บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับแครอท

แครอท อยู่ในวงศ์ **Apiaceae (Umbelliferae)** มีถิ่นกำเนิดอยู่ในทวีปเอเชียแถบกลางจนถึงทางตะวันออก ต่อมาได้แพร่เข้าไปในยุโรปและประเทศจีน แครอทเป็นพืชสองฤดู โดยฤดูแรกเจริญทางต้น ใบ และราก ฤดูที่สองจะเจริญทางดอก และเมล็ด ลักษณะลำต้นเป็นแผ่นใบจะเจริญจากลำต้น เป็นกลุ่มมีก้านใบยาวประกอบด้วยเปลือกบาง (periderm) และส่วนของเนื้อ (cortex) ซึ่งประกอบด้วยท่ออาหาร และเป็นแหล่งเก็บอาหารสำรอง ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของน้ำตาลเป็นส่วนประกอบ 45-65% หัวเนื้อมีสีขาว เหลือง ส้ม แดง ม่วงและดำ ส่วนของแกน (inner core) ประกอบด้วยท่อน้ำ (xylem) และแกน (pith) แครอทสายพันธุ์ที่มีคุณภาพสูง จะมีแกนขนาดเล็กและมีสีเดียวกับเนื้อหรือมีส่วนของเนื้อมากกว่าส่วนของแกน การปลูกฤดูที่สองเพื่อผลผลิตเมล็ดพันธุ์ลำต้นจะยืดตัว สร้างก้านดอกยาว 2-4 ฟุต บนยอดมีช่อดอกซึ่งช่อแรกจะเจริญจากส่วนกลางของลำต้น ต่อจากนั้นช่ออื่นๆ จะเจริญตาม การผสมเกสรจะเป็นแบบผสมข้าม (ส่วนใหญ่แมลงเป็นตัวช่วยผสมเกสร)

การใช้ประโยชน์และคุณค่าทางอาหาร

แครอทเป็นพืชที่อุดมไปด้วยสารเบต้าแคโรทีน (B – Carotene) โดยเฉพาะบริเวณส่วนของเปลือกแก่ ซึ่งสามารถเปลี่ยนเป็นวิตามินเอสูงช่วยลดการเสื่อมของตา เช่น ต้อกระจก นอกจากนี้ยังมีวิตามินบี 1 บี 2 และวิตามินซี ช่วยทำให้ร่างกายมีภูมิต้านทานโรคหวัด ป้องกันมะเร็ง ป้องกันอาการผิดปกติในกระดูก และโรคผิวหนัง

แครอทนอกจากจะมีสารเบต้าแคโรทีน ที่มีอำนาจยับยั้งเซลล์ของมะเร็งต่อต้านการเกิดเซลล์มะเร็งได้เป็นอย่างดี และช่วยให้ตับขับสารพิษออกจากร่างกายแล้ว ยังมีแคลเซียมเพคเตท ช่วยลดระดับคลอเลสเตอรอล ลดการเกิดโรคหัวใจและภาวะหัวใจล้มเหลว ช่วยบำรุงเซลล์ผิวหนังและเส้นผมให้มีสุขภาพดี มีสารต่างๆ ที่เป็นทั้งเกลือแร่และวิตามินอีกมากมาย เช่น ธาตุแคลเซียม ฟอสฟอรัส เหล็ก สามารถที่จะทานบ่อยๆ ได้ แต่อาจทำให้มีผิวเหลืองจากสารเบต้าแคโรทีนได้

แครอทนิยมรับประทานสดในสลัด หรือนำมาประกอบอาหารชนิดอื่นๆ เช่น ผัด ต้มซุป ใส่แกงจืด ใช้ทำส้มตำแบบมะละกอ คั้นสดรับประทานเป็นน้ำเพื่อสุขภาพ และช่วยเพิ่มสีสรรในจานอาหาร

ตาราง 2.1 คุณค่าทางโภชนาการของแครอท จากส่วนที่เป็นอาหาร 100 กรัม

น้ำ (%)	พลังงาน (cal)	โปรตีน (g)	ไขมัน (g)	คาร์โบไฮเดรท (g)	แคลเซียม (mg)	ฟอสฟอรัส (mg)	โซเดียม (mg)
88	42	1.1	0.2	9.7	37	36	47

วิตามินเอ (IU)*	เหล็ก (mg)	ไทอะมิน (mg)	ไรโบฟลาวิน (mg)	ไนอะซิน (mg)	โปแตสเซียม (mg)	แอสคอร์บิคแอซิด (mg)
11,000	0.7	0.06	0.05	0.6	341	8.0

ที่มา : Lorenz, A.O., and D.N. Maynard, 1980.

* IU (International Unit หรือ USP Unit) เป็นหน่วยในการวัดปริมาณ ที่ใช้กับยาบางชนิด, วัคซีน, วิตามิน, ฮอร์โมน, เลือด ซึ่งไม่ได้วัดทางกายภาพ เช่นน้ำหนัก, ความสูง ฯลฯ แต่วัดจากการเหนี่ยวนำให้เกิดผลทางชีวภาพได้ของยาเมื่อเทียบกับปริมาณของสารออกฤทธิ์ในยาที่ทำให้เกิดทางชีวภาพที่เท่าเทียมกัน เช่น วิตามินอี 1 IU จะเท่ากับปริมาณ d-alpha-tocopherol 0.667 mg

