

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

2.1 การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

การอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง จะมีไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็นแหล่งความร้อนและเป็นตัวกลางในการอบแห้ง ซึ่งการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีไอน้ำเป็นส่วนประกอบอย่างเดียว ความดันย่อยจึงมีค่าเท่ากับความดันไอรวม การระเหยของน้ำในวัสดุจะเกิดขึ้นเมื่อวัสดุได้รับความร้อนจากไอน้ำร้อนยวดยิ่ง จนถึงจุดเดือดหรือสูงกว่าจุดเดือดของน้ำ เป็นผลให้น้ำในวัสดุสามารถระเหยออกไปได้ ในขณะที่การอบแห้งด้วยลมร้อนตัวกลางในการอบแห้งเป็นอากาศ การระเหยของน้ำในวัสดุจะเกิดขึ้นเมื่อวัสดุได้รับความร้อนจากอากาศ ซึ่งกลไกการระเหยน้ำในแต่ละกระบวนการอบแห้งจะอธิบายละเอียดต่อไป โดยทั่วไปนั้นการอบแห้งแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ

2.1.1 ช่วงที่เพิ่มอุณหภูมิวัสดุ (Heat up Period)

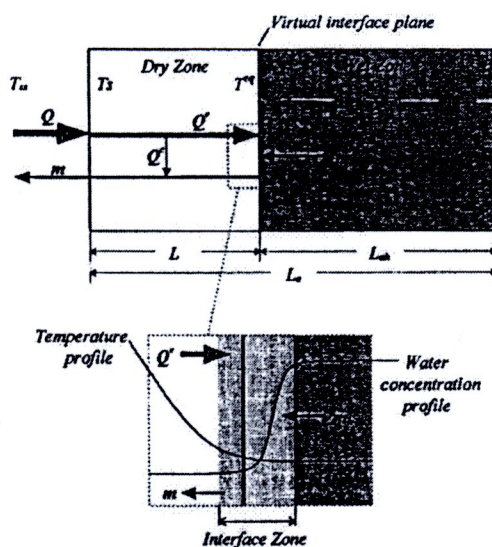
ในช่วงแรกของการอบแห้งความร้อนที่ให้กับวัสดุจะอยู่ในรูปของความร้อนสัมผัส โดยทำให้อุณหภูมิของวัสดุสูงขึ้นจนถึงจุดเดือดของน้ำในวัสดุ ซึ่งจะเป็นช่วงที่ใช้ปริมาณความร้อนสูง และถ้า Degree of superheat ไม่สูงพอจะทำให้เกิดการควบแน่นของไอน้ำที่ผิววัสดุ ซึ่งจะทำให้ความชื้นในวัสดุเพิ่มขึ้น ซึ่งปริมาณไอน้ำกลั่นตัวจะขึ้นอยู่กับ การแพร่ความร้อน (Thermal diffusivity, $\alpha = K/\rho C_p$) ของวัสดุ ความชื้นในวัสดุ และ Degree of superheat

2.1.2 ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant Drying Rate Period)

ในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่สำหรับการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง เป็นการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลที่เกิดขึ้นเฉพาะที่รอบๆ ผิวของวัสดุ การนำความร้อนจะผ่านจากไอน้ำไปยังที่ผิวด้านนอกของวัสดุ โดยมีผลต่างของอุณหภูมิระหว่างไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับผิววัสดุเป็นตัวผลักดัน และเนื่องจากโดยรอบวัสดุเต็มไปด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนที่ผิวด้านนอกจึงไม่ได้เกิดจากการแพร่เหมือนกับการอบแห้งด้วยอากาศร้อน แต่เกิดจากการระเหยน้ำที่ผิวด้านนอกของวัสดุไปในทันทีโดยมีกลไกการพามวลของน้ำมาจากภายในวัสดุ อุณหภูมิของวัสดุจะคงที่ที่จุดเดือดของน้ำที่ความดันในระบบจนกระทั่งความชื้นของวัสดุลดลงถึงความชื้นวิกฤต ความร้อนที่ถ่ายเทโดยการพาจากไอน้ำร้อนยวดยิ่งไปยังวัสดุมีค่าเท่ากับความแตกต่างของเอนทัลปีของไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

2.1.3 ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling Drying Rate Period)

ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงความชื้นของวัสดุมีค่าต่ำกว่าความชื้นวิกฤต การถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลไม่ได้เกิดขึ้นเฉพาะที่ผิวของวัสดุเท่านั้น อัตราการอบแห้งลดลงจะเกิดเมื่อปริมาณน้ำในวัสดุมีน้อยลง ทำให้ชั้นวัสดุซึ่งติดจากผิวด้านนอกแห้ง เรียกว่า ชั้นแห้ง (Dry layer) การนำความร้อนจะผ่านจากไอน้ำไปยังผิวด้านนอกของวัสดุชั้นแห้งและภายในวัสดุชั้นเปียกหรือโซนเปียก (Wet zone) ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.1 โดยมีผลต่างของอุณหภูมิระหว่างไอน้ำร้อนขดขึงกับแต่ละโซนดังกล่าวในวัสดุเป็นตัวผลักดัน ในกรณีของการถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณชั้นแห้ง โดยการระเหยน้ำในชั้นแห้งไปในทันที โดยมีผลต่างของความดันไอน้ำร้อนขดขึงและความดันไอน้ำในวัสดุเป็นตัวผลักดัน ชั้นแห้งจะแผ่ขยายเข้าไปยังโซนเปียก ภายในโซนเปียกจะไม่มี การระเหยเกิดขึ้น นอกจากนี้ ชั้นแห้งยังเพิ่มความต้านการนำความร้อน ทำให้อัตราการอบแห้งลดลง



รูปที่ 2.1 ลักษณะทางกายภาพของชั้นแห้งและโซนเปียกในการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนขดขึง

(Elustondo et al., 2001)

ในระหว่างการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนขดขึง ไอน้ำจะต้องมีอุณหภูมิสูงกว่าจุดควบแน่นของน้ำตลอดเวลาเพื่อป้องกันการควบแน่นของไอน้ำบนผิววัสดุ อย่างไรก็ตามในช่วงแรกอาจมีการควบแน่นของไอน้ำที่ผิววัสดุเมื่อเริ่มใส่วัสดุเข้าไปในห้องอบแห้ง ซึ่งปัญหานี้สามารถแก้ไขโดยให้ความร้อนแก่วัสดุก่อนทำการอบแห้ง

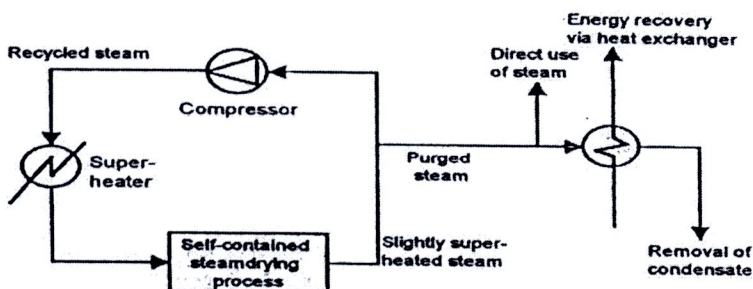
อย่างไรก็ตามสำหรับกระบวนการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนขดขึงและลมร้อนแบบไหนดจะมีอัตราการอบแห้งเร็วกว่ากันขึ้นอยู่กับ

1. ปริมาณไอน้ำควบแน่นที่เกิดขึ้นบนผิววัสดุในช่วงเพิ่มอุณหภูมิวัสดุ ถ้ามีปริมาณมาก จะทำให้เวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถลดปัญหานี้ได้โดยให้ความร้อนแก่วัสดุอบแห้งก่อนทำการทดลอง

