บทที่ 2

การตรวจเอกสาร

ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับสาหร่ายเตา

สาหร่ายเตา มีชื่อสามัญว่า “เตา” หรือ “เทา” และชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Spirogyra* sp. เป็นสาหร่ายชนิด *Spirogyra neglecta* (Hassall) Kützing (ฐิติกานต์, 2550) จัดอยู่ใน Division chlorophyta, Class zygnematophyceae, Order zygnematales, Family zygnemataceae เป็นสาหร่ายน้ำจืดสีเขียวขนาดใหญ่ ลักษณะของสาหร่ายชนิดนี้จะเป็นเส้นสายยาว ไม่แตกแขนง คล้ายเส้นผมสีเขียวสด เซลล์มีรูปร่างเป็นทรงกระบอก ความกว้างของเซลล์ 50-58 µm ความยาวเป็น 2-5 เท่าของความกว้าง ในแต่ละเซลล์ประกอบด้วย 3 คลอโรพลาสต์ ซึ่งจะหมุนวน 2.0-2.5 รอบภายในเซลล์ ส่วนการสืบพันธุ์เป็นแบบอาศัยเพศ มีการสร้างท่อ conjugation มาเชื่อมกันระหว่างเส้นสายทั้งสองเส้น เซลล์ที่สร้างไซโกสปอร์ (zygospore) มีลักษณะบวมเล็กน้อย โดยไซโกสปอร์ดังกล่าวมีลักษณะเป็นรูปไข่หรือวงรี ผิวเรียบ สีน้ำตาลเข้ม ขนาดความกว้าง 54-58 µm และยาวเป็น 1.5 เท่าของความกว้าง (ภาพ 1) มักเกิดรวมกันเป็นกลุ่มในน้ำนิ่ง อาจอยู่ที่ก้นบ่อกับก้อนดิน ก้อนหิน หรืออาจจะลอยอยู่บริเวณผิวน้ำ สาหร่ายชนิดนี้เจริญในน้ำนิ่ง น้ำมีคุณภาพดีถึงปานกลาง น้ำใส มีความขุ่นไม่เกิน 10 NTU อุณหภูมิ 15-27ºC ค่า pH 6.0-7.8 พบมากในแถบภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ชาวบ้านนิยมนำมารับประทานเป็นอาหารพื้นบ้านคือ ยำเตาสด หรือนำมาแปรรูปเป็นข้าวเกรียบเตา

(a) (b)

ภาพ 1 สาหร่ายเตาชนิด *Spirogyra neglecta* (Hassall) Kutzing; (a) ในธรรมชาติ, (b) ภายใต้กล้องจุลทรรศน์

ที่มา: ยุวดี และคณะ (2555)

สาหร่ายเตามีคุณค่าทางโภชนาการสูง ดังแสดงในตาราง 1 มีโปรตีนอยู่ในระดับใกล้เคียงกับปลาน้ำจืด รวมทั้งยังมีรงควัตถุหลายชนิด เช่น คลอโรฟิลล์เอ และบี เบต้าแคโรทีน แซนโทฟิล นอกจากนี้ยังพบว่ามีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ซึ่งสารอนุมูลอิสระมีบทบาทสำคัญในการเกิดการอักเสบ การทำลายเนื้อเยื่อ มีผลต่อความเสื่อมหรือการแก่ของเซลล์ และยังเป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดภาวะแทรกซ้อนในโรคเบาหวานอีกด้วย ฤทธิ์ลดน้ำตาลและไขมันในเลือดในภาวะเบาหวาน และยังมีฤทธิ์ต้านเอนไซม์ไทโรสิเนส ช่วยป้องกันการเกิดฝ้าและจุดด่างดำ ช่วยให้ผิวขาว มีสารเมือกหรือมอยเจอร์ไรเซอร์ ช่วยให้ความชุ่มชื้นแก่ผิวหนัง และกระตุ้นการสร้างโปรคอลลาเจนที่มีผลต่อการสร้างเนื้อเยื่อผิวหนัง

ตาราง 1 คุณค่าทางโภชนาการและสารอาหารในสาหร่ายเตา

สารอาหาร	%
โปรตีน	18.63
คาร์โบไฮเดรต	56.31
ไขมัน	5.21
เส้นใย	7.66
อื่นๆ	12.19

ที่มา: ธีระวัฒน์ และคณะ (2554)

สารต้านอนุมูลอิสระและความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ

ในปัจจุบันผู้บริโภคได้ให้ความสำคัญกับเรื่องสุขภาพ อาหาร และความสวยงามมากขึ้น โดยผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนประกอบของสารสกัดจากธรรมชาติและสมุนไพรที่มีสารต้านอนุมูลอิสระ จึงเป็นสารที่มีผู้บริโภคให้ความสนใจ เนื่องจากสารที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสามารถช่วยชะลอการเสื่อมสภาพของเซลล์ในร่างกาย รวมทั้งสามารถป้องกันกลิ่นหืนของอาหาร ซึ่งเป็นการเสื่อมเสียของอาหาร (food spoilage) เนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมี หรือการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลในผักและผลไม้ เป็นต้น ในที่นี้จะกล่าวถึงสารต้านอนุมูลอิสระในกลุ่มของสารประกอบฟีนอลิกซึ่งเป็นสารต้านออกซิเดชันที่สำคัญชนิดหนึ่งที่พบในสาหร่ายเตา ซึ่งอาจใช้เป็นตัวกำหนดมาตรฐานในการนำสาหร่ายเตามาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์อาหารสุขภาพและเครื่องสำอาง

สารประกอบฟีนอลิก

สารประกอบฟีนอลิก (phenolic compound) หรือสารประกอบฟีนอล เป็นสารต้านอนุมูลอิสระชนิดหนึ่งที่อยู่ในกลุ่ม polyphenolic ซึ่งสารที่อยู่ในกลุ่มสารประกอบฟีนอลิก ได้แก่ flavonoids, flavones, gallic acid, ellagic acid, ligin, tannin, anthocyanins, carotenoids และอนุพันธ์ของ cinnamic acid (Cowan, 1999; Helmja et al., 2007) เป็นสารที่ให้สีสันแก่พืช สารประกอบฟีนอลิกมีมากกว่า 8,000 ชนิด จัดเป็นสารต้านอนุมูลที่ได้รับจากภายนอก พบได้มากในธรรมชาติและอาหารหรือเครื่องดื่มที่ผลิตจากพืชหลายชนิด เช่น ผัก ผลไม้ เครื่องเทศ สมุนไพร เมล็ดธัญพืชต่างๆ (Shahidi et al., 1992; Kinsella et al., 1993; Chen et al., 1996; วาริน, 2543; วาริน, 2546; ศรีจันทร์, 2546; โอภา และคณะ, 2549; ปริยานุช, 2551)

สารประกอบฟีนอลิกนอกจากจะมีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระแล้วยังมีคุณสมบัติอื่นๆ เช่น ฤทธิ์ต้านแบคทีเรีย ต้านไวรัส ต้านการอักเสบ ช่วยขยายหลอดเลือด ต้านโรคภูมิแพ้ ทำลายเชื้อโรคที่เข้าสู่ร่างกาย รวมถึงเป็นสารกระตุ้นให้สร้างภูมิคุ้มกัน ต้านมะเร็ง และยังช่วยในการถนอมอาหาร ป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน โดยใช้เป็นสารกันหืนในอาหาร (lipid oxidation) การวิเคราะห์หาสารประกอบฟีนอลิกส่วนใหญ่นิยมหาออกมาในรูปของกรดแกลลิก (gallic acid)

การตรวจวิเคราะห์ความสามารถรวมในการต้านอนุมูลอิสระมีด้วยกันหลายวิธี การตรวจวิเคราะห์ด้วยวิธี Trolox Equivalent Antioxidant Capacity Assay (TEAC) ซึ่งการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้ โดยทั่วไปจะมีการสร้างอนุมูลอิสระที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอน และวิเคราะห์ความสามารถในการยับยั้ง หรือขจัดอนุมูลอิสระของสารตัวอย่าง โดยวัดปริมาณอนุมูลอิสระที่ลดลงหรือที่เหลือ วิธี Scavenging activity of ABTS radical เป็นวิธีวัดทางอ้อมโดยใช้สาร2,2'-azinobis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) (ABTS) ทำให้เกิดอนุมูล $ABTS^{\bullet+}$ เป็นการวัดความสามารถในการขจัดอนุมูล $ABTS^{\bullet+}$ ที่มีสีเขียวปนน้ำเงิน ข้อดีของวิธีนี้คือสะดวก รวดเร็ว และง่ายต่อการวิเคราะห์ สามารถวิเคราะห์ปริมาณสารอนุมูลอิสระที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาโดยวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลง ทำการวิเคราะห์ได้ทั้งในน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์ (โอภา และคณะ, 2549; เสาวนีย์ และคณะ, 2554) และวิธี DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl) radical อนุมูล $DPPH^{\bullet}$ เป็นอนุมูลไนโตรเจนที่คงตัว มีสีม่วง อยู่ในรูปอนุมูลอยู่แล้ว โดยไม่ต้องทำปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดอนุมูล การวิเคราะห์เป็นการวัดความสามารถของสารทดสอบในการกำจัดอนุมูลอิสระ โดยวิธีให้ไฮโดรเจนอะตอม การวัดทำโดยใช้เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (spectrophotometer) วัดการลดลงของสี เมื่อเติมสารต้านออกซิเดชันลงไป โดยวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 517 nm DPPH radical ใช้ในการทดสอบความสามารถในการทำลายอนุมูลอิสระของสารตัวอย่าง

(scavenging activity) สารละลายของ DPPH· มีสีม่วงในเอทานอล และเมื่อได้รับ H จะเปลี่ยนเป็นสารละลายสีเหลือง (Blois, 1958)

รงควัตถุหรือสารสีในอาหาร

สีเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดในการประเมินคุณภาพของอาหารทางประสาทสัมผัส เพราะผู้บริโภคจะพิจารณาคุณภาพของอาหารจากสีเป็นอันดับแรก สีของอาหารเกิดจากรงควัตถุหรือสารสี ซึ่งอาจเป็นรงควัตถุที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ หรือเกิดจากการสังเคราะห์ที่เติมลงไปในอาหารเพื่อให้อาหารมีสีสันตามที่ต้องการ รงควัตถุที่มีอยู่ในอาหารที่ได้จากพืช สามารถจำแนกออกเป็น 4 กลุ่ม คือ คลอโรฟิลล์ (chlorophyll) แคโรทีนอยด์ (carotenoid) รงควัตถุทั้ง 2 ชนิด ละลายได้ในลิพิด ส่วนรงควัตถุที่ละลายได้ในน้ำ ได้แก่ แอนโทไซยานิน (anthocyanin) และบีทาเลน (betalain) (นิธิยา, 2545)

