บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พริกไทย

พริกไทย มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Pipper nigrumm* L. วงศ์ Piperaceae ชื่ออื่น พริกน้อย (ภาคเหนือ) พริก (ภาคใต้) พริกขี้นก พริกไทยดำ พริกไทยล่อน พริกไทยเป็นไม้เถ้ายืนต้น ลำต้นมีข้อ ซึ่งบริเวณข้อใหญ่กว่าลำต้นเห็นได้ชัดเจน ลำต้นอ่อนมีสีเขียวและจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลตามอายุที่เพิ่มขึ้น รากของพริกไทยมี 2 ชนิด คือ รากหาอาหารที่อยู่ใต้ดินกับรากที่ทำหน้าที่ยึดลำต้นกับหลัก ซึ่งอาจจะเป็นไม้ยืนต้นอื่นหรือไม้ค้างเพื่อให้เลื้อยเติบโตต่อไปได้ ออกดอกเป็นช่อในแนวยาวตรงข้ามกับใบ ช่อดอกอ่อนมีสีเหลืองอมเขียว เมื่อแก่จะมีสีเขียวและปลายช่อห้อยลง ผลของพริกไทยมีลักษณะกลมเรียงตัวกันเป็นพวงอัดแน่นอยู่กับแกนช่อ มีรสเผ็ดร้อน ผลอ่อนมีสีเขียว ผลสุกจะมีสีส้มแดง ผลที่นำมาใช้มี 3 ชนิด คือ พริกไทยสด พริกไทยดำ และพริกไทยขาว พริกไทยดำทำได้โดยเก็บผลที่เต็มที่มีสีเขียวแก่นำมาตากจนแห้ง ซึ่งจะได้พริกไทยผิวสีดำเหี่ยว ผลสุกจะมีสีส้มแดง ส่วนพริกไทยขาวคือการเก็บผลที่เริ่มสุกมาแช่น้ำแล้วนำมานวดเพื่อลอกเปลือกออกแล้วตากแดด จะได้พริกไทยที่มีสีขาวเป็นเงา พริกไทยเป็นพืชเมืองร้อน มีถิ่นกำเนิดทางตะวันตกเฉียงใต้ของอินเดีย สำหรับประเทศไทยปลูกที่ภาคกลาง ภาคใต้ และพบมากที่ภาคตะวันออก โดยเฉพาะจังหวัดจันทบุรี พริกไทยช่วยกระตุ้นปุ่มรับรสที่ลิ้น เพื่อให้กระเพาะอาหารหลั่งน้ำย่อยได้มากขึ้น สรรพคุณทางยา ช่วยขับลม ขับเหงื่อ ขับปัสสาวะ แก้ท้องอืดท้องเฟ้อ แก้ไข้มาลาเรีย แก้อหิวาตกโรค (สุพจน์ คิลานเภสัช, 2543)

การอบแห้ง

การอบแห้ง คือ กระบวนการลดความชื้นซึ่งส่วนใหญ่ใช้การถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุชื้น เพื่อไล่ความชื้นออกโดยการระเหย โดยใช้ความร้อนที่ได้รับเป็นความร้อนแฝงของการระเหย การอบแห้งช่วยให้สามารถเก็บรักษาอาหารได้เป็นเวลายาวนานขึ้น เทคโนโลยีการอบแห้งเป็นสิ่งที่ไม่ซับซ้อน แต่การวางแผนดำเนินการอบแห้งภายใต้สภาวะอากาศและเงื่อนไขที่กำหนดเป็นสิ่งที่จำเป็นที่จะต้องศึกษา ทั้งนี้เพื่อให้ได้วิธีดำเนินการที่เหมาะสมที่สุด
(สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, 2540)

การอบแห้งเป็นวิธีการถนอมอาหารที่มนุษย์คุ้นเคยมาแต่โบราณ เช่น ตากหญ้า ตากข้าว ตากเมล็ดพันธุ์พืช ตากเนื้อสัตว์ ผัก ผลไม้ ธัญชาติ การอบแห้งถ้าใช้พลังงานแสงจาก

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

ดวงอาทิตย์ เรียกว่า การตากแห้ง ถ้าการอบแห้งโดยใช้พลังงานความร้อนจากไฟฟ้า ก๊าซ ไอน้ำ ในเครื่องอบแห้ง เรียกว่า การอบแห้ง ซึ่งการอบแห้งมีประโยชน์หลายด้านดังนี้ (ชมพู่ ยิ้มโต, 2550)

1. ป้องกันการเกิดปฏิกิริยาเคมี การผลิตเอนไซม์ การเน่าเสียที่เกิดจากเชื้อจุลินทรีย์

2. ทำให้มีผลิตภัณฑ์ไว้ใช้อุปโภค/บริโภคในยามขาดแคลน นอกฤดูกาลหรือในแหล่งห่างไกล

3. ทำให้ผลิตภัณฑ์สามารถเก็บรักษาไว้ได้นานโดยไม่ต้องแช่ตู้เย็นให้เปลืองค่าใช้จ่าย

4. เป็นการลดน้ำหนักอาหาร ขนาดของอาหาร ทำให้สะดวกในการบรรจุ การเก็บรักษา การขนส่ง ลดพื้นที่ และค่าใช้จ่าย

5. เพื่อให้เกิดผลิตภัณฑ์อาหารชนิดใหม่ที่มีลักษณะ กลิ่นรสเฉพาะ เช่น ลูกเกด ซึ่งได้จากการอบแห้งองุ่น ลูกพรุน หมูแผ่น หมูหยอง กุนเชียง เป็นต้น

6. เพื่อให้เกิดความสะดวกในการใช้อุปโภค/บริโภค เช่น ชา กาแฟผลสำเร็จรูป

ข้อดีและข้อเสียของการทำให้อาหารแห้ง

การทำให้อาหารแห้งนั้นนอกจากจะทำให้อาหารเก็บไว้ได้นานแล้ว ยังมีข้อดีและข้อเสียอื่น ๆ ดังนี้

ข้อดีของการทำให้อาหารแห้ง มีดังนี้

1. น้ำหนักเบา การทำให้แห้งสามารถลดน้ำหนักลงได้ประมาณร้อยละ 60 – 90 ของอาหารสด ยกเว้นธัญพืชประกอบด้วยน้ำ และน้ำส่วนนี้เองจะถูกกำจัดออกไปโดยกระบวนการอบแห้งหรือตากแห้ง

2. มีความกระชับ กล่าวคือ ผลิตภัณฑ์อาหารอบแห้งต้องการเนื้อที่น้อยกว่าของอาหารสด อาหารแช่เยือกแข็ง หรืออาหารกระป๋อง โดยเฉพาะถ้าสามารถจัดเก็บในภาชนะบรรจุได้

3. ความคงตัวที่สภาวะการเก็บ ผลิตภัณฑ์อาหารอบแห้งไม่จำเป็นต้องใช้ตู้เย็นในการเก็บรักษา แต่มีข้อจำกัดของอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ในการเก็บรักษา เพื่อให้ได้ระยะเวลาการเก็บรักษาที่นานขึ้น

ข้อเสียของการทำให้อาหารแห้ง แม้ว่าบางข้อจะสามารถแก้ไข โดยวิธีอบแห้งสมัยใหม่ การปฏิบัติก่อนการอบแห้งก็ตาม แต่ก็ยังมีข้อเสีย ดังนี้