2. อุณหภูมิของตัวกลางสูงหรือต่ำกว่า Inversion temperature ถ้าอุณหภูมิของไอน้ำร้อนยิ่งสูงกว่า inversion temperature การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยิ่งจะเร็วกว่าลมร้อน

3. ความดันไอของไอน้ำร้อนยิ่งในระบบอบแห้ง ถ้าใช้ความดันไอน้ำร้อนยิ่งเพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนก็จะสูงตาม ทำให้การอบแห้งเร็วขึ้น

รูปที่ 2.2 แสดงตัวอย่างระบบอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยิ่ง ไอน้ำร้อนยิ่งที่ผ่านห้องอบแห้งจะนำกลับมาใช้ใหม่ในระบบ ส่วนไอน้ำที่ระเหยจากวัสดุยังมีความร้อนอยู่ คือความร้อนแฝงที่เกิดจากการระเหย ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นตัวกลางในระบบได้ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานให้สูงขึ้น จากนั้นไอน้ำจะไหลเวียนผ่านการเพิ่มความร้อน ปริมาณน้ำที่ระเหยที่มากเกินไปและอุณหภูมิยังสูงอยู่ อาจนำไปใช้ในงานอื่นๆ ได้อีก ซึ่งเป็นการนำพลังงานกลับมาใช้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 2.2 ระบบการอบแห้ง โดยใช้ไอน้ำร้อนยิ่ง

(Deventer and Hejijmans, 2001)

2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยิ่ง

ในที่นี้จะกล่าวถึงปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยิ่ง ในด้านการอบแห้งและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ซึ่งปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการอบแห้งดังกล่าวได้แก่ อุณหภูมิ ความเร็ว และความดันของไอน้ำร้อนยิ่ง

1. อุณหภูมิของไอน้ำร้อนขุดยิ่ง

Li et al. (1999) ได้ทำการศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของไอน้ำร้อนขุดยิ่งที่ใช้อบขนมขบเคี้ยว (Tortilla chips) พบว่าอุณหภูมิของไอน้ำร้อนขุดยิ่งมีผลต่ออัตราการอบแห้งแผ่นขนมมากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับผลของการเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนกล่าวคือ อุณหภูมิของไอน้ำร้อนขุดยิ่งที่สูงขึ้นจะมีผลทำให้วัสดุมีความแข็ง เกิดจำนวนรูพรุนมากกว่า ขนาดของรูพรุนใหญ่กว่า และการหดตัวจะน้อยกว่าที่อุณหภูมิของไอน้ำร้อนขุดยิ่งต่ำกว่า เนื่องจากไอน้ำที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ไอน้ำในวัสดุออกไปได้มากและรวดเร็ว โครงสร้างภายในจึงมีรูพรุนจำนวนมากและใหญ่เป็นผลให้วัสดุในขั้นนี้คือแผ่นขนมมีลักษณะพองตัวมากขึ้น การหดตัวของแผ่นขนมน้อยลง ขณะที่ผลของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีผลไม่มากต่อคุณภาพดังกล่าว ทั้งนี้ความสัมพันธ์ที่แท้จริงขึ้นกับชนิดของวัสดุและรายละเอียดโครงสร้างภายในด้วย

Iyota et al. (2001) ได้ทำการศึกษาการอบแห้งมันฝรั่งโดยใช้ไอน้ำร้อนขุดยิ่งและลมร้อนที่อุณหภูมิ 170 และ 240°C โดยเปรียบเทียบอัตราการอบแห้ง คุณภาพด้านสีและโครงสร้างของมันฝรั่ง พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นการอบแห้งจะใช้เวลาน้อยลง การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขุดยิ่งและลมร้อน พบว่าที่อุณหภูมิเดียวกันการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนขุดยิ่งจะเร็วกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน

2. ความเร็วของไอน้ำร้อนขุดยิ่ง

ความเร็วของไอน้ำร้อนขุดยิ่งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้งโดยพบว่าความเร็วที่มากขึ้นช่วยเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน เมื่อความเร็วของไอน้ำร้อนขุดยิ่งมีค่าสูงขึ้นจะพาความร้อนที่ผิววัสดุไปได้เร็ว ทำให้การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นได้เร็วเป็นการลดเวลาในการอบแห้ง โดยวิธี Impingement เป็นเทคนิคที่คิดค้นหนึ่งที่ใช้ในการอบแห้ง ลักษณะสำคัญคือ จะมีหัวฉีด (Nozzle) เมื่อตัวกลางผ่านหัวฉีดจะมีความเร็ว 10 – 100 m/s และอุณหภูมิ 100 - 350°C ซึ่งเป็นความเร็วและอุณหภูมิที่สูง Moreira (2001) ได้ทำการศึกษาการอบแห้งมันฝรั่งแผ่นบางและขนมขบเคี้ยวด้วยไอน้ำร้อนขุดยิ่งโดยวิธี Impingement พบว่า เมื่ออุณหภูมิและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น 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 และแบบจำลองสามารถทำนายได้ดีกับทุกวัสดุที่ทำการทดลอง การลดความดันทำได้โดยติดตั้งปั๊มสุญญากาศที่ห้องอบแห้ง

2.3 ข้อดีและข้อเสียของการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

ข้อดีของการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

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

ข้อเสียของการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

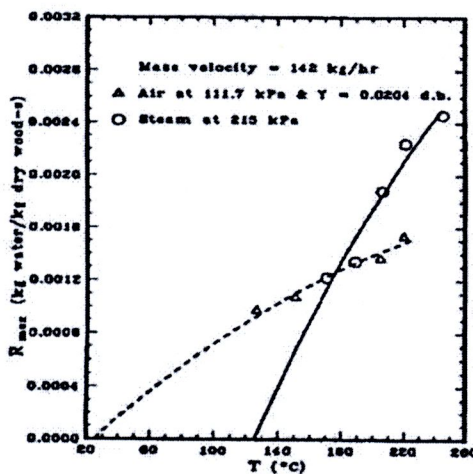
1. ไม่เหมาะสำหรับวัสดุที่ไวต่อความร้อน เพราะคุณภาพจะเสียหายเนื่องจากความร้อนสูง แต่มีเทคนิคการอบแห้งที่ใช้กับวัสดุชนิดนี้ โดยลดความดันทำให้สามารถอบแห้งที่อุณหภูมิลดลงได้

2. ต้นทุนในการสร้างเครื่องสูง

2.4 อุณหภูมิอินเวอร์ชัน (Inversion Temperature)

การอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนขวยังจะให้อัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน เมื่อการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนขวยังมีอุณหภูมิอบแห้งสูงกว่าอุณหภูมิอินเวอร์ชัน (Inversion Temperature) อย่างไรก็ตาม การอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนขวยังไม่เหมาะที่จะใช้กับวัสดุที่ไวต่อการรับความร้อน เนื่องจากอุณหภูมิที่สูง จะทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์เสียหาย

ในการเปรียบเทียบการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขวยังและอากาศร้อน ที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆ ตำแหน่งอุณหภูมิที่อัตราการอบแห้งวัสดุด้วยตัวกลางทั้งสองชนิดมีค่าเท่ากัน เรียกอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งนั้นว่าอุณหภูมิอินเวอร์ชัน (Inversion Temperature) (Sheikholeslami and Watkinson, 1992) ในการคำนวณหาอุณหภูมิอินเวอร์ชันโดยวิธีการทางทฤษฎีพบว่าที่ความเร็วเชิงมวลของอากาศร้อนและไอน้ำร้อนขวยังเท่ากับ 142 kg/h อุณหภูมิอินเวอร์ชันจะมีค่าประมาณ 180°C ถ้าอุณหภูมิอบแห้งสูงกว่นี้พบว่า การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขวยังจะมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อน แต่ถ้าอุณหภูมิอบแห้งต่ำกว่านี้ การอบแห้งด้วยอากาศร้อนจะมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขวยังซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.3