การศึกษาปริมาณรงควัตถุในสาหร่ายเตาของยุวดี และคณะ (2549) และฐิติกานต์ (2550) พบว่าสาหร่ายเตามีรงควัตถุหลายชนิด ได้แก่ คลอโรฟิลล์เอ และบี เบต้า-แคโรทีน (β-carotene) อัลฟ่า-แคโรทีน (α-carotene) แกมม่า-แคโรทีน (γ-carotene) และแซนโทฟิล ซึ่งรงควัตถุเหล่านี้มีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ ดังนั้นความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระอาจเกิดมาจากรงควัตถุ และสารอื่นๆ เช่น สารประกอบฟีนอลิก ที่มีอยู่ในสาหร่ายเตา (โอภา และคณะ, 2549)

คลอโรฟิลล์

คลอโรฟิลล์เป็นรงควัตถุสีเขียวที่พบมากในพืชซึ่งมีอยู่หลายชนิด ได้แก่ คลอโรฟิลล์ เอ บี ซี และดี ซึ่งพบอยู่ในคลอโรพลาสต์ คลอโรฟิลล์เป็นรงควัตถุที่ไม่คงตัว ดังนั้นการแปรรูปอาหารจะมีผลต่อปริมาณคลอโรฟิลล์ โดยเฉพาะกระบวนการแปรรูปที่ใช้ความร้อนจะทำให้คลอโรฟิลล์เปลี่ยนเป็นสีเขียวอมน้ำตาล และเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลในที่สุด การวิเคราะห์ปริมาณคลอโรฟิลล์ของสาหร่ายเตาสามารถวิเคราะห์ตามวิธีใน Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water ซึ่งเป็นวิธีการมาตรฐานที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์น้ำ น้ำเสีย และน้ำจากแหล่งต่างๆ เนื่องจากสาหร่ายเตาจัดเป็นแพลงก์ตอนพืช (phytoplankton) หรือพืชเซลล์เดียวที่มีลักษณะคล้ายพืช เนื่องจากมีคลอโรฟิลล์และผนังเซลล์เช่นเดียวกับพืช โดยคลอโรฟิลล์เอเป็นรงควัตถุสังเคราะห์แสงที่พบมากในแพลงก์ตอนพืชที่ยังมีชีวิตทุกชนิด จึงนิยมใช้คลอโรฟิลล์เอเป็นตัวชี้ถึงมวลชีวภาพของแพลงก์ตอนพืชในแหล่งน้ำ (นิธิยา, 2545)

ทฤษฎีการอบแห้ง

การอบแห้งเป็นกระบวนการที่สำคัญในการถนอมอาหารหรือวัสดุทางชีวภาพให้มีอายุการเก็บรักษาที่ยาวนานขึ้น โดยการลดความชื้นหรือปริมาณน้ำอิสระในอาหารหรือวัสดุทางชีวภาพซึ่งมีผลต่อจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดเน่าเสียไม่สามารถเจริญเติบโตได้ รวมทั้งยับยั้งการทำงานของเอ็นไซม์ หรือชะลอปฏิกิริยาต่างๆ ทั้งทางเคมีและทางชีวเคมี นอกจากนั้นการอบแห้งยังช่วยลดน้ำหนักหรือปริมาตรของอาหารหรือวัสดุทางชีวภาพทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการขนส่ง และการเก็บรักษา (ฤทธิชัย และคณะ, 2554; สักกมน, 2555; วิไล, 2547; กิตติพงษ์, 2540)

หลักการอบแห้ง

การอบแห้งเป็นหน่วยปฏิบัติการทางวิศวกรรมอาหารซึ่งเป็นกระบวนการถ่ายเทความร้อนไปยังอาหารหรือวัสดุทางชีวภาพที่มีความชื้นสูง เพื่อไล่ความชื้นหรือน้ำออกจากอาหารหรือวัสดุทางชีวภาพโดยการระเหยน้ำ ทั้งนี้คุณภาพของอาหารจะขึ้นอยู่กับกลไกการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลสารในระหว่างกระบวนการอบแห้ง ทั้งนี้ความร้อนเกิดการถ่ายเทได้ 3 วิธี ได้แก่

1. การนำความร้อน (conduction) เป็นการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการเคลื่อนที่โดยตรงจากพลังงานของโมเลกุลภายในของแข็ง

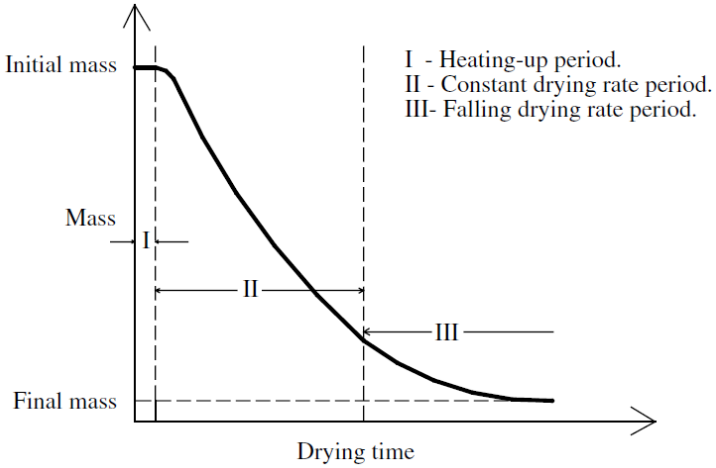
2. การพาความร้อน (convection) เป็นการถ่ายเทความร้อนโดยกลุ่มโมเลกุลที่เกิดการเคลื่อนที่เนื่องจากความหนาแน่นที่แตกต่างกัน

3. การแผ่รังสี (radiation) เป็นการถ่ายเทความร้อนออกรอบตัวทุกทิศทุกทาง โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลาง เป็นการถ่ายเทความร้อนในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การแผ่รังสีที่เกิดในช่วงความยาวช่วงคลื่น 0.1-100 μm จัดเป็นรังสีความร้อน (thermal radiation)

การเคลื่อนที่ของน้ำเมื่อได้รับพลังงานความร้อนจากภายในชิ้นอาหารหรือวัสดุทางชีวภาพออกมาบริเวณผิวประกอบไปด้วย การเคลื่อนที่ด้วยแรงผ่านช่องแคบ (capillary force) เป็นการเคลื่อนที่ในอาหารที่มีเซลล์โปร่ง และมีช่วงว่างระหว่างเซลล์ต่อเนื่องกันเป็นทางแคบๆ ซึ่งจะทำให้เกิดแรงดันของน้ำขึ้นมาตามท่อ การเคลื่อนที่เกิดขึ้นได้สะดวกรวดเร็ว แต่จะหยุดเมื่อน้ำในทางแคบๆ ขาดตอนลง และการเคลื่อนที่ด้วยการแพร่ (diffusion) ผ่านเซลล์ เป็นการเคลื่อนที่ในอาหารที่มีเนื้อแน่น ไม่มีช่องว่างระหว่างเซลล์หรือเกิดในอาหารที่อบแห้งไประยะหนึ่ง แรงที่ผ่านไปในช่องแคบหมดไปแล้ว น้ำจะต้องแพร่ผ่านเซลล์จึงทำให้เคลื่อนที่ได้ช้า (วิไล, 2547; กิตติพงษ์, 2540)

อัตราการอบแห้ง

ฤทธิชัย (2553) ได้อธิบายว่าอัตราการระเหยน้ำ หรืออัตราการอบแห้งจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ การพัฒนาวิธีการอบแห้งเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการอบแห้งจึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะช่วยรักษาคุณภาพของอาหารหรือวัสดุทางชีวภาพอบแห้งให้มีคุณภาพใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์สด โดยอัตราการอบแห้ง (drying rate) จะขึ้นอยู่กับสมบัติของอาหารหรือวัสดุทางชีวภาพ เช่น ความหนา ความชื้นเริ่มต้น ความชื้นสมดุล ภายใต้สภาวะการอบแห้งนั้นๆ ทั้งนี้ Idris et al. (2004) ได้อธิบายกลไกการเปลี่ยนแปลงมวลหรือความชื้นของอาหารหรือวัสดุทางชีวภาพในระหว่างกระบวนการอบแห้ง ออกเป็น 3 คาบเวลา (ภาพ 2) ได้แก่ คาบเวลาที่ 1 เกิดปรากฏการณ์ถ่ายเทพลังงานความร้อนให้อาหารหรือวัสดุทางชีวภาพจนถึงอุณหภูมิของการระเหย หรือเรียกว่าการให้ความร้อนช่วงต้น (heating up period) จากนั้นน้ำอิสระบริเวณผิวหน้าของอาหารหรือวัสดุทางชีวภาพจะเกิดการระเหย โดยถ่ายเทมวลไปยังตัวกลางทางความร้อน เมื่อน้ำหรือความชื้นที่ผิวลดลง น้ำในโครงสร้างชั้นในเซลล์จะเคลื่อนที่มาแทนที่ผิวหน้าเพื่อทดแทนความชื้นที่เสียไป โดยที่อัตราการระเหยน้ำที่ผิวหน้าจะเท่ากับอัตราการเคลื่อนตัวของน้ำภายโครงสร้างเซลล์ชั้นใน เรียกคาบเวลานี้ว่า คาบเวลาที่อัตราการอบแห้งคงที่ (constant rate period) ซึ่งจะดำเนินต่อเนื่องไปจนกระทั่งค่าความชื้นเข้าสู่ความชื้นวิกฤติ (critical moisture content) ซึ่งอัตราการถ่ายเทมวลของไอน้ำที่ผิวหน้าของอาหารหรือวัสดุทางชีวภาพมีค่าสูงกว่าอัตราการเคลื่อนตัวของน้ำภายโครงสร้างเซลล์ชั้นในเกิดเป็นชั้นของความแห้ง (drying front) กระบวนการอบแห้งจะเข้าสู่คาบเวลาที่อัตราการอบแห้งลดลง (falling rate period)



ภาพ 2 เส้นโค้งความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงความชื้นในระหว่างการอบแห้ง
ที่มา: Idris et al. (2004)

ปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้ง

การอบแห้งคือการเคลื่อนย้ายน้ำหรือความชื้นออกจากอาหารหรือวัสดุทางชีวภาพ ปัจจัยใดๆ ที่มีผลต่อการเคลื่อนย้ายน้ำหรือความชื้นนี้จึงมีผลต่ออัตราการอบแห้ง โดยปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออัตรากรอบแห้ง ประกอบไปด้วย ลักษณะธรรมชาติของอาหารหรือวัสดุทางชีวภาพ วัสดุที่มีลักษณะเป็นรูพรุนหรือเนื้อโปร่ง (porosity) มากจะมีอัตราการอบแห้งเร็ว เนื่องจากน้ำในวัสดุสามารถเคลื่อนจากภายในออกมาภายนอกได้ง่าย รวมทั้งวัสดุที่มีน้ำตาลสูงจะเหนียวเหนอะหนะ ทำให้การเคลื่อนที่ของน้ำเป็นไปได้ช้า แต่วัสดุที่มีการลวกนวดคลึงทำให้เซลล์แตกจึงแห้งได้เร็วกว่า ขนาด รูปร่าง ปริมาตร และพื้นที่ผิวของวัสดุก็ส่งผลต่ออัตราการอบแห้ง โดยวัสดุที่มีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมาก จะมีพื้นที่ระเหยน้ำมากทำให้มีอัตราการอบแห้งเร็วขึ้น ดังนั้นวัสดุที่มีความหนามากอัตราการอบแห้งจะช้ากว่าวัสดุที่หนาน้อยกว่า เนื่องจากอัตราการอบแห้งจะเป็นสัดส่วนผกผันกับความหนาของวัสดุ ปริมาณของวัสดุที่นำมาอบแห้งก็เป็นปัจจัยหนึ่ง โดยวัสดุที่มีปริมาณมากๆ จะมีอัตราการอบแห้งที่ช้า เนื่องจากอากาศร้อนไม่สามารถสัมผัสกับวัสดุที่นำมาอบแห้งได้อย่างทั่วถึงจึงไม่สามารถถ่ายเทความร้อนให้กับวัสดุได้ ความดันนั้นเกี่ยวเนื่องกับการระเหยของน้ำ เนื่องจากในที่ความดันต่ำๆ น้ำจะเดือดได้ที่อุณหภูมิต่ำลง ดังนั้นการอบแห้งภายใต้ความดันต่ำๆ จะทำให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้น รวมทั้งอุณหภูมิของอากาศร้อน การเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ความสามารถในการรับไอน้ำเพิ่มขึ้น จึงมีผลต่อการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ และยังทำให้การแพร่กระจายน้ำได้ดีขึ้นเช่นกัน เนื่องจากเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของอากาศจะทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิผิววัสดุและของกระแสอากาศที่ไหลอย่างอิสระมีมากขึ้น ส่งผลเกิดการถ่ายเทความร้อนและมวลสารได้ดีขึ้น และความเร็วของลมร้อน เมื่อเพิ่มความเร็วลมจะทำให้การเคลื่อนที่ของน้ำดีขึ้นนอกจากนั้นความเร็วลมทำให้เกิดกระแสปั่นป่วนของอากาศในเตาอากาศจึงสัมผัสวัสดุได้ดีขึ้น (จิตธนา และคณะ, 2546)

การเปลี่ยนแปลงคุณภาพของอาหารหรือวัสดุชีวภาพเนื่องจากการอบแห้ง

การอบแห้งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของอาหาร เนื่องจากอาหารมีการสูญเสียน้ำและได้รับความร้อน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงคุณภาพที่เห็นได้ชัดเจนระหว่างการอบแห้ง คือ การหดตัวของชิ้นอาหาร การอบแห้งที่ใช้อุณหภูมิสูงจะทำให้ผิวของอาหารแข็งตัวอย่างรวดเร็ว ช่วยปิดกั้นการระเหยของน้ำจากภายในวัสดุไม่ให้ออกมาสู่ภายนอก เป็นผลให้อัตราการอบแห้งลดลด นอกจากการหดตัวแล้วยังมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการอบแห้ง รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น สี กลิ่น เนื้อของผลิตภัณฑ์ คุณค่าทางสารอาหาร เมื่ออาหารได้รับความร้อนสูงผิวชั้นนอกจะเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล (browning reaction) ส่วนใหญ่

แล้วปฏิกิริยาดังกล่าวจะทำให้รสชาติไม่ดี ลักษณะภายนอกไม่น่าดู ทั้งนี้การเกิดสีน้ำตาลในอาหารมี 2 แบบ คือ ปฏิกิริยาที่มีเอนไซม์เกี่ยวข้อง โดยการเกิดสีน้ำตาลจะเกิดเนื่องจากเอนไซม์ที่ยังคงทำงานอยู่เมื่อสัมผัสกับอากาศจะเกิดสีน้ำตาล แต่ปฏิกิริยาที่ไม่มีเอนไซม์เกี่ยวข้องแต่มีน้ำตาลเข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งอาจแบ่งได้เป็นปฏิกิริยาเมไลเซชัน (caramelization reaction) ซึ่งเกิดขึ้นจากเมื่อวัสดุได้รับความร้อนที่สูงมากเกินไป ในขณะที่ปฏิกิริยาเมลลาร์ด (maillard reaction) จะเกิดขึ้นเมื่อมีส่วนสารประกอบไนโตรเจน เมื่อได้รับความร้อนสูง ผลต่อคุณค่าทางอาหาร พบว่าอาหารส่วนใหญ่จะเกิดการสูญเสียสารอาหารในระหว่างการอบแห้งโดยจะเกิดขึ้นที่ผิวนอกของอาหาร ดังนั้นสัดส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรจึงมีความสำคัญในการหาการสูญเสียสารอาหาร (นิธิยา, 2544; สมชาติ, 2540; ราม, 2550)

น้ำในอาหาร

น้ำในอาหารนับเป็นสารประกอบหลักที่มีอยู่ในอาหาร โดยเฉพาะอาหารสด เช่น ผัก ผลไม้ เนื้อสัตว์ ไข่ นม น้ำมีอิทธิพลต่อสมบัติ และคุณภาพด้านต่างๆ ของอาหาร ทั้งสมบัติทางกายภาพ (physical properties) ความหนืด (viscosity) สมบัติด้านเนื้อสัมผัส (textural properties) ซึ่งอาหารจะมีน้ำอยู่ระหว่าง 7-95% น้ำที่อยู่ในอาหารมักเรียกว่า ความชื้น โดยมีอยู่ในรูปน้ำอิสระ (free water) และน้ำที่เกาะเกี่ยวกับสารอื่น (bound water)

น้ำอิสระเป็นน้ำที่แทรกอยู่ในช่องว่างของอาหาร เป็นน้ำที่มีสารอื่นๆ ละลายอยู่หรือแขวนลอยอยู่ น้ำชนิดนี้จะอยู่รอบๆ เซลล์หรืออยู่ภายในเซลล์เป็นน้ำส่วนใหญ่ที่พบในอาหาร สามารถละลายได้ แต่น้ำส่วนนี้ยังมีคุณสมบัติไม่เหมือนกับน้ำในธรรมชาติอย่างแท้จริง จึงมักเรียกน้ำส่วนนี้ว่า แอกทีฟวอเตอร์ (active water: a_w) ซึ่งหมายถึงน้ำที่ยังคงรักษาคุณสมบัติของน้ำอิสระไว้ได้ น้ำอิสระในอาหารมีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสและการเก็บรักษาอาหารอย่างมาก เนื่องจากน้ำมีส่วนก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี และทางชีวภาพของอาหาร รวมทั้งจุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ในเจริญเติบโต และการดำรงชีวิตซึ่งเป็นสาเหตุของการเน่าเสียในอาหาร ดังนั้นการเก็บรักษาอาหารจึงนิยมใช้การระเหยน้ำอิสระออกจากอาหาร โดยการอบแห้ง อาหารแต่ละชนิดมีความชื้น หรือปริมาณน้ำอิสระไม่เท่ากัน โดยอาหารที่มีน้ำอิสระมาก (วอเตอร์แอคทิวิตี้สูง) จะเน่าเสียง่ายเนื่องจากจุลินทรีย์สามารถเจริญเติบโตได้ดี การทราบปริมาณน้ำอิสระในอาหารจึงมีความจำเป็นมากในการที่จะคาดเดาได้ว่าอาหารจะเสียด้วยจุลินทรีย์หรือไม่ และสามารถบอกถึงอายุการเก็บรักษาได้ (ณรงค์, 2538; วิไล, 2547)

การวัดค่าวอเตอร์แอคทิวิตี้จะทำโดยการวัดค่าความชื้นของอากาศแวดล้อม ซึ่งสามารถแบ่งวิธีการวัดออกเป็น 2 วิธี ได้แก่ วิธีแบบสถิต (isopiestic methods) และวิธีแบบพลวัต

(dynamic methods) โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการหาค่าวอเตอร์แอคทีวิตี้แบบพลวัต ซึ่งสามารถทำได้โดยการวัดค่าความชื้นสัมพันธ์ของอาหารในภาชนะปิดด้วยเครื่องมือซึ่งสามารถวัดค่าความชื้นสัมพัทธ์ของพื้นที่อากาศว่างที่มีการเคลื่อนที่ภายในภาชนะปิดบรรจุอาหารด้วยเซ็นเซอร์แบบต่างๆ

การวิเคราะห์ความชื้น (moisture content) หรือปริมาณน้ำมีความสำคัญในกระบวนการแปรรูปอาหารหรือวัสดุชีวภาพ และการวิเคราะห์ทางเคมีของอาหาร เช่น อาหารที่มีความชื้นหรือน้ำมากจะเสื่อมเสียอย่างรวดเร็วเนื่องจากความร้อน สำหรับการวิเคราะห์ความชื้นเริ่มต้น และความชื้นสมดุล เพื่อที่จะนำข้อมูลดังกล่าวไปใช้ในการวิเคราะห์สมดุลมวล และสมดุลความร้อนในระหว่างการอบแห้ง

1. การวิเคราะห์ปริมาณความชื้นเริ่มต้น (initial moisture content) ความชื้นเป็นตัวบอกปริมาณน้ำที่มีอยู่ในอาหารหรือวัสดุทางชีวภาพ ซึ่งโดยทั่วไปจะบอกได้ 2 แบบ คือ เมื่อเทียบกับมวลทั้งหมดของอาหารหรือวัสดุทางชีวภาพ เรียกว่า ความชื้นน้ำหนักเปียก และเมื่อเทียบกับมวลแห้งของอาหารหรือวัสดุทางชีวภาพ เรียกว่า ความชื้นน้ำหนักแห้ง ซึ่งสมการ (1)-(2) แสดงการคำนวณค่าความชื้นทั้งสองมาตรฐาน ซึ่งความชื้นน้ำหนักแห้งนิยมใช้ในเอกสารวิชาการ เนื่องจากน้ำหนักแห้งจะมีค่าคงที่เสมอไม่เปลี่ยนไปตามระยะเวลาการอบแห้ง ดังนั้นจึงง่ายในการอ้างอิง

ความชื้น (น้ำหนักเปียก)

$$MC_{wb} = \frac{M_w}{M_{w+d}} \tag{1}$$

ความชื้น (น้ำหนักแห้ง)

$$MC_{db} = \frac{M_w}{M_d} \tag{2}$$

เมื่อ MC_{wb} คือ ความชื้นน้ำหนักเปียก (g_{water}/g_{weight})
MC_{db} คือ ความชื้นน้ำหนักแห้ง ($g_{water}/g_{dry\ mattert}$)
M_w คือ มวลของน้ำในอาหาร (g)
M_d คือ มวลของแข็งในอาหาร (g)
M_{w+d} คือ มวลทั้งหมดของอาหาร (g)

สำหรับหน่วยของความชื้นนั้นสามารถบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ โดยการคูณด้วย 100 และตัวย่อด้านท้าย คือ %(wb.) หมายถึง เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักเปียก) และ %(db.) หมายถึง

เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักแห้ง) สำหรับการเปลี่ยนความชื้นจากมาตรฐานหนึ่งสู่อีกมาตรฐานหนึ่งสามารถทำได้โดยใช้สมการ (3)-(4)

$$MC_{wb} = \frac{MC_{db}}{MC_{db} + 1} \tag{3}$$

$$MC_{db} = \frac{MC_{wb}}{1 - MC_{db}} \tag{4}$$

การหาน้ำหนักของอาหารหรือวัสดุทางชีวภาพสุดท้ายเมื่อทราบความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้าย ในกรณีที่ทราบน้ำหนักเริ่มต้นของอาหารที่ต้องการอบแห้ง โดยสามารถหาน้ำหนักสุดท้ายของอาหารได้จากสมการ (5)

$$W_f = W_i \frac{(100 - MC_i)}{(100 - MC_f)} \tag{5}$$

เมื่อ MC_i คือ ความชื้นเริ่มต้น (%(wb.))