สารเบต้าแคโรทีน

ในส่วนของเบต้าแคโรทีนมักจะพบในผัก ผลไม้ที่มีสีส้ม เหลือง หรือแดง อย่างเช่น มะเขือเทศ แตงโม ข้าวโพดอ่อน แคนตาลูป มะละกอสุก แครอท ฟักทอง และผักใบเขียวอย่าง คะน้า ผักบุ้ง บล็อคโคลี ในทางวิทยาศาสตร์ค้นพบว่า สูตรโครงสร้างทางเคมีของเบต้าแคโรทีนเป็นสูตรโครงสร้างทางเคมีที่มีขนาดใหญ่มาก เมื่อเรากินเข้าไปตับจะทำหน้าที่เปลี่ยนโมเลกุลของเบต้าแคโรทีนให้กลายเป็นวิตามินเอ และสำหรับเบต้าแคโรทีน 1 โมเลกุล จะสามารถให้วิตามินเอ 2 โมเลกุล เบต้าแคโรทีนเป็นสารอาหารชนิดหนึ่งที่ถูกค้นพบว่ามีคุณสมบัติในการทำลายอนุมูลอิสระได้อย่างดีเลิศ โดยพบว่าเบต้าแคโรทีนจะทำปฏิกิริยาต้านการเกิดอ๊อกซิเดชั่นระหว่างอนุมูลอิสระกับสารสำคัญในเซลล์ที่มีชีวิต โดยแย่งทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระเสียก่อน แล้วขับถ่ายออกไปตามระบบขับถ่ายต่างๆ ของร่างกาย เซลล์ของเราก็รอดชีวิตจากกระบวนการในการทำลายโดยอนุมูลอิสระดังกล่าว เราเรียกกระบวนการในการแย่งทำปฏิกิริยาของเบต้าแคโรทีนกับอนุมูลอิสระว่า การต้านปฏิกิริยาอ๊อกซิเดชั่น หรือเอนตี้อ๊อกซิแด้นนั่นเอง

เบต้าแคโรทีน คือสารสำคัญในผักผลไม้ที่มีฤทธิ์ต้านมะเร็งและยังช่วยกระตุ้นร่างกายให้สู้กับเนื้อร้าย คำว่า "แคโรทีน" ได้ชื่อจากแครอท เพราะแคโรทีนเป็นสารสีเหลืองส้มที่มีมากในแค

รอท พืชผักผลไม้มากมายมีสารแคโรทีนและสารแคโรทีนก็มีกว่าห้าร้อยชนิดรวมกันเรียกว่าแคโรทีนอยด์ (Carotenoids)

แคโรทีน คือ สารสำคัญที่ร่างกายนำไปสร้างวิตามินเอจากสัตว์ เช่น ตับและน้ำนม และจากพืชสีเหลืองและเขียวเข้ม โดยสารแคโรทีนในพืชถูกเปลี่ยนเป็นวิตามินเอในร่างกายมนุษย์ ซึ่งงานวิจัยมากมายแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมะเร็งกับระดับวิตามินเอในเลือดต่ำ แคโรทีนสามารถทำลายเซลล์มะเร็ง ทำให้ขนาดก้อนมะเร็งลดลงถึง 7 เท่าของขนาดธรรมดาในหนูทดลอง เบต้าแคโรทีนมีพิษโดยตรงต่อเซลล์มะเร็งชนิด Squamous Carcinoma Cells ที่ตัดจากก้อนเนื้อ แคโรทีนลดการขยายตัวของก้อนมะเร็งในปอดและกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์ในการต้านมะเร็ง (Carrot, http://www.orst.edu/Dept/NWREC/carrot.html/ Commercial Vegetable)

เบต้าแคโรทีนจะเปลี่ยนแปลงในกระแสเลือดกลายเป็นกรดเรติโนอิคซึ่งใช้เป็นสารต้านมะเร็งซึ่งจะถูกสะสมไว้ในปอด ตับ ไต และชิ้นไขมัน ซึ่งสามารถเปลี่ยนเป็นกรดเรติโนอิคทันทีที่ร่างกายต้องการ ความร้อนทำให้เบต้าแคโรทีนเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและถูกดูดซึมได้ดีขึ้น

ปี พ.ศ. 2524 ริชาร์ด ปีโต และคณะได้เขียนบทความลงในนิตยสารเนเจอร์ว่า สารเบต้าแคโรทีน สามารถออกฤทธิ์ยับยั้งมะเร็งได้ ซึ่ง ดร. ริชาร์ด เชเคลล์ นักระบาดวิทยา มหาวิทยาลัยเท็กซัส ก็สนับสนุนความน่าเชื่อถือของข้อมูลนี้ว่าอาหารที่มีสารเบต้าแคโรทีน สามารถลดอุบัติการณ์โรคมะเร็งในปอดได้ แม้แต่ในผู้ที่สูบบุหรี่มาหลายปีแล้วก็ตาม นอกจากนี้ยังพบว่า คนที่ทานพืชผักที่มีแคโรทีนน้อยที่สุด จะเสี่ยงต่อมะเร็งในปอดเป็นเจ็ดเท่าของคนที่ทานมากที่สุด เบต้าแคโรทีนสามารถป้องกันและยับยั้งมะเร็งในระยะต่างๆ ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากให้กินเบต้าแคโรทีนขนาดสูงพร้อมกับฉายรังสี

2.2 การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

2.2.1 ทฤษฎีการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

1. ช่วงเพิ่มอุณหภูมิวัสดุ (Heat up Period)

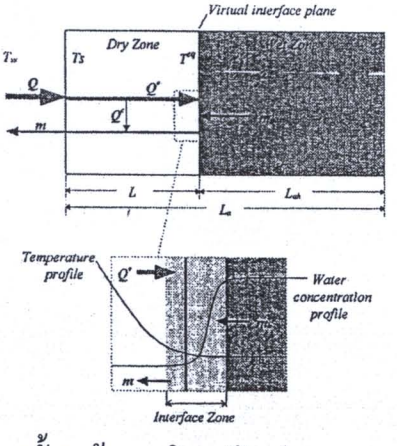
ในช่วงแรกของการอบแห้งความร้อนที่ให้กับวัสดุจะอยู่ในรูปของความร้อนสัมผัส โดยทำให้อุณหภูมิของวัสดุสูงขึ้นจนถึงจุดเดือดของน้ำในวัสดุ ซึ่งจะเป็นช่วงที่ใช้ปริมาณความร้อนสูง และถ้า Degree of superheat ไม่สูงพอจะทำให้เกิดการควบแน่นของไอน้ำที่ผิววัสดุ ซึ่งจะทำให้ความชื้นในวัสดุเพิ่มขึ้น ซึ่งปริมาณไอน้ำกลั่นตัวจะขึ้นอยู่กับ Thermal diffusivity ของวัสดุ ($\alpha = k/\rho c_p$) ความชื้นในวัสดุ และ Degree of superheat

2. ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant Drying Rate Period)

ในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่สำหรับการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง เป็นการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลที่เกิดขึ้นเฉพาะที่รอบๆ ผิวของวัสดุ การนำความร้อนจะผ่านจากไอน้ำไปยังที่ผิวด้านนอกของวัสดุ โดยมีผลต่างของอุณหภูมิระหว่างไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับผิววัสดุเป็นตัวผลักดัน และเนื่องจากโดยรอบวัสดุเต็มไปด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ดังนั้นการถ่ายเทความชื้นที่ผิวด้านนอกจึงไม่ได้เกิดจากการแพร่เหมือนกับการอบแห้งด้วยอากาศร้อน แต่เกิดจากการระเหยน้ำที่ผิวด้านนอกของวัสดุไปในทันทีโดยมีกลไกการพามวลของน้ำมาจากภายในวัสดุ อุณหภูมิของวัสดุจะคงที่ที่จุดเดือดของน้ำที่ความดันในระบบจนกระทั่งความชื้นของวัสดุลดลงถึงความชื้นวิกฤต ความร้อนที่ถ่ายเทโดยการพาจากไอน้ำร้อนยวดยิ่งไปยังวัสดุมีค่าเท่ากับความแตกต่างของเอนทัลปีของไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

3. ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling Drying Rate Period)

ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงความชื้นของวัสดุมีค่าต่ำกว่าความชื้นวิกฤต การถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลไม่ได้เกิดขึ้นเฉพาะที่ผิวของวัสดุเท่านั้น อัตราการอบแห้งลดลงจะเกิดเมื่อปริมาณน้ำในวัสดุมีน้อยลง ทำให้ชั้นวัสดุซึ่งถัดจากผิวด้านนอกแห้ง เรียกว่า ชั้นแห้ง (Dry layer) การนำความร้อนจะผ่านจากไอน้ำไปยังผิวด้านนอกของวัสดุชั้นแห้งและภายในวัสดุชั้นเปียกหรือโซนเปียก (Wet zone) ตามลำดับ ดังรูป 2.1 โดยมีผลต่างของอุณหภูมิระหว่างไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับแต่ละโซนดังกล่าวในวัสดุเป็นตัวผลักดัน ในกรณีของการถ่ายเทความชื้นจะเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณชั้นแห้ง โดยการระเหยน้ำในชั้นแห้งไปในทันที โดยมีผลต่างของความดันไอน้ำร้อนยวดยิ่งและความดันไอในวัสดุเป็นตัวผลักดัน ชั้นแห้งจะแผ่ขยายเข้าไปยังโซนเปียก ภายในโซนเปียกจะไม่มีการระเหยเกิดขึ้น นอกจากนี้ ชั้นแห้งยังเพิ่มความต้านการนำความร้อน ทำให้อัตราการอบแห้งลดลง



รูป 2.1 ลักษณะทางกายภาพของชั้นแห้งและโซนเปียกในการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

ที่มา: Elustondo *et al.* (2001)

ในระหว่างการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ไอน้ำจะต้องมีอุณหภูมิสูงกว่าจุดควบแน่นของน้ำตลอดเวลาเพื่อป้องกันการควบแน่นของไอน้ำบนผิววัสดุ อย่างไรก็ตามในช่วงแรกอาจมีการควบแน่นของไอน้ำที่ผิววัสดุเมื่อเริ่มใส่วัสดุเข้าไปในห้องอบแห้ง ซึ่งปัญหานี้สามารถแก้ไขโดยให้ความร้อนแก่วัสดุก่อนทำการอบแห้ง

อย่างไรก็ตามสำหรับกระบวนการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อนแบบไหนจะมีอัตราการอบแห้งเร็วกว่ากันขึ้นอยู่กับ

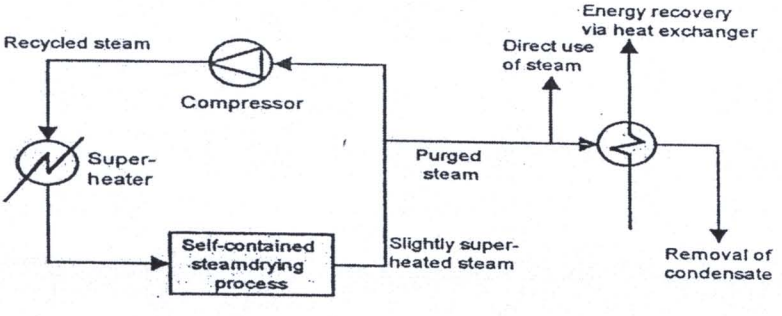
1. ปริมาณไอน้ำควบแน่นที่เกิดขึ้นบนผิววัสดุในช่วงเพิ่มอุณภูมิวัสดุ ถ้ามีปริมาณมากจะทำให้เวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถลดปัญหานี้ได้โดยให้ความร้อนแก่วัสดุอบแห้งก่อนทำการทดลอง

2. อุณหภูมิของตัวกลางสูงหรือต่ำกว่า Inversion temperature* ถ้าอุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งสูงกว่า inversion temperature การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะเร็วกว่าลมร้อน

3. ความดันไอของไอน้ำร้อนยวดยิ่งในระบบอบแห้ง ถ้าใช้ความดันไอน้ำร้อนยวดยิ่งเพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนก็จะสูงตาม ทำให้การอบแห้งเร็วขึ้น