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

1. ความไวต่อความร้อน เนื่องจากอาหารส่วนมากมีความไวต่อความร้อนในระดับหนึ่ง อาจทำให้เกิดกลิ่นรสไหม้ขึ้นได้ ถ้าควบคุมสภาวะไม่เหมาะสม

2. เกิดการสูญเสียกลิ่น รส สารระเหย ที่ระเหยได้ และเกิดการเปลี่ยนสีของผลิตภัณฑ์ได้

3. การเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง ซึ่งรวมถึงการเกิดการแห้งกรอบอันเนื่องจากการหดตัว

4. เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่ไม่ใช่เกิดจากเอนไซม์ ทั้งนี้เนื่องจากความเข้มข้นของสารเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังเกิดการหืนไขมัน

5. เกิดการเสื่อมเสียอันเนื่องมาจากจุลินทรีย์ได้ ถ้าหากว่าอัตราการอบแห้งเริ่มต้นช้า ปริมาณความชื้นสุดท้ายมีค่าสูง หรือเก็บผลิตภัณฑ์ไว้ในบรรยากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูง

วิธีการอบแห้ง (ชมพู่ ยิ้มโต, 2550)

การอบแห้งโดยอาศัยธรรมชาติ แบ่งออกได้ 2 วิธี คือ

1. การอบแห้งแห้งโดยอาศัยแสงแดดโดยตรง ส่วนใหญ่ใช้ไอร้อนจากแสงแดดหรืออาศัยการผึ่งลม อาหารที่ทำให้แห้งโดยวิธีนี้ ได้แก่ ปลา เนื้อสัตว์ เมล็ดธัญพืช ตลอดจนผลไม้บางชนิด เช่น กล้วยตาก วิธีนี้นับเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายภายในประเทศที่ค่อนข้างยากจนและมีแสงแดดเพียงพอ เป็นวิธีที่ค่อนข้างถูกแต่จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพต่ำเนื่องจากไม่สามารถควบคุมอัตราเร็วในการอบแห้งได้

2. การอบแห้งด้วยตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ วิธีทำให้อาหารแห้งโดยอาศัยธรรมชาติด้วยการตากแดดนั้น มีปัญหามากในเรื่องของการปนเปื้อนจากสิ่งปนเปื้อน ซึ่งเป็นผลเสียต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์อาหารแห้งที่ได้ และประสิทธิภาพในการอบแห้งด้วยการตากแดดมักต่ำ ดังนั้นจึงมีการพัฒนาตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ขึ้น โดยตู้อบดังกล่าวนี้จะอาศัยพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ได้ดีอยู่ในตู้อบ เพื่อเป็นการเพิ่มอัตราการทำให้แห้งได้เร็วขึ้น และในตำแหน่งเดียวกันตู้ดังกล่าวจะมีวัสดุกั้น เพื่อลดปัญหาการปนเปื้อนจากสิ่งปนเปื้อนต่าง ๆ เช่น แมลง ฝุ่น เป็นต้น ทำให้ผลิตภัณฑ์อาหารแห้งที่ได้ มีคุณภาพและความสะดวกดีขึ้นจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการตากแดด

การอบแห้งด้วยเครื่องจักรกล วิธีการนี้มีการนำเอาเทคนิคและหลักวิชาการทางวิทยาศาสตร์เข้ามาเกี่ยวข้องด้วยอย่างมาก ซึ่งอาศัยการส่งความร้อนเข้าไปในชิ้นอาหารเพื่อทำให้น้ำหรือความชื้นกลายเป็นไอระเหยออกไปจากผิวหน้าอาหาร โดยความร้อนที่ส่งเข้าไปอาจจะเป็น

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

การนำความร้อน การพาความร้อน หรือการแผ่รังสีก็ได้ แต่โดยทั่วไปการทำให้แห้งด้วยเครื่องจักรกลมักนิยมใช้หลักการนำความร้อนและการพาความร้อนเป็นส่วนใหญ่

ข้อเปรียบเทียบการอบแห้งทั้งสองวิธี ดังนี้

1. การอบแห้งโดยเครื่องสามารถควบคุมสภาวะทั่วไป เช่น อุณหภูมิ ความชื้นและการหมุนเวียนของบรรยากาศได้ในระดับที่เหมาะสม ส่วนการอบแห้งโดยอาศัยธรรมชาติขึ้นอยู่กับดินฟ้าอากาศ

2. การอบแห้งโดยใช้เครื่อง ใช้พื้นที่น้อยกว่าวิธีที่อาศัยแสงแดด ได้มีการคำนวณไว้ว่าผู้ที่ประกอบกสิกรรมในเนื้อที่ 20 ไร่ ต้องมีพื้นที่สำหรับตากแห้งเป็นเนื้อที่ 1 ไร่ จึงจะเพียงพอ

3. ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องอบแห้งทำให้อาหารแห้งสะอาด และมีคุณภาพดีกว่าวิธีการอบแห้งโดยอาศัยธรรมชาติ

4. คุณสมบัติในการคืนรูป เมื่อนำไปหุงต้ม ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องอบแห้งจะดีกว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบแห้งโดยอาศัยธรรมชาติ

5. ระยะเวลาในการอบแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้ง จะเร็วกว่าการอบแห้งโดยอาศัยธรรมชาติ

6. ค่าใช้จ่ายในการอบแห้งโดยอาศัยธรรมชาติจะถูกกว่าอบแห้งโดยใช้เครื่อง

การจำแนกวิธีการอบแห้ง

การอบแห้งวัสดุสามารถจำแนกตามวิธีการถ่ายเทความร้อนและมวลสาร ได้ดังนี้ คือ

1. การใช้ลมร้อนเป็นตัวกลางในการเคลื่อนย้ายไอน้ำออกไปจากวัสดุ เป็นวิธีการอบแห้งด้วยการพาความร้อน (Convection) เครื่องอบแห้งส่วนมากจะใช้วิธีนี้ เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูง ใช้งานง่าย และค่าใช้จ่ายไม่สูงเกินไปนัก

2. การแผ่กระจายวัสดุออกเป็นชั้นบาง ๆ บนพื้นผิวที่ให้ความร้อน เป็นวิธีการอบแห้งด้วยการนำความร้อน (Conduction) ไอน้ำจะกระจายตัวสู่บรรยากาศแวดล้อมได้ดี วัสดุจะแห้งภายในเวลาอันสั้น แต่การสัมผัสความร้อนโดยตรง อาจทำให้เกิดความเสียหายได้

3. การให้ความร้อนบริเวณผนังรอบ ๆ ห้องอบแห้ง โดยวัสดุไม่สัมผัสกับแหล่งความร้อน เป็นวิธีการอบแห้งด้วย การแผ่รังสี (Radiation) บางครั้งอาจเพิ่มประสิทธิภาพด้วยระบบดูดไอน้ำออก หรือใช้สุญญากาศลดความดันช่วยประหยัดพลังงานความร้อนได้

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

4. การปรับสภาวะความดันและอุณหภูมิ เพื่อทำให้น้ำในวัสดุเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งที่ระดับต่ำกว่าจุดร่วมสามสถานะ (Triple point) แล้วให้พลังงานความร้อนหรือลดความดันลง จนกระทั่งเกิดการระเหิด น้ำจะเปลี่ยนสถานะจากของแข็งกลายเป็นไอโดยตรง เรียกว่าการอบแห้งแบบเยือกแข็ง หรือการอบแห้งแบบระเหิด (Freeze drying, Sublimation drying หรือ Lyophilization) วิธีการนี้จะช่วยรักษาคุณภาพ และการคืนตัวของวัสดุได้ดีมาก แต่ค่าใช้จ่ายจะสูงตามไปด้วย