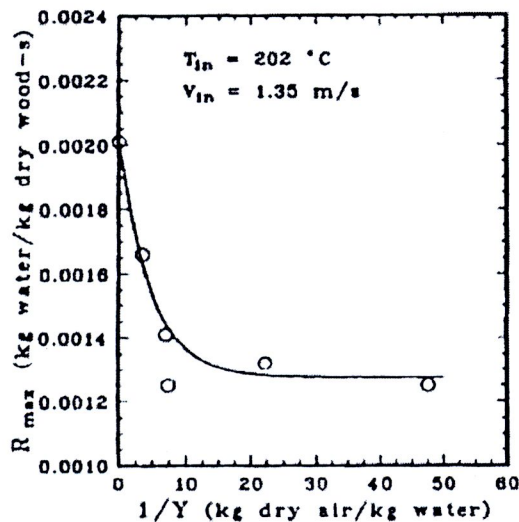


รูปที่ 2.3 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งระหว่างการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขวยังกับอากาศ

(Sheikholeslami and Watkinson, 1992)



นอกจากนี้ Sheikholeslami and Watkinson (1992) ยังได้ทำการศึกษาผลกระทบของความชื้นของอากาศต่ออัตราการอบแห้ง พบว่า ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิอินเวอร์ชันเมื่อความชื้นของอากาศลดลงทำให้อัตราการอบแห้งลดลงด้วย ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งและความชื้นของอากาศ

(Sheikholeslami and Watkinson, 1992)

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า การอบแห้งด้วยอากาศร้อนจะมีประสิทธิภาพดีกว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง เมื่ออากาศร้อนมีความชื้นต่ำที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิอินเวอร์ชัน นอกจากนี้ยังพบว่า ผลงานวิจัยของ Sheikholeslami and Watkinson (1992) พบว่าสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yoshida and Hyodo (1970) ซึ่งทำการทดลองหาอุณหภูมิอินเวอร์ชันโดยหาอัตราการระเหยของน้ำจาก Wetted wall column ในตัวกลาง 3 ชนิด คือ อากาศ อากาศชื้น และไอน้ำร้อนยวดยิ่ง พบว่าที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิต่ำหนึ่ง อัตราการระเหยของน้ำในไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะสูงกว่าในอากาศ อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งนั้นคือ อุณหภูมิอินเวอร์ชัน ที่อุณหภูมิอินเวอร์ชันอัตราการระเหยของน้ำจะไม่ขึ้นกับความชื้นของตัวกลาง นั่นคือ อัตราการระเหยของน้ำเมื่อใช้ตัวกลางแตกต่างกันจะมีค่าเท่ากันเมื่ออัตราการไหลโดยมวลของตัวกลางมีค่าคงที่

อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติพบว่าสำหรับการอบแห้งวัสดุชนิดต่างๆและอบแห้งด้วยวิธีการต่างๆอุณหภูมิอินเวอร์ชันไม่ใช่ค่า 180°C เสมอไป งานวิจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิอินเวอร์ชันที่ได้จากการทดลองมีดังต่อไปนี้

ณรงค์ อึ้งกิมบัว (2544) ศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งของเนื้อหมูและปลาร้าด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน โดยมีเงื่อนไขการทดลองดังนี้ อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ	
ห้องสมุดงานวิจัย	
วันที่ 15 มี.ค. 2555	เลขทะเบียน 250312
เลขเรียกหนังสือ.....	

คือ 120, 140 และ 160°C อัตราการไหลเชิงปริมาตร 0.071 m³/s น้ำหนักผลิตภัณฑ์ 0.2 kg ทำการทดลองอบแห้งเพื่อลดความชื้นเนื้อหมูจาก 3.5% db. ให้เหลือความชื้นสุดท้าย 0.25% db. และลดความชื้นปลาร้าจาก 2.4% db ให้เหลือความชื้นสุดท้าย 0.04% db. จากการทดลองพบว่า อัตราการอบแห้งปลาร้าด้วยไอน้ำร้อนขดยิ่งที่อุณหภูมิ 120 และ 140°C ต่ำกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อน และมีค่าใกล้เคียงกันที่อุณหภูมิ 160°C ในขณะที่อัตราการอบแห้งเนื้อหมูด้วยไอน้ำร้อนขดยิ่งที่ทุกๆ อุณหภูมิอบแห้งต่ำกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อน ดังนั้นอุณหภูมิอินเวอร์ชันสำหรับปลาร้าและเนื้อหมูมีค่าเท่ากับ 160°C และสูงกว่า 160°C ตามลำดับ

Iyota et al. (2001) ทดลองอบแห้งมันฝรั่งด้วยไอน้ำร้อนขดยิ่งและอากาศร้อน โดยอุณหภูมิไอน้ำร้อนขดยิ่งและอากาศร้อนคือ 170 และ 240°C จากการทดลองพบว่าอัตราการอบแห้งมันฝรั่งด้วยไอน้ำร้อนขดยิ่งที่อุณหภูมิ 170°C จะต่ำกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อน และมีค่าใกล้เคียงกันที่อุณหภูมิ 240°C ดังนั้นอุณหภูมิอินเวอร์ชันมีค่าประมาณ 240°C

Tarnawaki et al. (1996) ทดลองเปรียบเทียบการอบแห้งกระดาศและกระดาศอัดแข็งด้วยไอน้ำร้อนขดยิ่งและอากาศร้อน โดยศึกษาการเปลี่ยนค่าของอุณหภูมิตอบแห้งระหว่าง 100°C ถึง 600°C กับการเปลี่ยนค่าของความเร็วในการไหลของไอน้ำ พบว่า ถ้าอบแห้งที่อุณหภูมิสูงกว่า 245°C การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขดยิ่งจะเร็วกว่าอากาศร้อน

อิสเรศ ฐชกัลยา (2543) ออกแบบสร้างและทดสอบเครื่องอบแห้งข้าวเปลือก โดยเทคนิคฟลูอิดเบดด้วยไอน้ำร้อนขดยิ่ง สภาวะต่างๆ ของการศึกษาทดลองคือ ความชื้นเริ่มต้น 25 - 43% db. ความชื้นสุดท้าย 16 - 28 % db. ความสูงเบดข้าวเปลือก 10 - 15 cm. อุณหภูมิไอน้ำร้อนขดยิ่ง 150 - 170°C พบว่าความสูงเบดมีผลต่ออุณหภูมิอินเวอร์ชัน โดยความสูงเบดเพิ่ม อุณหภูมิอินเวอร์ชันเพิ่มขึ้น โดยอุณหภูมิอินเวอร์ชันที่ทำการทดลองอยู่ในช่วง 150 - 170°C

จากงานวิจัยที่ผ่านมาสรุปได้ว่า อุณหภูมิอินเวอร์ชันมีค่าไม่คงที่ แปรเปลี่ยนไปตามชนิดของวัสดุอบแห้งและลักษณะทางกายภาพของการอบแห้ง ซึ่งอุณหภูมิอินเวอร์ชันที่สภาวะต่างๆ แสดงในตารางที่ 3 ซึ่งรวบรวมโดย Schwartze and Brocker (2000) จากตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าลักษณะการไหลของตัวกลางมีผลต่ออุณหภูมิอินเวอร์ชัน เมื่อการไหลของตัวกลางเป็นการไหลแบบปั่นป่วนพบว่าอุณหภูมิอินเวอร์ชันมีค่าต่ำกว่าการไหลของตัวกลางที่เป็นแบบราบเรียบ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการไหลแบบปั่นป่วนนั้นจะมีค่า Reynold number สูง ซึ่งมีผลทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (heat transfer coefficient, h) มีค่าสูงเช่นกัน ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่าสูงตามไปด้วย