*อุณหภูมิอินเวอร์ชัน (Inversion temperature) คือ อุณหภูมิของตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้ง ซึ่งทำให้อัตราการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อนมีค่าเท่ากัน

รูป 2.2 แสดงตัวอย่างระบบอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ผ่านห้องอบแห้งจะนำกลับมาใช้ใหม่ในระบบ ส่วนไอน้ำที่ระเหยจากวัสดุยังมีความร้อนอยู่ คือความร้อนแฝงที่เกิดจากการระเหย ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นตัวกลางในระบบได้ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานให้สูงขึ้น จากนั้นไอน้ำจะไหลเวียนผ่านการเพิ่มความร้อน ปริมาณน้ำที่ระเหยที่มากเกินพอและอุณหภูมิยังสูงอยู่ อาจนำไปใช้ในงานอื่นๆ ได้อีก ซึ่งเป็นการนำพลังงานกลับมาใช้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูป 2.2 ระบบการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

ที่มา : Mujumdar (2000)

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่ 17 ต.ค. 2555
เลขทะเบียน 249448
เลขเรียกหนังสือ

2.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

ในที่นี้จะกล่าวถึงปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ในด้านการอบแห้งและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ซึ่งปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการอบแห้งดังกล่าวได้แก่ อุณหภูมิ รองลงมาคือ ความเร็ว และความดันของไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

1.อุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่มีอิทธิพลต่อการอบแห้ง

Li et al. (1999) ได้ทำการศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและค่าสัมประสิทธิการถ่ายเถความร้อุนของไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ใช้อบขนมขบเคี้ยว (Tortilla chips) พบว่าอุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีผลต่ออัตราการอบแห้งแผ่นขนมมากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับผลของการเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนกล่าวคือ อุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สูงขึ้นจะมีผลทำให้วัสดุมีความแข็ง เกิดจำนวนรูพรุนมากกว่า ขนาดของรูพรุนใหญ่กว่า และการหดตัวจะน้อยกว่าที่อุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งต่ำกว่า เนื่องจากไอน้ำที่อุณหภูมิสูงจะทำให้น้ำในวัสดุออกไปได้มากและรวดเร็ว โครงสร้างภายในจึงมีรูพรุนจำนวนมากและใหญ่เป็นผลให้วัสดุในที่นี้คือแผ่นขนมมีลักษณะพองตัวมากขึ้น การหดตัวของแผ่นขนมน้อยลง ขณะที่ผลของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีผลไม่มากต่อคุณภาพดังกล่าว ทั้งนี้ความสัมพันธ์ที่แท้จริงขึ้นกับชนิดของวัสดุและรายละเอียดโครงสร้างภายในด้วย

Iyota et al. (2001) ได้ทำการศึกษาการอบแห้งมันฝรั่งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อนที่อุณหภูมิ 170 และ 240°C โดยเปรียบเทียบอัตราการอบแห้ง คุณภาพด้านสีและโครงสร้างของมันฝรั่ง พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นการอบแห้งจะใช้เวลาน้อยลง การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อน พบว่าที่อุณหภูมิเดียวกันการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะเร็วกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน

2. ความเร็วของไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่มีอิทธิพลต่อการอบแห้ง

ความเร็วของไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้งโดยพบว่าความเร็วที่มากขึ้นช่วยเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน เมื่อความเร็วของไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีค่าสูงขึ้นจะพาความชื้นที่ผิววัสดุไปได้เร็ว ทำให้การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นได้เร็วเป็นการลดเวลาในการอบแห้ง โดย วิธีImpingement เป็นเทคนิคที่ดีตัวหนึ่งที่ใช้ในการอบแห้ง ลักษณะสำคัญคือ จะมีหัวฉีด (Nozzle) เมื่อตัวกลางผ่านหัวฉีดจะมีความเร็ว 10 – 100 m/s และอุณหภูมิ 100 - 350°C ซึ่งเป็นความเร็วและอุณหภูมิที่สูง Moreira (2001) ได้ทำการศึกษาการอบแห้งมันฝรั่งแผ่นบางและขนมขบเคี้ยวด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งโดยวิธี Impingement พบว่า เมื่ออุณหภูมิและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเถ

ความร้อนเพิ่มขึ้น มันฝรั่งแผ่นบางจะใช้เวลาในการอบแห้งได้เร็วขึ้น ส่งผลให้การสูญเสียคุณค่าทางอาหาร คือ วิตามิน ซี น้อยลง

3. ความดันของไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

ความดันไอของไอน้ำร้อนยวดยิ่ง มีความสำคัญในการอบแห้ง เนื่องจากเป็นตัวกำหนดจุดเดือดของน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุ ในกรณีที่ความดันไอน้ำประมาณ 1 bar เท่ากับความดันบรรยากาศ ซึ่งอุณหภูมิจุดเดือดของน้ำประมาณ 100°C อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ใช้จะต้องมากกว่า 100°C การอบแห้งวิธีนี้ไม่เหมาะกับวัสดุที่ไวต่อความร้อน เพราะคุณภาพของวัสดุมีการสูญเสีย แต่สามารถปรับปรุงและพัฒนาการใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งเพื่ออบแห้งวัสดุที่ไวต่อความร้อน Elustondo et al. (2001) ได้ทดลองทำการอบแห้ง กล้วย แอปเปิ้ล มันสำปะหลัง มันฝรั่ง ไม้ และกุ้ง โดยใช้ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ (SAPSS : subatmospheric pressure superheated steam) และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายการอบแห้งและเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองกับการทดลอง โดยใช้ความดันช่วง 0.1 – 0.2 บรรยากาศ (boiling point 45 -60°C) และใช้อุณหภูมิอบแห้งของไอน้ำร้อนยวดยิ่งสูงกว่าจุดเดือดในช่วง 60 -90°C พบว่า สามารถอบแห้งได้ดีโดยเฉพาะวัสดุที่มีรูพรุน การคายน้ำออกจะง่ายและช่วยลดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรได้ และแบบจำลองสามารถทำนายกับทุกวัสดุที่ทำการทดลอง การลดความดันทำได้โดยติดตั้งปั๊มสุญญากาศที่ห้องอบแห้ง