5. การใช้ความดันออสโมติกกำจัดน้ำภายในวัสดุ (Osmotic dehydration) ด้วยการแช่วัสดุลงในสารละลายที่ มีความเข้มข้นสูงกว่า น้ำจะแพร่ผ่านผนัง Membrane ออกมาภายนอก และสารละลายจะแพร่สวนทางเข้าไปภายในวัสดุ จนกระทั่งความเข้มข้นทั้งสองเท่ากัน

เครื่องอบแห้งที่ใช้ความร้อนจากแหล่งอื่น

ความร้อนที่ใช้กับเครื่องอบแห้งประเภทนี้ ส่วนมากจะได้จากกระแสไฟฟ้า หรือก๊าซ ซึ่งสร้างขึ้นเพื่อใช้อบอาหารให้แห้งในระบบอุตสาหกรรม มีหลายแบบหลายขนาด โดยใช้หลักการที่แตกต่างกัน เช่น

1. เครื่องอบแห้งด้วยลมร้อนแบบตู้หรือถาด มีลักษณะเป็นตู้ที่บุด้วยวัสดุที่เป็นฉนวน มีถาดสำหรับวางอาหารที่จะอบ ความร้อนกระจายภายในตู้ โดยแผงที่ช่วยการไหลเวียนของลมร้อน หรือโดยพัดลม เครื่องมือชนิดนี้จะใช้อบอาหารที่มีปริมาณน้อย หรือสำหรับงานทดลอง

2. เครื่องอบแห้งด้วยลมร้อนแบบต่อเนื่อง มีลักษณะคล้ายอุโมงค์ นำอาหารที่ต้องการอบแห้งวางบนสายพานที่เคลื่อนผ่านลมร้อนในอุโมงค์ เมื่ออาหารเคลื่อนออกจากอุโมงค์ก็จะแห้งพอดี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการปรับอุณหภูมิของลมร้อน และความเร็วของสายพาน ที่เคลื่อนผ่านลมร้อนในอุโมงค์ ตัวอย่างอาหารเช่น ผักหรือผลไม้อบแห้ง

3. เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย การทำงานของเครื่องอบแบบนี้ คือ ของเหลวที่ต้องการทำให้แห้งต้องฉีดพ่นเป็นละอองเข้าไปในตู้ที่มีลมร้อนผ่านเข้ามา เมื่อละอองของอาหาร และลมร้อนสัมผัสกัน จะทำให้น้ำระเหยออกไป แล้วอนุภาคที่แห้งจะลอยกระจายในกระแสลม เข้าสู่เครื่องแยกเป็นผงละเอียด แล้วนำอาหารผงนั้น บรรจุในภาชนะต่อไป เช่น กาแฟผงสำเร็จรูป ไข่ผง น้ำผลไม้ผง ซุปผง เป็นต้น

4. เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้ง ประกอบด้วยลูกกลิ้งทำด้วยเหล็กไร้สนิม อาจเป็นแบบลูกกลิ้งคู่ หรือลูกกลิ้งเดี่ยวก็ได้ ภายในมีลักษณะกลวง และทำให้ร้อนด้วยไอน้ำ หรือไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

อาหารที่จะอบแห้ง ต้องมีลักษณะเละ ๆ ป้อนเข้าเครื่องตรงผิวนอกของลูกกลิ้งเป็นแผ่นฟิล์มบาง ๆ แผ่นฟิล์มของอาหารที่แห้งติดบนผิวหน้าของลูกกลิ้ง แซะออก โดยใบมีด ที่ติดให้ขนานกับผิวหน้าของลูกกลิ้ง จะได้ผลิตภัณฑ์อบแห้งที่เป็นแผ่นบาง ๆ และกรอบเป็นเกล็ด หรือเป็นผง

5. เครื่องอบแห้งแบบเยือกแข็ง ประกอบด้วย เครื่องที่ทำให้อาหารเย็นจัด แผ่นให้ความร้อน และตู้สุญญากาศ หลักการในการอบแห้งแบบนี้ คือ การไล่น้ำจากอาหารออกไปในสภาพที่น้ำเป็นน้ำแข็ง แล้วกลายเป็นไอ หรือที่เรียกว่า เกิดการระเหยขึ้นภายในตู้สุญญากาศ ผลิตภัณฑ์เยือกแข็งจะวางอยู่ในถาด และถาดวางอยู่บนแผ่นให้ความร้อน ถ้าใช้ไมโครเวฟในกระบวนการอบแห้งร่วมกับการอบแห้งแบบเยือกแข็ง จะช่วยลดเวลาของการอบแห้งลงไปในถึงหนึ่งในสิบ ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ประสบความสำเร็จมากที่สุด คือ กาแฟผงสำเร็จรูป

6. ตู้อบแห้งแบบที่ใช้ไมโครเวฟ ขณะนี้ได้มีการใช้ไมโครเวฟคลื่นความถี่ 13×10^6 ไซเกิล เพื่อลดความชื้นของผัก เช่น กะหล่ำปลี จากร้อยละ 90 – 95 เหลือความชื้นเพียงร้อยละ 5 -7 เมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งแบบใช้ลมร้อน จะช่วยลดเวลาเหลือเพียงหนึ่งในห้า ซึ่งจะทำให้ลดค่าใช้จ่าย และผลิตภัณฑ์ที่จะมีคุณภาพดี และมีสีสวย

กลไกของการอบแห้งวัสดุ

การอบแห้งเป็นกระบวนการลดความชื้นวัสดุ จนถึงระดับที่จุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ เพื่อทำให้วัสดุมีสภาพที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษา ด้วยการถ่ายเทความร้อนและมวลสารไปพร้อม ๆ กัน โดยทั่วไปแล้ว การอบแห้งมักจะใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลาง (Drying medium) ในการพาความชื้นออกไปจากวัสดุ ดังนั้นปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่ออัตราการอบแห้งจึงได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และอัตราการไหลของอากาศร้อน ด้วยเหตุนี้ปรากฏการณ์หลักที่เกิดขึ้นกับการอบแห้งด้วยลมร้อน คือ การถ่ายเทความร้อนและมวลสารระหว่างวัสดุและของไหล โดยอาศัยแรงขับจากความต่างศักย์ของอุณหภูมิและความชื้น กล่าวคือ ความร้อนสัมผัสจากของไหลจะถูกถ่ายเทสู่วัสดุ ทำให้ความชื้นระเหยออกไปกับอากาศ ในขณะเดียวกันไอน้ำก็จะเคลื่อนที่จากผิวหน้าวัสดุไปยังอากาศด้วยความเข้มข้นของความชื้นด้วย

การเคลื่อนที่ของความชื้นออกจากวัสดุนั้นมี 2 วิธีด้วยกัน คือ

1. การเคลื่อนที่ด้วยแรง Capillary จะเกิดกับวัสดุที่ มีเซลล์โปร่ง ความพรุนสูง และมีความต่อเนื่องระหว่างเซลล์โดยมักจะเกิดขึ้นในช่วงต้นของการอบแห้ง

