วแต่น้ำคัมปลา) ซึ่งแสดงว่าปลาสุกแล้วจึงใช้กระชอนไม้ไผ่ตักปลาไปเทบนตะแกรงตาก เกลี่ยปลาไม่ให้ทับซ้อนกัน ในขณะที่คัมจะมีการเติมน้ำเกลือและเติมน้ำเป็นครั้งคราว แต่จะไม่มีการเปลี่ยนน้ำคัมปลาจนกว่าจะคัมปลาจนหมด

1.4 การตากปลา นำตะแกรงตากปลาไปวางตากแดด และมีการพลิกกลับปลาเป็นครั้งคราวเพื่อให้ปลาแห้งทั่วถึง เวลาที่ใช้ในการตากไม่แน่นอนขึ้นกับสภาพอากาศ ในวันที่มีแดดและลมดี ถ้าตากปลาในช่วงเช้าก็สามารถเก็บปลาได้ในช่วงบ่ายของวันนั้น แต่ถ้าตากปลาในตอนเช้าแล้วปลายังไม่แห้งในวันนั้นจะเก็บปลาไว้ในโรงเรือน โดยจะวางตะแกรงตากปลาซ้อนทับกันโดยใช้ท่อนไม้ขนาดเล็กวางคั่นระหว่างตะแกรงเพื่อป้องกันไม่ให้ตัวปลาถูกทับแล้วนำออกไปตากแดดอีกครั้งในวันรุ่งขึ้น

1.5 ขั้นตอนการบรรจุปลา เมื่อปลาแห้งได้ที่แล้วจะนำปลามาเทกองรวมกันบนพื้นโรงเรือนที่มีการปูแผ่นพลาสติก ป้องกันการปนเปื้อนจากพื้นทรายหรือกองบนโต๊ะ เพื่อคัดขนาดและคัดเลือกล้างปลอมปน เช่น ไข่ หอย และปลาชนิดอื่น ๆ ออก จากนั้นจะบรรจุปลาแห้งในกระสอบป่านหรือถุงพลาสติกถุงละประมาณ 10 กิโลกรัม หรือ ลังกระดาษลังละประมาณ 5 กิโลกรัม เพื่อรอการจำหน่ายต่อไปโดยจะมีพ่อค้าคนกลางมารับซื้อวันต่อวัน



ภาพที่ 2-1 ขั้นตอนการทำปลากะตักดัดดักแห้ง (วรรณวิภา สุวรรณรักษ์, 2546)

ตารางที่ 2-1 คุณค่าทางโภชนาการของปลากะตักดัดดักแห้ง (กองโภชนาการ กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข, 2544)

องค์ประกอบ	ปริมาณ	หน่วยต่อร้อยกรัม
พลังงาน	225	กิโลแคลอรี
โปรตีน	50.1	กรัม
ไขมัน	2.5	กรัม
ความชื้น	29.6	กรัม
โคเลสเตอรอล	0.5	กรัม
แคลเซียม	905	มิลลิกรัม
ฟอสฟอรัส	601	มิลลิกรัม
เหล็ก	4	มิลลิกรัม
เกลือ	17.3	กรัม
วิตามิน บี 1	0.01	มิลลิกรัม
วิตามิน บี 2	0.1	มิลลิกรัม

ร่างมาตรฐานปลากะตักดัมตากแห้ง

มาตรฐานปลากะตักดัมตากแห้งที่ Codex กำลังจัดอยู่ในขั้นการจัดทำร่างมาตรฐาน (Draft Standard for Boiled Dried Salted Anchovies) ได้แก่

1.1 ขอบข่าย มาตรฐานนี้ใช้สำหรับปลาทุกชนิดที่อยู่ในครอบครัว *Engraulidae* ซึ่งผลิตเพื่อการค้าโดยผ่านการต้มเกลือ ดัมและตากแห้ง ผลิตภัณฑ์ต้องผ่านการให้ความร้อนก่อนการนำมาบริโภคและมาตรฐานฉบับนี้ไม่ครอบคลุมถึงผลิตภัณฑ์ที่ผลิตโดยใช้เอนไซม์ร่วมในขั้นตอนการหมักเกลือ

1.2 บทนิยาม

1.2.1 คำจำกัดความของผลิตภัณฑ์ : ผลิตภัณฑ์ต้องเตรียมจากปลาที่สะอาด สด โดยมีลักษณะปรากฏ สีและกลิ่นของปลาสด และใช้เกลือแกงที่มีคุณภาพเหมาะสมสำหรับการบริโภค

1.2.2 คำจำกัดความกระบวนการผลิต : การผลิตต้องทำโดยล้างปลาสดในน้ำเกลือหรือน้ำทะเลที่สะอาดแล้วทำเค็มโดยการดัมหรือลวกปลาในน้ำเกลือหรือน้ำทะเลสะอาดก่อนนำไปตากแห้ง การตากแห้งอาจทำโดยใช้ความร้อนจากแสงอาทิตย์หรือใช้ความร้อนจากแหล่งอื่นที่ไม่ใช่แสงอาทิตย์ ผลิตภัณฑ์ต้องบรรจุในภาชนะบรรจุที่เหมาะสมซึ่งสามารถป้องกันการซึมผ่านของความชื้นและก๊าซเพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

1.3 ข้อกำหนดมาตรฐาน

1.3.1 ปริมาณเกลือแกง ไม่เกิน 15 เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานเปียก)

1.3.2 ค่าวอเตอร์แอคทีวิตี (a_w) ไม่เกิน 0.75

1.3.3 ปริมาณเถ้าที่ละลายในกรดไม่เกิน 1.5 เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานเปียก)

1.3.4 ตัวแตกหัก คำนวณจากจำนวนตัวปลาที่แตกหักหารด้วยจำนวนทั้งหมดของตัวอย่างปลาที่ทดสอบไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์

1.3.5 ผลิตภัณฑ์ต้องมีปริมาณฮีสตามีนไม่เกิน 20 มิลลิกรัม/100 กรัม (วรรณวิภา สุวรรณรักษ์, 2546)

มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนปลาแห้ง

1.1 ขอบข่าย มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนนี้ครอบคลุมปลาทุกขนาด ทั้งที่เป็นปลาเล็กปลาน้อย และปลาขนาดใหญ่ที่อาจใช้ทั้งตัวหรือมีการตัดแต่งให้เหมาะกับชนิดและลักษณะของปลา ทั้งนี้ไม่ครอบคลุมถึงปลาแห้งที่ได้มีการประกาศมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแล้ว

1.2 บทนิยาม

1.2.1 คำจำกัดความของผลิตภัณฑ์: ผลิตภัณฑ์ต้องเตรียมจากปลาที่สะอาด สด โดยมีลักษณะปรากฏ สีและกลิ่นของปลาสด และใช้เกลือแกงที่มีคุณภาพเหมาะสม สำหรับการบริโภค

1.2.2 คำจำกัดความกระบวนการผลิต:

ปลาแห้ง หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากปลา ที่นำมาล้างให้สะอาดด้วยน้ำหรือน้ำเกลือเจือจาง แล้วทำให้แห้ง อาจรับประทานได้ทันที หรืออาจนำไปทอด อบ หรือนำไปประกอบอาหารอื่นก็ได้

การทำแห้ง หมายถึง การทำให้ความชื้นในเนื้อปลาลดลง โดยใช้ความร้อนจากแสงอาทิตย์ หรือจากแหล่งพลังงานอื่น

สารปนเปื้อน หมายถึง สารซึ่งปะปนเข้าไปในผลิตภัณฑ์โดยไม่เจตนา แต่อาจเกิดจากวัตถุดิบ การทำกรรมวิธีการผลิต การเตรียม การบรรจุหีบห่อ ภาชนะที่ใช้บรรจุ การขนส่ง หรือการเก็บรักษา (มผช, 2546)

1.3 ข้อกำหนดมาตรฐาน

1.3.1 ปลาจะดักต้องมีเนื้อสัมผัสแห้ง เนื้อแน่น ไม่ยุ่ย

1.3.2 ค่าวอเตอร์แอกติวิตี (a_w) ไม่เกิน 0.85

1.3.3 ความชื้นไม่เกิน 20 เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานเปียก)

1.3.4 ตัวแตกหักน้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์

1.3.5 ปริมาณเกลือแกงไม่เกิน 15 เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานเปียก)

1.3.6 ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดไม่เกิน 1×10^5 โคโลนีต่อกรัม (CFU/g) เชื้อราและยีสต์ไม่เกิน 100 CFU/g และเชื้อ *Staphylococcus aureus* ไม่เกิน 100 CFU/g (บริษัท ทีทีไอเอส จำกัด, 2540)

การอบแห้ง (Drying)

การอบแห้ง เป็นวิธีที่ทำให้ปริมาณความชื้นในอาหารลดลง จนถึงระดับที่สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ อาหารแห้งแต่ละชนิดจะมีความชื้นในระดับที่ปลอดภัยไม่เท่ากัน การอบแห้งนั้นมีประโยชน์หลายด้านดังนี้

1. ป้องกันการเน่าเสียจากจุลินทรีย์ ปฏิกิริยาและเอนไซม์
2. สามารถเก็บอาหารไว้ใช้ได้ ในยามขาดแคลนหรือช่วงนอกฤดูกาล
3. เก็บอาหารไว้ได้นานโดยไม่ต้องแช่ตู้เย็น
4. ช่วยลดน้ำหนักของอาหารทำให้สะดวกในการบรรจุ เก็บรักษาและขนส่ง
5. เป็นการพัฒนาให้ได้ผลิตภัณฑ์ใหม่

การอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (Superheated Steam Drying)

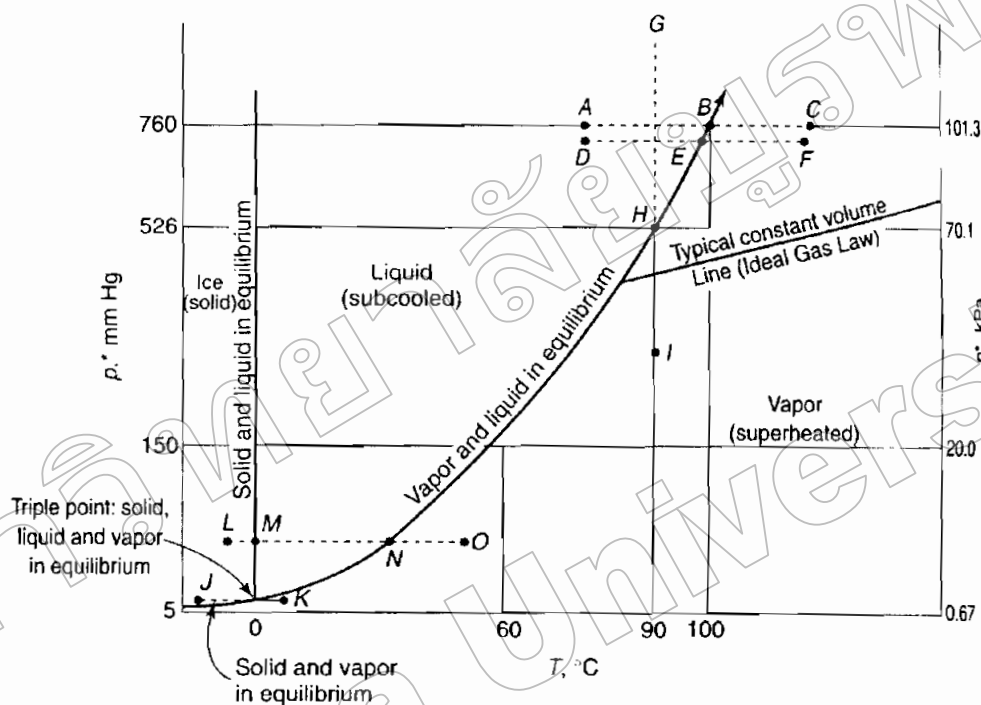
ในการอบแห้งทั่วไปมักจะใช้ลมร้อนในการอบแห้ง ความร้อนจะถูกถ่ายเทจากความร้อนไปยังวัสดุ ความร้อนส่วนใหญ่จะถูกนำไปใช้ในการระเหยน้ำ โดยของเหลวที่อยู่ภายในวัสดุจะเคลื่อนที่ออกมาจากผิว โดย Capillary Flow ซึ่งเป็นผลมาจากแรงตึงผิว (Surface Force) ส่วนไอน้ำในวัสดุจะเคลื่อนที่เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น (Vapor Diffusion) และความดันไอ (Partial Pressure of Vapor) ที่แตกต่างระหว่างไอน้ำในวัสดุกับลมร้อน ถ้าผิวของวัสดุมีน้ำอยู่เป็นจำนวนมากอุณหภูมิและความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิวก็จะคงที่ ซึ่งส่งผลให้อัตราการอบแห้งคงที่ด้วย ไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็นไอน้ำที่มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิอิ่มตัว (Saturation Temperature) ที่ความดันในห้องอบแห้ง ตัวอย่างเช่น ที่ความดันบรรยากาศ ไอน้ำจะมีอุณหภูมิอิ่มตัวประมาณ 100°C ซึ่งถือว่าไอน้ำที่สถานะนี้เป็นไอน้ำอิ่มตัว แต่หากให้ความร้อนสัมผัส (Sensible Heat) แก่ไอน้ำอิ่มตัวอุณหภูมิของมันก็จะเพิ่มสูงขึ้นมากกว่า 100°C โดยไอน้ำในสถานะดังกล่าวนี้ก็คือ ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (Superheated Steam)

ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง คือไอน้ำที่มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิอิ่มตัว ที่ความดันที่กำหนด กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ความดันไอ และการเกิดวัฏภาคของน้ำ น้ำแข็ง และ ไอน้ำ แสดงได้ดังภาพที่ 2-2

ลักษณะเด่นของไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่เห็นได้ชัดก็คือ การลดลงของอุณหภูมิจะไม่ส่งผลให้เกิดการควบแน่นของไอน้ำรอบๆที่ไอน้ำยังคงมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิอิ่มตัวที่ความดันในห้องอบแห้งความชื้นที่ระเหยออกมาจากผลิตภัณฑ์ที่นำมาอบแห้งจะกลายเป็นส่วนหนึ่งของตัวกลางใน

การอบแห้ง ซึ่งโดยปกติไม่จำเป็นต้องระบายออกจากระบบ ดังนั้นจึงสามารถนำไอน้ำร้อนยวดยิ่งกลับมาผ่านเครื่องทำความร้อนและอบแห้งผลิตภัณฑ์ได้อีก จึงเป็นการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ (สำราญ ชีช่วงทอง, 2544)



ภาพที่ 2-2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ความดันไอ และการเกิดวิฤภาคของน้ำ น้ำแข็ง และไอน้ำ (Himmelblau & Riggs, 2004)

นิยามศัพท์เกี่ยวกับไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

อัตราความร้อนยวดยิ่ง (Degree of Superheat) คืออุณหภูมิหรือจำนวนองศาที่สูงเพิ่มขึ้นไปจากจุดเดือดของน้ำ

ความร้อนสัมผัส (Sensible Heat) คือ ความร้อนที่ทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนโดยที่สถานะไม่เปลี่ยน

ความร้อนแฝง (Latent Heat) คือ ความร้อนที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางสถานะ เช่น จากของแข็งเป็นของเหลว จากของเหลวเป็นไอ หรือจากไอเป็นของเหลว

การพาความร้อน (Convection) คือ การถ่ายโอนความร้อนผ่านสารตัวกลางที่เป็นของไหล เช่น อากาศ

การนำความร้อน (Conduction) คือ การถ่ายโอนความร้อนผ่านวัตถุ ซึ่งจะส่งผ่านความร้อนผ่านทางโมเลกุลของสาร จากที่ ๆ มีความร้อนสูงกว่าไปยังที่ ๆ มีความร้อนต่ำกว่า

กลไกในการอบแห้งโดยใช้น้ำร้อนยวดยิ่ง

ฉัตรชัย นิยมล (2548) กล่าวว่า สำหรับการอบแห้งโดยใช้น้ำร้อนยวดยิ่ง ซึ่งมีไอน้ำเป็นส่วนประกอบอย่างเดียวนั้น ความดันไอย่อย (Partial Pressure of Vapor) จึงมีค่าเท่ากับความดันไอรวม (Total Pressure) และความดันไอในไอน้ำร้อนยวดยิ่ง มีค่าสูงกว่าความดันไอในวัสดุ จึงไม่มีการแพร่ของความชื้น ดังนั้นในการระเหยน้ำจึงต้องทำให้วัสดุมีอุณหภูมิสูงกว่าจุดเดือดของน้ำในวัสดุ น้ำจึงระเหยได้ สามารถแบ่งช่วงเวลาการอบแห้งได้เป็น 3 ช่วง คือ

1. ช่วงเพิ่มอุณหภูมิวัสดุ (Heat Up Period)

สำหรับการอบแห้งโดยลมร้อน ในช่วงแรกของการอบแห้งความร้อนที่ให้กับวัสดุ จะอยู่ในรูปของ Sensible Heat โดยทำให้อุณหภูมิของวัสดุสูงขึ้นจนถึงประมาณอุณหภูมิของกระเปาะเปียก แต่สำหรับการอบแห้งโดยใช้น้ำร้อนยวดยิ่ง อุณหภูมิของวัสดุจะสูงขึ้นจนถึงจุดเดือดของน้ำในวัสดุ ซึ่งจะเป็นช่วงการให้ปริมาณความร้อนสูง และถ้า Degree of Superheat ไม่สูงพอ จะทำให้เกิดการกลั่นตัวของไอน้ำที่ผิววัสดุ ซึ่งจะทำความชื้นในวัสดุเพิ่มขึ้น ซึ่งปริมาณไอน้ำควบแน่นจะขึ้นอยู่กับ Thermal Diffusivity ของวัสดุ ความชื้นในวัสดุ และ Degree of Superheat ไอน้ำควบแน่นนี้จะทำความชื้นในวัสดุเพิ่มขึ้นส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการอบแห้งนานขึ้น

2. ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant Rate Drying Period)

สำหรับการอบแห้งโดยลมร้อน ความร้อนจากลมร้อนจะถ่ายเทไปยังผิวของวัสดุโดยการนำความร้อนผ่านชั้นฟิล์มของก๊าซ (Gas Film) และวัสดุจะแพร่ความชื้นจากผิวผ่านชั้นฟิล์มของก๊าซไปยังลมร้อน โดยมีผลต่างของอุณหภูมิและผลต่างของความดันไอที่ผิวของวัสดุและลมร้อน เป็นตัวขับเคลื่อนตามลำดับ โดยวัสดุจะมีอุณหภูมิประมาณอุณหภูมิกระเปาะเปียก แต่สำหรับไอน้ำร้อนยวดยิ่งการนำความร้อนจากชั้นฟิล์มของไอน้ำไปยังวัสดุ โดยมีผลต่างของอุณหภูมิจากไอน้ำร้อนยวดยิ่งและผิววัสดุเป็นแรงขับเคลื่อน และเนื่องจากโดยรอบวัสดุประกอบไปด้วยไอน้ำ ดังนั้นการถ่ายเทความชื้นจึงไม่ได้เกิดจากการแพร่ (Diffusional Mass Transfer) แต่เกิดจากการกลไกการพาของไอน้ำ ซึ่งเกิดจากความแตกต่างระหว่างความดันไอของไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับความดันไอที่ผิวของวัสดุ เป็นแรงขับเคลื่อน อุณหภูมิของวัสดุจะคงที่ที่จุดเดือดของน้ำที่ความดันในระบบ ตลอดจนกระทั่งความชื้นลดลงจนถึงความชื้นวิกฤต สำหรับอัตราการระเหยของความชื้นที่ผิวของผลิตภัณฑ์สามารถหาได้จาก

$$m_w = \frac{q''}{h_{fg}} = \frac{h A (T_{steam} - T_{surface})}{h_{fg}} \quad (2-1)$$

m_w คือ อัตราการระเหยของมวลต่อหน่วยพื้นที่ ($\text{kg/m}^2\text{s}$)

q'' คือ ความร้อนทั้งหมด (kJ)

A คือ พื้นที่ (m^2)

$T_{surface}$ คือ อุณหภูมิที่ผิวของผลิตภัณฑ์ซึ่งสอดคล้องกับอุณหภูมิอิ่มตัวที่ความดันของไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (K)

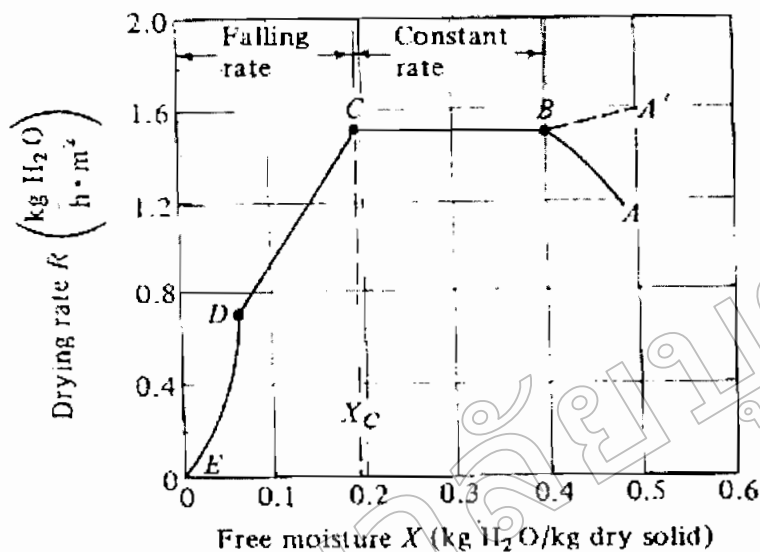
T_{steam} คือ อุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (K)

h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($\text{kW/m}^2\text{K}$)

h_{fg} คือ ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (kJ/kg)

3. ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling Rate Drying Period)

ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงความชื้นของวัสดุมีค่าต่ำกว่าความชื้นวิกฤต การถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลไม่ได้เกิดขึ้นเฉพาะที่ผิวของวัสดุเท่านั้น แต่เกิดการถ่ายเทในเนื้อวัสดุด้วย การเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในวัสดุมายังผิวช้ากว่าการพาความร้อนจากผิววัสดุไปยังอากาศ ทำให้อัตราการอบแห้งลดลง อัตราการระเหยของน้ำจะถูกควบคุมโดยความต้านทานต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำในวัสดุ ส่งผลให้อัตราการระเหยของน้ำลดลงในขณะที่อัตราการถ่ายเทความร้อนจากของไหลมายังวัสดุยังคงเท่าเดิม ดังนั้นจึงทำให้อุณหภูมิของวัสดุมีค่าสูง อัตราการระเหยในช่วงนี้จะขึ้นอยู่กับธรรมชาติของวัสดุมากกว่าคุณสมบัติของตัวกลาง ดังภาพที่ 2-3



ภาพที่ 2-3 กราฟในการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนขวดย้ง (รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต, 2535)

โดยทั่วไปอัตราการอบแห้งสำหรับกระบวนการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนขวดย้งและลมร้อนไม่แตกต่างกันมากนัก จุดใหญ่ที่แตกต่างกันคือ การกลั่นตัวของไอน้ำบนผิววัสดุในช่วงเพิ่มอุณหภูมิวัสดุและการทำให้อุณหภูมิของวัสดุสูงขึ้น ซึ่งการอบแห้งแบบไหนจะเร็วกว่ากันขึ้นอยู่กับ

1. ปริมาณไอน้ำควบแน่นที่เกิดขึ้น ถ้ามีปริมาณมากจะทำให้เวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถลดปัญหานี้ได้ โดยให้ความร้อนแก่วัสดุอบแห้งก่อนทำการทดลอง
2. อุณหภูมิของตัวกลางสูงหรือต่ำกว่าอุณหภูมิอินเวอร์ชัน (Inversion Temperature) ถ้าอุณหภูมิของไอน้ำร้อนขวดย้งสูงกว่าอุณหภูมิอินเวอร์ชัน การอบแห้งโดยไอน้ำร้อนขวดย้งจะเร็วกว่าลมร้อน
3. ความดันไอของไอน้ำร้อนขวดย้งในระบบอบแห้ง ถ้าใช้ความดันไอน้ำร้อนขวดย้งเพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะสูงขึ้น เนื่องจากสมบัติของไอน้ำที่เปลี่ยนไป ความดันของไอน้ำจะแปรผันตรงกับอุณหภูมิจุดเดือดของน้ำ ซึ่งอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะทำให้การอบแห้งเร็วขึ้น
4. ธรรมชาติของวัสดุที่นำมาอบแห้ง เช่น ถ้าวัสดุที่นำมาอบแห้งมีขนาดเล็ก หรือมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สูง หรือมีอุณหภูมิเริ่มต้นของวัสดุสูง จะส่งผลให้วัสดุมีการอบแห้งได้เร็วขึ้น (ศิริวัฒน์ สีนประเสริฐ, 2548)

อุณหภูมิอินเวอร์ชัน (Inversion Temperature)

ในการเปรียบเทียบการอบแห้งโดยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน ที่อุณหภูมิอบแห้งต่าง ๆ ตำแหน่งอุณหภูมิที่อัตราการอบแห้งวัสดุด้วยตัวกลางทั้งสองชนิดมีค่าเท่ากันเรียก อุณหภูมิ ค่าแห่งนั้นว่า อุณหภูมิอินเวอร์ชัน ถ้าอุณหภูมิอบแห้งสูงกว่านี้พบว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งโดยอากาศร้อน แต่ถ้าอุณหภูมิอบแห้งต่ำกว่านี้การอบแห้งโดยอากาศร้อนจะมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งโดยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง จากงานวิจัยต่าง ๆ ที่ผ่านมา อุณหภูมิอินเวอร์ชันมีค่าไม่คงที่ แปรเปลี่ยนไปตามชนิดของวัสดุอบแห้ง และลักษณะทางกายภาพของการอบแห้ง (ฉัตรชัย นิยมบล, 2548)

การจำลองการเคลื่อนที่ของความชื้น

ในช่วงการอบแห้งลดลง เราอาจทำการจำลองการเคลื่อนที่ของความชื้นภายในผลิตภัณฑ์มาซึ่งผิวได้ โดยสมมติให้การเคลื่อนที่ดังกล่าวอยู่ในรูปการแพร่ความชื้น (Moisture Diffusion) ซึ่งถูกควบคุมด้วยความต้านทานภายในเนื้อผลิตภัณฑ์เอง ด้วยเหตุนี้จึงมักใช้กฎการแพร่ข้อที่สองของฟิค (Fick's Second Law of Diffusion) มาใช้ในการทำนายการเคลื่อนที่ของความชื้นในช่วงการอบแห้งลดลง ซึ่งแสดงได้ในรูปของ