MC_f คือ ความชื้นสุดท้าย (%(wb.))

W_i คือ น้ำหนักอาหารเริ่มต้นก่อนการอบแห้ง (g)

W_f คือ น้ำหนักอาหารสุดท้ายหลังการอบแห้ง (g)

2. การวิเคราะห์ปริมาณความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content) สามารถแบ่งวิธีการเข้าสู่สมดุลตามการเคลื่อนที่ของอากาศได้ 2 วิธี ได้แก่ วิธีเชิงสถิต (isopiestic methods) เป็นวิธีการวัดความชื้นสมดุลที่วัสดุเข้าสู่จุดสมดุลกับสภาพแวดล้อม โดยปราศจากการก่อกวนด้านพลศาสตร์ของอากาศหรือวัสดุ โดยนิยมนำสารเคมีที่มีความสามารถในการดูดซับความชื้นส่วนเกินมาใช้ ได้แก่ สารละลายเกลืออิ่มตัวหรือสารละลายกรด และวิธีเชิงพลวัต (dynamic methods) เป็นการปล่อยให้อาหารหรือวัสดุทางชีวภาพสัมผัสกับอากาศแวดล้อม โดยทำให้อากาศหรือผลิตภัณฑ์เคลื่อนไหว วิธีนี้อาหารหรือวัสดุทางชีวภาพจะเข้าสู่สมดุลกับสิ่งแวดล้อมอย่างรวดเร็ว จึงเหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ที่ความชื้นสูง

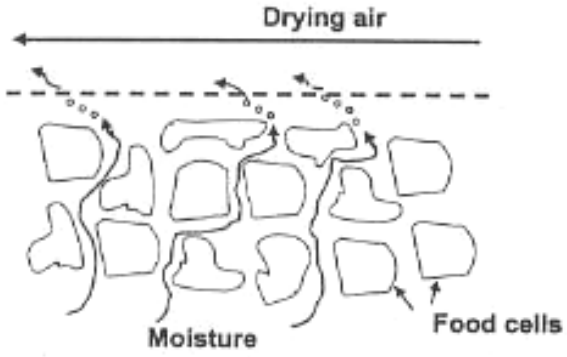
การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ (open sun drying) เป็นวิธีหนึ่งของการถนอมอาหารแบบดั้งเดิมที่นิยมใช้กันในระดับครัวเรือนมาช้านาน เนื่องจากเป็นวิธีที่มีความสะดวก มีต้นทุนต่ำเมื่อเทียบกับการอบแห้งแบบอื่นๆ และมีอุปกรณ์ไม่ยุ่งยากซับซ้อน โดยหลักการอบแห้งด้วยวิธีดังกล่าว คือการไล่ความชื้นออกจากวัสดุโดยการถ่ายเทความร้อนให้แก่วัสดุด้วยวิธีการพาด้วยอากาศ (convection) หรือการแผ่รังสี (radiation) เพื่อเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุ ให้ความชื้นกลายเป็นไอระเหยออกไป โดยเริ่มต้นที่พื้นผิวของวัสดุอบแห้งจนเกิดการแพร่ความชื้นภายในเนื้อวัสดุมาสู่พื้นผิว และจะถูกไล่ออกไปด้วยวิธีการพาด้วยอากาศต่อไป ทำให้ความชื้นโดยรวมของวัสดุลดลง โดยที่ความสามารถของอากาศในการทำให้เกิดการระเหยจากวัสดุ (drying potential) จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ รวมถึงความเร็วลมที่นำพาความร้อน ซึ่งวิธีการดังกล่าวจะใช้เวลานาน อีกทั้งยังทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพไม่แน่นอน การควบคุมคุณภาพทำได้ยาก เนื่องจากคุณภาพของผลิตภัณฑ์จะขึ้นอยู่กับลักษณะอากาศและช่วงเวลาที่ใช้ในการตากแดด รวมทั้งอาจเกิดการปนเปื้อนฝุ่นละอองและอาจมีแมลงซึ่งเป็นสาเหตุของการปนเปื้อนเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งอาจส่งผลให้ผลิตภัณฑ์อบแห้งไม่เป็นที่ยอมรับในด้านคุณภาพได้

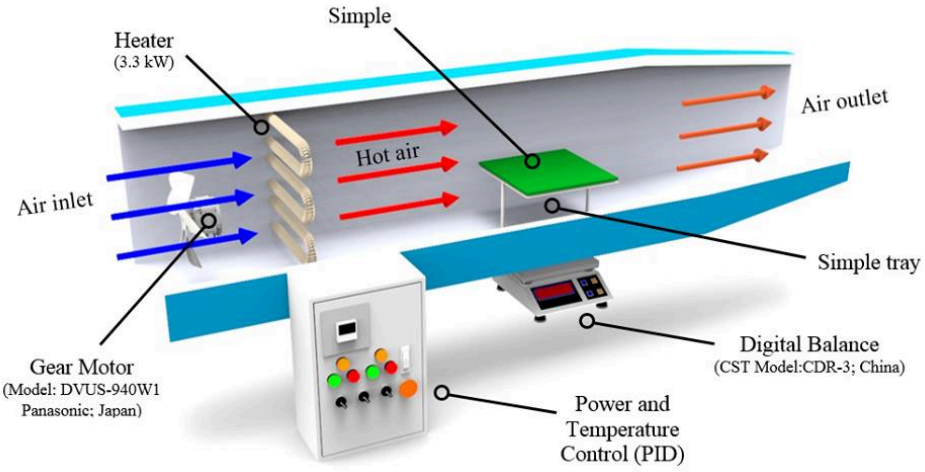
การอบแห้งด้วยลมร้อน

การอบแห้งด้วยลมร้อน (hot air drying) เป็นวิธีการอบแห้งที่นิยมใช้กันมาก เนื่องจากมีความสะดวกต่อการปฏิบัติงานและเป็นกระบวนที่ควบคุมได้ง่าย และไม่ซับซ้อนรวมทั้งยังมีต้นทุนในการดำเนินงานที่ต่ำ ภาพ 3 แสดงกลไกการถ่ายเทมวลหรือความชื้นของการอบแห้ง เมื่ออากาศหรือลมร้อนพัดผ่านหน้าอาหารที่เปียก ความร้อนจะถูกถ่ายเทไปสู่ผิวของอาหารหรือวัสดุทางชีวภาพ และน้ำหรือความชื้นจะเกิดการระเหยออกมาด้วยความร้อนแฝงของการเกิดไอ (latent heat of vaporization) ส่วนความชื้นที่อยู่ภายในจะค่อยๆ แพร่กระจายมายังผิว โดยอัตราการแพร่กระจายความชื้นจะขึ้นอยู่กับศักยภาพของการถ่ายเทความร้อน และความแตกต่างของอุณหภูมิ โดยไอน้ำจะแพร่ผ่านฟิล์มอากาศและถูกพัดพาไปโดยลมร้อนที่เคลื่อนที่ สภาวะดังกล่าวจะทำให้ความดันไอที่ผิวหน้าของอาหารต่ำกว่าความดันไอด้านในอาหาร เป็นผลให้เกิดความแตกต่างของความดันไอน้ำ ชั้นด้านในของอาหารจะมีความดันไอสูงและค่อยๆ ลดต่ำลงเมื่อชั้นอาหารเข้าใกล้อากาศแห้ง ความแตกต่างนี้ทำให้เกิดแรงดันเพื่อไล่น้ำออกจากอาหาร แต่อย่างไรก็ตามการอบแห้งด้วยลมร้อน ต้องมีตัวกลางทางความร้อนเพื่อถ่ายเทพลังงานไปสู่ความชื้นภายในอาหาร ทำให้ต้องใช้เวลาในการระเหยความชื้นออกจากชั้นในโครงสร้างเซลล์ยาวนาน จึงส่งผลต่อคุณภาพของ

อาหารในด้านต่าง ๆ เช่น อาหารเกิดการหดตัว การเกิดเปลือกแข็ง การสูญเสียคุณค่าทางอาหาร สารระเหย การเปลี่ยนแปลงสี และการเกิดสีน้ำตาล เป็นต้น (วิไล, 2547)



ภาพ 3 การถ่ายเทความชื้นออกจากอาหารหรือวัสดุทางชีวภาพในระหว่างการอบแห้ง
ที่มา: วิไล (2547)



ภาพ 4 แผนภาพของเครื่องอบแห้งแบบถาด
ที่มา: ปองพล และ ฤทธิชัย (2557)

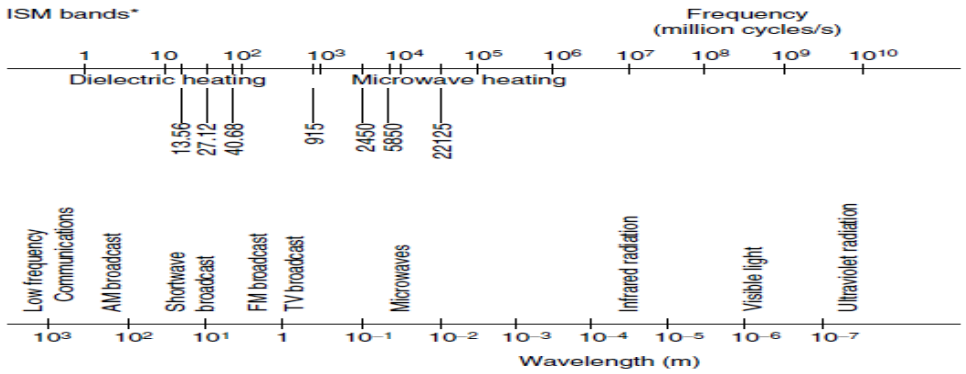
เครื่องอบแห้งที่ใช้ในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะมีฉนวนไว้เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน และทำให้สามารถนำอากาศมาหมุนเวียนใช้ใหม่เพื่อประหยัดพลังงาน โดยเครื่องอบแห้ง