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

2. การเคลื่อนที่ด้วยการแพร่ (Diffusion) ผ่านเซลล์ จะเกิดกับวัสดุที่มีเนื้อแน่นไม่มีช่องว่างระหว่างเซลล์ หรือเกิดกับวัสดุที่ผ่านการอบแห้งไประยะหนึ่ง เซลล์เกิดการหดตัวทำให้แรง Capillary หมดไป น้ำจึงต้องเคลื่อนที่ด้วยการแพร่

การเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุจะมีผลต่ออัตราการอบแห้ง (Drying rate) คือ ถ้าวัสดุมีเนื้อโปร่ง การเคลื่อนที่ด้วยการไหลแบบ Capillary น้ำจะเคลื่อนที่มาที่ผิวได้เร็วกว่าการระเหยกลายเป็นไอ ทำให้ผิววัสดุเปียกชุ่มไปด้วยน้ำ การระเหยเป็นไปอย่างอิสระด้วยอัตราเร็วคงที่ จึงเรียกการอบแห้งช่วงนี้ว่า ช่วงอัตราอบแห้งคงที่ (Constant rate period) ต่อมาเมื่อการไหลแบบ Capillary หมดไป น้ำต้องเคลื่อนที่ด้วยการแพร่ ซึ่งช้าลงมากจนมาสู่ผิวหน้าไม่ทัน ผิวของวัสดุจึงแห้ง การระเหยเกิดขึ้นได้ช้า ทำให้อัตราเร็วลดลง จึงเรียกการอบแห้งช่วงนี้ว่า ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling rate period) สำหรับวัสดุที่มีเนื้อแน่น น้ำเคลื่อนที่ได้ช้าจะมีเฉพาะช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเท่านั้น และเมื่อความชื้นของอากาศภายในตู้อบสมดุลกับความชื้นของวัสดุ การอบแห้งจะสิ้นสุดลง และเรียกความชื้นของวัสดุขณะนั้นว่า ความชื้นสมดุล

ความชื้นสมดุล

ความชื้นสมดุลของวัสดุ มีความสำคัญต่อการศึกษากระบวนการอบแห้ง เพราะเมื่อทำการอบแห้งวัสดุจะลดต่ำลงจนถึงจุด ๆ หนึ่ง ซึ่งไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะนั้นความชื้นในวัสดุมีความดันไอเท่ากับความดันไอของอากาศที่อยู่รอบ ๆ และอุณหภูมิของวัสดุก็เท่ากับอุณหภูมิของอากาศรอบ ๆ ด้วย เรียกความชื้นในขณะนั้นว่า ความชื้นสมดุล ค่าความชื้นสมดุลจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, 2540)

อัตราการอบแห้ง (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2547)

อัตราการอบแห้งของอาหารแบ่งได้เป็น 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงอัตราการแห้งคงที่ (constant-rate regime) ซึ่งเป็นช่วงแรกของการอบแห้ง และช่วงอัตราการแห้งลดลง (falling-rate regime) ซึ่งต่อจากช่วงแรก ในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่การระเหยของน้ำจะเกิดที่ผิวของอาหาร ลักษณะการระเหยจะเกิดคล้ายกับการระเหยน้ำจากภาชนะ สามารถเขียนอัตราการแห้งในช่วงเวลานี้เป็นรูปสมการได้ดังนี้

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

1. ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ เป็นช่วงแรกของการอบแห้ง ซึ่งเกิดจากการระเหยของน้ำจากผิววัสดุที่มีความชื้นสูงจนมีน้ำเกาะอยู่ที่ผิว โดยอัตราการระเหยน้ำคงที่จะอธิบายได้ดังสมการที่ (2-1)

$$\frac{dM}{dt} = \frac{h_c A}{L}(T_a - T_{sur}) \qquad (2\text{-}1)$$

เมื่อ dM/dt คือ อัตราการอบแห้ง, กิโลกรัมต่อวินาที

h_c คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของฟิล์มอากาศที่อยู่เหนือผิววัสดุ, วัตต์ต่อตารางเมตร-เคลวิน

A คือ พื้นที่ผิวของวัสดุ, ตารางเมตร

L คือ ความร้อนแฝงของน้ำในวัสดุ, จูลต่อกิโลกรัม

T_a คือ อุณหภูมิอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง, เคลวิน

T_{sur} คือ อุณหภูมิที่ผิววัสดุ, เคลวิน

2. ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง เป็นช่วงของการอบแห้งที่ต่อจากช่วงแรก ซึ่งเป็นช่วงที่เกิดกระบวนการระเหยน้ำในตัววัสดุที่ขึ้นอยู่กับกระบวนการแพร่ความชื้นจากเนื้อในของวัสดุมาสู่ผิววัสดุและสิ้นสุดที่อากาศแวดล้อม โดยทั่วไปจะอธิบายอัตราการอบแห้งในรูปดังสมการ (2-2)

$$\frac{dM}{dt} = -k(M - M_e) \qquad (2\text{-}2)$$

เมื่อ M_e คือ ความชื้นสมดุลของวัสดุ, มาตรฐานแห้ง

M คือ ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ, มาตรฐานแห้ง

k คือ ค่าคงที่ใด ๆ

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการอบแห้ง

ชมพู่ ยิ้ม โต (2550) กล่าวว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการเคลื่อนย้ายน้ำมีผลต่ออัตราเร็วในการอบแห้ง ดังนี้

1. ธรรมชาติของอาหาร อาหารมีเนื้อโปร่ง น้ำจะเคลื่อนที่แบบผ่านช่องแคบซึ่งเร็วกว่าการแพร่ในอาหารเนื้อแน่น ดังนั้นอาหารเนื้อโปร่งจึงแห้งได้เร็วกว่าอาหารเนื้อแน่น อาหารที่มีน้ำตาลสูงจะเหนียวเหนอะหนะกีดขวางการเคลื่อนที่ของน้ำจึงแห้งช้า อาหารที่มีการลวก นวด คลึง ทำให้เซลล์แตกจึงแห้งได้เร็วขึ้น

2. ขนาดและรูปร่างอาหาร ขนาดและรูปร่างมีผลต่อพื้นที่ผิว ต่อน้ำหนัก ขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักมากกว่าขนาดใหญ่จึงแห้งได้เร็วกว่า ความหนาของอาหาร อาหารยิ่งหนามากเท่าไหร่ การอบแห้งก็ใช้เวลานาน นอกจากนั้นต้องคำนึงถึงพื้นที่ผิวที่สัมผัสกับอากาศที่จะเคลื่อนย้ายไอน้ำออกไปด้วย

3. ตำแหน่งของอาหารในเตา อัตราการอบแห้งภายในเครื่องอบเกิดไม่สม่ำเสมอขึ้นกับชนิด ประสิทธิภาพ ทิศทางการเคลื่อนที่ของลม น้ำในอาหารที่สัมผัสลมร้อนได้ดีกว่า หรือสัมผัสกับลมร้อนที่มีความชื้นต่ำย่อมระเหยได้ดีกว่า

4. ปริมาณอาหารต่อถาด ถ้าปริมาณอาหารต่อถาดมากเกินไป อาหารส่วนล่างไม่ได้สัมผัสกับอากาศร้อนหรือได้รับความร้อนจากถาดแล้วแต่ไอน้ำไม่สามารถแพร่กระจาย ผ่านชั้นอาหารตอนบนออกมาได้จึงแห้งช้า

5. ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (Relative Humidity : RH) ความแตกต่างระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ของลมร้อนกับอาหารมีผลต่อแรงขับดันความชื้นออกจากอาหาร ในการอบแห้งยิ่งมีความชื้นต่ำ (น้ำน้อย : ลมร้อนมีอุณหภูมิสูง) อัตราการอบแห้งยิ่งสูง แต่ถ้าลมร้อนมีความชื้นเข้าใกล้จุดอิ่มตัว (น้ำเยอะ) จะรับไอน้ำได้น้อย อัตราการอบแห้งจะต่ำ ความชื้นของอากาศจะเป็นตัวกำหนดความสามารถในการรับไอน้ำของอากาศร้อน อากาศร้อนที่มีไอน้ำอยู่มากแล้วจะรับไอน้ำได้น้อย

6. อุณหภูมิของอากาศ ถ้าอากาศมีความชื้นคงที่ การเพิ่มอุณหภูมิเป็นการเพิ่มความสามารถในการรับไอน้ำจึงมีผลต่ออัตราการอบแห้งและอุณหภูมิที่สูงขึ้น อย่างไรก็ตามอุณหภูมิที่ใช้ต้องไม่สูงจนทำให้อาหารไหม้ หรือเกิดความเสียหายจากปฏิกิริยาทางเคมีหรือกายภาพ

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

การกำหนดอุณหภูมิของลมร้อนที่ใช้ขึ้นกับลักษณะการเคลื่อนที่ของลมร้อนและระยะเวลาในการอบแห้ง การอบแห้งผักและผลไม้อุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 45 – 70 องศาเซลเซียส ถ้าสูงกว่า 70 องศาเซลเซียส น้ำจะระเหยเร็วเกินไป อาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเชิงซ้อนทางเคมี กายภาพ ที่ผิวหน้า ผิวหน้าเกิดเปลือกแห้งแข็งกระด้าง น้ำซึมผ่านไม่ได้ เรียกว่า case hardening อัตราการอบแห้งลดต่ำลง ผลิตภัณฑ์มีความชื้นสูง เมื่อเก็บผลิตภัณฑ์ไว้จะเกิดการเน่าเสีย เกิดสีคล้ำ

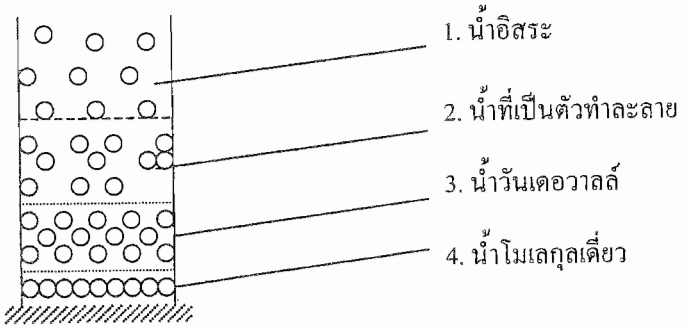
7. ความเร็วของลมร้อน ในการอบแห้งลมร้อนมีหน้าที่ในการถ่ายเทความร้อนให้กับอาหาร พาความชื้นออกไป ถ้าใช้ความเร็วลมสูงก็จะพาไอน้ำออกจากผิวหน้าของอาหารสู่ภายนอกได้เร็วขึ้น และยังช่วยป้องกันการเกิดสภาวะอิ่มตัวในบรรยากาศเหนือผิวของอาหาร

8. ปริมาณน้ำในอาหาร ปริมาณน้ำในอาหารมีผลต่ออัตราการอบแห้ง อาหารที่น้ำมากจะใช้เวลาในการอบแห้งนานกว่าอาหารที่มีน้ำน้อย

ลักษณะการเกาะตัวของน้ำบนวัสดุ

น้ำที่เกาะตัวบนของแข็งในวัตถุชื้นสามารถแบ่งได้เป็น 4 ชนิด คือ

- น้ำอิสระ (free water)
- น้ำที่เป็นตัวทำละลาย (solvent water)
- น้ำที่เกาะตัวโดยแรงแวนเดอร์วาลล์ (water attached with Van de Waal force)
- น้ำโมเลกุลเดี่ยว (mono-molecular water)



ภาพที่ 2-1 แสดงแผนภูมิของน้ำประเภทต่าง ๆ ในวัตถุชื้น (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2547)

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

การเกาะของน้ำอิสระจะอยู่ชั้นนอกสุดของผิวของแข็ง ส่วนน้ำแบบอื่นจะอยู่ถัดลงมาจนถึงน้ำแบบโมเลกุลเดี่ยว ซึ่งอยู่บริเวณผิวสัมผัสของของแข็ง ในการแยกน้ำแบบอิสระจะใช้พลังงานน้อยสุด ส่วนน้ำแบบโมเลกุลเดี่ยวต้องใช้พลังงานในการแยกน้ำออกจากวัตถุชื้นมากสุด

ความชื้นในวัสดุ

ความชื้นเป็นตัวบอกปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุเมื่อเทียบกับมวลของวัสดุชื้นหรือแห้ง ความชื้นในวัสดุสามารถแสดงได้เป็น 2 แบบ คือ

1. ความชื้นมาตรฐานเปียก (wet basis)

$$M_w = \frac{(w-d)}{w} \times 100 \qquad (2\text{-}3)$$

ความชื้นมาตรฐานเปียกนิยมใช้ในวงการค้า โดยทั่ว ๆ ไป จะอ้างถึงในรูปของเปอร์เซ็นต์ ($100M_w$)

2. ความชื้นมาตรฐานแห้ง (dry basis)

$$M_d = \frac{(w-d)}{d} \times 100 \qquad (2\text{-}4)$$

ความชื้นมาตรฐานแห้งนิยมใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งทางทฤษฎี เนื่องจากช่วยให้การคำนวณสะดวกขึ้น เพราะมวลของวัสดุแห้งจะมีค่าคงที่หรือเกือบคงที่ระหว่างการอบแห้ง ที่ว่าเกือบคงที่นี้ เพราะผลิตผลทางการเกษตรเป็นสิ่งมีชีวิต มีการหายใจ ดังนั้นจึงมีการเผาผลาญสารอาหาร ทำให้มวลแห้งลดลง ส่วนใหญ่แล้วมวลแห้งจะลดลงเพียงเล็กน้อย (สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, 2540)

โดยที่ M_w คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก, ร้อยละ
M_d คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง, ร้อยละ
w คือ น้ำหนักเริ่มต้นของวัสดุชื้น, กรัม
d คือ น้ำหนักของวัสดุแห้ง (ไม่มีความชื้น), กรัม

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบาง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของวัสดุในกระบวนการอบแห้งแบบชั้นบาง การอบแห้งแบบนี้ วัตถุชื้นจะเรียงเป็นชั้นบาง ๆ หรือเพียงหนึ่งชั้นของเมล็ดพืช กรณีที่การอบแห้งเมล็ดพืชแบบชั้นบาง การลดลงของความชื้น เมื่อพิจารณาในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง จะมีลักษณะเป็นฟังก์ชั่นลด ตามรูปแบบของสมการเอ็กโปเนนท์เชียล และความชื้นจะลดลงเข้าใกล้ความชื้นสมดุล จะได้สมการที่อยู่ในรูปแบบของอัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio) ดังนี้