2.2.3 ข้อดีและข้อเสียของการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

ข้อดีของการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

1. ไม่เกิดปฏิกริยา oxidation หรือ combustion ในช่วงการอบแห้ง ซึ่งหมายถึงไม่เกิดอันตรายจากการติดไฟ และการระเบิด และมักจะให้ผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งมีคุณภาพดี
2. สามารถทำให้มีอัตราการอบแห้งที่สูงทั้งช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant Rate Drying Period) และช่วงอัตรการอบแห้งลดลง (Falling Rate Drying Period) โดยขึ้นกับอุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่ง
3. ขั้นตอนการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งยังถือว่าเป็นกระบวนการ Pasteurization, Sterilization หรือ Deodorization ของผลิตภัณฑ์อาหาร
4. ประสิทธิภาพการใช้พลังงานสูง เนื่องจากมีการนำความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอกลับมาใช้ใหม่ จึงทำให้การสิ้นเปลืองพลังงานลดลง

ข้อเสียของการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

1. ไม่เหมาะสำหรับวัสดุที่ไวต่อความร้อน เพราะคุณภาพจะเสียหายเนื่องจากความร้อนสูง แต่มีเทคนิคการอบแห้งที่ใช้กับวัสดุชนิดนี้ โดยลดความดันทำให้สามารถอบแห้งที่อุณหภูมิลดลงได้
2. ต้นทุนในการสร้างเครื่องสูง

2.3 คุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหาร

Arun and Sirikalaya (2000) ศึกษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญอันหนึ่งต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมทางอาหาร การพิจารณาด้านคุณภาพมีอยู่หลายลักษณะ จะขึ้นอยู่กับชนิดและลักษณะของผลิตภัณฑ์อาหารแต่ละอย่างด้วย ซึ่งสมบัติในแต่ละด้านมีความสัมพันธ์กัน เมื่อสมบัติตัวใดตัวหนึ่งเปลี่ยนจะทำให้สมบัติตัวอื่นเปลี่ยนแปลงตามด้วย สมบัติด้านคุณภาพสามารถแบ่งได้เป็น

- สมบัติด้านโครงสร้าง (Density, Porosity, Pore, Specific Volume)
- สมบัติด้านสีและสภาพปรากฏ (Color, Appearance)
- สมบัติด้านเนื้อสัมผัส (Compression Test, Stress Relaxation Test, Tensile Test)
- สมบัติด้านการคืนตัว (Rehydration Rate, Rehydration Capacity)
- สมบัติด้านความร้อน (State of Product : Glassy, Crystalline, Rubbery)
- สมบัติด้านประสาทสัมผัส (Aroma, Taste, Flavor)
- ลักษณะด้านโภชนาการ (Vitamins, Proteins)

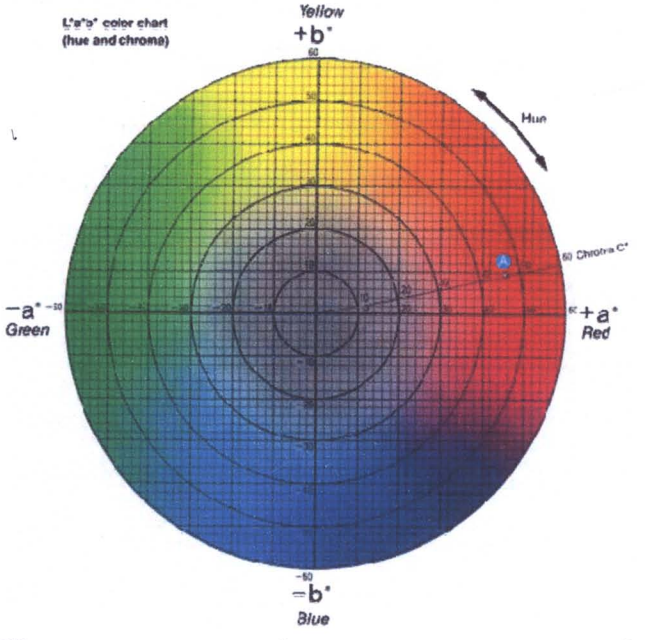
ในที่นี้จะขอกล่าวถึงคุณภาพบางตัวที่มีการศึกษาเพื่อเพิ่มความเข้าใจในคุณภาพนั้นๆ ได้ดีขึ้น

1. โครงสร้างของผลิตภัณฑ์

ความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ และสภาวะการอบแห้ง โดยทั่วไปความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์จะเป็นฟังก์ชันของความชื้นของผลิตภัณฑ์ การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นระหว่างการอบแห้งนั้นมีผลมาจากการหดตัวของผลิตภัณฑ์ขณะอบแห้ง รูปร่างที่เปลี่ยนไปหรือการหดตัวดังกล่าวเกิดขึ้นจากการสูญเสียความชื้นในผลิตภัณฑ์ร่วมกับการระเหยน้ำ การหดตัวดังกล่าวยังมีผลต่อรูพรุนในผลิตภัณฑ์ด้วย การเปลี่ยนแปลงรูพรุนนั้นมีปัจจัยอื่นๆ อีกมากมาย ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติด้านโครงสร้าง ได้แก่ เงื่อนไขการอบแห้ง ความชื้นในวัสดุและกระบวนการในการอบแห้ง