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff} \nabla^2 M \quad (2-2)$$

M คือ ความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่เวลาใด ๆ (เศษส่วน)

D_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (Effective Diffusion Coefficient)

(ตารางเมตรต่อวินาที)

t คือ เวลาในการอบแห้ง (วินาที)

คำตอบของสมการ สามารถหาได้จากการทราบเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial Condition) และเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) โดยคำตอบที่ได้จะขึ้นกับรูปร่างของผลิตภัณฑ์ที่สมมุติขึ้นด้วย ตัวอย่าง เช่น

1. ผลิตภัณฑ์มีลักษณะเป็นแผ่นบาง (Infinite Slab) เช่น ในการอบแห้งเนื้อหมูแผ่นบาง (Uengkimbuan, Soponronnarit, Prachayawarakorn, & Nathakaranakule, 2003) หรือทุเรียนแผ่นบาง (Jamradloedluk, Nathakaranakule, Soponronnarit, & Prachayawarakorn, 2003) แสดงได้ในรูปของสมการ (2-3) และ (2-4)

$$MR = \frac{(M - M_e)}{(M_o - M_e)} \quad (2-3)$$

$$MR = \left(\frac{8}{\pi^2} \right) \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{(2n+1)^2} \right) \exp \left(- (2n+1)^2 \frac{\pi^2 D_{eff} t}{L^2} \right) \quad (2-4)$$

2. ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นทรงกลม (Spherical) เช่น ในกรณีอบแห้งกุ้ง (Prachayawarakorn, Soponronnarit, Wetchacama & Jaisut, 2002) แสดงได้ในรูปของสมการ (2-5)

$$MR = \left(\frac{6}{\pi^2} \right) \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{n^2} \right) \exp \left(- \frac{n^2 \pi^2 D_{eff} t}{r^2} \right) \quad (2-5)$$

MR คือ อัตราส่วนความชื้น (Moisture Ratio)

M คือ ความชื้นที่เวลาใด ๆ (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง)

M_o คือ ความชื้นเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง)

M_e คือ ความชื้นสมดุลของผลิตภัณฑ์ (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง)

L คือ ความหนาของผลิตภัณฑ์ (เมตร)

r คือ รัศมีของผลิตภัณฑ์ทรงกลม (เมตร)

ขอให้สังเกตว่า ในการคำนวณค่าอัตราส่วนความชื้นจะกำหนดให้ $M_e = 0$ ด้วยเหตุผลที่ว่า อุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งค่อนข้างสูงในระหว่างการอบแห้ง จะทำให้ความชื้นสมดุลของผลิตภัณฑ์มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ นอกจากนี้ยังสมมติว่าขนาดของผลิตภัณฑ์มีค่าคงที่ในช่วงดังกล่าวนี้ (ไม่พิจารณาการหดตัวของผลิตภัณฑ์)

สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล

จากการทดลองสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลได้ โดยนำค่าความชื้นและเวลาที่ได้จากการทดลองมาพิดกับสมการ (2-4) โดยใช้สมการถดถอยจะได้ว่า D_{eff} และจากสมการ (2-3) จะสามารถหาค่าอัตราส่วนความชื้นของผลิตภัณฑ์ได้ จากผลของการทดลอง เป็นการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิสูง โดยอุณหภูมิที่ใช้มีค่ามากกว่าจุดเดือดของน้ำ จึงทำการสมมติค่าความชื้นสมดุลที่ใช้คำนวณให้มีค่าเป็นศูนย์ได้ เมื่อได้อัตราส่วนความชื้นจากการคำนวณระยะเวลาในการอบแห้งและอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งได้ โดยกำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่

ใช้ในการอบแห้งในรูปแบบของสมการอาร์เรเนียส (Arrhenius Equation) ตามสมการ (2-6) นำค่าอัตราส่วนความชื้น อุณหภูมิในการอบแห้งและเวลาที่ใช้ในการอบแห้งมาคำนวณร่วมกับสมการ (2-4) จะสามารถหาค่า D_o และ E_a ได้

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล ซึ่งเป็นตัวแปรที่บ่งชี้ถึงความเร็วในการเคลื่อนที่ของความชื้นจะขึ้นอยู่กับธรรมชาติของผลิตภัณฑ์เองและยังขึ้นกับอุณหภูมิของตัวกลางในการอบแห้ง รวมถึงยังขึ้นอยู่กับรูปร่างของผลิตภัณฑ์ที่สมมติขึ้นมาด้วยเช่นกัน ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้งกับสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลจะแสดงได้ในลักษณะสมการอาร์เรเนียส (Arrhenius Equation) กล่าวคือ

$$D_{eff} = D_o \exp\left(\frac{-E_a}{RT_{abs}}\right) \quad (2-6)$$

เมื่อ D_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (ตารางเมตรต่อวินาที)

D_o คือ แฟกเตอร์อาร์เรเนียส (ตารางเมตรต่อวินาที)

E_a คือ พลังงานกระตุ้น (กิโลจูลต่อกิโลแคลวิน)

T_{abs} คือ อุณหภูมิของตัวกลางในการอบแห้ง (องศาเคลวิน)

R คือ ค่าคงที่ของก๊าซสากล, ($R = 8.314 \text{ kJ/mol K}$)

ความถูกต้องของการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พิจารณาจากค่าผลรวมของค่าความคลาดเคลื่อนยกกำลังสอง (Summation of Square Error, SSE) ซึ่งได้จากสมการ (2-7)

$$SSE = \sum_{i=1}^n (D_{eff}(\text{Experiment}) - D_{eff}(\text{Model}))^2 \quad (2-7)$$

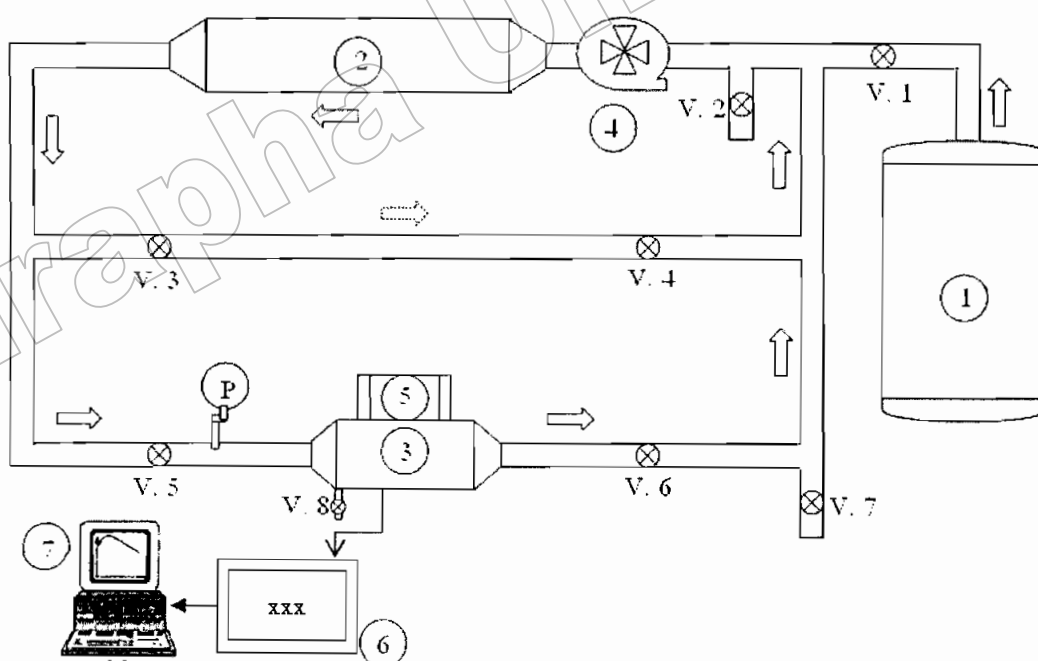
โดยที่ n = จำนวนข้อมูลของการทดลอง

นำค่า D_o และ E_a ที่ได้จากสมการ (2 - 6) มาแทนค่ากลับลงในสมการอีกครั้ง โดยแทนค่าอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองลงไป จะสามารถหาค่าของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของอุณหภูมิต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองได้ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลในวัสดุต่างชนิดกัน และสภาวะการอบแห้งที่ต่างกันจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลแตกต่างกันด้วยขึ้นกับการทดลอง

เครื่องอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

การอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (Superheated Steam) จะอาศัยไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็นตัวกลางในการถ่ายโอนความร้อนไปสู่ผลิตภัณฑ์ และพาความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์ ความชื้นที่ระเหยออกมาจากผลิตภัณฑ์ที่นำมาอบแห้งจะกลายเป็นส่วนหนึ่งของตัวกลางในการอบแห้ง ซึ่งความชื้นที่ระเหยออกมาจากผลิตภัณฑ์ไม่จำเป็นต้องระบายออกจากระบบ ดังนั้นจึงสามารถนำกลับมาใช้ให้ความร้อนแก่ผลิตภัณฑ์ได้อีก จึงเป็นการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ (ฉัตรชัย นิยมบล, 2548)

การอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งในการทดลอง ใช้เครื่องอบแห้งแบบไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ที่เป็นห้องอบแห้งแบบวงด (Batch Dryer) โดยลักษณะของระบบเครื่องอบแห้งแบบไอน้ำร้อนยวดยิ่ง แสดงไว้ในภาพที่ 2-6 ประกอบด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังนี้ 1. เครื่องกำเนิดไอน้ำ (Boiler) 2. อุปกรณ์ให้ความร้อน (Super Heater) 3. ห้องอบแห้ง (Drying Chamber) 4. พัดลม (Blower) 5. เครื่องชั่งน้ำหนัก (Loadcell) 6. จอแสดงผลค่าน้ำหนัก (Display) 7. คอมพิวเตอร์ และประกอบด้วยอุปกรณ์อื่น ๆ อีก คือวาล์วควบคุมและมาตรวัดความดัน



ภาพที่ 2-4 เครื่องอบแห้งแบบใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

การทำงานของระบบเริ่มต้นด้วยการอุ่นระบบโดยใช้พัดลมป้อนอากาศให้ผ่านไปยังอุปกรณ์ให้ความร้อน (Super Heater) จนได้อุณหภูมิที่ต้องการในการอบแห้ง จากนั้นจึงปล่อยไอน้ำอิ่มตัวจากเครื่องกำเนิดไอน้ำ (Boiler) ให้ไหลผ่านอุปกรณ์ให้ความร้อน เพื่อให้ไอน้ำอิ่มตัวเปลี่ยนสภาพเป็นไอน้ำร้อนยวดยิ่ง โดยควบคุมความดันภายในระบบอบแห้งให้คงที่ (ใช้ความดันในการอบแห้งสูงกว่าความดันบรรยากาศเล็กน้อย) หลังจากนั้นไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะไหลผ่านห้องอบแห้งในแนวขนานกับผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการอบแห้ง โดยที่ปริมาณไอน้ำทั้งหมดจะถูกนำกลับมาใช้ใหม่ เพื่อให้การใช้พลังงานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ (สุดาทิพย์ คงจำ, อติศักดิ์ นาดกรณกุล และสมชาติ โสภณธนฤทธิ์, 2549).