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} = \exp(-kt) \qquad (2\text{-}5)$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น, ไร้หน่วย

M_t คือ ความชื้นที่เวลาใด ๆ, มาตรฐานแห้ง

M_i คือ ความชื้นเริ่มต้น, มาตรฐานแห้ง

M_e คือ ความชื้นสมดุล, มาตรฐานแห้ง

t คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง, นาที

k คือ ค่าคงที่ใด ๆ

สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล

แบบจำลองทางทฤษฎีที่ใช้ในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในวัสดุใด ๆ สามารถอธิบายได้โดยใช้แบบจำลองการแพร่ความชื้นตามกฎข้อที่สองของฟิกส์ (Fick's Second Law of Diffusion) เพื่อใช้ในการทำนายการเคลื่อนที่ของความชื้น เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff} \nabla^2 M \qquad (2\text{-}6)$$

เมื่อ M คือ ความชื้นที่เวลาใด ๆ, มาตรฐานแห้ง

D_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล, ตารางเมตรต่อวินาที

t คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง, วินาที

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Duc, Hun, and Keum (2011) ศึกษาหาแบบจำลองการอบแห้งชั้นบางและสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ทำการอบแห้งด้วยอุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 30 45 และ 60 เปอร์เซ็นต์ จากการผลทดลองพบว่าแบบจำลอง Page (1949) เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดสำหรับใช้อธิบายการอบแห้งชั้นบางเรพซีด โดยที่อัตราการอบแห้งเกิดขึ้นในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงและอัตราการกำจัดความชื้นออกจากเรพซีดถูกควบคุมโดยอัตราการแพร่ของน้ำไปยังผิวของเมล็ด ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นสามารถคำนวณได้จากสมการการแพร่ความชื้นตามกฎข้อที่สองของฟิกส์ ซึ่งสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นมีค่าระหว่าง 1.72×10^{-11} ถึง 3.31×10^{-11} ตารางเมตรต่อวินาที ตลอดช่วงอุณหภูมิที่ทำการศึกษา สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นที่ขึ้นกับอุณหภูมิอธิบายได้จากสมการของ Arrhenius และพลังงานกระตุ้นมีค่า 28.47 กิโลจูลต่อโมล

Doymaz (2007) ศึกษาลักษณะจำเพาะของการอบแห้งชิ้นฟักทองด้วยลมร้อน โดยทดลองด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนระดับห้องปฏิบัติการ ในการอบแห้งชั้นบางดำเนินการอบแห้งด้วยอุณหภูมิอบแห้ง 3 ค่า คือ 50 55 และ 60 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที และความชื้นสัมพัทธ์มีค่าระหว่าง 15 - 20 เปอร์เซ็นต์ พบว่าอัตราการอบแห้งเกิดขึ้นในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง การถ่ายเทมวลความชื้นของฟักทองอธิบายโดยใช้สมการการแพร่ความชื้นตามกฎข้อที่สองของฟิกส์ ซึ่งสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมีค่าระหว่าง 3.88×10^{-10} ถึง 9.38×10^{-10} ตารางเมตรต่อวินาที ภายใต้ช่วงอุณหภูมิที่ทำการศึกษา ค่าพลังงานกระตุ้นมีค่าเป็น 78.93 กิโลจูลต่อโมล สามารถอธิบายได้จากความสัมพันธ์ของ Arrhenius โดยอุณหภูมิมีผลต่อการแพร่ความชื้น แบบจำลอง Logarithmic และ Verma et al. ให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) สูงกว่า ค่าไคสแคว (χ^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) ต่ำกว่า ซึ่งสามารถอธิบายการอบแห้งชิ้นฟักทองได้ดีที่สุด

Kashaninejad, Mortazavi, Safekordi, and Tabil (2007) ศึกษาการอบแห้งชั้นบางของถั่วพิสตาชิโอ โดยทำการศึกษาอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์และความเร็วลมที่มีต่อพฤติกรรมการอบแห้งชั้นบางของถั่วพิสตาชิโอ และหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสม ซึ่งทดลองอบแห้งด้วยอุณหภูมิของลมร้อน 4 ระดับได้แก่ 25 40 55 และ 70 องศาเซลเซียส และความเร็วของลมร้อน 3 ระดับได้แก่ 0.5 1.0 และ 1.5 เมตรต่อวินาที และความชื้นสัมพัทธ์

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

2 ระดับได้แก่ 5 และ 20 % จากแบบจำลองจำนวน 6 แบบจำลอง พบว่าแบบจำลอง Page เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดสำหรับอธิบายพฤติกรรมการอบแห้งถั่วพิสตาชิโอ โดยอุณหภูมิและความเร็วของลมร้อนที่ใช้ในการอบแห้งมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการอบแห้งถั่วพิสตาชิโอ เมื่อใช้อุณหภูมิอบแห้งสูงทำให้เวลาในการอบแห้งสั้นลง ขณะที่ความชื้นสัมพัทธ์ในช่วงที่ทำการศึกษาไม่มีนัยสำคัญต่ออัตราการอบแห้ง และการแพร่ความชื้นประสิทธิผลของน้ำมีค่าระหว่าง 5.42×10^{-11} ถึง 9.29×10^{-10} ตารางเมตรต่อวินาที ตลอดทั้งช่วงอุณหภูมิที่ทำการศึกษา ซึ่งพลังงานกระตุ้นมีค่าเป็น 30.79 กิโลจูลต่อโมล โดยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลที่ขึ้นกับอุณหภูมิสามารถอธิบายได้จากความสัมพันธ์ของในแบบของ Arrhenius

Sacilik (2007) ศึกษาลักษณะจำเพาะของการอบแห้งเมล็ดฟักทองโดยใช้ลมร้อน โดยใช้ความเร็วลมร้อน 0.8 เมตรต่อวินาที และอุณหภูมิลมร้อนอยู่ในช่วง 40 - 60 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการอบแห้งจนได้ความชื้นสุดท้ายคือ 9.0 7.5 และ 6.0 ชั่งโมง ตามลำดับ เมื่ออุณหภูมิของลมร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นจะใช้เวลาในการอบแห้งลดลง จากการทดลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมีค่าอยู่ในช่วง 8.53×10^{-11} ถึง 17.52×10^{-11} ตารางเมตรต่อวินาที และค่าพลังงานการกระตุ้นมีค่าประมาณ 33.15 กิโลจูลต่อโมล แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ให้ผลการทำนายใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุดคือแบบจำลองลอการิธึมโดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) มากกว่าร้อยละ 99

Verga, Fito, Andres, and Lemus (2007) ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งพริกหยวก (Var. Lamuyo) โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 50 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส ด้วยความเร็วลม 2.5 เมตรต่อวินาที อัตราการอบแห้งเกิดขึ้นในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง โดยอบแห้งจากความชื้นเริ่มต้นจนถึงความชื้นสมดุลซึ่งมีค่า 10% พบว่าอุณหภูมิอบแห้งทั้ง 4 ระดับใช้เวลาในการอบแห้งระหว่าง 250 - 450 นาที สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมีค่าระหว่าง 3.2×10^{-9} ถึง 11.2×10^{-9} ตารางเมตรต่อวินาที ตลอดช่วงอุณหภูมิที่ทำการศึกษา สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลที่ขึ้นกับอุณหภูมิอธิบายได้จากสมการของ Arrhenius ซึ่งพลังงานกระตุ้น (E_a) มีค่า 39.70 กิโลจูลต่อโมล โดยนำแบบจำลอง Newton, Henderson–Pabis, Page และ Page modified วิเคราะห์เพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ค่าผลรวมกำลังสองของค่าความผิดพลาด (SSE) ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) และค่าไคสแคว (χ^2) จากผล