2. สีของผลิตภัณฑ์

การเปลี่ยนแปลงสีระหว่างการอบแห้งเกิดขึ้นได้จากการระเหยน้ำออกจากผิววัสดุระหว่างการอบแห้ง รวมถึงการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล (Browning) เป็นปฏิกิริยาเคมีที่ซับซ้อน ไม่ได้เป็นปฏิกิริยาปฐมภูมิแต่เป็นปฏิกิริยาทุติยภูมิหลายปฏิกิริยารวมกัน สารสีน้ำตาลที่เกิดขึ้นรวมเรียกว่า Melanins หรือ Malanoidins ซึ่งเป็นสารพอลิเมอร์ที่ไม่อิ่มตัว



รูป 2.3 การบรรยายสีในระบบ CIE Lab มองในระนาบ 2 มิติ: Hue บรรยายถึงเฉดสี และ Chroma บรรยายถึงความมันวาวหรือความเข้มของโทนสี. ที่มา: Minolta (1997)

โดยทั่วไปการเกิดสีน้ำตาลในผักผลไม้และผลิตภัณฑ์อาหารมี 2 แบบ คือ ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่ได้มาจากเอนไซม์ (Non-Enzymatic Browning) และ ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลเนื่องมาจากเอนไซม์ (Enzymatic Browning)

ก. ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลเนื่องมาจากเอนไซม์ (Enzymatic Browning)

ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลเนื่องมาจากเอนไซม์เป็นการเปลี่ยนสีที่เป็นผลมาจากการที่สารประกอบ ฟีนอลิค (Phenolic Compounds) ในเซลล์ของพืชเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแล้วเปลี่ยนเป็นสารประกอบสีน้ำตาล โดยเอนไซม์สำคัญที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล ได้แก่ เอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส (Polyphenol Oxidase)

ข. ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่ได้มาจากเอนไซม์ (Non-Enzymatic Browning)

ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่ได้มาจากเอนไซม์ เป็นปฏิกิริยาที่จะเกิดขึ้นเมื่อผลิตภัณฑ์ได้รับความร้อน ทำให้มีการสูญเสียน้ำ มีการสลายตัว และมีปฏิกิริยาการรวมตัว พัฒนาเป็นสารสี

เหลืองจนถึงสีน้ำตาลและน้ำตาลแดงมีกลิ่นและรสชาติเฉพาะ ปฏิกิริยารูปแบบนี้สามารถจำแนกย่อยออกได้เป็น 2 แบบ คือ การเกิดคาราเมไลเซชัน (Caramelization) และปฏิกิริยาเมลาร์ด (Maillard Reaction)

ข.1 การเกิดคาราเมไลเซชัน (Caramelization)

คาราเมไลเซชันเป็นการให้ความร้อนสลายโมเลกุลให้แยกออกและเกิดโพลีเมอไรเซชันของสารประกอบคาร์บอนได้เป็นสารสีน้ำตาล ปฏิกิริยานี้สารเริ่มต้นเป็นน้ำตาลเท่านั้น เมื่อน้ำตาลได้รับความร้อนจะสูญเสียน้ำจากโมเลกุลและหากยังคงให้ความร้อนต่อไปจะเกิดสารสีดำไม่ละลายน้ำและไม่แพร่กระจายเรียกว่าคาราเมลิน(Caramelin) สารสีที่เกิดจากปฏิกิริยาคาราเมไลซชันของน้ำตาลอย่างเดียวประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโรเจน และออกซิเจน เรียก คาราเมล (Caramel)

ข.2 การเกิดปฏิกิริยาเมลลารด์ (Maillard Reaction)

เมลลารด์เกิดขึ้นเมื่อน้ำตาลแอลโดสหรือคีโตส ซึ่งเป็นน้ำตาลรีดิวซิงได้รับความร้อนในภาวะที่มีน้ำกับเอมีน จะทำให้เกิดสารประกอบต่างๆ ซึ่งมีผลต่อสี กลิ่นและรสชาติของอาหาร

การยับยั้งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล

การยับยั้งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์ในผักผลไม้นี้มีผลทำให้สีผลิตภัณฑ์เปลี่ยนไปรวมทั้งรสชาติผลไม้ อาจมีผลทำให้คุณภาพลดลงไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค การควบคุมไม่ให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์นี้ทำได้หลายวิธีจะต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับผักและผลไม้แต่ละชนิด โดยอาจแบ่งได้หลายประเภทเช่น อุณหภูมิ การใช้ความดัน การควบคุมหรือดัดแปลงส่วนประกอบของอากาศ และการใช้สารเคมี ในส่วนของงานวิจัยนี้ได้รวบรวมแนวทางการยับยั้งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลด้วยอุณหภูมิ 2 วิธี คือ

1. การใช้ความร้อนทำลายเอนไซม์ เนื่องจากส่วนประกอบที่สำคัญของเอนไซม์ คือ โปรตีน ซึ่งจะเสียสภาพเมื่อได้รับความร้อนที่สูง ดังนั้นการลวกด้วยน้ำหรือไอน้ำจึงสามารถทำลายเอนไซม์ได้ ระดับความร้อนที่ใช้ควรเหมาะสมกับผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด เนื่องจากอาจทำลายเนื้อเยื่อทำให้สูญเสียลักษณะเนื้อสัมผัส สูญเสียน้ำและสารอาหารที่ละลายในน้ำได้

2. การใช้อุณหภูมิต่ำ อุณหภูมิต่ำสามารถชะลอการเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลได้ โดยจะชะลอการทำงานของเอนไซม์ลง การใช้อุณหภูมิต่ำมีจุดประสงค์เพื่อลดอัตราการเมตาบอลิสึมให้น้อยที่สุด โดยอุณหภูมิต่ำนั้นไม่เป็นอันตรายต่อพืช และลดอัตราการเจริญของจุลินทรีย์ให้น้อยลงการใช้อุณหภูมิต่ำจึงสามารถชะลอการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ แต่ในผักผลไม้ต่างชนิดมีความต้องการอุณหภูมิต่ำที่เหมาะสมในการเก็บรักษาต่างกัน