ตารางที่ 2.1 ค่าอุณหภูมิอินเวอร์ชัน (Inversion temperature) จากงานวิจัยต่างๆ (Schwartz and Brocker, 2000)

Reference	Theory/Experimental	Description	T inversion (°C)
Schwartz	Theory	Wetted wall column, turbulent	199
Yoshida and Hyodo	Experimental	Wetted wall column, turbulent	160-176
Chow and Chung	Theory	Flat plate, laminar	250
Chow and Chung	Theory	Flat plate, turbulent	190
Schwartz and Brocker	Theory	Flat plate, turbulent	200
Haji and Chow	Experimental	Flat plate, turbulent	170-220
Hasen et al.	Theory	Moving flat surface and gas, laminar	230-260
Al-Taleb et al.	Theory	Moving flat surface, laminar	225
Wu et al.	Theory	Wedge, turbulent	200
Ramamurthy	Experimental	Impinging jets, laminar	218-230
Bond et al.	Experimental	Impinging jets, turbulent	175
Sheikholeslami and Watkinson	Theory	Equilibrium approach	164

2.5 คุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหาร

Arun and Sirikalaya (2000) ศึกษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญอันหนึ่งต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมทางอาหาร การพิจารณาด้านคุณภาพมีอยู่หลายลักษณะ จะขึ้นอยู่กับชนิดและลักษณะของผลิตภัณฑ์อาหารแต่ละอย่างด้วย ซึ่งสมบัติในแต่ละด้านมี

ความสัมพันธ์กัน เมื่อสมบัติตัวใดตัวหนึ่งเปลี่ยนจะทำให้สมบัติตัวอื่นเปลี่ยนแปลงตามด้วย สมบัติด้านคุณภาพสามารถแบ่งได้เป็น

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

ในที่นี้จะขอกล่าวถึงคุณภาพบางตัวที่มีการศึกษาเพื่อเพิ่มความเข้าใจในคุณภาพนั้นๆ ได้

ดีขึ้น

2.5.1 โครงสร้างของผลิตภัณฑ์

ความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ และสภาวะการอบแห้ง โดยทั่วไปความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์จะเป็นฟังก์ชันของความชื้นของผลิตภัณฑ์ การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นระหว่างการอบแห้งนั้นมีผลมาจากการหดตัวของผลิตภัณฑ์ขณะอบแห้ง รูปร่างที่เปลี่ยนไปหรือการหดตัวดังกล่าวเกิดขึ้นจากการสูญเสียความชื้นในผลิตภัณฑ์ ร่วมกับการระเหยน้ำ การหดตัวดังกล่าวยังมีผลต่อรูพรุนในผลิตภัณฑ์ด้วย การเปลี่ยนแปลงรูพรุนนั้นมีปัจจัยอื่นๆ อีกมากมาย ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติด้าน โครงสร้าง ได้แก่ เงื่อนไขการอบแห้ง ความชื้นในวัสดุและกระบวนการในการอบแห้ง

2.5.2 สีของผลิตภัณฑ์

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

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

- ก. ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลเนื่องจากเอนไซม์ (Enzymatic Browning)

ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลเนื่องมาจากเอนไซม์เป็นการเปลี่ยนสีที่เป็นผลมาจากการที่สารประกอบฟีนอลิก (Phenolic Compounds) ในเซลล์ของพืชเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแล้วเปลี่ยนเป็นสารประกอบสีน้ำตาล โดยเอนไซม์สำคัญที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล ได้แก่ เอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส (Polyphenol Oxidase)

ข. ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่ได้มาจากเอนไซม์ (Non-Enzymatic Browning)

ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่ได้มาจากเอนไซม์ เป็นปฏิกิริยาที่จะเกิดขึ้นเมื่อผลิตภัณฑ์ได้รับความร้อน ทำให้มีการสูญเสียน้ำ มีการสลายตัว และมีปฏิกิริยาการรวมตัว พัฒนาเป็นสารสีเหลืองจนถึงสีน้ำตาลและน้ำตาลแดงมีกลิ่นและรสชาติเฉพาะ ปฏิกิริยารูปแบบนี้สามารถจำแนกย่อยออกได้เป็น 2 แบบ คือ การเกิดคาราเมลไลเซชัน (Caramelization) และปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard Reaction)

ข.1 การเกิดคาราเมลไลเซชัน (Caramelization)

คาราเมลไลเซชันเป็นการให้ความร้อนสลายโมเลกุลให้แยกออกและเกิดโพลีเมอร์ไซเคชันของสารประกอบคาร์บอนได้เป็นสารสีน้ำตาล ปฏิกิริยานี้สารเริ่มต้นเป็นน้ำตาลเท่านั้น เมื่อน้ำตาลได้รับความร้อนจะสูญเสียน้ำจากโมเลกุลและหากยังคงให้ความร้อนต่อไปจะเกิดสารสีดำไม่ละลายน้ำและไม่แพร่กระจายเรียกว่าคาราเมลิน (Caramelin) สารสีที่เกิดจากปฏิกิริยาคาราเมลไลเซชันของน้ำตาลอย่างเดียวประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน เรียก คาราเมล (Caramel)

ข.2 การเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard Reaction)

เมลลาร์ดเกิดขึ้นเมื่อน้ำตาลแอลโดสหรือคีโตส ซึ่งเป็นน้ำตาลรีดิวซิงได้รับความร้อนในภาวะที่มีน้ำกับเอมีน จะทำให้เกิดสารประกอบต่างๆ ซึ่งมีผลต่อสี กลิ่นและรสชาติของอาหาร

การยับยั้งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล

การยับยั้งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์ในผักผลไม้มีผลทำให้สีผลิตภัณฑ์เปลี่ยนไปรวมทั้งรสชาติผลไม้ อาจมีผลทำให้คุณภาพลดลงไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค การควบคุมไม่ให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์นี้ทำได้หลายวิธีจะต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับผักและผลไม้แต่ละชนิด โดยอาจแบ่งได้หลายประเภทเช่น อุณหภูมิ การใช้ความดัน การควบคุมหรือตัดแปลงส่วนประกอบของอากาศ และการใช้สารเคมี ในส่วนของงานวิจัยนี้ได้รวบรวมแนวทางการยับยั้งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลด้วยอุณหภูมิ 2 วิธี คือ

1. การใช้ความร้อนทำลายเอนไซม์ เนื่องจากส่วนประกอบที่สำคัญของเอนไซม์ คือ โปรตีน ซึ่งจะเสียสภาพเมื่อได้รับความร้อนที่สูง ดังนั้นการลวกด้วยน้ำหรือไอน้ำจึงสามารถทำลายเอนไซม์ได้ ระดับความร้อนที่ใช้ควรเหมาะสมกับผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด เนื่องจากอาจทำลายเนื้อเยื่อทำให้สูญเสียลักษณะเนื้อสัมผัส สูญเสียรสชาติและสารอาหารที่ละลายในน้ำได้

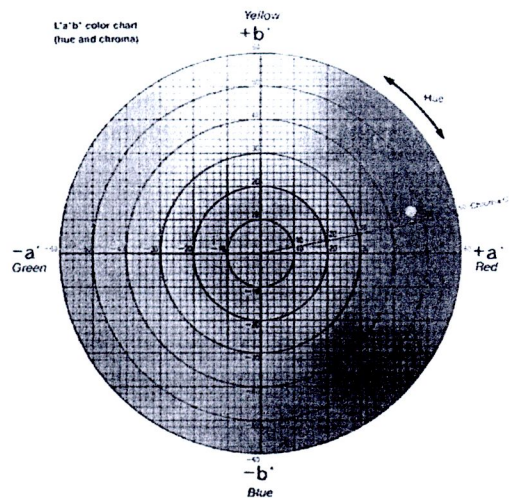
2. การใช้อุณหภูมิต่ำ อุณหภูมิต่ำสามารถชะลอการเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลได้ โดยจะชะลอการทำงานของเอนไซม์ลง การใช้อุณหภูมิต่ำมีจุดประสงค์เพื่อลดอัตราการเมตาบอลิซึมให้น้อยที่สุด โดยอุณหภูมิต่ำนั้นไม่เป็นอันตรายต่อพืช และลดอัตราการเจริญของจุลินทรีย์ให้น้อยลง การใช้อุณหภูมิต่ำจึงสามารถชะลอการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ แต่ในผักผลไม้ต่างชนิดมีความต้องการอุณหภูมิต่ำที่เหมาะสมในการเก็บรักษาต่างกัน

ระบบค่าของสี (Color System)

ในการบอกค่าสีของอาหารเรานิยมบอกชื่อของสี เช่น แดง เหลือง เขียว เป็นต้น หรือเพิ่มคำอธิบายรายละเอียดเพิ่มเติม เช่น อ่อน เข้ม จาง สด หรือใช้ค่าเปรียบเทียบกับสิ่งที่คุ้นเคย เช่น เขียวใบทองอ่อน เขียวใบเตย ขาวดอกมะลิ น้ำตาลช็อกโกแลต และอาจจะเพิ่มความรู้ลึกทางด้านจิตใจเสริมด้วย เช่น ขาวบริสุทธิ์ แดงสดใส เหลืองอร่าม ซึ่งการบอกค่าของสีด้วยวิธีการดังกล่าว ไม่สามารถนำมาใช้เมื่อเราต้องการใช้ค่าของสี เป็นปัจจัยในการควบคุมคุณภาพอาหาร หรือควบคุมกระบวนการผลิต ดังนั้นจึงต้องมีระบบค่าของสีซึ่งเป็นที่เข้าใจตรงกัน โดยระบบค่าของสีที่ใช้เป็นมาตรฐานสากล และนิยมใช้ในการบอกค่าสีของอาหาร คือ

การวัดสีระบบ Commission International de l'Eclairage CIE Lab scale ในระยะเริ่มแรก CIE ได้กำหนดสเกลการวัดสีเป็น $L^*-a^*-b^*$ ซึ่งเป็นระบบการบรรยายสีแบบ 3 มิติ โดยที่แกน L^* จะบรรยายถึงความสว่าง (Lightness) จากค่า $+L^*$ แสดงถึงสีขาว จนไปถึง $-L^*$ แสดงถึงสีดำ แกน a^* จะบรรยายถึงแกนสีจากเขียว ($-a^*$) ไปจนถึงแดง ($+a^*$) ส่วนแกน b^* จะบรรยายถึงแกนสีจากน้ำเงิน ($-b^*$) ไปเหลือง ($+b^*$) ลักษณะการบรรยายสีของ CIE ดังแสดงในรูป 2.5

การวัดสีระบบ Hunter Lab Scale ซึ่งบรรยายแกนใน 3 มิติเช่นเดียวกับระบบ CIE โดยที่ Hunter Lab จะใช้สเกล $L-a-b$ บรรยายลักษณะสีเช่นเดียวกับ $L^*-a^*-b^*$ ของ CIE ข้อแตกต่างระหว่างระบบสีของ CIE และ Hunter Lab คือ สูตรการคำนวณค่าสี



รูป 2.5 การบรรยายสีในระบบ CIE Lab มองในระนาบ 2 มิติ: Hue บรรยายถึงเฉดสี และ Chroma บรรยายถึงความมันวาวหรือความเข้มของโทนสี. ที่มา: Minolta, 1997.

3. ลักษณะเนื้อสัมผัส

ลักษณะทางเนื้อสัมผัสในอาหารเป็นผลประกอบกันของคุณสมบัติทางเคมี และกายภาพ ซึ่งรวมไปถึง ขนาดรูปร่าง จำนวน และการจัดเรียงตัวของโครงสร้างของสารนั้นๆ ดังนั้นลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหารจึงมีความจำเป็นและสำคัญอย่างมากต่อการยอมรับของผู้บริโภค ลักษณะเนื้อสัมผัสอาหารใช้เป็นตัวชี้ถึงลักษณะ ส่วนประกอบและโครงสร้างภายในอาหาร ซึ่งคุณภาพสำคัญของผลิตภัณฑ์ได้แก่ 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

การวิเคราะห์โปรไฟล์ของเนื้อสัมผัส (Texture Profile Analysis, TPA)

การวิเคราะห์โปรไฟล์ของเนื้อสัมผัส เป็นวิธีทดสอบที่เลียนแบบการเคี้ยวของมนุษย์ หรือเลียนแบบสภาวะที่อาหารถูกกระทำภายในปาก ขณะอยู่บนจาน หรือในภาชนะที่บรรจุอาหาร ซึ่งกราฟเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าของแรงกับระยะเวลาที่ใช้ในการจำลองการบดเคี้ยว โดยการทดสอบจะกักตัวอย่างจำนวน 2 ครั้ง จะได้กราฟแรงกับเวลาที่มีค่า peak ที่เป็นบวก 2 ค่า ดังรูป 2.6 การกดครั้งแรก หมายถึง การกัดอาหารครั้งแรก (first bite) จุดสูงที่สุดในช่วงนี้ คือ

1. Fracturability (การแตกหัก) คือ แรงที่ทำให้ตัวอย่างแตกหัก จะต้องเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีค่าความแข็ง (hardness) พอสมควรและมีการเกาะรวมตัวกัน (cohesiveness) ต่ำ จุดที่เกิดค่านี้อาจเกิดที่แรงกดลดลงในช่วงการกดครั้งแรกด้วย probe

2. Hardness (ความแข็ง) คือ แรงที่สูงสุดของการกดครั้งแรกที่ใช้ในการทำให้ตัวอย่างเสียรูปแรงที่ใช้ในการกดตัวอย่างระหว่างพื้นกราฟเพื่อเปลี่ยนรูปร่างตัวอย่าง

3. Springiness (ความยืดหยุ่น) อัตราของการคืนรูปของวัสดุหลังจากการถูกกดทำให้เสียรูปจากการกดในครั้งแรก

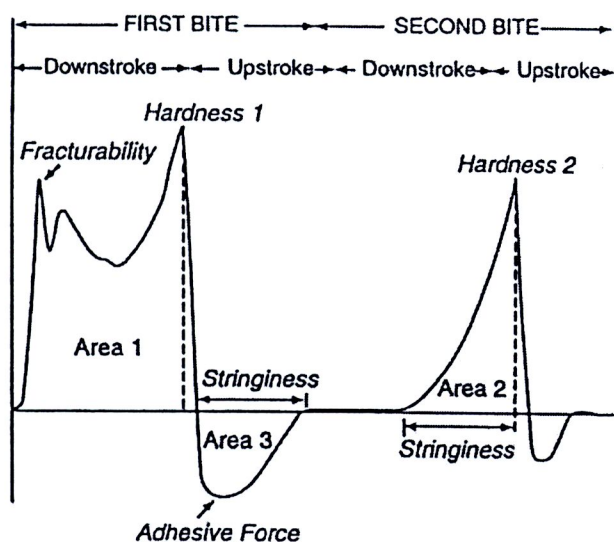
4. Cohesiveness (ความสามารถเกาะรวมตัวกัน) ขอบเขตของวัสดุที่สามารถทนทานต่อการทำให้เสียรูปจากการกดครั้งแรก หรือเกิดการแตกหักของการเกาะรวมกันหรือยึดกันในชั้นตัวอย่าง

5. Chewiness (การทนต่อการเคี้ยว) แรงที่ใช้ในการเคี้ยวหรือบดตัวอย่างจนกระทั่งเสียรูปโดยเป็นตัวอย่างที่มีลักษณะผสมของความแข็ง (hardness) การเกาะตัวรวมกัน (cohesiveness) และความยืดหยุ่น (springiness) ระยะเวลาที่ใช้ในการเคี้ยวบด ตัวอย่างที่เป็นของแข็งในอัตราการใช้ที่คงที่จนกระทั่งสามารถที่จะกลืนได้

6. Gumminess (ความเหนียวเป็นยางหรือกาว) แรงที่ต้องใช้ในการแยกตัวอย่างที่เป็นกึ่งของแข็งจนกระทั่งเสียรูป โดยเป็นตัวอย่างที่มีความแข็ง (hardness) ต่ำ และมีการเกาะตัวรวมกัน (cohesiveness) สูง พลังงานที่ใช้ในการเคี้ยวตัวอย่างที่เป็นกึ่งของแข็งในอัตราการใช้ที่คงที่จนกระทั่งสามารถที่จะกลืนได้

7. Adhesiveness (ความสามารถในการเกาะติดผิววัสดุ) งานที่ใช้ในการเอาชนะแรงระหว่างพื้นผิวของตัวอย่างกับพื้นผิวของวัสดุอื่นที่ตัวอย่างสัมผัสอยู่แรงที่ใช้ในการเคลื่อนย้ายตัวอย่างที่ติดอยู่ในปาก (โดยปกติคือเพดานปาก) ในระหว่างกระบวนการเคี้ยว

8. Crispness (ความกรอบ) เป็นความสามารถในการแตกหักของตัวอย่างในการบดเคี้ยว โดยจะหาได้จากจำนวน Peak ของแรงที่ใช้ในการบดเคี้ยว (Number of peak)



รูป 2.6 แสดงการหา Texture Parameter ต่างๆ ใน TPA Curve

ที่มา: http://www.texturetechnologies.com/texture_profile_analysis.html (22 Jan 2006)

2.6 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับฟักทอง

1. ข้อมูลทั่วไป

ฟักทอง (Pumkin) เป็นพืชผักที่จัดอยู่ในกลุ่มพืชตระกูลแตง (Cucurbitaceae) ซึ่งได้แก่ ฟักทอง แตงกวา แตงร้าน ฟักแฟง มะระ บวบ แตงโม แคนตาลูป ฯลฯ เป็นพืชดั้งเดิมของโลก ตะวันตก ลักษณะเป็นไม้เถาขนาดใหญ่ เลื้อยตามดิน ยาว 5-12 เมตร เถา ก้านใบ แผ่นใบ ก้านดอก กลีบเลี้ยง และผลอ่อนมีขนยาว ใบเป็นใบเลี้ยงเดี่ยวเว้าเป็นหยัก ดอกเดี่ยว ดอกตัวผู้กับตัวเมียแยกกัน แต่อยู่ในเถาเดียวกัน ผิวผลเมื่อยังอ่อนออกสีเขียว เมื่อแก่จะเป็นสีเขียวสลับเหลือง ปกติฟักทองเมื่อแก่จัดจะมีสีเหลืองอมส้ม ผิวขรุขระ เปลือกแข็ง เนื้อในสีเหลือง ไข่เส้นใยสีเหลืองนํม มีเมล็ดสีขาวแบน ๆ ติดอยู่จำนวนมาก ปลูกได้ทั่วไปทั้งในเขตร้อนและเขตหนาว ฟักทองมีกากใยสูง อุดมด้วยวิตามินเอช่วยบำรุงผิวพรรณและถนอมสายตา มี “กรดโปรโฟโอนิก” กรดนี้ทำให้เซลล์มะเร็งอ่อนแอลง ในเนื้อฟักทองมีแคโรทีนและเบต้า เป็นพืชผักที่มีราคาถูก นิยมนำมาเป็นส่วนประกอบในอาหาร และนำไปทำของหวานเป็นอาหารว่าง ใช้แต่งสีขนม เช่น ขนมฟักทอง ลูกชุบ โดยนำเนื้อนี้สุกมาขีกับแป้งหรือถั่วกวน ยอดอ่อนนำมาลวกจิ้ม น้ำพริก หรือใส่แกงเลียง แกงส้มเปรอะ แกงส้มเป็นต้น เนื้อใช้ทำอาหารได้ทั้งคาว-หวาน ทั้งผัด-แกง-ขนม และใช้เป็นอาหารเสริมในเด็กเล็ก รวมทั้งคัดแปลงมาใช้โรยหน้าหรือปนในขนมต่างๆ ทำให้มีสีสันสวยงาม และมีคุณค่าทางอาหารมากยิ่งขึ้น

แหล่งปลูกฟักทองในประเทศไทย มีหลายจังหวัด แต่ที่ปลูกมากคือ ศรีสะเกษ, สกลนคร, ขอนแก่น, กาญจนบุรี, ชุมพร และฉะเชิงเทรา ซึ่งจะทยอยกันให้ผลผลิตออกมาสู่ท้องตลาด ทำให้มีฟักทองขายตลอดทั้งปี

ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ ฟักทองเป็นพืชผักที่มีลำต้นทอดและเลื้อยไปตามพื้นดิน เช่นเดียวกับแตงโม มีดอกสีเหลือง ทั้งตัวผู้และตัวเมียจะแยกกันแต่อยู่ในต้นเดียวกัน ดังนั้น จึงต้องการช่วยผสมเกสร โดยวิธีธรรมชาติ เช่น ลมพัด หรือมีแมลงผสมเกสร หรือผู้ปลูกช่วยผสมเกสร เพื่อการติดผล เป็นไม้เถาอ่อน มีขนสาบมือ มีหนวดสำหรับเกี่ยวพันทอดไปตามพื้นดิน จึงต้องการเนื้อที่ปลูกมากกว่าพืชผักอื่นๆ เป็นพืชใบเลี้ยงคู่ที่มีอายุปีเดียว (ฤดูเดียว) เมื่อให้ผลแล้วก็ตายไป มีหลายพันธุ์ทั้งแบบต้นเลื้อยและเป็นพุ่มเตี้ย พันธุ์เบาอายุเก็บเกี่ยวประมาณ 50 - 60 วัน ส่วนพันธุ์หนักมีอายุตั้งแต่หยอดเมล็ดจนติดผลอ่อน 45 - 60 วันและให้ผลแก่เมื่อ 120 - 180 วัน โดยทยอยเก็บผลได้หลายครั้งจนหมดผล

พันธุ์ฟักทอง มีพันธุ์พื้นเมืองหลายพันธุ์ เรียกตามลักษณะของผล เช่น พันธุ์ข้องปลา จะมีลักษณะของผลคล้ายข้องปลา, พันธุ์ผลมะพร้าว จะมีลักษณะผลคล้ายมะพร้าว เป็นต้น

ฟักทองพันธุ์ดำ เมื่อแก่เปลือกจะมีสีเขียวเข้มอมดำ เปลือกจะขรุขระเป็นปุ่มปม คล้ายผิวทางคอก (บางที่ก็เรียกพันธุ์ทางคอก) ก้นของผลยุบเข้าไปในผล ทำให้ปอกเปลือกยาก แต่เป็นพันธุ์หนักผลโต

ฟักทองพันธุ์น้ำตก ผิวจะไม่ค่อยขรุขระนัก ก้นของผลจะนูนออกมา ทำให้ปอกเปลือกง่าย ผลเล็กกว่าพันธุ์ดำเล็กน้อย พันธุ์ฟักทองนี้ จะมีชื่อเรียกแต่ละท้องถิ่นไม่เหมือนกัน มีขนาดรูปร่างสีเปลือก ผล และเนื้อก็แตกต่างกันไป พันธุ์เบาให้ผลเล็ก อายุเก็บเกี่ยว 120 - 180 วัน โดยทยอยเก็บผลได้เรื่อยๆ 4 - 5 ครั้ง ต้นหนึ่งๆ จะให้ผลได้ 4 - 5 ผล หรือมากกว่าถึง 7 ผล