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

การทดลองพบว่าแบบจำลอง Page modified เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดสำหรับทุกช่วงของการอบแห้ง

Sacilik and Elicin (2006) ศึกษาการอบแห้งชิ้นแอปเปิ้ลปลอดสารพิษแบบชั้นเดียว โดยใช้ชิ้นแอปเปิ้ลที่มีความหนา 5 และ 9 มิลลิเมตร โดยทดลองอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 40 - 60 องศาเซลเซียส พบว่าความชื้นและอัตราการอบแห้งจะขึ้นกับอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งและความหนาของชิ้นแอปเปิ้ล โดยเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งเพิ่มขึ้นในขณะที่ความหนาลดลง จะทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งลดลง และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลและอัตราการคืนตัวจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อใช้อุณหภูมิอบแห้งเพิ่มขึ้น โดยสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมีค่าอยู่ในช่วง 2.27×10^{-10} ถึง 4.97×10^{-10} ตารางเมตรต่อวินาที โดยแบบจำลองลอการิทึมให้ผลการทำนายการอบแห้งชิ้นแอปเปิ้ลดีที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) สูง และให้ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) ค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ย (%P) และค่าไคสแคว (χ^2) ต่ำกว่าแบบจำลองอื่น

Doymaz (2005) ศึกษาการอบแห้งกระเจี๊ยบด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนระดับห้องปฏิบัติการ โดยทดลองอบแห้งด้วยอุณหภูมิของลมร้อน 50-70 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 8 - 25 % จากผลการทดลองพบว่าอัตราการอบแห้งเกิดขึ้นในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง การถ่ายเทความชื้นของกระเจี๊ยบอธิบายโดยใช้สมการการแพร่ความชื้นของฟิกส์ โดยสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมีค่าอยู่ในช่วง 4.27×10^{-10} ถึง 1.30×10^{-9} ตารางเมตรต่อวินาที โดยสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลที่ขึ้นกับอุณหภูมิสามารถอธิบายในรูปแบบความสัมพันธ์ของ Arrhenius และพบว่าพลังงานกระตุ้นของการแพร่ความชื้นมีค่า 51.26 กิโลจูลต่อโมล จากข้อมูลการทดลองนำมาวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสม โดยแบบจำลอง Page ให้ผลการทำนายดีที่สุดสำหรับอธิบายการอบแห้งชั้นเดียวของกระเจี๊ยบ

Ertekin and Yaldiz (2004) ศึกษาพฤติกรรมการอบแห้งชั้นบางมะเขือยาวโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบลมร้อน ทำการทดลองโดยใช้อุณหภูมิของลมร้อน 30 - 70 องศาเซลเซียส และความเร็วลมของลมร้อน 0.5 - 2.0 เมตรต่อวินาที และได้ทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและความเร็วของลมร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง อิทธิพลจากมะเขือยาวที่ผ่านการเตรียมตัวอย่างและ

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

ความหนาของมะเขือยาวที่มีต่อพฤติกรรมการอบแห้ง ศึกษาเวลาที่ใช้ในการอบแห้งและคุณภาพของมะเขือยาวหลังการอบแห้ง จากผลการศึกษาพบว่าเมื่ออุณหภูมิและความเร็วของลมร้อนที่ใช้ในการอบแห้งเพิ่มขึ้นทำให้เวลาการอบแห้งสั้นลง โดยมะเขือยาวที่ผ่านการเตรียมตัวอย่างและความบางของมะเขือยาวทำให้ใช้เวลาการอบแห้งสั้นลง แต่ในทางตรงกันข้ามเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งค่าความสว่างของสีมะเขือยาวจะลดลง แต่เมื่อเพิ่มความเร็วของลมร้อนจะทำให้ความสว่างของสีมะเขือยาวมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่ความหนาไม่มีอิทธิพลต่อค่าสี และอัตราการคืนตัวจะมีค่าสูงที่สุดเมื่ออบแห้งด้วยอุณหภูมิของลมร้อน 50 องศาเซลเซียส และได้ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและความเร็วของลมร้อนที่มีต่อค่าคงที่และสัมประสิทธิ์ของแบบจำลอง พบว่าแบบจำลอง Midilli et al. เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับใช้อธิบายการถ่ายเทความชื้นในมะเขือยาว

Akpinar, Bicer, and Yildiz (2003) ศึกษาพฤติกรรมการอบแห้งชั้นบางพริกชี้ฟ้าแดง โดยทดลองอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนโดยใช้อุณหภูมิทางเข้าห้องอบแห้ง 55 60 และ 70 องศาเซลเซียส และความเร็วลมร้อน 1.5 เมตรต่อวินาที แล้วทำการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าคงที่และสัมประสิทธิ์ของแบบจำลอง พบว่าแบบจำลอง Approximation of the diffusion สามารถใช้อธิบายพฤติกรรมการอบแห้งชั้นบางพริกชี้ฟ้า โดยให้ค่า r เท่ากับ 0.9987 ค่า χ^2 เท่ากับ 3.32×10^{-4} และ ค่า RMSE เท่ากับ 0.0174 โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งมีผลต่อสัมประสิทธิ์ของแบบจำลอง

Togrul and Pehlivan (2003) ศึกษาพฤติกรรมการอบแห้งแอปริคอท โดยการทดลองอบแห้งจะใช้อัตราการไหลของลมร้อน 0.2 0.5 1.0 และ 1.5 เมตรต่อวินาที และอุณหภูมิของลมร้อน 50 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส จากการศึกษาพบว่าแบบจำลองลอการิทึมสามารถทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งแอปริคอทด้วยลมร้อนได้ดีที่สุด โดยให้ค่าความถูกต้องร้อยละ 99.9 การถ่ายเทความชื้นเกิดขึ้นในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง และความชื้นของแอปริคอทจากความชื้นเริ่มต้นจนเหลือความชื้นสุดท้ายมีค่าประมาณ 0.16 มาตรฐานแห้ง ขณะที่สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลให้ค่าความถูกต้องร้อยละ 97.3 และสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลขึ้นกับอุณหภูมิและอัตราการไหลของลมร้อน

Madamba, Driscollb, and Buckleb (1996) ศึกษาการอบแห้งชั้นบางของชิ้นกระเทียมที่ความหนา 2 - 4 มิลลิเมตร โดยอบแห้งด้วยอุณหภูมิลมร้อน 50 - 80 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 0.5 - 1 เมตรต่อวินาที จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) พบว่า

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

อุณหภูมิและความหนาของชิ้นกระเทียมมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่ออัตราการอบแห้ง ขณะที่ความชื้นสัมพัทธ์ที่ระดับต่ำ และความเร็วลมไม่มีนัยสำคัญต่ออัตราการอบแห้ง โดยสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมีค่าอยู่ในช่วง 2×10^{-10} ถึง 4.2×10^{-10} ตารางเมตรต่อวินาที ตลอดช่วงอุณหภูมิที่ทำการทดลอง พลังงานกระตุ้นมีค่า 989 กิโลจูลต่อกิโลกรัม จากข้อมูลการทดลองสามารถวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จำนวน 4 แบบจำลอง พบว่า แบบจำลอง Page และ Two-compartment ให้ผลการทำนายดีกว่าแบบจำลอง Exponential และ Thomson โดยสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลที่ขึ้นกับอุณหภูมิสามารถอธิบายได้จากความสัมพันธ์ของ Arrhenius

อำไพศักดิ์ ทีบุญมา และประทีป ตุ้มทอง (2554) ศึกษาเพื่อหาสมการการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมสำหรับอบแห้งปลานิลด้วยลมร้อน โดยมีเงื่อนไขการทดลอง คือ ความเร็วลม 1.0 1.5 และ 2.0 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิของลมร้อนเท่ากับ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส สมการอบแห้งชั้นบางที่ศึกษาประกอบด้วยสมการของ Two term, Page, Modified Page, Logarithmic, Two term exponential, Henderson and Pabis, Approximation of diffusion และ Newton จากผลการศึกษาพบว่าอัตราการอบแห้งจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิหรือความเร็วของลมร้อน นอกจากนั้นจากการวิเคราะห์พบว่าแบบจำลอง Two term สามารถทำนายผลการอบแห้งปลานิลด้วยลมร้อนได้ดีที่สุด โดยให้ค่า R^2 มากที่สุด และค่า RMSE น้อยที่สุด

ณรงค์ อึ้งกิมบ้วน ภาณุพงศ์ บุญเพียร และวันเพ็ญ หวานระรื่น (2554) ศึกษาจลนพลศาสตร์และแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งพริกไทยด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 70 และ 90 องศาเซลเซียส จากข้อมูลผลการทดลองจะใช้แบบจำลองการอบแห้งจำนวน 11 แบบจำลองเพื่อเปรียบเทียบผลการอบแห้งพริกไทย โดยความถูกต้องของแบบจำลองจะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ไคสแคว และรากที่สองของค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดกำลังสอง จากผลการทดลองพบว่า อัตราการอบแห้งพริกไทยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้อุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น แบบจำลองการอบแห้งแบบลอการิทึมจะให้ผลการทำนายการอบแห้งพริกไทยดีที่สุด โดยให้ค่า R^2 สูงที่สุด ในขณะที่ให้ค่า χ^2 และ RMSE น้อยที่สุด

ศักชัย จงจำ และอำไพศักดิ์ ทีบุญมา (2553) ศึกษาการอบแห้งหญ้าปักกิ่งด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด และหาสมการการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมสำหรับทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งหญ้าปักกิ่ง โดยทำการทดลองอบแห้งภายใต้เงื่อนไขที่ ความดันสมบูรณ์ 5 10 และ 15 กิโลปาสคาล และอุณหภูมิอบแห้ง 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

ซึ่งมีพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการศึกษาได้แก่ อัตราส่วนความชื้น อัตราการอบแห้ง และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ผลจากการศึกษาพบว่า เมื่อลดความดันสมบูรณ์และเพิ่มอุณหภูมิอบแห้ง จะทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งลดลง นอกจากนั้นผลการวิเคราะห์สมการอบแห้งชั้นบาง พบว่าแบบจำลองของ Modified, Henderson and Pabis สามารถทำนายผลการอบแห้งหญ้าปักกิ่งด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดได้ดีที่สุด โดยให้ค่า R^2 มากที่สุด และ RMSE น้อยที่สุด

ประทีป ตุ้มทอง และอำไพศักดิ์ ทีบุญมา (2553) ศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งปลานิลด้วยลมร้อน และหาสมการการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมเพื่อทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งโดยทำการทดลองอบแห้งภายใต้เงื่อนไขความเร็ว 1.0 1.5 และ 2.0 เมตรต่อวินาที และอุณหภูมิอบแห้ง 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส พารามิเตอร์ที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการศึกษาได้แก่ อัตราการอบแห้ง และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ผลจากการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วลม หรือเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งทำให้อัตราการอบแห้ง และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเพิ่มขึ้น ส่วนของสมการการอบแห้งชั้นบางทั้ง 11 สมการ พบว่าสมการ two term สามารถทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งปลานิลด้วยลมร้อนดีที่สุด โดยให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) 0.99899 มากที่สุด และ ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) 0.0092 น้อยที่สุด

ณรงค์ อึ้งกิมบ้วน และภาณุพงศ์ บุญเพียร (2553) ศึกษาการอบแห้งพริกไทยด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับพลังงาน 160 320 และ 640 วัตต์ พบว่าอัตราการอบแห้งพริกไทยประกอบด้วยช่วงเพิ่มอุณหภูมิของพริกไทย ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ และช่วงอัตราการอบแห้งลดลง โดยเมื่อระดับพลังงานของคลื่นไมโครเวฟมีค่ามากขึ้น ทำให้อัตราการอบแห้งมีค่าสูงขึ้น และระยะเวลาการอบแห้งคงที่มีค่าน้อยลง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Page ให้ค่าความถูกต้องของผลการทำนายจลนศาสตร์การอบแห้งพริกไทยดี มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมากกว่าร้อยละ 99.75 และสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของพริกไทยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระดับพลังงานของคลื่นไมโครเวฟเพิ่มขึ้น และความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลกับความชื้นของพริกไทยในรูปสมการกำลังสองให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมากกว่าร้อยละ 99.5

อาณัติ พิลา ฐานิตย์ เมธิยานนท์ และสมชาติ โสภณรณฤทธิ์ (2551) ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หลากหลายรูปแบบที่นำมาอธิบายลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

มะพร้าวขูดแบบชั้นบาง ทำการทดลองที่เงื่อนไขอุณหภูมิ 80 100 และ 120 องศาเซลเซียส ความเร็วของอากาศมีค่าคงที่ 2.5 เมตรต่อวินาที ทำการอบแห้งมะพร้าวขูดที่มีความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 105 มาตรฐานแห้ง จนเหลือความชื้นสุดท้ายประมาณร้อยละ 3 มาตรฐานแห้ง โดยในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงของมะพร้าวขูดจะนำมาพิจารณาหาความสัมพันธ์กับรูปแบบสมการทางทฤษฎีซึ่งเกี่ยวข้องกับพารามิเตอร์ของการอบแห้งที่เงื่อนไขของการทดลอง ประสิทธิผลของการทำนายของแบบจำลองสามารถพิจารณาได้จาก ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) และค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ย (%P) โดยที่แบบจำลองของ Midilli เป็นแบบจำลองที่ดีที่สุดที่จะนำไปใช้อธิบายการลดลงของความชื้นมะพร้าวขูดแบบชั้นบาง โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์และค่าคงที่ของแบบจำลองการอบแห้งที่อยู่ในแบบจำลองของ Midilli สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของสมการเส้นตรงและรูปแบบสมการโพลิโนเมียลซึ่งเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิได้ค่าการแพร่ความชื้นประสิทธิผลมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1.19×10^{-7} ถึง 2.66×10^{-7} ตารางเมตรต่อวินาที เมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 80 ไปเป็น 120 องศาเซลเซียส และค่าพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของสสารมีค่าเท่ากับ 25.94 กิโลจูลต่อโมล

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University