ในปัจจุบันมีหลายชนิด ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงเครื่องอบแห้งแบบถาด (tray dryer) ภาพ 4 แสดงแผนภาพของเครื่องอบแห้งแบบถาด

เครื่องอบแห้งแบบถาดประกอบด้วยถาดเตี้ยๆ ที่มีช่องตาข่ายอยู่ด้านล่างและบุด้วยฉนวน โดยอากาศร้อนจะไหลเวียนอยู่ในตู้ที่ความเร็วลม 0.5-5 m/s มีระบบท่อหรือแบฟเฟิล เพื่อนำลมร้อนขึ้นไปด้านบนผ่านแต่ละถาดเพื่อให้ลมร้อนกระจายอย่างสม่ำเสมอ อาจมีการติดตั้งเครื่องทำความร้อนเพิ่มด้านบนหรือด้านข้างของถาดเพื่อเพิ่มอัตราการอบแห้ง เครื่องอบแห้งชนิดนี้นิยมใช้ในการผลิตอาหารในปริมาณต่ำ ใช้เงินลงทุนและค่าดูแลรักษาต่ำ

การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ

คลื่นไมโครเวฟจัดเป็นนวัตกรรมการสร้างความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีประสิทธิสูง ซึ่งสามารถสร้างความร้อนภายในตัวผลผลิตทางการเกษตรได้ดี และไม่มีผลกระทบจากการถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกลาง ดังนั้นการประยุกต์ใช้คลื่นไมโครเวฟในกระบวนการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตร จึงเป็นแนวทางเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการอบแห้ง (ฤทธิชัย, 2553)

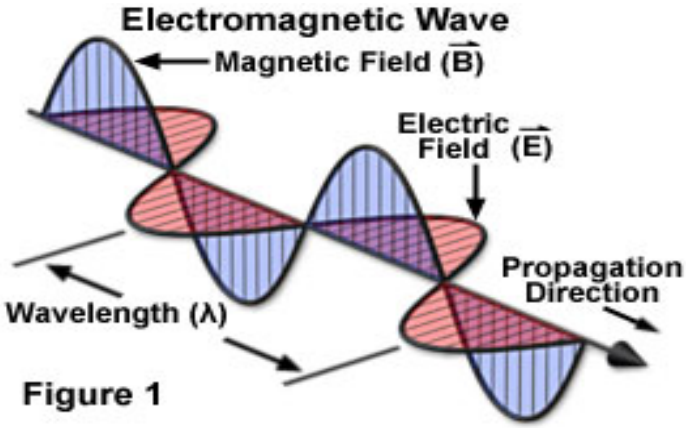


ภาพ 5 แถบสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
ที่มา: ผดุงศักดิ์ (2551)

เทคโนโลยีการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ (microwave drying technology) เป็นนวัตกรรมการสร้างความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูง คลื่นไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีลักษณะเฉพาะทั้งความยาวคลื่น (wavelength: λ) และความถี่ (frequency: f) ดังแสดงในภาพ 5 ซึ่งจะเห็นได้ว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในหนึ่งรอบคลื่นจะมีการผสมผสานกันของทั้ง

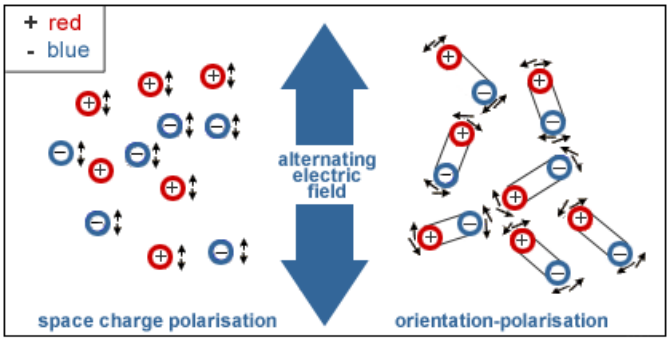
สนามไฟฟ้า (electric field) และสนามแม่เหล็ก (magnetic field) คลื่นไมโครเวฟใช้ย่านความถี่ตั้งแต่ 300 MHz ถึง 300 GHz อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 1 mm ถึง 1 m จากข้อตกลงของคณะกรรมการระดับนานาชาติว่าด้วยการจัดสรรคลื่นความถี่ด้วยวัตถุประสงค์ทางด้านอุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์ และทางด้านการแพทย์ (Industrial Scientific and Medical: ISM) ในทางปฏิบัติของการประยุกต์ใช้คลื่นเพื่อสร้างความร้อน เช่น ในกระบวนการอบแห้งซึ่งจะสามารถกระทำได้ที่ความถี่เท่ากับ 13.56, 27.12, 40.68, 915 และ 2,450 MHz

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงย่านความถี่ไมโครเวฟไม่ใช่พลังงานความร้อนแต่คลื่นเหล่านี้สามารถเปลี่ยนแปลงเป็นความร้อนได้เมื่อเกิดอันตรกิริยากับวัสดุ (lossy material) เมื่อพิจารณาประเด็นในภาพ 6 จะเห็นว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า คือ คลื่นซึ่งมีพลังงานและแอมพลิจูดเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง ยกตัวอย่างเช่น เมื่อทำการพิจารณาแยกส่วนของสนามไฟฟ้า (E) จะพบว่าบางจุดบนคลื่นมีค่าเป็นศูนย์จากนั้นจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดและสลายลดลงกลับมาที่ศูนย์ และเริ่มเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดอีกครั้งในทิศทางของขั้วตรงข้ามก่อนสลายกลับมาที่ศูนย์อีกครั้งโดยสิ่งเดียวที่เกิดขึ้นนี้ก็เช่นเดียวกับกรณีของสนามแม่เหล็ก (B) นอกจากนั้นค่าแอมพลิจูดตลอดแกน X ของคลื่นแทนกำลังของสนามไฟฟ้าและแม่เหล็กซึ่งวัดในหน่วยของโวลล์หรือแอมแปร์ต่อหน่วยระยะทาง ตามลำดับ และการเปลี่ยนแปลงแบบสลับขั้วไปมาและลดลงจนกระทั่งมีค่าเป็นศูนย์เป็นสาเหตุให้เกิดแรงเค้นกระทำต่อไอออน อะตอมและโมเลกุล ซึ่งสามารถเปลี่ยนไปเป็นความร้อนในที่สุด โดยหากกำลังของสนามมีค่ามากจะยิ่งส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงมากขึ้นตามไปด้วย (ผดุงศักดิ์, 2551)



ภาพ 6 ไดอะแกรมแสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
ที่มา: ผดุงศักดิ์ (2551)

เมื่อคลื่นไมโครเวฟถูกดูดซับเข้าสู่อาหารจะเกิดความร้อน 2 แบบ ประกอบไปด้วย กลไกการเหนี่ยวนำเชิงไอออน (ionic conduction) และกลไกชนิดการหมุนของทั้งสองขั้ว (dipolar rotation) ภาพ 7 แสดงกลไกการเหนี่ยวนำเชิงประจุไอออนภายใต้สนามไฟฟ้า โดยผลจากการเหนี่ยวนำจะทำให้ประจุไอออนขั้วบวกกับขั้วลบเกิดการสั่นและการหมุน เกิดการเสียดสีกันระหว่างโมเลกุลจนเกิดเป็นพลังงานความร้อน การเกิดความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟในผลผลิตทางการเกษตรสามารถอธิบายในลักษณะของการที่คลื่นไมโครเวฟเหนี่ยวนำให้โมเลกุลของน้ำภายในวัสดุทางการเกษตรเกิดการหมุนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงขั้วไฟฟ้าอย่างรวดเร็ว ผลของการหมุนนี้ทำให้เกิดการเสียดสีของโมเลกุลของน้ำภายในวัสดุ ก่อให้เกิดความร้อนในผลผลิตทางการเกษตรได้อย่างรวดเร็ว (Assawarachan and Noomhorm, 2008)



ภาพ 7 กลไกการเหนี่ยวนำเชิงไอออนและกลไกลชนิดการหมุนของทั้งสองขั้ว
ที่มา: PÜSCHNER Microwave Power System (no date)

การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ (microwave drying) เป็นนวัตกรรมการสร้างความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูง สามารถสร้างความร้อนทั้งบริเวณผิวนอกและภายในโครงสร้างเซลล์ของผลิตภัณฑ์จึงช่วยเร่งอัตราการอบแห้งได้เป็นอย่างดี โดยไม่มีผลกระทบจากการถ่ายเทความร้อนในระหว่างการอบแห้ง การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟจึงเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพของการอบแห้ง แต่อย่างไรก็ตามการอบแห้งที่มีอัตราการถ่ายเทมวลที่เร็วเกินไป บางครั้งอาจเกิดผลเสียต่อเนื้อสัมผัสได้ในบางกรณี นอกจากนี้มักพบรอยไหม้ในบางตำแหน่งของผลิตภัณฑ์เนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิภายในของอาหารหรือวัสดุชีวภาพในระหว่างการอบแห้ง และบริเวณผิววัสดุจะเกิดการ

ไหม้เนื่องจากได้รับความร้อนมากเกินไป และยังมีข้อจำกัดเนื่องจากมีต้นทุนในการผลิตสูง (รุ่งนภา , 2549; น้ำฝน และคณะ, 2555)

การอบแห้งด้วยแสงอาทิตย์ การอบแห้งด้วยลมร้อน และการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งการอบแห้งแต่ละวิธีมีข้อได้เปรียบ และข้อจำกัดในลักษณะต่างกันไป โดยตาราง 2 จะเปรียบเทียบข้อได้เปรียบและข้อจำกัดในทางด้านต่างๆ ของวิธีการอบแห้งที่กล่าวมา

ตาราง 2 การเปรียบเทียบข้อได้เปรียบและข้อจำกัดของวิธีการอบแห้งแบบต่างๆ

วิธีการอบแห้ง	ข้อได้เปรียบ	ข้อจำกัด
การอบแห้งด้วยแสงอาทิตย์ (open sun drying)	มีขั้นตอนการใช้งานง่าย มีอุปกรณ์ไม่ยุ่งยากซับซ้อน และมีต้นทุนต่ำ	ใช้ระยะเวลานาน คุณภาพไม่แน่นอน การควบคุมคุณภาพทำได้ยาก และอาจเกิดการปนเปื้อนฝุ่นละอองและแมลง
การอบแห้งด้วยลมร้อน (hot air drying)	เป็นวิธีที่ง่ายต่อการควบคุมกระบวนการ และมีค่าใช้จ่ายในกระบวนการอบแห้งต่ำ	ใช้เวลาในการอบแห้งนาน อาจทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการสูญเสียคุณภาพได้
การอบแห้งด้วยไมโครเวฟ (microwave drying)	มีอัตราการอบแห้งที่เร็ว ใช้เวลาในการอบแห้งสั้น และช่วยลดการหดตัวของผลิตภัณฑ์ได้	มีความยุ่งยากในการควบคุมอุณหภูมิ การกระจายความร้อนเนื้ออาหารไม่สม่ำเสมอทำให้อาหารเกิดการไหม้เป็นจุดๆ ไม่เหมาะกับอาหารที่มีความหนามากเนื่องจากข้อจำกัดในการทะลุทะลวงของคลื่นมีค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับการลงทุนการใช้งานของเครื่องมือค่อนข้างสูง และสิ้นเปลืองพลังงาน