การเก็บเกี่ยวผลผลิต ฟักทองเป็นพืชผักที่แมลงไม่ค่อยชอบทำลายเมื่อผลแก่เก็บเกี่ยวได้เลย โดยสังเกตสีเปลือก สีจะกลมกลืนเป็นสีเขียวกัน ไม่แตกต่างกันมากนักจนวลขึ้นเต็มทั้งผล คือมีนวลขึ้นตั้งแต่หัวไปจนตลอดทั้งผล แสดงว่าแก่จัด การเก็บควรเหลือขั้วติดไว้ด้วยสักพอประมาณเพื่อช่วยให้เก็บรักษาได้นานขึ้น สามารถเก็บผลไว้รอขาย หรือบริโภคได้นานๆ โดยไม่ต้องใส่ตู้เย็น

การให้ผลผลิต จะทยอยเก็บผลได้ 5 - 6 ครั้ง เก็บได้เรื่อยๆ ถ้าปลูกเดือนกุมภาพันธ์จะเก็บผลได้ในเดือนมิถุนายน (พันธุ์หนัก) ทยอยเก็บไปได้เรื่อยๆ จนเดือนกรกฎาคม ต้นหนึ่งถึง 5 - 7 ผล 1 ไร่ ให้ผลผลิตประมาณ 1 - 1.5 ตัน ถ้าดูแลรักษาใส่ปุ๋ยดีจะให้ถึง 2 ตัน (น้ำหนักสด) ถ้าพันธุ์เบาปลูกได้ 50 - 60 วัน ก็เก็บผลได้

การใช้ประโยชน์และคุณค่าทางอาหาร

ฟักทองมีสารสังเคราะห์จากพืชประเภทแคโรทีนอยด์ เช่น เบต้าแคโรทีน ซึ่งมีคุณสมบัติเป็น สารต้านอนุมูลอิสระ ซึ่งมีอยู่ในเนื้อสีเหลืองของฟักทอง มีส่วนช่วยลดโอกาสการเกิดมะเร็งได้ หากกินฟักทองทั้งเปลือกจะได้ฤทธิ์ทางยา สามารถกระตุ้นการหลั่งอินซูลินซึ่งช่วยควบคุมระดับน้ำตาลในเส้นเลือด ป้องกันการเกิดเบาหวาน ความดันโลหิต นอกจากนี้ยังช่วยบำรุงตับ ไต นัยน์ตา และสร้างเซลล์ใหม่ทดแทนเซลล์ที่ตายไป

นอกจากนี้ยังเป็นพืชผักที่มีกากใยมากพอสมควร ดังนั้นจึงช่วยให้ระบบย่อยอาหารดีขึ้น และไม่ทำให้อ้วน เพราะมีแคลอรีไม่สูงมาก ผู้ที่ต้องการมีรูปร่างสวยงามควรบริโภคเป็นประจำและ ฟักทองยังมีวิตามินสูงซึ่งช่วยเสริมสร้างคอลลาเจนใต้ผิวหนังทำให้ผิวพรรณมีน้ำมีนวล และสายตา อีกด้วย ฟักทองเหมาะสำหรับสตรีหลังคลอดบุตร เนื่องจากขาดธาตุฟอสฟอรัสและที่สำคัญเกี่ยวกับการเกิดหน้าท้องลาย มีฤทธิ์อุ่น ช่วยย่อยอาหาร ทำให้ กระเพาะอุ่น บำรุงกำลัง ลดอาการอักเสบ แก้ปวด

ตารางที่ 2.2 คุณค่าทางโภชนาการของฟักทอง (ส่วนที่รับประทานได้ 100 กรัม)

สารอาหาร/หน่วย	เมล็ดฟักทอง	เนื้อฟักทอง	ยอดฟักทอง
พลังงาน (แคลอรี)	124	43	16
โปรตีน (กรัม)	2.9	1.9	2.0
คาร์โบไฮเดรต (กรัม)	24.6	8.5	1.6
ไขมัน (กรัม)	1.5	0.2	0.2
แคลเซียม (มิลลิกรัม)	7	21	6
ฟอสฟอรัส (มิลลิกรัม)	17	17	9
เหล็ก (กรัม)	1.9	4.9	1.2
วิตามินเอ (มิลลิกรัม)	3,200	3,266	4,083
วิตามินบี 1 (มิลลิกรัม)	0.10	0.10	0.08
วิตามินบี 2 (มิลลิกรัม)	0.04	0.05	0.18
ไนอาซีน (มิลลิกรัม)	1.0	1.0	1.4
วิตามินซี (มิลลิกรัม)	84	52	41

ที่มา : <http://dnfe5.nfe.go.th/ilp/occupation/45305/45305-1.html>

ตารางที่ 2.3 ปริมาณเบต้าแคโรทีนจากพืชผัก 100 กรัม

พืช	ไมโครกรัม
แครอท	5,330
ผักปวยเล้ง	3,535
มะม่วงสุก	2,000
มะละกอสุก	810
มะเขือเทศ	620
บรอกโคลี	575
ฟักทอง	450

จากตารางที่ 2.3 เป็นตารางแสดงปริมาณเบต้าแคโรทีนที่เป็นสารต่อต้านอนุมูลอิสระ และเปลี่ยนเป็นวิตามินเอ (ตามจำนวนที่ร่างกายต้องการ) ในพืชผัก 100 กรัม จะให้เบต้าแคโรทีนเป็นจำนวนไมโครกรัมซึ่งฟักทองจะให้ปริมาณเบต้าแคโรทีน 450 ไมโครกรัม

สารเบต้าแคโรทีน

ในส่วนของเบต้าแคโรทีนมักจะพบในผัก ผลไม้ที่มีสีส้ม เหลือง หรือแดง อย่างเช่น มะเขือเทศ แดงโม ข้าวโพดอ่อน แคนตาลูป มะละกอสุก แครอท ฟักทอง และผักใบเขียวอย่าง คะน้า ผักบุ้ง บล๊อคโคลี ในทางวิทยาศาสตร์ค้นพบว่า สูตรโครงสร้างทางเคมีของเบต้าแคโรทีนเป็นสูตรโครงสร้างทางเคมีที่มีขนาดใหญ่มาก เมื่อเรากินเข้าไปมันจะทำหน้าที่เปลี่ยนโมเลกุลของเบต้าแคโรทีนให้กลายเป็นวิตามินเอ และสำหรับเบต้าแคโรทีน 1 โมเลกุล จะสามารถให้วิตามินเอ 2 โมเลกุล เบต้าแคโรทีนเป็นสารอาหารชนิดหนึ่งที่ถูกค้นพบว่ามีคุณสมบัติในการทำลายอนุมูลอิสระได้อย่างดีเลิศ โดยพบว่าเบต้าแคโรทีนจะทำปฏิกิริยาด้านการเกิดออกซิเดชันระหว่างอนุมูลอิสระกับสารสำคัญในเซลล์ที่มีชีวิต โดยแข่งทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระเสียก่อน แล้วขับถ่ายออกไปตามระบบขับถ่ายต่างๆ ของร่างกาย เซลล์ของเราที่รอดชีวิตจากขบวนการในการทำลายโดยอนุมูลอิสระดังกล่าว เราเรียกขบวนการในการแข่งทำปฏิกิริยาของเบต้าแคโรทีนกับอนุมูลอิสระว่า การต้านปฏิกิริยาออกซิเดชัน หรือเอนตี้ออกซิเดชันนั่นเอง