จากงานวิจัยที่ผ่านมา นักวิจัยหลายท่านได้ศึกษาการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง โดยสามารถแบ่งออกเป็นในกลุ่มผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร ในกลุ่มของผักและผลไม้ เช่น โหระพา (Barbieri et al., 2004) หน่อไม้ (ทวีชัย วงศ์ศักดิ์ไพโรจน์, 2543) ข้าว (วาทัญญู รอดประพัฒน์ และคณะ, 2548; Soponronnarit et al., 2006; Taechapairoj et al., 2004) ถั่วเหลือง (Prachayawarakorn et al., 2006) มันฝรั่งแผ่น (Iyota, Nishimura, Onuma, & Nomura, 2001) เป็นต้น และในกลุ่มของเนื้อสัตว์ ได้แก่ เนื้อไก่ (Nathakaranakule et al., 2007) กุ้ง (สำราญ ธิช่างทอง, 2544; คลฤดี ใจสุทธิ์, 2543; Namsanguan et al., 2004; Prachayawarakorn et al., 2002) ปลากระดัก (สำราญ ธิช่างทอง, 2544) เนื้อไก่ปรุงรส (สุดาทิพย์ คงจำ, อติศักดิ์ นาดกรณกุล และสมชาติ โสภณธนฤทธิ์, 2549) เนื้อหมู (ธนิต สวัสดิ์เสวี, 2549; ณรงค์ อึ้งกิมบัว, 2544; พลสันต์ วงษ์ศรี, 2548) เนื้อหมูปรุงรส (วันชัย เพ็งพงศา, อติศักดิ์ นาดกรณกุล และสมชาติ โสภณธนฤทธิ์, 2549) เนื้อวัว (ชัยยงค์ เตชะไพโรจน์ และคณะ, 2549; ศิริวิธ สีนประเสริฐ, 2548) ปลาร้า (ชัยยงค์ เตชะไพโรจน์ และคณะ, 2549; ณรงค์ อึ้งกิมบัว, 2544)

สมการจลศาสตร์ของการอบแห้ง (Drying Kinetic Equation)

1. การอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่

การอบแห้งช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นเมื่อวัสดุอบมีความชื้นเริ่มต้นมากกว่า 230 - 300 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง ขึ้นไป ที่ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ การถ่ายเทความร้อนและมวลระหว่างวัสดุและอากาศจะเหมือนกับการถ่ายเทความร้อนและมวลที่เกิดขึ้น ที่กระเปาะเปียกของเทอร์โมมิเตอร์ คือเกิดขึ้นเฉพาะที่รอบ ๆ ผิววัสดุเท่านั้นและน้ำจะเกาะอยู่ที่ผิวของวัสดุเป็นจำนวนมาก ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อการอบแห้ง คือ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วลม เมื่อเพิ่มความเร็วลมที่ไหลผ่านวัสดุ จะทำให้ฟิล์มอากาศนิ่งมีความหนาลดลง เป็นผลให้ความต้านทานต่อการไหลของความร้อนและมวลลดลงด้วย เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของอากาศอบแห้ง

จะทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างที่ผิววัสดุและของกระแสอากาศที่ไหลอิสระมีมากขึ้น เป็นผลให้การถ่ายเทความร้อนและมวลดีขึ้น และเมื่อลดค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอบแห้ง จะ เป็นผลให้ความแตกต่างระหว่างอัตราส่วนความชื้นอิมิตที่ผิววัสดุและอัตราส่วนความชื้นของ กระแสอากาศที่ไหลอิสระมีมากขึ้นทำให้เกิดการถ่ายเทมวลดีขึ้น

2. การอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง

สมการจลศาสตร์ของการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง สามารถแบ่งเป็นสมการ การอบแห้งทางทฤษฎี สมการการอบแห้งกึ่งทฤษฎี และสมการการอบแห้งเอมไพริคัล แต่ละ รูปแบบมีรายละเอียด ดังนี้

2.1 สมการการอบแห้งทางทฤษฎี (Theoretical Drying Kinetic Equation)

การอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง การเคลื่อนที่ของน้ำส่วนมากจะอยู่ในรูป ของเหลว ซึ่งเป็นผลมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น (Vapor Diffusion) ที่เป็นไป ในลักษณะของการแพร่ของน้ำภายในวัสดุ การถ่ายเทมวลภายในอธิบายได้ด้วยสมการการแพร่ ความชื้นที่อยู่บนพื้นฐานตามกฎข้อที่สองของฟิคส์ ดังสมการ (2-2)

2.2 สมการอบแห้งกึ่งทฤษฎี (Semi-Theoretical Drying Kinetic Equation)

สมการจลศาสตร์ของการอบแห้งกึ่งทฤษฎี สามารถสร้างสมการง่าย ๆ โดยการสมมติ อัตราการอบแห้งภายใต้สภาวะคงที่แปรผันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับผลต่างของความชื้นของ ผลิตภัณฑ์และความชื้นสมดุล ข้อสมมุติฐานดังกล่าวคล้ายกับกฎการเย็นตัวของนิวตัน สมการ ดังกล่าวเขียนได้ดังนี้

$$MR = \frac{M}{M_o} = \exp(-Kt) \quad (2-8)$$

เมื่อ K คือ ค่าคงที่ของการอบแห้ง

ค่าคงที่ของการอบแห้ง (K) เป็นคุณสมบัติเฉพาะของผลิตภัณฑ์หนึ่ง ๆ ภายในช่วงสภาวะ อากาศอบแห้งและวัสดุอบแห้งมีลักษณะใกล้เคียงกับการทดลองเท่านั้น

2.3 สมการอบแห้งเอมไพริคัล (Empirical Drying Equation)

สมการอบแห้งเอมไพริคัล คือ สมการที่สร้างจากแนวโน้มข้อมูลการทดลองสำหรับ วัสดุอบในช่วงอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์และความเร็วของอากาศอบแห้งหนึ่ง ๆ ซึ่งพบว่าใช้ทำนาย อัตราการอบแห้งได้ดี แต่มีข้อจำกัดในเรื่องที่เงื่อนไขการอบแห้งที่ต้องตรงกับสภาวะการทดลอง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง (Drying Model)

การอบแห้งของผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง มีการควบคุมโดยกลไกการแพร่ของน้ำและ/หรือไอน้ำ แบบจำลองการอบแห้งแบบชั้นบางซึ่งแสดงการอบแห้งของผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร ซึ่งมีการนำมาใช้อย่างแพร่หลาย โดยแบบจำลองการอบแห้งที่นำมาศึกษาได้แก่

1. แบบจำลอง Newton

Lewis (1921 อ้างถึงใน อภัสสร ศิริจริยวัตร, 2547) ได้เสนอแบบจำลองการอบแห้ง ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยใช้ความสัมพันธ์ของกฎการเย็นตัวของ Newton ซึ่งมีสมมุติฐาน คือความต้านทานการเคลื่อนที่ของน้ำทั้งหมด อยู่ที่ผิวสัมผัสด้านนอกของตัวอย่าง โดยอัตราการสูญเสียความชื้นเป็นสัดส่วนกับผลต่างระหว่างปริมาณความชื้นภายในอาหารและปริมาณความชื้นสมดุล

$$MR = \frac{(M - Me)}{(Mo - Me)} = \exp(-Kt) \quad (2-9)$$

2. แบบจำลอง Zero model

Phoungchandang and Woods (2000) ศึกษาการอบแห้งกล้วย พบว่าผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นสูง และปริมาณความชื้นสมดุลมีค่าต่ำมาก การใช้แบบจำลอง Zero ซึ่งแทนค่าปริมาณความชื้นสมดุลในแบบจำลอง Newton ให้มีค่าเป็นศูนย์ จะมีประสิทธิภาพมากกว่าการใช้แบบจำลอง Newton แบบจำลอง Zero มีรูปแบบดังนี้

$$MR = \frac{M}{Mo} = \exp(-Kt) \quad (2-10)$$

3. แบบจำลอง Modified Page

Overhults et al. (1973) ได้ปรับปรุงแบบจำลอง Page ซึ่งปรับปรุงมาจากแบบจำลอง Newton โดยการเพิ่มค่าคงที่ n เข้าไปในแบบจำลอง Newton ดังนี้

$$MR = \frac{(M - Me)}{(Mo - Me)} = \exp(-Kt)^n \quad (2-11)$$

และสามารถหาความสัมพันธ์ของค่าคงที่ n (Drying exponent) กับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในการอบแห้งตามแบบจำลองที่เสนอ โดย Rapusas and Driscoll (1995) ซึ่งมีรูปแบบดังนี้

$$n = A \times RH^B \exp\left(\frac{C}{T}\right) \quad (2-12)$$

4. แบบจำลอง Henderson and Perry

แบบจำลอง Henderson and Perry เป็นเทอมแรกของสมการของ Fick's Second Law ดังนั้นค่าคงที่ในการอบแห้งของแบบจำลอง Henderson and Perry จึงมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพในการแพร่ของน้ำ และสมมติฐานของแบบจำลองนี้ คือ การอบแห้งมีการควบคุมโดยการแพร่ของน้ำภายในตัวอย่าง

$$MR = \frac{(M - Me)}{(Mo - Me)} = A \exp(-Kt) \quad (2-13)$$

ค่าคงที่การอบแห้ง (K) สามารถอยู่ในรูปความสัมพันธ์กับอุณหภูมิในการอบแห้ง โดยใช้แบบจำลองของ Arrhenius ดังนี้

$$K = A \exp\left(-\frac{B}{T + 273.15}\right) \quad (2-14)$$

เมื่อ A, B, C คือ ค่าคงที่

K คือ ค่าคงที่การอบแห้ง (Drying constant) (1/นาที)

MR คือ อัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio)

n คือ ค่า Drying exponent

RH คือ ค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่จุดสมดุล

t คือ เวลาในการอบแห้ง (วินาที)

T คือ อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)

M คือ ปริมาณความชื้นที่เวลาใด ๆ (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง)

M_o คือ ปริมาณความชื้นเริ่มต้นในอาหาร (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง)

M_e คือ ปริมาณความชื้นสมดุล (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง)

ตารางที่ 2-2 แบบจำลองการอบแห้ง (Drying Model)

ชื่อสมการ	ชนิดของสมการ	อ้างอิง
แบบจำลอง Newton	$MR = \frac{(M - Me)}{(Mo - Me)} = \exp(-Kt)$	กฤษณ์ จันทน์โชติกุล, 2545; ธนิต สวัสดิ์เสวี, 2549; Panchariya, Popovie, and Sharma, 2002
แบบจำลอง Zero model	$MR = \frac{M}{Mo} = \exp(-Kt)$	กฤษณ์ จันทน์โชติกุล, 2545 ธนากร บุณเพชร, 2547; อรรถพร เตชะพันธ์, 2535; Ramos and Silva, 2001
Modified Page Model	$MR = \frac{(M - Me)}{(Mo - Me)} = \exp(-Kt)^n$	ธนากร บุณเพชร, 2547; มนตรี มนต์รีพิลา, 2548; มานิต สุขจินดาเสถียร, 2536; วรชาติ ขวัญสพร, 2546; สัฟร เบฮาคุปต์, 2546; อากัสสร ศิริจริยวัตร, 2547; Panchariya et al., 2002; Park, Vohnikova and Brod, 2002; Zhongwei, Stefan, and Marta, 2005
แบบจำลอง Henderson and Perry	$MR = \frac{(M - Me)}{(Mo - Me)} = A \exp(-Kt)$	นภาพร รัตนสมบุรณ์, ศักรินทร์ ภูมิรัตน์ และทิพาพร อู่วิทยา, 2539, Panchariya et al., 2002; Zhongwei et al., 2005

ข้อดีของการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

1. ไม่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) การเผาไหม้หรือการระเบิด ภายในระบบระหว่างการอบแห้ง เนื่องจากไม่มีก๊าซออกซิเจนในห้องอบแห้ง
2. ช่วยให้มีสมบัติบางอย่างของอาหารเปลี่ยนแปลงไปในทางที่ดีกว่าการอบแห้งวิธีอื่น เช่น มีการหดตัวน้อยกว่า มีความสามารถในการดูดน้ำกลับคืนหรือมีการคืนตัวสูงกว่าหรือมีความพรุนมากกว่า
3. ประหยัดพลังงานในการอบแห้ง เนื่องจากอัตราการอบแห้งมีค่าเพิ่มขึ้นทั้งในช่วงการอบแห้งคงที่และการอบแห้งลดลง ซึ่งอยู่กับอุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็นสำคัญ ลักษณะเช่นนี้จะเป็นจริงก็ต่อเมื่ออุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิอินเวอร์ชัน
4. เชื้อโรคที่อยู่ในอาหารจะถูกฆ่าด้วยความร้อนจากไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (กรณีอบแห้งที่ความดันไม่ต่ำจนเกินไป) นอกจากนี้ สารที่ไม่พึงประสงค์ภายในผลิตภัณฑ์ยังสามารถถูกกำจัดออกไปได้เช่นกัน
5. สำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีสารพิษหรือมีสารที่มีคุณค่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งสามารถสกัดเอาสารเหล่านั้นออกมาพร้อมกับการควบแน่นได้ซึ่งถือเป็นการช่วยให้ลดมลภาวะทางอากาศก่อนที่จะปล่อยไอน้ำออกสู่บรรยากาศ

ข้อเสียหรือข้อจำกัดบางประการ

1. ระบบอบแห้งมีความซับซ้อนมากขึ้น ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะต้องป้องกันไม่ให้เกิดการรั่วซึมของอากาศจากภายนอกเข้าสู่ระบบซึ่งอาจก่อให้เกิดปัญหาเรื่องการกักความร้อนขึ้นได้
2. สำหรับการอบแห้งที่ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะมีค่าค่อนข้างสูง (มากกว่า 100°C) ลักษณะเช่นนี้อาจส่งผลกระทบต่อสมบัติบางอย่างของผลิตภัณฑ์ ทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ลดลงได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับผลิตภัณฑ์อาหาร
3. อาจก่อให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับการควบแน่นขึ้นได้หากอุณหภูมิภายในระบบไม่สูงพอ (สูงกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้างที่ความดันในระบบ) ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังการอบแห้ง รวมถึงอาจทำให้อุปกรณ์ในระบบได้รับความเสียหายจากการกัดกร่อน

ปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้ง

สุคนธ์ชน ศรีนาม (2539) กล่าวว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้ง คือ

1. ธรรมชาติของอาหาร อาหารเนื้อโปรงมีการเคลื่อนที่ของน้ำภายในอาหารแบบผ่านช่องแคบ ซึ่งเร็วกว่าการแพร่ในอาหารเนื้อแน่น ดังนั้นอาหารเนื้อโปรงจึงแห้งได้เร็วกว่าอาหารเนื้อแน่น อาหารที่มีน้ำตาลสูงจะเหนียวเหนอะหนะ กีดขวางการเคลื่อนที่ของน้ำจึงแห้งช้า อาหารที่มีการลวกนวดคลึง ทำให้เซลล์แตกจะแห้งได้เร็วขึ้น
2. ขนาดและรูปร่าง มีผลต่อพื้นที่ผิวต่อน้ำหนัก เช่น รูปร่างเหมือนกัน ขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักมากกว่าขนาดใหญ่จึงแห้งได้เร็วกว่า
3. ตำแหน่งของอาหารในเตา น้ำในอาหารที่สัมผัสกับลมร้อนที่มีความชื้นต่ำย่อมระเหยได้ดีกว่า
4. ปริมาณอาหารต่อถาด ถ้าปริมาณอาหารต่อถาดมากเกินไป อาหารส่วนล่างไม่ได้สัมผัสกับอากาศร้อนหรือได้รับความร้อนจากถาดแล้ว แต่ไอน้ำไม่สามารถแพร่กระจายผ่านชั้นอาหารตอนบนออกมา ได้จึงแห้งช้า
5. ความสามารถในการรับไอน้ำของอากาศร้อน อากาศร้อนที่มีน้ำอยู่มากแล้วจะรับไอน้ำได้น้อยจะมีผลในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่
6. อุณหภูมิของอากาศร้อน ถ้าอากาศมีความชื้นคงที่ การเพิ่มอุณหภูมิเป็นการเพิ่มความสามารถในการรับไอน้ำ จึงมีผลต่อการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่และอุณหภูมิที่สูงขึ้น ทำให้การแพร่กระจายของน้ำดีขึ้น จึงมีผลต่อการอบแห้งลดลงด้วย
7. ความเร็วของลมร้อน ลมร้อนทำหน้าที่ในการเคลื่อนย้ายไอน้ำออกไปด้วย เมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นจึงเคลื่อนย้ายได้เร็วขึ้น การเคลื่อนย้ายเกิดขึ้นเต็มที่ที่ความเร็วลม 244 เมตรต่อวินาที นอกจากนั้นความเร็วลมทำให้เกิดกระแสปั่นป่วนของอากาศในเตา อากาศจึงสัมผัสอาหารได้ดีขึ้น

นอกจากนี้ปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้งซึ่ง Kudra and Mujumdar (2002) กล่าวว่า ยังเกี่ยวข้องกับปัจจัยดังต่อไปนี้

8. การหมุนเวียนของอากาศ การเพิ่มการหมุนเวียนของอากาศทำให้อัตราการอบแห้งในช่วงการอบแห้งคงที่เพิ่มขึ้นแต่จะไม่มีผลมากในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง
9. ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ อัตราการอบแห้งจะเร็วหรือช้าขึ้นกับความชื้นสัมพัทธ์ ถ้าอากาศแห้งมากๆ ผิวหน้าของอาหารจะแห้งทำให้น้ำภายในเนื้อเยื่อระเหยออกมายาก ความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสมอยู่ที่ 45-60 เปอร์เซ็นต์

การเปลี่ยนแปลงของอาหารเนื่องจากการอบแห้ง

วรรณวิภา สุวรรณรักษ์ (2546 อ้างอิงจาก Fellows, 1992) ได้แก่

1. กลิ่นและรสชาติ

ความร้อนในกระบวนการทำแห้งจะทำให้กลิ่นของอาหารระเหยออกไปด้วย ดังนั้นการสูญเสียสารให้กลิ่นจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้และความเข้มข้นของของแข็งทั้งหมดในอาหาร ความดันไอของสารที่ระเหยได้และความสามารถในการละลายน้ำ หากเป็นสารที่ระเหยได้ง่ายจะสูญเสียตั้งแต่เริ่มต้นการทำแห้ง ส่วนช่วงหลังของการทำแห้งจะมีการสูญเสียเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังนั้นการควบคุมสภาวะที่ใช้ในการอบแห้งจะช่วยลดการสูญเสียกลิ่นและรสชาติของอาหารได้ การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้จะเกิดน้อยลงหากบรรจุผลิตภัณฑ์ในภาชนะปิดสนิทแบบสุญญากาศเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำและเติมสารป้องกันการเกิดออกซิเดชัน

2. ผลต่อสี

การทำแห้งทำให้เกิดการเปลี่ยนสีที่ผิวของอาหาร ยิ่งการทำแห้งใช้เวลานานและอุณหภูมิสูงยิ่งเกิดได้ง่ายและอาจเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลระหว่างการเก็บรักษาหากเย็นไม่ยังมีปฏิกิริยาอยู่ การเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลขึ้นอยู่กับค่าออกเตอร็อกซิเดชันและอุณหภูมิที่ใช้ระหว่างการเก็บรักษาซึ่งเก็บที่อุณหภูมิสูงยิ่งมีสีคล้ำโดยเฉพาะเมื่ออาหารมีค่าความชื้นมากกว่า 4-5 เปอร์เซ็นต์ และอุณหภูมิที่เก็บสูงกว่า 38 °C (Pimpaporn, Devahastin, & Chiewchan, 2007; Nathakaranakule, Kraivanichkul, & Soponronnarit, 2007; Leeratanarak, Devahastin, & Chiewchan, 2006; Nathakaranakule et al., 2006; Pracachayawarakorn et al., 2002; ชัยยงค์ เตชะไพโรจน์ และคณะ, 2549; ศิริวิฒ สันประเสริฐ, 2548)

3. ลักษณะเนื้อสัมผัส

3.1 การเกิดเปลือกแข็ง

การทำแห้งเนื้อสัตว์ เนื้อเยื่อจะเกิดการจับตัวรวมกันและโปรตีนเสียสภาพธรรมชาติ เกิดการสูญเสียความสามารถในการอุ้มน้ำและกล้ามเนื้อเหนียวขึ้น การทำแห้งอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัสมากกว่าการใช้อุณหภูมิต่ำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพที่ซับซ้อนที่ผิวและผิวนอกของอาหารจะแข็งขึ้น (Case Hardening) ซึ่งจะลดอัตราการแห้งของส่วนที่อยู่ด้านในชั้นอาหารและผลิตภัณฑ์อาหารแห้งที่ได้จะมีผิวนอกแห้งและภายในยังชื้นอยู่ทำให้ความชื้นระหว่างผิวนอกและด้านในของอาหารมีความแตกต่างกันสูง (Pimpaporn et al., 2007; ชัยยงค์ เตชะไพโรจน์ และคณะ, 2549; ศิริวิฒ สันประเสริฐ, 2548)

3.2 การหดตัว

การหดตัวเกิดขึ้นจากการทำแห้ง เนื่องจากเกิดการสูญเสียน้ำทำให้เซลล์ของอาหารหดตัวจากผิวออก ส่วนที่แข็งจะคงสภาพได้ ส่วนที่อ่อนกว่าจะเว้าลงไป อาหารที่มีน้ำมากจะหดตัวบิดเบี้ยวมาก การทำแห้งแบบรวดเร็วจะทำให้เกิดการบิดเบี้ยวน้อยกว่าการทำแห้งอย่างช้า ๆ (Nathakaranakule et al., 2007; Pracachayawarakorn et al., 2002; ชัยยงค์ เตชะไพโรจน์ และคณะ, 2549; ศิริวิวัฒน์ สันประเสริฐ, 2548)

3.3 การเสียความสามารถในการคืนสภาพ

การเสียความสามารถในการคืนสภาพ อาหารแห้งบางชนิดต้องนำมาคืนสภาพ แต่การคืนสภาพโดยการเติมน้ำจะไม่ได้เหมือนเดิมเพราะเซลล์เสียความยืดหยุ่นของผนังเซลล์ สตาร์ชและโปรตีนเสียสภาพ (Leeratanarak, Devahastin, & Chiewchan, 2006; Nathakaranakule et al., 2007; Pracachayawarakorn et al., 2002)

4. ผลต่อคุณค่าทางอาหาร

4.1 การเกิดออกซิเดชันของไขมัน

องค์ประกอบของสัตว์น้ำมีไขมัน 1–22 เปอร์เซ็นต์ และไขมันของสัตว์น้ำมีกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูง การที่สัตว์น้ำมีกรดไขมันไม่อิ่มตัวเป็นองค์ประกอบสูง ทำให้ง่ายต่อการเกิดออกซิเดชัน จากการสัมผัสกับออกซิเจนซึ่งมีเหล็กและทองแดงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งเกิดได้แม้ที่อุณหภูมิในช่วงการแช่เยือกแข็ง ปัจจัยที่ทำให้เกิดออกซิเดชัน นอกจากปริมาณของกรดไขมันไม่อิ่มตัวแล้วยังมีผลมาจากปัจจัยอื่น ๆ ได้แก่ การกระจายของไขมันในส่วนต่าง ๆ ของสัตว์น้ำ การสัมผัสกับโปร ออกซิแดนท์ (Pro-Oxidant) สารเคมีบางตัว เช่น เกลือ (NaCl) และปัจจัยภายนอก เช่น แสง ความร้อนและออกซิเจน เป็นต้น

4.2 การเกิดไฮโดรไลซิสของไขมัน

ไฮโดรไลซิสในสัตว์น้ำเกิดจากปฏิกิริยาย่อยสลายไตรกลีเซอไรด์ และฟอสโฟไลปิด โดยเอนไซม์ไลเปส และเอนไซม์ฟอสโฟไลเปส ซึ่งมักมีอยู่แล้วในอาหารตามธรรมชาติ หรืออาจจะเกิดขึ้นจากจุลินทรีย์สร้างขึ้น ปฏิกิริยานี้ จะต้องมีน้ำเข้าไปเกี่ยวข้องโดยมีความร้อน และแสงสว่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

4.3 การเสื่อมสภาพของโปรตีน

ความร้อนมีผลทำให้โปรตีนแปรสภาพ เกิดการสูญเสียกรดอะมิโน เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโปรตีน แต่โดยทั่วไปความร้อนที่ใช้ในกระบวนการทำแห้ง มีผลต่อโปรตีนน้อยมาก การต้มสัตว์น้ำก่อนตากแห้ง ทำให้สูญเสียโปรตีนที่ละลายน้ำ เเปปไทด์ที่มีขนาดเล็ก และกรด

อะมิโนอิสระบางตัวไปกับน้ำตาล ส่วนในขั้นตอนการตากแห้ง ทำให้สูญเสียโปรตีนที่ละลายในสารละลายเกลือ เช่น ไมโอซิน

4.4 ปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard Reactions)

การเกิดสีน้ำตาลในผลิตภัณฑ์อาหารจะเกิดขึ้นเมื่ออาหารได้รับความร้อน ซึ่งมีการสูญเสียองค์ประกอบของอาหารมีการสลายตัวและมีการรวมตัวเกิดเป็นสารสีเหลืองจนถึงสีน้ำตาลและมีกลิ่นเฉพาะตัว การเกิดปฏิกิริยานี้จะทำให้คุณค่าทางอาหารลดลงรวมถึงสีและรสชาติของอาหารจะเปลี่ยนไปด้วย ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ การเกิดคาราเมลไลเซชัน และการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด

4.5 การเกิดสารที่เป็นพิษ

4.5.1 การเกิดสารก่อการกลายพันธุ์ (Mutagens) และสารก่อมะเร็ง (Carcinogens)

สารก่อการกลายพันธุ์ หมายถึงสารที่ทำให้หน่วยพันธุกรรมมีข้อผิดพลาดไปจากเดิมซึ่งความผิดพลาดนี้สามารถถ่ายทอดทางพันธุกรรมไปยังเซลล์ที่เกิดใหม่ได้ เกิดจากปฏิกิริยาไพโรไลซิส (Pyrolysis) ของกรดอะมิโนบางชนิด เช่น โลซีน ทริปโตเฟนและเฟนิลอะลานีน ซึ่งก่อให้เกิดสารประกอบในกลุ่มเฮเทอโรไซคลิกเอมีน (Heterocyclic Amines) และสารก่อมะเร็งหมายถึง สารเคมีที่มีฤทธิ์ทำให้เกิดมะเร็ง สารเฮเทอโรไซคลิกเอมีน (Heterocyclic Amines) ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งชนิดหนึ่งในปลาซาร์ดินและเนื้อที่ย่างในเตาอบ (Broiled) และยังกล่าวว่า การบริโภคปลาอย่าง หรือปิ้งที่มีสารไพโรไลเซต (Pyrolysates) มีความสัมพันธ์กับการเกิดมะเร็ง โดยเฉพาะมะเร็งในกระเพาะอาหารสูงมาก

4.5.2 การเกิดไนโตรโซเดียมไดเมทิลลามีน (N- Nitrosodimethylamine)

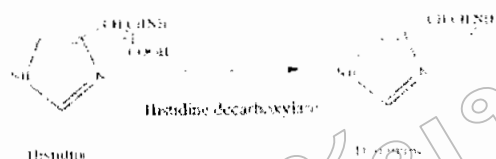
ไนโตรโซเดียมไดเมทิลลามีน เป็นสารก่อมะเร็งที่พบในหมักแห้งที่ปิ้ง หรือย่างโดยใช้ก๊าซ ปริมาณที่พบจะเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่ใช้สูงกว่า 100 °C แต่ถ้าอุณหภูมิต่ำกว่าจะไม่พบนอกจากนี้ยังพบว่า การปิ้งหรือย่างโดยใช้ไฟฟ้าก็ก่อให้เกิดไนโตรโซเดียมไดเมทิลลามีนเช่นกัน แต่พบในปริมาณน้อย

4.5.3 การเกิดไมโคทอกซิน (Mycotoxin)

ไมโคทอกซินเป็นพิษที่เชื้อราผลิตขึ้นมา โดยมีอะฟลาทอกซิน (Aflatoxin) เป็นสารพิษที่อันตรายที่สุด มีพิษรุนแรงต่อตับของสัตว์ทดลองทุกชนิดและเป็นสารก่อมะเร็งต่อสัตว์ทดลอง

4.5.4 การเกิดฮิสตามีน (Histamine)

การเกิดฮิสตามีนในปลาพบว่าเกิดได้ 2 ทาง คือ เกิดจากปฏิกิริยาย่อยสลายตัวเอง (Autolysis) ของปลาหรือเกิดจากปฏิกิริยาของเอนไซม์ฮิสตามีนดีคาร์บอกซิเลสของแบคทีเรียที่ย่อยกรดอะมิโนฮิสติดีนอิสระ (Free Histidine) ทำให้เกิดฮิสตามีนในปลา ดังภาพที่ 2-5



ภาพที่ 2-5 การเกิดฮิสตามีนในสัตว์น้ำ (วรรณวิภา สุวรรณรักษ์, 2546)

ฮิสตามีนในสัตว์น้ำ พบมากในปลาจำพวกสคอมบรอยด์ (Scombroid) ที่จัดอยู่ในวงศ์สคอมบริดี (Scombridae) และวงศ์สคอมเบอร์เรสโซอิดี (Scomberesocidae) เช่น ปลาหูฉลาม อัลบาคอร์สคิปแจค เกลโลฟิน บิ๊กอายทูน่า โบนิโต โอตา แมคเคอเรล นอกจากนี้ยังพบในปลาพวก Non- Scombroid Fish เช่น ปลามาฮี-มาฮี บลูฟิชและปลาที่อยู่ในวงศ์คลูเปอิดี (Clupeidae) และวงศ์แองกราวลิดี (Engraulidae) เช่น ปลาซาร์ดีน ปลากระดัก ทั้งนี้เนื่องจากปลาดังกล่าวมีปริมาณฮิสติดีนในกล้ามเนื้อสูง

การเสื่อมเสียของผลิตภัณฑ์สัตว์น้ำแห้ง

1. การเสื่อมเสียก่อนกระบวนการผลิต

สัตว์น้ำโดยเฉพาะปลาเป็นอาหารที่เสื่อมเสียได้รวดเร็ว ทั้งนี้เนื่องจากปลามีกรดอะมิโนอิสระสูงและมีเนื้อเยื่อเกี่ยวพันน้อยเมื่อเทียบกับสัตว์ชนิดอื่น เมื่อสัตว์น้ำตาย จะเกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งจากเอนไซม์ในตัวสัตว์น้ำเอง และเอนไซม์จากแบคทีเรีย การเน่าเสียจะเริ่มจากเหงือก ช่องท้อง แล้วจึงรุกรลามไปยังส่วนอื่น ๆ ของสัตว์น้ำ

2. การเสื่อมเสียหลังกระบวนการผลิต

การเสื่อมเสียของอาหารแห้งเกิดจากสาเหตุหลัก 3 ประการคือ จุลินทรีย์ การทำลายโดยแมลงและการแตกหักของอาหารแห้ง

2.1 การเสื่อมเสียจากจุลินทรีย์

จุลินทรีย์ทุกชนิดไม่สามารถเจริญในอาหารที่มีค่า วอเตอร์แอคทิวิตีต่ำกว่า 0.6 ค่าวอเตอร์แอคทิวิตี ที่จุลินทรีย์แต่ละชนิดต้องการใช้ในการเจริญ แสดงดังตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-3 ค่าวอเตอร์แอกติวิตีที่จุลินทรีย์แต่ละชนิดต้องการใช้ในการเจริญ
(นิธิยา รัตนานนท์, 2545)

ชนิดจุลินทรีย์	ค่าวอเตอร์แอกติวิตีต่ำสุด ที่ จุลินทรีย์ต้องการใช้ในการเจริญ
แบคทีเรีย	0.91
ยีสต์	0.85
รา	0.80
แบคทีเรียชนิดทนเกลือได้ดี (Halophilic Bacteria)	0.75
เชื้อราชนิดทนแล้งได้ดี (Xerophilic)	0.65
ยีสต์ชนิดทนน้ำตาลที่มีความเข้มข้นสูงได้ดี (Osmophilic)	0.60

2.2 การเสื่อมเสียจากแมลง

มักเกิดในระยะแรกของการแปรรูปสัตว์น้ำ เกิดจากตัวอ่อนของแมลงที่มีปีก (blowfly) โดยแมลงดังกล่าว จะวางไข่ในสัตว์น้ำที่ยังมีความชื้น และเมื่อไข่ฟักเป็นตัว จะใช้สัตว์น้ำเป็นอาหารทำให้เกิดการเสื่อมเสียของสัตว์น้ำขึ้น

2.3 การเสื่อมเสียจากการแตกหักของอาหาร

การแตกหักของอาหารเป็นสาเหตุให้ผู้บริโภคไม่ยอมรับ นอกจากนี้ยังทำให้ราคาของผลิตภัณฑ์ต่ำลง การแตกหักของอาหารเกิดได้จากหลายสาเหตุ เช่น การเสื่อมเสียของวัตถุดิบก่อนการแปรรูป การเจริญของจุลินทรีย์ในอาหาร คุณลักษณะทางกายภาพของอาหารเอง เช่นอาหารที่แห้งมาก ๆ ภาชนะบรรจุ การดูแลรักษาในขณะขนส่งและการเก็บรักษา สาเหตุหลักที่ก่อให้เกิดการแตกหักในปลากะตักตากแห้งคือ การแตกหักจากแรงกระแทกในช่วงขนส่งและเก็บรักษา เนื่องจากการเลือกใช้ภาชนะบรรจุที่ไม่เหมาะสมและการขนถ่ายอย่างไม่ระมัดระวัง แต่อย่างไรก็ตาม เราสามารถป้องกันการแตกหักจากสาเหตุดังกล่าวได้โดยการใช้ภาชนะบรรจุที่เหมาะสม เช่น ภาชนะบรรจุที่กันการกระแทกได้และไม่บรรจุปริมาณมากเกินไป รวมทั้งเพิ่มความระมัดระวังในการขนถ่ายผลิตภัณฑ์โดยการไม่วางซ้อนทับกันเป็นจำนวนมาก ไม่โยนผลิตภัณฑ์ เป็นต้น

ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์

ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหารทะเลแห้ง สามารถแบ่งออกได้

11 ปัจจัยดังนี้ คือ (วรรณิยา โสภักดี, 2544)

1. ส่วนประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ โดยทั่วไปผลิตภัณฑ์ที่นำมาจากวัตถุดิบที่มีไขมันมีอายุการเก็บรักษาสั้นกว่า
2. คุณภาพทางวัตถุดิบ ต้องการคุณภาพของวัตถุดิบที่ดีในการผลิตเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่มีคุณภาพดี
3. ปริมาณความชื้นและค่าวอเตอร์แอคทีวิตีเป็นดัชนีชี้บ่งอายุการเก็บรักษา ผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณความชื้นและค่าวอเตอร์แอคทีวิตีต่ำ จะมีอายุการเก็บรักษาที่สั้นกว่า (บริษัท ทีทีเอสไอ จำกัด, 2540)
4. ปริมาณเกลือ ผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณเกลือสูงสามารถเก็บรักษาได้ยาวนานกว่า
5. การปนเปื้อนของจุลินทรีย์ ผลิตภัณฑ์ที่มีการปนเปื้อนของจุลินทรีย์สูง จะมีอายุการเก็บรักษาที่สั้นกว่า (บริษัท ทีทีเอสไอ จำกัด, 2540)
6. เทคนิคที่ใช้ในกระบวนการเตรียมก่อนทำการทดลองวัตถุดิบ เช่น การลวก การต้ม หรือนึ่ง จะทำให้การปนเปื้อนของจุลินทรีย์ลดต่ำลง
7. เวลาและอุณหภูมิในการอบแห้ง เวลาและอุณหภูมิในการอบแห้งที่เหมาะสมเป็นสิ่งที่ต้องการ
8. การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันในผลิตภัณฑ์ การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันสามารถเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วที่ปริมาณความชื้นต่ำ
9. การรบกวนของแมลง ผลิตภัณฑ์แห้งสามารถถูกรบกวนโดยแมลง เช่น มด แมลงชนิดปีกแข็ง เป็นต้น ถ้าผลิตภัณฑ์เหล่านี้ถูกเก็บรักษาในที่ที่ไม่เหมาะสม
10. วัสดุที่ใช้บรรจุ การบรรจุที่เหมาะสมสามารถยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ได้
11. อุณหภูมิการเก็บรักษา การเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำทำให้เวลาที่ใช้ในการเก็บรักษายาวนานขึ้น

ความชื้นในวัสดุ

ความชื้นเป็นตัวบอกปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุเมื่อเทียบกับมวลของวัสดุขึ้นหรือแห้ง ความชื้นในวัสดุสามารถแสดงได้เป็น 2 แบบ คือ

1. ความชื้นมาตรฐานเปียก (wet basis)

$$M_w = \frac{(w - d)}{w} \quad (2-15)$$

ความชื้นแบบนี้นิยมใช้กันในการค้า โดยทั่ว ๆ ไปจะอ้างถึงในรูปของเปอร์เซ็นต์ ($100 M_w$)

2. ความชื้นมาตรฐานแห้ง (dry basis)

$$M_d = \frac{(w - d)}{d} \quad (2-16)$$

ความชื้นแบบนี้นิยมใช้กันในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งทางทฤษฎี เพราะช่วยให้การคำนวณสะดวกขึ้น ซึ่งเป็นเพราะมวลของวัสดุแห้งจะมีค่าคงที่หรือเกือบคงที่ระหว่างการอบแห้ง (สมชาติ โสภณธรรมฤทธิ์, 2540)

เมื่อ M_w คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (เศษส่วน)

M_d คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (เศษส่วน)

w คือ มวลของวัสดุ (kg)

d คือ มวลของวัสดุแห้ง (kg)

ความชื้นสมดุลของวัสดุ

ความชื้นสมดุลของวัสดุมีความสำคัญต่อการศึกษาระบวนการอบแห้ง เพราะเมื่อทำการอบแห้งวัสดุโดยใช้อากาศที่สภาวะคงที่ (เช่น อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์คงที่) ความชื้นของวัสดุจะลดลงต่ำลงจนถึงจุด ๆ หนึ่ง ซึ่งไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะนั้นความชื้นในวัสดุมีความดันไอเท่ากับ ความดันไอของอากาศที่อยู่รอบ ๆ และอุณหภูมิของวัสดุก็เท่ากับอุณหภูมิของอากาศรอบ ๆ ด้วย เรียกความชื้นในขณะนั้นว่า ความชื้นสมดุล ค่าความชื้นสมดุลขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (สมชาติ โสภณธรรมฤทธิ์, 2540)

1. วิธีการหาค่าความชื้นสมดุล

วิธีการหาค่าความชื้นสมดุลที่นิยมใช้ในการหาผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรและผลิตภัณฑ์ทางอุตสาหกรรมมีอยู่ 2 วิธี คือ

1.1 วิธีเชิงสถิต (Static Methods) เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมกันแพร่หลาย หลักการคือ ทำให้ความชื้นของผลิตภัณฑ์เข้าสู่สมดุลกับอากาศซึ่งอยู่หนึ่ง โดยควบคุมความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิให้คงที่ อุณหภูมิควบคุมได้โดยตู้อบที่สามารถปรับอุณหภูมิได้ ส่วนการควบคุมค่าความชื้นสัมพัทธ์ให้คงที่นั้นจะใช้สารละลายเกลืออิ่มตัว หรือสารละลายกรด และจะชั่งน้ำหนักของผลิตภัณฑ์จนกระทั่งน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งเมื่อน้ำหนักไม่เปลี่ยนแปลงแสดงว่าผลิตภัณฑ์เข้าสู่สมดุลแล้ว ค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์นั้นก็คือความชื้นสมดุลนั่นเอง วิธีนี้ต้องใช้เวลานานแต่ก็เป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไป

1.2 วิธีเชิงจลน์ เป็นวิธีที่มีการปรับปรุงมาจากวิธีการเชิงสถิต ต่างกันตรงที่อากาศรอบ ๆ ผลิตภัณฑ์จะมีการเคลื่อนที่ ในขณะที่วิธีแรกอากาศจะอยู่นิ่งอยู่กับที่ จึงทำให้ผลิตภัณฑ์เข้าสู่สมดุลได้เร็วกว่าวิธีเชิงสถิตมาก คือใช้เวลาประมาณ 1-2 วันหรือน้อยกว่า แต่มีข้อเสียคือการควบคุมสถานะของอากาศซึ่งเคลื่อนที่ให้อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์คงที่มีความยุ่งยากและซับซ้อน

2. การควบคุมค่าความชื้นสัมพัทธ์โดยใช้สารเคมี

การหาความชื้นสมดุลของผลิตภัณฑ์จะทำในระบบปิด ซึ่งควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ให้คงที่ ในการควบคุมอุณหภูมิทำได้โดยตู้อบความร้อน ส่วนการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์นั้น เราอาจจะใช้อุปกรณ์เครื่องมือกลควบคุมได้ แต่ไม่นิยมเพราะว่ายุ่งยากและมีราคาแพง ดังนั้นจึงนิยมควบคุมด้วยสารเคมีแทน การควบคุมความชื้นสัมพัทธ์โดยใช้สารเคมีว่าจะเป็นสารละลายเกลืออิ่มตัวหรือสารละลายกรดจะต้องกระทำในภาชนะปิด โดยทั่ว ๆ ไปนิยมใช้สารละลายเกลืออิ่มตัวมากกว่า เพราะว่าการกัดกร่อนน้อยและราคาถูกกว่า ส่วนสารละลายกรดนั้นกัดกร่อนโลหะง่าย จึงไม่ค่อยนิยมใช้

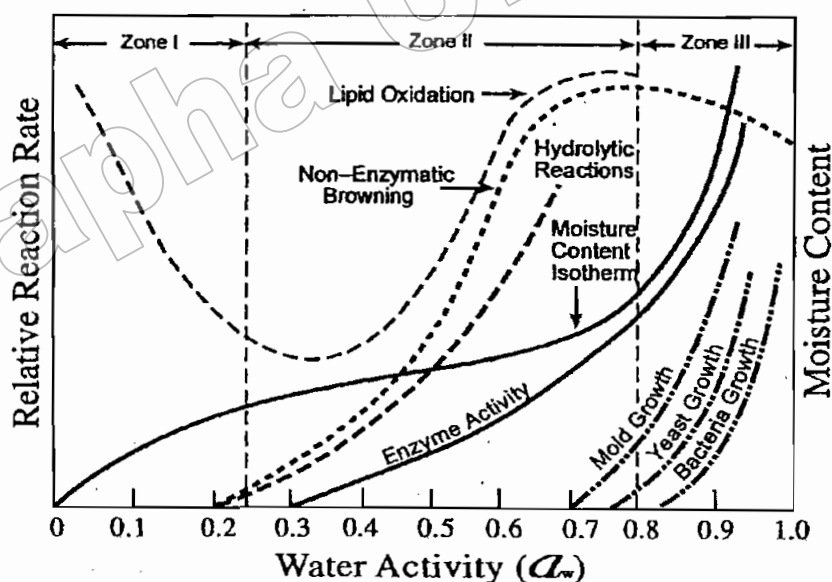
สารละลายเกลืออิ่มตัวที่ใช้ต้องมีคุณสมบัติ คือ ความชื้นสัมพัทธ์ไม่เปลี่ยนแปลงหรือเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป การที่สารละลายเกลืออิ่มตัวพยายามรักษาความดันไอหรือความชื้นสัมพัทธ์ไม่ให้เปลี่ยนแปลงนั้นขึ้นอยู่กับสารเคมีที่ใช้ ความเข้มข้นและอุณหภูมิ สารละลายเกลืออิ่มตัวที่ใช้ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์สำหรับการทดลองครั้งนี้ ได้แก่ ลิเทียมคลอไรด์ โปแตสเซียมอะซิเตด แมกนีเซียมคลอไรด์ โปแตสเซียมไนเตรด โซเดียมไนไตรต์ โซเดียมคลอไรด์ และโปแตสเซียมคลอไรด์ (ธนากร บุรณเพชร, 2547; คลฤดี ใจสุทธิ์, 2543; ภาณุวัฒน์ สรรพกุล, 2550; วินิต ชินนาพันธ์, ปวีณา ประดิษฐ์พงษ์ และรัตนา ม่วงรัตน์, 2548; อรุณี ผุคผ่อง, สมชาติ โสภณธนฤทธิ์ และวารุณี เตีย, 2533; Chen, 2002; Kaleemullah & Kailappan, 2004; McLaughlin, & Magee, 1998; Nikolay & Menkov, 2000; Temple & Boxel, 1999)

วอเตอร์แอกติวิตี (Water Activity; a_w)

วอเตอร์แอกติวิตี คือปริมาณน้ำอิสระที่เป็นประโยชน์ต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ และปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ ค่าวอเตอร์แอกติวิตี สามารถนิยามได้ว่าเป็นความชื้นสัมพัทธ์สมดุล (Equilibrium Relative Humidity; ERH) ณ จุดที่อาหารไม่มีการดูดซับหรือสูญเสีย น้ำค่าวอเตอร์แอกติวิตี สามารถหาได้จากอัตราส่วนของความดันไอที่อาหารมีได้สูงสุด (P) ต่อความดันไอน้ำ (P_0) ณ อุณหภูมิเดียวกัน ดังสมการ (2-17)

$$a_w \times 100 = \%ERH = \frac{P}{P_0} \times 100 \quad (2-17)$$

ส่วนใหญ่แล้วการถนอมอาหารจะใช้วิธีการลดค่าวอเตอร์แอกติวิตีให้ต่ำลงซึ่งจะจำกัดปริมาณความชื้นที่จะเป็นประโยชน์ต่อปฏิกิริยาต่าง ๆ ที่ทำให้อาหารเสื่อมคุณภาพ เช่น ปฏิกิริยาเคมีแบบเอนไซม์ (Enzymatic), แบบไม่เอนไซม์ (Non-enzymatic), การออกซิเดชันของไขมัน (Lipid oxidation) รวมไปถึง การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ เป็นต้น ข้อควรระวังในการลดค่าวอเตอร์แอกติวิตีของอาหารคือ จะต้องไม่ต่ำกว่าขอบเขตที่จะทำให้อาหารนั้นสูญเสียคุณภาพ



ภาพที่ 2-6 ความสัมพันธ์ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ กับค่าวอเตอร์แอกติวิตี ของอาหาร (นิริยา รัตนาปนนท์, 2545).

บทบาทของวอเตอร์แอกติวิตีต่อคุณภาพอาหาร

1. การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

วอเตอร์แอกติวิตี เป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในอาหาร การป้องกันการเสื่อมเสียของอาหารเนื่องจากจุลินทรีย์โดยวิธีควบคุมค่าวอเตอร์แอกติวิตี จึงใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น ฮันเดิล เทคโนโลยี (Hurdle Technology) ซึ่งเป็นการผสมผสานเทคนิคการถนอมอาหารแบบต่าง ๆ เพื่อให้เกิดลำดับของปัจจัยการถนอมอาหาร (Hurdles) ที่สามารถเอาชนะจุลินทรีย์ได้ ปัจจัยเหล่านี้ได้แก่ อุณหภูมิ ค่าวอเตอร์แอกติวิตี ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และอื่น ๆ จุลินทรีย์เจริญเติบโตภายใต้ค่าวอเตอร์แอกติวิตีที่จำกัด ถ้าค่าวอเตอร์แอกติวิตีต่ำกว่าที่จุลินทรีย์จะเจริญเติบโตได้มันจะไม่เจริญเติบโต เช่น แบคทีเรียส่วนใหญ่จะไม่เจริญเติบโตที่ค่าวอเตอร์แอกติวิตีต่ำกว่า 0.9 และราส่วนใหญ่ จะไม่เจริญเติบโตที่ค่าวอเตอร์แอกติวิตีต่ำกว่า 0.80 เป็นต้น

2. ปฏิกิริยาของเอนไซม์ (Enzymatic reaction)

น้ำมีอิทธิพลต่อการทำงานของเอนไซม์มาก ไม่เพียงแต่ทำหน้าที่พาสารที่จะทำปฏิกิริยาไปยังตำแหน่งที่เกิดปฏิกิริยาของเอนไซม์ ยังมีอิทธิพลต่อการเคลื่อนที่และการซึมผ่านของสารที่จะทำปฏิกิริยา สารเร่งปฏิกิริยาและสารยับยั้งปฏิกิริยาอีกด้วย ถ้าไม่มีน้ำ เอนไซม์จะทำหน้าที่ไม่ได้โดยทั่ว ๆ ไป ปฏิกิริยาของเอนไซม์จะเพิ่มขึ้นตามความชื้น

3. ปฏิกิริยาสีน้ำตาล (Non enzymatic browning)

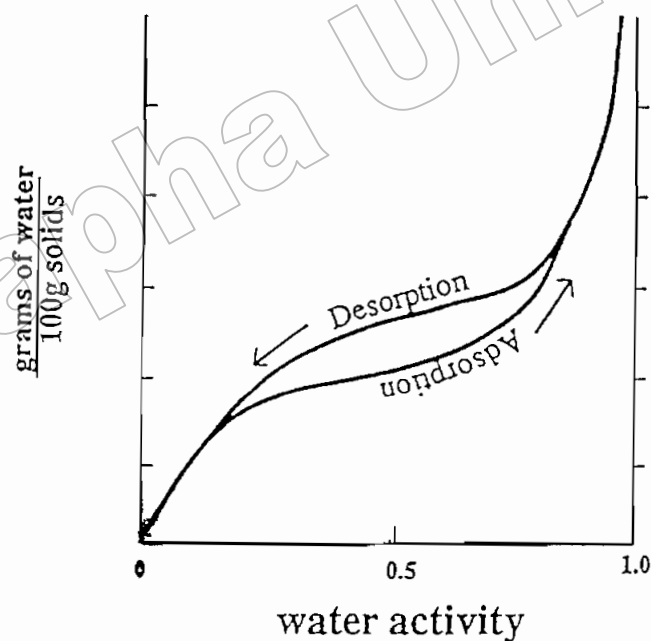
ปฏิกิริยาสีน้ำตาลเป็นปฏิกิริยาระหว่างน้ำตาลรีดิวซ์และกรดอะมิโน เกิดสารเมลานอยด์ (Melanoidins) ซึ่งมีสีน้ำตาล ปฏิกิริยาสีน้ำตาลขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นและมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงสุดที่ความชื้นปานกลาง (ค่าวอเตอร์แอกติวิตี 0.6-0.7) ดังนั้นอาหารแห้งส่วนใหญ่และอาหารที่มีความชื้นปานกลาง จะเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล

4. ปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน

เมื่อค่าวอเตอร์แอกติวิตีของอาหารเพิ่มขึ้นจากศูนย์ อัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะลดลงจนกระทั่งถึงความชื้นค่าหนึ่ง อัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ที่ปริมาณความชื้นต่ำ ๆ เพราะจะเกิดชั้นของน้ำรอบ ๆ สารเร่งปฏิกิริยาและไฮโดรเปอร์ออกไซด์ แต่เมื่อปริมาณความชื้นสูงขึ้น น้ำจะทำหน้าที่เป็นสารละลายซึ่งทำหน้าที่เป็นสารละลายซึ่งทำให้โลหะที่เป็นสารเร่งปฏิกิริยาซึมผ่านได้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้อาหารแห้งพองตัวสามารถรับออกซิเจนจากบรรยากาศได้เร็วขึ้นจึงทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันสูงขึ้นอีก (ไพศาล วุฒิจำนงค์, 2546)

มอยเจอร์ซอร์พชันไอโซเทอร์ม (Moisture Sorption Isotherms)

มอยเจอร์ซอร์พชันไอโซเทอร์ม (Moisture Sorption Isotherms) หรือซอร์พชันไอโซเทอร์ม (Sorption Isotherms) เป็นการเคลื่อนที่ของไอน้ำจากอาหารไปยังอากาศรอบ ๆ ขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นและองค์ประกอบของอาหารรวมทั้งอุณหภูมิและความชื้นของอากาศ ที่อุณหภูมิคงที่ ปริมาณความชื้นของอาหารจะเปลี่ยนไปจนกว่าความชื้นในอาหารจะสมดุลกับไอน้ำในอากาศรอบ ๆ นั่นคือ อาหารจะไม่มีน้ำหนักเพิ่มหรือลดลงภายใต้การเก็บรักษาในสภาวะดังกล่าว เราเรียกปริมาณความชื้นดังกล่าวว่า ปริมาณความชื้นสมดุลของอาหาร และเรียกความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศการเก็บรักษาว่าความชื้นสัมพัทธ์ที่สมดุล เมื่อนำค่าปริมาณความชื้นสมดุลมาพลอตกับความชื้นสัมพัทธ์จะได้กราฟที่เรียกว่า ซอร์พชันไอโซเทอร์ม (Sorption Isotherms) หรือเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำของอาหาร (g Water/g Dry Matter) กับค่าวอเตอร์แอคทิวิตี ที่อุณหภูมิคงที่ ซอร์พชันไอโซเทอร์มของน้ำ แสดงถึงค่าวอเตอร์แอคทิวิตี ที่อาหารจะมีความคงตัวและทำให้สามารถคาดคะเนการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นต่อค่าวอเตอร์แอคทิวิตี และต่อความคงตัวในระหว่างการเก็บรักษาได้ กราฟนี้มีประโยชน์ในการกำหนดอัตราและปริมาณการอบแห้ง (วิไล รังสาดทอง, 2543)



ภาพที่ 2-7 กราฟมอยเจอร์ซอร์พชันไอโซเทอร์ม (รัตนันท์ พรธมนารุโณทัย, 2543)

ซอร์พชันไอโซเทอร์มมี 2 ลักษณะ คือ กระบวนการคายความชื้น (Desorption) และการดูดความชื้น (Adsorption) ทั้ง 2 กระบวนการไม่ได้เกิดขึ้นพร้อมกัน หรือเป็นการเปลี่ยนกลับไปมา แต่มีความแตกต่างกันระหว่างแอดซอร์พชัน และดีซอร์พชันไอโซเทอร์ม ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า ฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) ขนาด รูปร่างจุดเริ่มหรือจุดปลายของเส้นแตกต่างกัน ขึ้นกับธรรมชาติของอาหาร อุณหภูมิ ปริมาณและอัตราเร็วของการดูดน้ำหรือคายน้ำ ที่ความชื้นหนึ่ง ๆ ของอาหารค่าวอเตอร์แอกติวิตี ของดีซอร์พชันจะต่ำกว่าแอดซอร์พชัน หรือที่ค่าวอเตอร์แอกติวิตีหนึ่ง ๆ ปริมาณความชื้นของดีซอร์พชันจะมากกว่าแอดซอร์พชันเสมอ อาหารแต่ละชนิดจะมีซอร์พชันไอโซเทอร์มของน้ำ ต่างกันขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางกายภาพองค์ประกอบทางเคมีและปริมาณของน้ำที่ถูกยึดอยู่ในอาหาร อย่างไรก็ตามรูปร่างของซอร์พชันไอโซเทอร์มโดยทั่วไปจะเป็นรูปซิกมอยด์ (Sigmoid) และแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน ซึ่งจะแตกต่างกันตามปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในอาหาร

ระยะที่ 1 ของไอโซเทอร์ม เส้นกราฟค่อนข้างชัน จะสอดคล้องกับโมโนโมเลกุลาร์เลเยอร์ (Monomolecular Layer) ของน้ำ ซึ่งเป็นน้ำที่เกาะอยู่กับสารประกอบในอาหารอย่างเหนียวแน่นและมีค่าวอเตอร์แอกติวิตี อยู่ในช่วง 0-0.25 หรือ 0.3

ระยะที่ 2 เส้นกราฟค่อนข้างราบ สอดคล้องกับน้ำในท่อเล็ก ๆ (Capillary Water) ที่มีอยู่ในอาหาร ซึ่งเป็นน้ำที่กำจัดออกได้แต่ค่อนข้างยาก ถ้าปริมาณน้ำส่วนนี้ลดลงจะทำให้ค่าวอเตอร์แอกติวิตีลดลง และยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ และปฏิกิริยาทางเคมีส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นในอาหารได้ด้วย ปริมาณความชื้นจะลดลงเหลือประมาณ 3-7 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นอยู่กับชนิดของอาหารและอุณหภูมิค่าวอเตอร์แอกติวิตีอยู่ในช่วง 0.3-0.8

ระยะที่ 3 เป็นน้ำอิสระที่มีอยู่ในเนื้อเยื่ออาหารทั้งจากพืชและสัตว์ สามารถกำจัดออกได้ง่าย น้ำเหล่านี้จะทำหน้าที่เป็นตัวทำละลาย และใช้สำหรับการเจริญของจุลินทรีย์และการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี อาหารจะมีน้ำประมาณ 12-25 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าวอเตอร์แอกติวิตี สูงถึง 0.8 - 1.0 (นิธิยา รัตนปณณท์, 2545)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของความชื้นสมดุล

ได้มีผู้นำทฤษฎีเทอร์โมไดนามิกส์ มาอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นสมดุล อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหรือความดันไอของผลิตภัณฑ์หลายชนิดในรูปของสมการ หรือแบบจำลองทางทฤษฎี กึ่งทฤษฎี และจากการทดลอง พบว่าแบบจำลองทางทฤษฎีส่วนใหญ่ไม่สามารถอธิบายความชื้นสมดุลของผลิตภัณฑ์ได้อย่างถูกต้อง จึงเบนความสนใจมาศึกษาแบบจำลองที่สร้างขึ้นจากการทดลองมากกว่าแบบจำลองทางทฤษฎีและกึ่งทฤษฎี

1. แบบจำลองของ Brunauer-Emmet-Teller (BET)

Brunaure et al.(1995) ได้สร้างสมการที่เรียกว่า BET สำหรับอธิบายความชื้นสมดุลที่อุณหภูมิคงที่โดยสมมติว่าการจับตัวของความชื้นมีมากกว่าความหนาของโมเลกุล 1 ชั้น (Pedro, Enrique, & Gustavo, 1997; Yrjo Roos, 1995) โดยสมการนี้สามารถอธิบายข้อมูลได้ดีสำหรับอาหารหลายชนิดในช่วงค่าวอเตอร์แอกติวิตี 0.1-0.5 เท่านั้น (Park, Vohnikova, & Brod, 2002; Prachayawarakorn et al., 2002) สามารถเขียนสมการได้ว่า

$$Me = \frac{M_{bm} C a_w}{(1 - a_w)(1 - a_w + C a_w)} \quad (2-18)$$

2. แบบจำลองของ Guggenheim-Anderson-deBoer (GAB)

สมการสำหรับอธิบายความชื้นสมดุลที่อุณหภูมิคงที่ที่ใช้ทำนายได้ดีกับผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิด สามารถอธิบายข้อมูลได้ดีสำหรับอาหารทุกชนิดในช่วงค่าวอเตอร์แอกติวิตี 0.1-0.9 (Pedro, Enrique, & Gustavo, 1997; Yrjo Roos, 1995) นั่นคือสมการของ Guggenheim-Anderson-deBoer (1995) หรือสมการของ GAB แสดงดังตารางที่ 2-4

$$Me = \frac{M_{gm} C K a_w}{(1 - K a_w)(1 - K a_w + C K a_w)} \quad (2-19)$$

เมื่อ Me คือ ปริมาณความชื้นสมดุล (เปอร์เซ็นต์ มาตรฐานแห้ง)

a_w คือ ค่าวอเตอร์แอกติวิตี

M_{bm} คือ ความชื้นสูงสุดใน 1 ชั้น โมโนโมเลกุลาร์เลเยอร์ของ BET

M_{gm} คือ ความชื้นสูงสุดใน 1 ชั้น โมโนโมเลกุลาร์เลเยอร์ของ GAB

K, C คือ ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ

โดยข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะเหมาะสมกับแบบจำลองใด จะใช้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) และใช้ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานในการทำนาย (Standard error of estimate, SEE) สามารถหาค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานในการทำนายได้ดังนี้

$$SEE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (M_m - M_p)^2}{df}} \quad (2-20)$$

ตารางที่ 2-4 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารที่ใช้สมการของ GAB ในการทำนายความชื้นสมดุล

วัตถุดิบ	อ้างอิง
เนื้อวัว	Delgado and Sun, 2002a; Francisco, Pei, and Tuan, 2003
เนื้อไก่	Delgado and Sun, 2002b
วุ้นหางจรเข้	Vega, Uribe, Lemus, and Miranda, 2007
กุ้งนาง, กุ้งทราย	Ariahu, Kaze, and Achem, 2006; Prachayawarakorn, Soponronnarit, Wetchacama, and Jaisut, 2002
มันเทศจีน, มันฝรั่ง	Chen, 2002; McLaughlin and Magee, 1998
ชาดำและชาเขียว, ใบชาดำ, ใบชา, ใบหม่อน, ใบมันต์	Ghodake et al., 2007; Panchariya, Popovic, and Sharma, 2002, Temple and Bostel, 1999; ญัฐพล ภูมิสะอาด และคณะ, 2546; Park, Vohnikova, and Brod, 2002
ยาสูบ	Menkov and Dinkov, 1999
lentil seeds	Nikolay and Menkov, 2000
ถั่วเขียว	Silakul and Jindal, 2002
แคร็กเกอร์	Siripatrawan and Jantawat, 2006
ผลิตภัณฑ์ผักแผ่น	วัฒนา ดำรงค์รัตน์กุล, 2548
แป้งข้าวโพด, แป้งข้าวหอมมะลิ	Guilan et al., 2007; Matsui, Larotonda, Pires, and Laurindo, 2003; วินิต ชินนาพันธ์และคณะ, 2548
นมข้าว	Jayendra, Singh, Patil, and Patel, 2005
พริกไทยแดง	Karina and Guillermo, 2007
อาหารต่าง ๆ	Iglesias and Chirife, 1995; Labuza and Hyman, 1998
เนื้อหมู	Clemente, Bon, Garcia-Pascual, Monleon, and Mulet, 2002
แอปเปิ้ล แอปริคอต องุ่น มันฝรั่ง	Figen and Atil, 2004
มะเขือเทศ	Giovanelli, Zanoni, Lavelli, and Nani, 2002
กาแฟ, โกโก้	Lahsani, Kouhila, and Mahrouz, 2002; Megda, Ana, Ronaldo, and Suzana, 2006
สับปะรด	Susana, Antoni, Africa, and Carmen, 2007
ขนมฝอยทอง	ภาณุวัฒน์ สรรพกุล, 2550

นอกจากนี้ยังมีสมการกึ่งทฤษฎีซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการทำนายความชื้นสมดุลของอาหาร นักวิจัยหลายท่าน พบว่าไม่มีแบบจำลองซอร์พชันไอโซเทอร์มใดที่สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นสมดุล และปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ที่จุดสมดุลได้ถูกต้องครอบคลุมวัสดุทางชีวภาพทุกชนิด ทุกช่วงของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับอาหารแต่ละชนิด นักวิจัยหลายท่านเลือกใช้แบบจำลองดังตารางที่ 2-4 ในการสร้างซอร์พชันไอโซเทอร์ม ของผลผลิตทางการเกษตรหลายชนิด ซึ่งได้ใช้การวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Regression Method) ในการวิเคราะห์ข้อมูลปริมาณความชื้นสมดุล และใช้ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานในการทำนาย (SEE) เป็นค่าตรวจสอบ

ตารางที่ 2-3 (ต่อ)

ชื่อสมการ	ชนิดของสมการ	อ้างอิง
Modified - Halsey Equation	$Me = \left[-\frac{\exp(A + Bt)}{\ln(a_w)} \right]^{\frac{1}{C}}$	กฤษฎณ์ จันทร์โชติกุล, 2545; มานิต สุขจินดาเสถียร, 2536; ชนากร บุณเพชร, 2547; วีนัล ชินนาพันธ์ และคณะ, 2548; อากัสสร ศิริจริยวัตร, 2547; Chen, 2002; Ghodake et al., 2007; McLaughlin and Magee, 1998; Nikolay and Menkov, 2000; Prado and Satori, 2000; Kaleemullah and Kailappan, 2004; Sanjuan et al., 2005; Silakul and Jindal, 2002; Temple and Boxtel, 1999
Modified - Oswin Equation	$Me = -\frac{A + BT}{\left(\frac{1}{a_w} - 1 \right)^{\frac{1}{C}}}$	(2-24) กฤษฎณ์ จันทร์โชติกุล, 2545; ธีรพล ภูมิสะอาด และคณะ, 2546; มารีนา มะห์นี, 2546; มารีนา มะห์นี และคณะ, 2549; วีนัล ชินนาพันธ์ และคณะ, 2548; Chen, 2002; Ghodake et al., 2007; Guilan et al., 2007; Kaleemullah and Kailappan, 2004; McLaughlin and Magee, 1998; Nikolay and Menkov, 2000; Park, Vohnikova, and Brod, 2002; Phoungchandang and Woods, 2000; Sanjuan et al., 2005; Temple and Boxtel, 1999

ตารางที่ 2-5 แบบจำลองซอร์พชั่นไฮเพอร์โบลิก

ชื่อสมการ	ชนิดของสมการ	อ้างอิง
Modified – Henderson Equation	$Me = \left[-\frac{\ln(1-aw)^{\frac{1}{p}}}{A(t+C)} \right] \quad (2-21)$	กฤษณ์ จันทน์โชติกุล, 2545; ณัฐพล ภูมิสะอาด, ธนากร บุรณเพชร และเจริญพร เดศสถิตยธนากร, 2546; ทวีชัย วงศ์ศักดิ์ไพโรจน์, 2545; มนตรี มนตรีพิลา, 2548; มารินา มะห์นิ, จอมภพ แวตักด์, สุวิทย์ เพชรทัญลิก และกรพนา บัวเพชร, 2549; วีนิด ชินนาพันธ์ และคณะ, 2548; อรุณี ผุดผ่อง, สมชาติ โสภณณฤทธิ์ และวารุณี เตีย, 2533; อากัสตร ศิริจิรวัตร, 2547; Chen, 2002; Ghodake, Goswami, and Chakraverly, 2007; Guilan, Xiaoguang, Wenfu, and Xiujuan, 2007; Kaleemullah and Kailappan, 2004; Nikolay and Menkov, 2000; Panchariya, Popovie, and Sharma, 2002; Phoungchandang and Woods, 2000; Sanjuan, Garcia, Campos, Garcia, and Mulet, 2005; Silakul and Jindal, 2002; Temple and Boxtel, 1999
Modified - Chung and Pfost Equation	$Me = -\ln \left[-\frac{(t+c)\ln a_w}{A} \right]^{\frac{100}{B}} \quad (2-22)$	ณัฐพล ภูมิสะอาด และคณะ, 2546; มารินา มะห์นิ และคณะ, 2549; วีนิด ชินนาพันธ์ และคณะ, 2548; อรุณี ผุดผ่อง และคณะ, 2533; อากัสตร ศิริจิรวัตร, 2547; Chen, 2002; Ghodake et al., 2007; Nikolay and Menkov, 2000; Kaleemullah and Kailappan, 2004; Phoungchandang and Woods, 2000; Silakul and Jindal, 2002

เมื่อ M_c คือ ความชื้นสมดุล (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง)

a_w คือ ค่าวอเตอร์แอกทิวิตี

t คือ อุณหภูมิที่ใช้ ($^{\circ}\text{C}$)

A, B, C คือ ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ

มหาวิทยาลัยบูรพา
Burapha University