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งเป็นการจำลองสภาวะการอบแห้งและศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่างๆ ของกระบวนการ ตลอดจนการทดลองและเปรียบเทียบเงื่อนไขของวิธีการอบแห้ง เพื่อกำหนดสภาวะที่เหมาะสมแทนการทดลองจริง เนื่องจากมีความสะดวกและช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในการทดลอง ทั้งนี้การจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งจะช่วยให้ได้ข้อมูลจำนวนมาก ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการอบแห้งอาหารหรือวัสดุทางชีวภาพได้อย่างรวดเร็ว (สักกมน, 2555) โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งสามารถจำแนกออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ แบบจำลองทางทฤษฎี (theoretical model) แบบจำลองกึ่งทฤษฎี (semi-theoretical model) และแบบจำลองเอมพิริคัล (empirical model)

รายงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งอาหารหรือวัสดุชีวภาพจำพวกผักและผลไม้นิยมใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งในรูปของแบบจำลองเอมพิริคัล ซึ่งเป็นแบบจำลองอย่างง่าย สามารถใช้ทำนายจลนพลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงความชื้นของอาหารหรือวัสดุทางชีวภาพโดยอาศัยการปรับค่าคงที่ของแบบจำลองหรือการปรับเส้นโค้ง (curve fitting) ให้ผลการจำลองสอดคล้องกับผลการทดลอง เช่น แบบจำลองของ Newton, Henderson and Pabis, Page, Modified Page, Wang and Singh, Midilli et al. และ Logarithmic ตาราง 3 แสดงรูปแบบความสัมพันธ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบต่างๆ (Alibas, 2007; Wang et al., 2007; Ozkan et al., 2007; สุเนตร และ ฤทธิชัย, 2554; Doymaz, 2006)

ตาราง 3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งในรูปของแบบจำลองเอมพิริคัล

model name	model equation	reference
Newton	$MR = \exp(-kt)$	McMinn (2006)
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	Pongtong et al. (2011)
Modified Page	$MR = \exp(-(kt)^n)$	Evin (2012)
Midilli et al.	$MR = a\exp(-kt^n) + bt$	Assawarachan and Noomhorm (2011)
Henderson and Pabis	$MR = a\exp(-kt)$	Assawarachan and Noomhorm (2011)
Logarithmic	$MR = a\exp(-kt) + c$	Evin (2012)
Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	Evin (2012)

นอกจากนี้แบบจำลองเอมพิริคัลแล้วยังมีแบบจำลองที่นิยมใช้ในการทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นในระหว่างการอบแห้ง ได้แก่ แบบจำลองกึ่งทฤษฎี ซึ่งมีความสัมพันธ์อยู่ในรูปกฎข้อที่สองของฟิค (Fick's second law) ในสภาวะการแพร่ความชื้นที่ไม่คงที่สามารถใช้ในการหาอัตราส่วนความชื้นดังแสดงในสมการ (6) สำหรับวัสดุที่มีรูปทรงเป็นแผ่นระนาบที่มีความยาวมากๆ (infinite slab) และมีความหนาครึ่งหนึ่งของตัวอย่างอาหารหรือวัสดุชีวภาพ เช่น กล้วยฉาบ สาหร่ายทะเลแผ่น (สุเนตร และ ฤทธิชัย, 2554; Wang et al., 2007)

$$MR = \frac{8}{\pi^2}\exp\left(-\pi^2 \frac{D_{eff} \cdot t}{4L^2}\right) \tag{6}$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น

D_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (m^2/s)

L คือ ความหนาครึ่งหนึ่งของตัวอย่าง (m)

t คือ เวลาในการอบแห้ง (s)

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลสามารถคำนวณจากค่าความชัน (slope) ของกราฟเส้นตรงซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง ln(MR) และเวลาในการอบแห้ง (t) ดังแสดงในสมการ (7)

$$slope = -\frac{\pi^2 \cdot D_{eff}}{4L^2} \tag{7}$$

การวิเคราะห์พลังงานกระตุ้นสำหรับการแพร่ (activation energy for diffusion: E_a) ด้วยสมการอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) ดังแสดงในสมการ (8) สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อน และสมการ (9) สำหรับการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Pongtong et al., 2011; Özbek and Dadali, 2007; สุเนตร และ ฤทธิชัย, 2554)

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \tag{8}$$

เมื่อ D_0 คือ ปัจจัยก่อนเลขชี้กำลัง (1/ min)

E_a คือ พลังงานกระตุ้นของการอบแห้งด้วยลมร้อน (kJ/mol)

R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ มีค่าเท่ากับ 0.008314 (kJ/mol K)

T คือ อุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง (K)

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{E_a \cdot m}{P}\right) \tag{9}$$

เมื่อ E_a คือ พลังงานกระตุ้นของการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ (W/g)

k คือ ค่าคงที่การอบแห้ง (1/min)

k_0 คือ แฟกเตอร์ความถี่ (1/ min)

m คือ น้ำหนักของตัวอย่าง (g)

P คือ พลังงานของคลื่นไมโครเวฟ (W)

ทั้งนี้ค่าพลังงานกระตุ้นสำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อน สามารถคำนวณจากค่าความชัน (slope) ของกราฟเส้นตรงที่พล็อตระหว่าง $\ln(D_{eff})$ และ $(1/T)$ ดังแสดงในสมการ (10) ในขณะที่ค่าพลังงานกระตุ้นสำหรับการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ คำนวณจากค่าความชัน (slope) ของกราฟเส้นตรงที่พล็อตระหว่าง $\ln(k)$ และน้ำหนักของอาหารหรือวัสดุทางชีวภาพต่อพลังงานของคลื่นไมโครเวฟ (m/P) ดังแสดงในสมการ (11)

$$slope = -\frac{E_a}{R} \tag{10}$$

$$slope = -E_a \tag{11}$$

การวิเคราะห์ความแม่นยำของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการอบแห้งด้วยวิธีทางสถิติ มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความเข้ากันได้ของแบบจำลองกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งจากรายงานวิจัยหลายๆ เรื่อง พบว่าพารามิเตอร์ที่นิยมใช้เพื่อประเมินความแม่นยำและความเหมาะสมของแบบจำลองในการทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างการอบแห้ง ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination: R^2) ค่าการลดลงไคกำลังสอง (chi square: χ^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (root mean square error: *RMSE*) (Lin et al., 1998; Waewsak et al., 2006) โดยที่ค่า R^2 เป็นค่าพารามิเตอร์

ทางสถิติที่สำคัญในการบ่งบอกคุณภาพของรูปแบบสมการในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้ง แบบจำลองที่ยิ่งมีค่าเข้าใกล้ 1.0 แสดงว่ามีความแม่นยำมาก ในขณะที่ค่า χ^2 และค่า *RMSE* เป็นพารามิเตอร์ทางสถิติที่ใช้บ่งบอกความผิดพลาดในการทำนายค่าของแบบจำลอง ดังนั้นแบบจำลองที่มีความแม่นยำและเหมาะสมในการทำนายจะให้ค่า R^2 สูง แต่ค่า χ^2 และค่า *RMSE* มีค่าต่ำ โดยสมการ (12)-(14) แสดงการคำนวณหาพารามิเตอร์ดังกล่าว

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n} MR_{i,\exp} \times MR_{i,pre}}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^{n} MR_{i,\exp}{}^2 \right) \left(\sum_{i=1}^{n} MR_{i,pre}{}^2 \right)}} \right]^2 \tag{12}$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N} \left(MR_{i,\exp} - MR_{i,pre} \right)^2}{N - n} \tag{13}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} \left(MR_{i,\exp} - MR_{i,pre} \right)^2}{N}} \tag{14}$$

เมื่อ R^2 คือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

χ^2 คือ ค่าการลดลงไคกำลังสอง

RMSE คือ ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย

$MR_{i,exp}$ คือ อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลอง

$MR_{i,pre}$ คือ อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทำนายของแบบจำลอง

N คือ จำนวนค่าสังเกต

n คือ จำนวนค่าคงที่ในแบบจำลอง

การวิเคราะห์สี

โดยทั่วไปการที่ผู้บริโภคจะยอมรับผลิตภัณฑ์อาหารหนึ่งๆ จะขึ้นอยู่กับปัจจัยคุณภาพที่สำคัญ คือ สีและลักษณะปรากฏ (color and appearance) กลิ่นรส (flavor) และลักษณะเนื้อสัมผัส (texture) สีและลักษณะปรากฏเป็นปัจจัยคุณภาพที่สำคัญมาก โดยเฉพาะกับการตัดสินใจซื้อ

ผลิตภัณฑ์ครั้งแรก เนื่องจากโดยปกติผู้บริโภคไม่มีโอกาสในการทดลองรับประทานผลิตภัณฑ์ ดังนั้นปัจจัยในการตัดสินใจซื้อส่วนใหญ่จะอยู่ที่คุณภาพด้านสีและลักษณะปรากฏเท่านั้น

การตรวจสอบสีด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ เป็นอุปกรณ์วัดสีที่นิยมใช้ในปัจจุบันซึ่งวัดสีของวัตถุโดยการวัดปริมาณแสงที่สะท้อน หรือแสงที่ถูกดูดกลืน หรือแสงที่ผ่านลอดมาจากวัตถุที่ความยาวคลื่นหนึ่งๆ ในช่วงที่ตามองเห็น (380-770 nm) ใช้ความสัมพันธ์ของปริมาณสารให้สีกับปริมาณแสงที่บันทึกได้ นำมาคำนวณหาปริมาณสารที่ให้สีอยู่ในวัตถุนั้น การตรวจสอบสีด้วยระบบ CIE เป็นวิธีการวัดสีที่กำหนดขึ้นโดยองค์กรที่มีบทบาทสำคัญในการกำหนดมาตรฐานด้านสีคือ Commission International de I'Eclairage (CIE) ซึ่งเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างในวงการวิชาการและการวิจัย ซึ่งระบบ CIELAB เป็นกระบวนการบรรยายสีแบบ 3 มิติ คือ L^* หมายถึงค่าความสว่าง (+) /ความมืด (-) ค่า a^* หมายถึง ความเป็นสีแดง (+) /ความเป็นสีเขียว (-) และค่า b^* หมายถึงความเป็นสีเหลือง (+) /ความเป็นสีน้ำเงิน (-) ในระบบนี้สามารถวัดค่าสีออกมาเป็นตัวเลขถือเป็นการวัดค่าโดยใช้เครื่องมือ เข้าใจได้ง่ายและค่าสีมีความสม่ำเสมอมากกว่าค่าสีในระบบ Hunter Lab