เบต้าแคโรทีน คือสารสำคัญในผักผลไม้ที่มีฤทธิ์ต้านมะเร็งและยังช่วยกระตุ้นร่างกายให้สู้กับเชื้อร้าย คำว่า “แคโรทีน” ได้ชื่อจากแครอท เพราะแคโรทีนเป็นสารสีเหลืองส้มที่มีมากในแค

รอต พืชผักผลไม้มากมายมีสารแคโรทีนและสารแคโรทีนก็มีกว่าห้าร้อยชนิดรวมกันเรียกว่าแคโรทีนอยด์ (Carotenoids)

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

เบต้าแคโรทีนจะเปลี่ยนแปลงในกระแสเลือดกลายเป็นกรดเรติโนอิกซึ่งใช้เป็นสารต้านมะเร็งซึ่งจะถูกสะสมไว้ในปอด ตับ ไต และชิ้นไขมัน ซึ่งสามารถเปลี่ยนเป็นกรดเรติโนอิกทันทีที่ร่างกายต้องการ ความร้อนทำให้เบต้าแคโรทีนเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและถูกดูดซึมได้ดีขึ้น

2.7 สมการจลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง

2.7.1 สมการจลนพลศาสตร์การอบแห้งทางทฤษฎี

การอบแห้งวัสดุที่มีโครงสร้างภายในเป็นรูพรุน โดยส่วนใหญ่ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง การเคลื่อนที่ของน้ำส่วนมากจะอยู่ในรูปของเหลว เป็นผลมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น (Vapor diffusion) ที่เป็นไปในลักษณะการแพร่ของน้ำภายในวัสดุ การถ่ายเทมวลภายในอธิบายได้ด้วยสมการการแพร่ความชื้นโดยอาศัยกฎข้อที่ 2 ของ Fick

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla^2 DM \quad (2.1)$$

เมื่อ	M	คือ ความชื้นของวัสดุ, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง
	D	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวม, m ² /h
	t	คือ เวลา, h

ถ้าพิจารณาการถ่ายเทมวลในทิศทาง x, y และ z ซึ่งตั้งฉากกันและกันและตั้งสมมุติฐานว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ไม่ขึ้นกับปริมาณความชื้นในวัสดุ (ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คงที่) จะได้ว่า

$$\frac{\partial MR}{\partial t} = D \left[\frac{\partial^2 MR}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 MR}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 MR}{\partial z^2} \right] \quad (2.2)$$

โดย
$$MR = \frac{(M - M_{eq})}{M_{in} - M_{eq}} \quad (2.3)$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้นของวัสดุ
 M_{in} คือ ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง
 M_{eq} คือ ความชื้นสมดุลของวัสดุ, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง

การหาคำตอบของสมการ (2.2) ต้องกำหนดสภาวะเริ่มต้นและสภาวะขอบเขตดังนี้

$$M(x, y, z, 0) = M_{in} \quad (2.4)$$

$$M(x, z, 0, t) = M(x, 0, z, t) = M(0, y, z, t) = M_{eq}$$

$$M(x, y, l_z, t) = M(x, l_y, z, t) = M(l_x, y, z, t) = M_{eq} \quad (2.5)$$

เมื่อ l_x คือ ความกว้าง, m
 l_y คือ ความหนา, m
 l_z คือ ความยาว, m

หาคำตอบของสมการ (2.2) โดยการแยกตัวแปรจะได้สมการการแพร่ของความชื้นในวัสดุรูปทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์จะได้

$$\overline{MR} = \left[\frac{8}{\pi^2} \right]^3 \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \left[\frac{1}{(2i+1)^2} \frac{1}{(2j+1)^2} \frac{1}{(2k+1)^2} \right] \exp \left[- \left[\frac{(2i+1)^2}{l_x^2} + \frac{(2j+1)^2}{l_y^2} + \frac{(2k+1)^2}{l_z^2} \right] \pi^2 D t \right] \quad (2.6)$$

เมื่อ $\overline{MR}$ คือ อัตราส่วนความชื้นเฉลี่ย
 D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น, m^2/h
 i, j, k คือ จำนวนเต็มมีค่า 0, 1, 2, 3....

ตารางที่ 2.4 แสดงสรุปสมการจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งวัสดุรูปทรงต่างๆ

รูปทรง	สมการ
ทรงสี่เหลี่ยม ลูกบาศก์	$\overline{MR} = \left[\frac{8}{\pi^2}\right]^3 \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \left[\frac{1}{(2i+1)^2} \frac{1}{(2j+1)^2} \frac{1}{(2k+1)^2} \right] \exp \left[- \left[\frac{(2i+1)^2}{I_x^2} + \frac{(2j+1)^2}{I_y^2} + \frac{(2k+1)^2}{I_z^2} \right] \pi^2 Dt \right]$
ทรงกลม	$\overline{MR} = \left(\frac{6}{\pi^2}\right) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp \left(- n^2 \pi^2 Dt / r^2 \right)$
infinite slab	$\overline{MR}(t) = \frac{8}{\pi^2} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{(2m+1)^2} \exp \left[- (2m+1)^2 \pi^2 \frac{Dt}{L^2} \right]$
infinite cylinder	$\overline{MR}(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{(\lambda_n r_o)^2} \exp \left[- (\lambda_n r_o)^2 \left(\frac{Dt}{r_o^2} \right) \right]$
ทรงกระบอก สั้น	$\overline{MR} = \frac{32}{\pi^2} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{(2m+1)^2} \exp \left(- (2m+1)^2 \pi^2 \frac{Dt}{L^2} \right) \right] \left[\frac{1}{(\lambda_n r_o)^2} \exp \left(- (\lambda_n r_o)^2 \left(\frac{Dt}{r_o^2} \right) \right) \right]_x$

ตารางที่ 2.5 สมการแบบจำลองค่า D ของการอบแห้งวัสดุต่างๆ 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	1.6x10 ⁻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	1.4x10 ⁻¹⁷	
3	$D = (0.000047T^2 - 0.011T + 0.28)(-0.11V^2 + 0.64V + 0.72)$ $(-0.01RH^2 + 0.69RH - 18.21) \times 10^{-7}$ (อบแห้งกล้วย , T= 60 - 100°C , V = 0.5 – 2 m/s , RH = 2 – 26%)	0.95	9.5x10 ⁻¹⁸	

2.7.2 สมการจลนพลศาสตร์การอบแห้งกึ่งทฤษฎี

สมการการอบแห้งกึ่งทฤษฎี สร้างโดยการสมมติว่าอัตราการอบแห้งภายใต้สภาวะคงที่แปรผันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความแตกต่างของความชื้นของวัสดุ และความชื้นสมดุล ข้อสมมุติฐานดังกล่าวคล้ายกับการเย็นตัวของนิวตัน ดังสมการ

$$\frac{dM}{dt} = -k (M - M_{eq}) \quad (2.7)$$

เมื่อ k = ค่าคงที่ของการอบแห้ง, h^{-1}

จัดรูปแบบสมการใหม่จะได้

$$\frac{dM}{(M - M_{eq})} = -k dt \quad (2.8)$$

เมื่อกำหนดสภาวะเริ่มต้น $M(0) = M_{in}$ จะได้คำตอบดังสมการ

$$\ln \frac{(M - M_{eq})}{(M_{in} - M_{eq})} = -kt \quad (2.9)$$

$$MR = \frac{(M - M_{eq})}{(M_{in} - M_{eq})} = \exp(-kt) \quad (2.10)$$

ค่าคงที่การอบแห้ง (k) เป็นคุณสมบัติเฉพาะของผลิตภัณฑ์หนึ่งๆ ภายในช่วงสภาวะอบแห้ง และวัสดุอบแห้งที่ทำการทดลองเท่านั้น สมการกึ่งทฤษฎีนี้สามารถใช้ได้ต่อเมื่อวัสดุอบแห้งมีลักษณะใกล้เคียงกับการทดลอง