3. ลักษณะเนื้อสัมผัส

ลักษณะเนื้อสัมผัสเป็นคุณภาพสำคัญอีกอย่างของผลิตภัณฑ์ ความเหนียวนุ่มหรือความยืดหยุ่น รวมทั้งความแข็งและลักษณะเนื้อสัมผัสแบบต่างๆ เป็นลักษณะที่ซับซ้อน ซึ่งอาจใช้ความรู้สึกโดยสัมผัสทางปาก (Mouth Feeling) หรือมีเทคนิคการวัดแบบ Mechanical Analysis Test เช่น Compression Test, Stress Relaxation Tests, Creep Tests และ Dynamic Mechanical Analysis Test ซึ่งค่าที่วัดได้จะอยู่ในรูปของ Applied Force แบบต่างๆ เช่น Stress, Strain, Shear Force, Rupture Force หรือ Elastic Modulus สามารถแปรค่านั้นเป็นความเหนียว ความแข็ง หรือความกรอบได้ โดยวิธี Texture Profile Analysis อย่างไรก็ตาม ลักษณะเนื้อสัมผัสยังขึ้นอยู่กับลักษณะทางเคมีและชีวฟิสิกส์ของผลิตภัณฑ์

2.4 สมการจลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง

2.4.1 สมการจลนพลศาสตร์การอบแห้งทางทฤษฎี

Loikov (1966) ได้นำหลักการทางทฤษฎีมาอธิบายการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุที่มีโครงสร้างภายในเป็นรูพรุนในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง เพื่อเสนอกลไกการเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัสดุซึ่งเกิดขึ้นในรูปแบบต่างๆดังต่อไปนี้

1) การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของของเหลวเนื่องจาก Capillary Flow ซึ่งเป็นผลมาจากแรงตึงผิว (Surface Force)

2) การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของของเหลวเนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น (Liquid Diffusion)

3) การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของของเหลวเนื่องจากการแพร่ความชื้นบนผิวของรูพรุนเล็กๆ (Surface Diffusion)

4) การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของไอเนื่องมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น (Vapor Diffusion)

5) การเคลื่อนที่ของไอน้ำในรูปของไอน้ำเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ (Thermal Diffusion)

6) การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของของเหลวและไอน้ำเนื่องจากความแตกต่างของความดันรวม (Hydrodynamic Flow)

สำหรับการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุอาหารส่วนใหญ่แล้วจะอยู่ในรูปของเหลว ถ้าสมมุติว่าการเคลื่อนที่ของน้ำอยู่ในรูปของของเหลวเนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้นส่วนใหญ่แล้ว จะสามารถเขียนได้ตามกฎของ Fick ว่า

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

$$\dot{m}_w = -AD\frac{\partial C}{\partial x} \tag{2.1}$$

เมื่อ $\dot{m}_w$ คือ อัตราการถ่ายเทมวล, kg / h

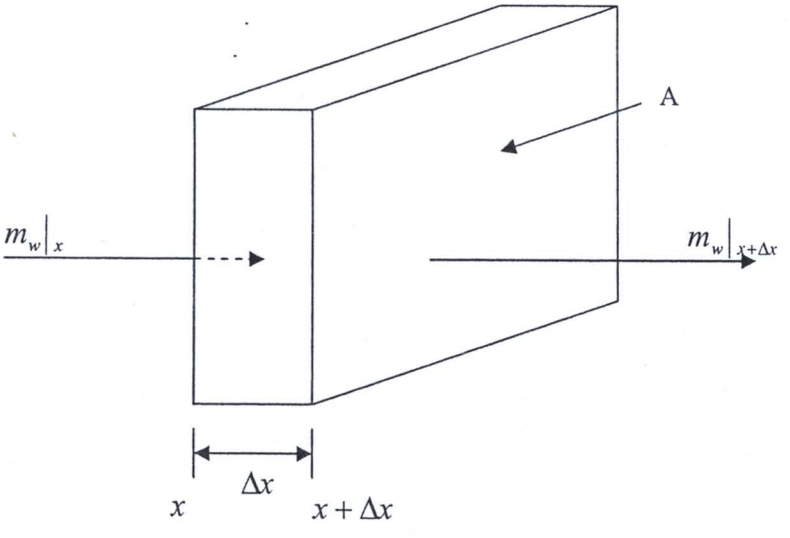
A คือ พื้นที่การถ่ายเทมวล, m^2

D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่, m^2 / h

C คือ ความเข้มข้นของความชื้น, kg / m^3

x คือ ระยะทาง, m

พิจารณาอัตราการเคลื่อนที่เข้าและออกจากปริมาตรควบคุม (รูป 2.4) และอัตราการเปลี่ยนแปลงมวลในปริมาตรควบคุม (พิจารณาเพียงทิศทางเดียว)



รูป 2.4 ปริมาตรบังคับ

อัตราการถ่ายเทมวลที่ทางเข้า คือ

$$\dot{m}_w|_x = -AD\frac{\partial C}{\partial x}|_x \tag{2.2}$$

อัตราการถ่ายเทมวลที่ทางออก คือ

$$\dot{m}_w|_{x+\Delta x} = -AD\frac{\partial C}{\partial x}|_{x+\Delta x} \tag{2.3}$$

อัตราการเปลี่ยนแปลงมวลในปริมาตรควบคุม คือ

$$\Delta\dot{m}_w = A\frac{\partial C}{\partial t}\cdot\Delta x \tag{2.4}$$

เมื่อ t คือเวลา, h

จากการทำ Mass balance จะได้

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(D\frac{\partial C}{\partial x}\right)=\frac{\partial C}{\partial t} \tag{2.5}$$

เมื่อนำค่าความหนาแน่นของวัสดุหารตลอดในสมการ (5) จะได้

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(D\frac{\partial M}{\partial x}\right)=\frac{\partial M}{\partial t} \tag{2.6}$$

เมื่อ M คือ ความชื้นวัสดุ, % มาตรฐานแห้ง

ถ้าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าคงที่ จะได้สมการใหม่มีค่าดังนี้

$$\frac{\partial M}{\partial t}=\frac{D\partial^2 M}{\partial x^2} \tag{2.7}$$

การหาคำตอบของสมการ (2.7) ต้องกำหนดภาวะเริ่มต้นและภาวะขอบเขตสมการ (2.8) – (2.10) ดังรูป 2.5

$$M(x,0)=M_{in} \qquad ; 0\le x\le L,\ t=0 \tag{2.8}$$

$$M(0,t)=M(l,t)=M_{eq} \qquad ; x=l,\ t>0 \tag{2.9}$$

$$\left(\frac{\partial M}{\partial x}\right)_{x=0}=0 \qquad ; x=0 \tag{2.10}$$

เมื่อ l คือ ความหนาวัสดุ, m

M_{in} คือ ความชื้นเริ่มต้น, % มาตรฐานแห้ง

M_{eq} คือ ความชื้นสมดุล, % มาตรฐานแห้ง

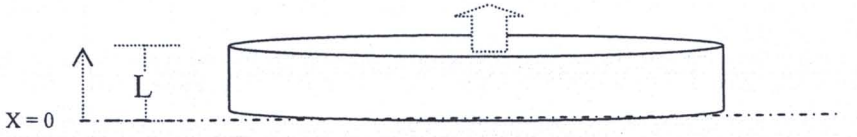
คำตอบของสมการ (2.7) หาได้โดยการแยกตัวแปร สำหรับวัสดุทรง infinite slab จะได้คำตอบคือ

$$\overline{MR}=\frac{8}{\pi^2}\sum_{n=0}^{\infty}\frac{1}{(2n+1)^2}\exp\left[-(2n+1)^2\frac{\pi^2 Dt}{l^2}\right] \tag{2.11}$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยและเท่ากับ

$$\overline{MR}=\frac{\overline{M}-M_{eq}}{\overline{M}_{in}-M_{eq}} \tag{2.12}$$

เมื่อ $\overline{M}$ คือ ความชื้นเฉลี่ย, % มาตรฐานแห้ง



รูป 2.5 ลักษณะการแพร่ของน้ำภายในวัสดุ

ตาราง 2.2 สมการแบบจำลองค่า D ของการอบแห้งวัสดุต่าง ๆ ด้วยลมร้อน

Model	Equation	R^2	MRS	Reference
1	$D = (139.85V - 8.84RH - 1.33VRH + 361.41) \exp\left[-\frac{13121}{RT_{abs}}\right] \times 10^{-7}$ (อบแห้งกล้วย , T= 60 - 100°C , V = 0.5 – 2 m/s , RH = 2 – 26%)	0.95	1.6×10^{-31}	Kunsathtin N. (2010)
2	$D = (111.46V + 255.73) \exp\left[-\frac{12083}{RT_{abs}} - 0.029RH\right] \times 10^{-7}$ (อบแห้งกล้วย , T= 60 - 100°C , V = 0.5 – 2 m/s , RH = 2 – 26%)	0.95	1.4×10^{-17}	
3	$D = (0.000047T^2 - 0.011T + 0.28)(-0.11V^2 + 0.64V + 0.72)(-0.01RH^2 + 0.69RH - 18.21)\times10^{-7}$ (อบแห้งกล้วย , T= 60 - 100°C , V = 0.5 – 2 m/s , RH = 2 – 26%)	0.95	9.5×10^{-18}	

2.4.2 สมการจลนพลศาสตร์การอบแห้งกึ่งทฤษฎี

สมการการอบแห้งกึ่งทฤษฎี สร้างโดยการสมมุติว่าอัตราการอบแห้งภายใต้สภาวะคงที่แปรผันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความแตกต่างของความชื้นของเมล็ดพืช และความชื้นสมดุล ข้อสมมุติฐานดังกล่าวคล้ายกับการเย็นตัวของนิวตัน ดังสมการ

$$\frac{dM}{dt} = -k(M - M_{eq}) \tag{2.13}$$

เมื่อ k = ค่าคงที่ของการอบแห้ง, h^{-1}

จัดรูปแบบสมการใหม่จะได้

$$\frac{dM}{(M - M_{eq})} = -kdt \tag{2.14}$$

เมื่อกำหนดสภาวะเริ่มต้น M (0) =M_{in} จะได้คำตอบดังสมการ

$$\ln\frac{(M - M_{eq})}{(M_{in} - M_{eq})} = -kt \tag{2.15}$$

$$MR = \frac{M - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} = \exp(-kt) \quad (2.16)$$

ค่าคงที่การอบแห้ง (k) เป็นคุณสมบัติเฉพาะของผลิตภัณฑ์หนึ่งๆ ภายในช่วงสภาวะอบแห้ง และวัสดุอบแห้งที่ทำการทดลองเท่านั้น สมการกึ่งทฤษฎีนี้สามารถใช้ได้ต่อเมื่อวัสดุอบแห้งมีลักษณะใกล้เคียงกับการทดลอง

Westernman et al. (1973) ทำการอบแห้งข้าวโพด และทำการเสนอค่าคงที่การอบแห้งเป็นฟังก์ชั่นของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ดังสมการ (2.17)

$$\ln(k) = 13.328 - 1.15RH - \frac{8255.9}{1.8T + 491.67} \quad (2.17)$$

เมื่อ RH คือ ความชื้นสัมพัทธ์, เศษส่วน

Phoungchandang (2000) ได้ทำการศึกษาค่าคงที่ของการอบแห้งกล้วยน้ำว้าแบบกึ่งทฤษฎีและสร้างสมการความสัมพันธ์ดังสมการ (2.18)

$$k = 0.6831 \exp\left(-\frac{3358}{T + 273.15}\right) \quad (2.18)$$

เมื่อ T คือ อุณหภูมิลมร้อน, °C