ข้อมูลที่ได้จากการวัดค่าสีระบบต่างๆ นั่นคือ ค่าสี แต่โดยทั่วไปในการใช้งานผู้ผลิตไม่ได้ต้องการทราบค่าสีของผลิตภัณฑ์เท่านั้น แต่ต้องการทราบว่าสีของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตในรุ่นหนึ่งๆ นั้น ตรงตามที่มาตรฐานกำหนดหรือไม่ และผู้ผลิตควรจะยอมรับผลิตภัณฑ์ในรุ่นนั้นหรือไม่ ดังนั้นผู้ผลิตจึงต้องการทราบ ค่าความแตกต่างสีโดยรวม (total color difference: ΔE) ระหว่างผลิตภัณฑ์และมาตรฐาน ต้องการทราบค่าความแตกต่างของสีที่สามารถนำไปกำหนด ค่าการยอมรับ (tolerance) เพื่อกำหนดขอบเขตในการยอมรับ/ปฏิเสธผลิตภัณฑ์หนึ่งๆนั่นเอง โดยการวิเคราะห์ค่าความแตกต่างสีโดยรวม สามารถหาได้จากสมการ (15) (Vega-Gálvez et al., 2009; Therdthai and Zhou, 2009)

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \qquad (15)$$

เมื่อ L^*, a^* และ b^* คือค่าพารามิเตอร์สีของสาหร่ายเตาหลังการอบแห้ง และ L_0^* a_0^* และ b_0^* คือค่าพารามิเตอร์สีของสาหร่ายเตาสด

การตรวจสอบสีด้วยการใช้ระบบมุนเซล (munsell color system) ระบบสีของมุนเซลเป็นระบบที่มีชื่อเสียงและได้รับนิยมสูง มีการจัดระเบียบตัวอย่างสีที่ทำไว้บนกระดาษชิ้นเล็กๆ ตามระบบตัวเลขที่มุนเซลคิดขึ้นมาโดยขึ้นอยู่กับตัวแปร 3 ตัว คือ

1. ค่าความสด (chroma) เป็นค่าที่บอกถึงความเข้มหรือความจางของสี (saturation) ในสัดส่วนของสี (hue) ที่มีอยู่ในสีเทา วัดค่าเปอร์เซ็นต์จาก 0% (สีเทา) จนถึง 100% ถ้าเราเติมสีเทาลงไปในสีใดๆ สีนั้นจะอิ่มตัวน้อยลงจนในที่สุดกลายเป็นสีเทา สมการแสดงค่าที่แสดงความบริสุทธิ์ของสี คือ

$$C^* = (a^2 + b^2)^{1/2} \quad (16)$$

2. ค่าสีสัน (hue angle) เป็นสีที่สะท้อนมาจากสีของวัตถุ ซึ่งแตกต่างกันตามความยาวคลื่นแสงที่มากระทบวัตถุและสะท้อนกลับมาที่ตาเรา hue ในมุนเซล จึงเป็นชื่อเรียกชนิดของสี เช่น สีแดง สีเขียว เป็นต้น สมการแสดงค่ามุมของสีหลัก คือ

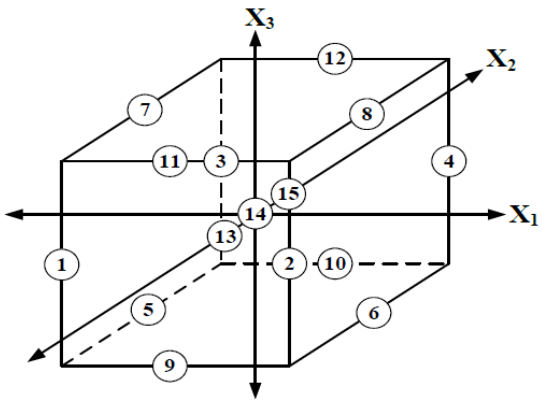
$$h^\circ = \tan^{-1}(b/a) \quad (17)$$

การหาสภาวะที่เหมาะสมของการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยลมร้อน โดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง

ในทางปฏิบัติทางอุตสาหกรรม การทดลองที่ได้รับการออกแบบมาจะมีการทำงานอย่างเป็นระบบในการสืบค้นในตัวแปรในกระบวนการ (process variable) หรือตัวแปรของผลิตภัณฑ์ (product variable) หลังจากที่ทำการกำหนดเงื่อนไขของกระบวนการ หรือองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ จึงจะสามารถทำการปรับปรุงเพื่อเพิ่มความสามารถในการผลิต ความน่าเชื่อถือ คุณภาพ และ ประสิทธิภาพ เนื่องด้วยทรัพยากรมีจำนวนจำกัด ดังนั้นการทดลองแต่ละครั้งจะต้องให้สาระข้อมูลที่สำคัญที่สุด ซึ่งการทดลองที่มีการวางแผนที่ดีจะทำให้ได้สาระข้อมูลที่สำคัญ และมีคุณภาพมากกว่าการทดลองที่เกิดขึ้นจากงานที่ไม่ได้รับการวางแผนมาก่อน และโดยเฉพาะการทดลองตามแผนที่วางไว้จะสามารถวิเคราะห์เกี่ยวกับอิทธิพลของปัจจัยที่ต้องการศึกษาได้ดีกว่าด้วย การออกแบบการทดลองสามารถแบ่งออกได้หลายวิธี ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบ็ห์นเคน (Box-Behnken design: BBD)

การออกแบบการทดลองแบบ BBD เป็นวิธีหนึ่งที่นิยมใช้เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของเงื่อนไขกระบวนการผลิตและเงื่อนไขในการผลิตที่เหมาะสม ซึ่งการออกแบบการทดลองแบบ BBD จะมีจำนวนครั้งในการทดลองที่น้อยรวมถึงมีต้นทุนที่ถูกกว่าเมื่อเทียบกับการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง (Central Composite: CCD) (ภณิกชา และคณะ, 2555; สมเกียรติ และ

ภูมินทร์, 2554; Pérez-Francisco et al., 2008) ภาพ 8 แสดงการออกแบบการทดลองแบบ BBD สำหรับ 3 ปัจจัย โดยอาศัยการทำการทดลองทั้งสิ้นจำนวน 15 การทดลอง โดยเป็นการทดลองที่ตำแหน่งกึ่งกลางซึ่งทำซ้ำจำนวน 3 การทดลอง ผลการทดลองที่ตำแหน่งกึ่งกลางจะถูกนำไปวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อหาความสมรูปของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์



ภาพ 8 การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบ็ห์นเคน
ที่มา: สมเกียรติ และ ภูมินทร์ (2554)

การหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งสาหร่ายเตาโดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (response surface methodology: RSM) เป็นการรวบรวมเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์ และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลอง รวมทั้งช่วยในการวิเคราะห์ปัญหาโดยที่ผลตอบสนองที่สนใจจะขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร และมีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบสนอง และนอกจากนี้การวิเคราะห์โดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนองยังสามารถทำให้ได้สมการทำนายกระบวนการอบแห้ง เพื่อทำนายการเปลี่ยนแปลงคุณภาพ และปริมาณสารสกัดต่างๆ ของสาหร่ายเตาอบแห้ง

ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Sripinyowanichi et al. (2012) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของปริมาณความชื้นสุดท้าย ต่ออายุการเก็บรักษา คุณภาพและการดูดซับไอโซเทอม ของการอบแห้งกากมะพร้าวด้วยลมร้อน โดยความชื้นสุดท้าย มีค่าเท่ากับ 3, 10, 15, 20 และ 25 %(db.) ซึ่งเก็บไว้ที่สภาวะอุณหภูมิ 35ºC ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ (RH) 60-75% เป็นเวลา 140 days จากการศึกษาพบว่าที่ปริมาณ

ความชื้นสุดท้าย 3 %(db.) ตัวอย่างกากมะพร้าวมีคุณภาพดีที่สุด ในด้านความขาว ปริมาณน้ำมัน และค่าเปอร์ออกไซด์ ไม่พบจุลินทรีย์ยีสต์ และรา ในระหว่างการเก็บรักษาเป็นเวลา 140 days ส่วนที่ระดับความชื้นอื่นๆ มีแนวโน้มลดลงของค่าความเป็นสีขาว และมีค่าเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความชื้น 20 และ 25 %(db.) ในขณะที่ปริมาณความชื้นสุดท้าย 15 %(db.) พบยีสต์และราในปริมาณที่ไม่เกินกำหนด แต่ไม่พบจุลินทรีย์ ทั้งนี้การอบแห้งที่ปริมาณความชื้นดังกล่าวกากมะพร้าวมีอายุการเก็บรักษาเป็นเวลา 63 days

Evin (2012) ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของจลนพลศาสตร์การอบแห้งแบบชั้นบางของกันดิเลีย (*Gundelia tournefortii* L.) ระหว่างวิธีการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับพลังงาน 90-800 W และการอบแห้งด้วยการตากแดดที่ระดับรังสีแสงอาทิตย์ 350-1100 W/m^2 พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Midilli มีความเหมาะสมในการทำนายพฤติกรรมการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟได้ดีที่สุด เนื่องจากให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) มากสุด มีค่าเท่ากับ 0.996 และมีค่าไคกำลังสอง (χ^2) ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (*RMSE*) และค่าความคลาดเคลื่อนเอนเอียงเฉลี่ย (*MBE*) น้อยที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.82×10^{-4}, 12×10^{-3} และ 1.4×10^{-4} ตามลำดับ ค่าคงที่การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟมีค่าอยู่ในช่วง 0.0098-0.2943 1/min และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น $5.5x10^{-8}$-$3.5x10^{-7}$ m^2/s แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Logarithmic สามารถอธิบายจลนพลศาสตร์การอบแห้งกันดิเลียด้วยการตากแดดได้ดีที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นเท่ากับ 2.48×10^{-8} m^2/s

Dadali et al. (2007) ศึกษาผลกระทบของระดับพลังงานคลื่นไมโครเวฟและปริมาณน้ำหนักของกระเจี๊ยบเขียวต่อการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนความชื้น อัตราการอบแห้ง และเวลาที่ใช้ในการอบแห้งระหว่างการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับพลังงานระหว่าง 180-900 W และปริมาณน้ำหนักของกระเจี๊ยบเขียว 25-100 g เพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งที่เหมาะสม โดยใช้แบบจำลองเอมพิริคัลของ Lewis, Page, Henderson and Pabis และ Logarithmic เพื่อเปรียบเทียบหาความเหมาะสมในการอบแห้งกระเจี๊ยบเขียว ผลการศึกษาพบว่าแบบจำลองของ Page มีความแม่นยำในการทำนายมากที่สุด

Ozkan et al. (2007) ศึกษาการอบแห้งใบปวยเล้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ ทำการอบแห้งใบปวยเล้งที่น้ำหนัก 50 g โดยมีความชื้นเริ่มต้น 9.01 $kg/kg_{dry\ matter}$ อบแห้งจนเหลือความชื้น 0.1 $kg/kg_{dry\ matter}$ โดยใช้พลังงานของคลื่นไมโครเวฟในช่วง 90-1000 W พบว่าเวลาที่ใช้ในการอบแห้งอยู่ระหว่าง 290-4005 s แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งของ Page สามารถอธิบายจลนพลศาสตร์การอบแห้งใบปวยเล้งแบบชั้นบางได้เหมาะสมที่สุด ที่ระดับพลังงาน 750 W

สามารถรักษาคุณภาพด้านสีและวิตามินซีได้ดีที่สุด ซึ่งใช้เวลาในการอบแห้ง 350 s และใช้พลังงานในการอบแห้งต่ำที่สุดซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.12 kW* hr

Harbourn et al. (2009) ศึกษาผลกระทบของการอบแห้งและสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมต่อการสลายตัวของสารฟีนอลิกของชาสมุนไพรจาก meadowsweet และ willow พบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 30ºC จะช่วยรักษาปริมาณสารฟีนอลิกได้ดีกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70ºC และตรวจพบปริมาณสารเควอซิทินทั้งหมด (total quercetin) ใกล้เคียงการอบแห้งแบบระเหิดและไม่มีความแตกต่างเชิงสถิต ที่มีต้นทุนการอบแห้งสูง

Jing et al. (2010) เปรียบเทียบวิธีการอบแห้งแบบต่างๆ ในการอบแห้งมันฝรั่งหวาน (sweet potatoes) ที่เตรียมด้วยวิธีการลวกด้วยไอน้ำ ที่อุณหภูมิ 100ºC เป็นเวลา 10 min ด้วยวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อน การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ และการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง เพื่อศึกษาอัตราการคงอยู่ของสารประกอบฟีนอลลิก แคโรทีนอยด์ และกรดแอสคอร์บิก ผลการศึกษาพบว่าวิธีการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟมีอัตราการคงอยู่ของสารประกอบฟีนอลลิก แคโรทีนอยด์ และกรดแอสคอร์บิก ได้เทียบเท่าวิธีการอบแห้งการอบแห้งแบบระเหิด แต่ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่าถึง 40-50 เท่า ในขณะที่การอบแห้งด้วยลมร้อนจะใช้เวลานาน และมีอัตราการคงอยู่ของสารอนุมูลอิสระที่มาก

Hossain et al. (2010) ศึกษาผลกระทบของวิธีอบแห้งระหว่างการอบแห้งด้วยลมร้อน การอบแห้งแบบระเหิด และการอบแห้งระบบสุญญากาศ ของพืชสมุนไพร่ในวงค์ *Lamiaceae* (วงค์กะเพรา หรือวงค์มินต์) จำนวน 6 ชนิด ได้แก่ โรสมารี่ (rosemary) โอริกาโน่ (oregano) เสจ (sage) ใบโหระพา (basil) มาร์จอรัม (marjoram) และไธม์ (thyme) เพื่อเปรียบเทียบปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระที่คงเหลือในผลิตภัณฑ์อบแห้งในแต่ละวิธี พบว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนจะมีอัตราการสูญเสียสารต้านอนุมูลอิสระในระหว่างการอบแห้งมากที่สุด แต่ในขณะผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งระบบสุญญากาศ และการอบแห้งแบบระเหิดจะมีปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระคงเหลือในปริมาณที่มากในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน แต่หากประเมินต้นทุนการอบแห้งต่อน้ำหนักของผลิตภัณฑ์อบแห้ง พบว่าการอบแห้งระบบสุญญากาศเป็นวิธีการอบแห้งที่มีประสิทธิภาพสูง ในการรักษาคุณภาพผลิตภัณฑ์ และมีข้อได้เปรียบในด้านเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

Assawarachan et al. (2013) ศึกษาผลกระทบของความเข้มคลื่นไมโครเวฟต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงสีในระบบ CIELAB และอัตราการสูญสลายของสารประกอบฟีนอลิก ผลการศึกษาพบว่าที่ระดับความเข้มคลื่นไมโครเวฟที่สูงมากเกินไปจะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงสีและอัตราการสูญสลายของสารประกอบฟีนอลิกมากเนื่องจากที่ระดับความเข้มคลื่นไมโครเวฟสูง จะมีอุณหภูมิสะสมในระหว่างการอบแห้งที่สูงมาก ในทางตรงข้ามที่ระดับความเข้มคลื่นไมโครเวฟต่ำ

จะใช้เวลาในอบแห้งที่ยาวนานกว่าส่งผลให้สาหร่ายเตาได้รับความร้อนเป็นเวลานาน และมีความร้อนสะสมในระบบมาก ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีและอัตราการสูญสลายของสารประกอบฟีนอลิกมากเช่นกัน โดยผลการวิจัยนี้พบว่าที่ระดับความเข้มของคลื่นไมโครเวฟ 1.55 W/g มีความเหมาะสมมากที่สุด

ธิดารัตน์ และ ศศิธร (2553) ศึกษาผลของวิธีการทำแห้งต่อปริมาณ 6-gingerol สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและสมบัติการต้านออกซิเดชันของขิง (*Zingiber officinale*) โดยทำการอบแห้งขิงด้วยวิธีลมร้อน และการอบแห้งด้วยวิธีการแช่เยือกแข็ง ตรวจสอบ 6-gingerol ด้วยวิธี high performance thin layer chromatography จากผลการทดลองพบว่าขิงที่ผ่านการทำแห้งทั้งสองวิธีมีปริมาณ 6-gingerol ไม่แตกต่างกัน (p>0.05) โดยขิงที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธีลมร้อนมีปริมาณ 6-gingerol เท่ากับ 18.41±0.05 $mg/g_{dry\ matter}$ ในขณะที่ขิงที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธีแช่เยือกแข็งมีปริมาณเท่ากับ 18.10±0.05 $mg/g_{dry\ matter}$ อย่างไรก็ตามขิงที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธีลมร้อนวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและความสามารถต้านออกซิเดชันสูงกว่าขิงที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธีแช่เยือกแข็ง 28.6 และ 23.0% ตามลำดับ

ปองพล และคณะ (2556) ได้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งขมิ้นชันด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองทางสถิติ ทั้งนี้ปัจจัยที่ศึกษาประกอบด้วยระดับพลังงานคลื่นไมโครเวฟที่ใช้ในการอบแห้งขมิ้นชันที่แตกต่างกัน 3 ระดับ คือ 164, 465 และ 752 W ความเข้มข้นของกรดแอสคอร์บิค ได้แก่ 3, 5 และ 7% และเวลาที่ใช้แช่ขมิ้นชันในกรดแอสคอร์บิค คือ 30, 60 และ 90 s โดยการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวตอบสนองของบ็อกซ์-เบ็ห์นเคน (BBD) ผลการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งขมิ้นชัน คือที่ระดับพลังงานคลื่นไมโครเวฟ 475.75 W ความเข้มข้นของกรดแอสคอร์บิค 4.91% และเวลาที่ใช้แช่ 59.95 s ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งขมิ้นชันด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยสภาวะดังกล่าวให้ค่าความแตกต่างสีโดยรวม (ΔE) เท่ากับ 2.90 ซึ่งเป็นค่าต่ำที่สุด

Pérez-Francisco et al. (2008) ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้ง vegetal pear โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบ็ห์นเคน (BBD) และการหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งที่ใช้พลังงานต่ำ สามารถรักษาคุณภาพสี และปริมาณผลผลิตด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง (RSM) โดยศึกษาปัจจัยที่ผลต่อการทดลอง คือ อุณหภูมิในการอบแห้ง (60-70ºC) ความหนาของชิ้นตัวอย่าง (4-7 cm) และความเข้มข้นของกรดแอสคอร์บิค (0-0.1%) จากผลการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการรักษาคุณภาพของ vegetal pear คือ การอบแห้งที่อุณหภูมิ 63ºC ที่ความหนาของตัวอย่างทดสอบ 5 cm และระดับความเข้มข้นของกรดแอสคอร์บิคที่ 0.075% ซึ่งจะ

ให้ค่าความชื้นเท่ากับ 0.052 $g/g_{dry\ matter}$ ค่าความแตกต่างสี มีค่าเท่ากับ 11.65 และอัตราผลผลิต 0.0073 kg/hr และค่าใช้จ่ายในการอบแห้ง เท่ากับ \$30.58 $kg_{dry\ matter}$/product

ผลการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า งานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาผลกระทบของสภาวะการอบแห้งและวิธีการอบแห้งต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เช่น การเปลี่ยนแปลงคุณภาพสี ปริมาณน้ำมันหอมระเหยที่สกัดได้ อัตราการคงเหลือของสารออกฤทธิ์ รวมทั้งการเปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในอบแห้งในแต่ละวิธี โดยการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในระหว่างการอบแห้งมีแนวทางในการศึกษาด้วยการเปรียบเทียบวิธีการอบแห้งอย่างน้อย 3 วิธี โดยการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งซึ่งจะเป็นวิธีการอบแห้งที่รักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ดีที่สุดและถูกใช้เป็นวิธีสำหรับควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ (control quality product) เทียบกับวิธีการอบแห้งลมร้อนที่สภาวะต่างๆ ซึ่งวิธีการการอบแห้งดังกล่าวเป็นวิธีการอบแห้งแบบดั่งเดิม (traditional drying) ซึ่งจะถูกใช้ในการควบคุมคุณภาพของการอบแห้ง (control quality process) และการอบแห้งที่สนใจศึกษา เช่น การอบแห้งระบบสุญญากาศ (vacuum drying) การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ (microwave drying) การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟระบบสุญญากาศ (microwave vacuum drying) หรือการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำยิ่งยวด (superheated steam drying)

นอกจากนี้ยังมีการใช้เทคนิคในการออกแบบการทดลองเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการทดลองจริง ซึ่งการออกแบบการทดลองแบบ BBD ถูกนำมาใช้เนื่องจากมีจำนวนครั้งในการทดลองที่น้อย รวมถึงช่วยลดต้นทุนที่ใช้ ดังนั้นจึงมีงานวิจัยจำนวนมากที่นำวิธีการออกแบบการทดลองดังกล่าวมาใช้ในการทดลอง รวมทั้งมีการนำเอาวิธี RSM เพื่อวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการ มาใช้เพื่อช่วยให้มองรูปร่างของพื้นผิวตอบสนองได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งวิธีการดังกล่าวเป็นการรวบรวมเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์ และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลอง และวิเคราะห์ปัญหาโดยที่ผลตอบสนองที่เราสนใจขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร