แบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งพริกไทยดำด้วยเทคนิคการสลับลมร้อน

พิรุฬห์รัชย์ ไทยสมัคร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยแม่โจ้
พ.ศ. 2557

ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยแม่โจ้

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร

ชื่อเรื่อง

แบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งพริกไทยดำด้วยเทคนิคการสลับลมร้อน

โดย

พิรุฬห์รัชย์ ไทยสมัคร

พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการที่ปรึกษา .....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ จตุรงค์ล้ำเลิศ)

วันที่ 17 เดือน เม.ย. พ.ศ. 2557

กรรมการที่ปรึกษา .....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนวัฒน์ นิทัศน์วิจิตร)

วันที่ 17 เดือน เม.ย. พ.ศ. 2557

กรรมการที่ปรึกษา .....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จาตุพงศ์ วาฤทธิ์)

วันที่ 17 เดือน เม.ย. พ.ศ. 2557

ประธานอาจารย์ประจำหลักสูตร .....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ จตุรงค์ล้ำเลิศ)

วันที่ 17 เดือน เม.ย. พ.ศ. 2557

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว .....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จาตุพงศ์ วาฤทธิ์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 17 เดือน เม.ย. พ.ศ. 2557

ชื่อเรื่อง แบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งพริกไทยดำ ด้วยเทคนิคการสลับลมร้อน

ชื่อผู้เขียน นางสาวพิรุฬห์รัชย์ ไทยสมัคร

ชื่อปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร

ประธานกรรมการที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ จตุรงค์ล้ำเลิศ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการอบแห้งพริกไทยดำแบบชั้นหนาอยู่กับที่ โดยแบบจำลองถูกนำเสนอในรูปแบบอัตราส่วนอุณหภูมิไร้มิติและอัตราส่วนความชื้นไร้มิติซึ่งเปลี่ยนแปลงตามเวลาและชั้นความหนา ขั้นตอนการทำวิจัยถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกทำการเก็บรวบรวมข้อมูลการกระจายอุณหภูมิและความชื้นตลอดกระบวนการอบแห้งซึ่งศึกษาการอบแห้งพริกไทยที่อุณหภูมิ 100 และ 115 °C (พริกไทยไม่ผ่านการลวกและพริกไทยผ่านการลวก) โดยศึกษาอิทธิพลตัวแปรสองตัวแปรคือ ความหนาของชั้นพริกไทย 20, 30 และ 40 cm และรูปแบบการไหลของอากาศ (การไหลแบบธรรมดาและการไหลแบบสลับทิศทางลมร้อน) ส่วนที่สองทำการประมาณค่าตัวแปรไร้มิติสำหรับใช้ในการคำนวณในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายพฤติกรรมการอบแห้ง ผลการจากการศึกษาพบว่าแบบจำลองแบบชั้นหนาอยู่กับที่ให้ผลของอัตราส่วนอุณหภูมิและอัตราส่วนความชื้นคล้ายกันในการอบแห้งทั้งสองรูปแบบ แบบจำลองนี้ใช้อธิบายการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อนได้ที่ความหนา 20-40 เซนติเมตร และผลจากการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ สามารถนำไปประกอบสร้างแบบจำลองการอบแห้งทางทฤษฎี อีกทั้งสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการปรับปรุงตู้อบและกระบวนการอบแห้งในอุตสาหกรรมเพื่อลดต้นทุนในการอบแห้ง

Title	Mathematical Modeling and Simulation of Batch Drying of Black Pepper in Fixed-Beds with Air Flow Reversal
Author	Miss Phirunrat Thaisamak
Degree of	Master of Engineering (Food Engineering)
Advisory Committee Chairperson	Assistant Professor Dr. Somkiat Jaturonglumlert

ABSTRACT

The purpose of this research study was to compare the fixed deep-bed drying of black pepper. The deep-bed drying model aims to study the temperature and moisture ratios which varies with bed depth and drying time. The drying process was divided into two parts. The first part included data collection of the temperature and moisture distribution, which was affected by two independent variables, e.g., the depth (at 20, 30 and 40 cm) and types of airflow (normal airflow vs. reverse airflow every 1 hour). The second part was to analyze the dimensionless variable to explain the drying behavior. Results show that temperature and moisture ratios of normal airflow and reverse airflow were found to be of similar trends. The deep-bed model using the airflow reversal process could be used for drying at 20-40 cm bed depth, which some parameters can be applied to simulate in theoretical modeling. This model can explain the behavior of the drying process following the depth and type airflow, future more can applied to use for improve dryer and the drying process in the industry to reduce the cost.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นผลงานที่ผู้วิจัยได้ทุ่มเทความตั้งใจ สติปัญญา กำลังกายและกำลังใจ จนกระทั่งสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี โดยได้รับความอนุเคราะห์ คำแนะนำและความช่วยเหลือจากบุคคลหลายฝ่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งขอขอบพระคุณท่านผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ จตุรงค์ล้ำเลิศ ซึ่งเป็นประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้สละเวลาอันมีค่า ให้ความรู้ คำแนะนำและคำปรึกษา ตลอดจนให้ความดูแลและเอาใจใส่เป็นอย่างดี จนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี จึงขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้เป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จาตุพงศ์ วาฤทธิ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนวัฒน์ นิทัศน์วิจิตร ที่กรุณารับเป็นกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำ ความรู้ คำปรึกษาในด้านต่าง ๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ด้วยดีตลอดมา

ขอขอบพระคุณ คุณนิยนาฏ อินตาแก้ว และพนักงานประจำของบริษัท นิธิฟูดส์ จำกัด ที่อนุเคราะห์ให้ใช้สถานที่ เครื่องมือต่าง ๆ ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย และอำนวยความสะดวกในการทำงานตลอดระยะเวลาที่เข้าทำการทดลอง จนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วง

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร ที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์สำหรับเตรียมพริกไทย ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ คณาจารย์ ข้าราชการและเจ้าหน้าที่ของสาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรและสาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร ที่คอยให้กำลังใจและคำแนะนำดี ๆ เสมอ และที่ให้ความช่วยเหลือเพื่อให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณ คุณวิภา เทพปินตา คุณจันจิรา จิตแสง คุณสกาวเดือน แก้วดำ และน้อง ๆ นักศึกษาปริญญาตรีและปริญญาโท ห้องปฏิบัติการอบแห้งทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ และเป็นกำลังใจในการทำงานวิจัยครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อศรณ์รังสรรค์ ไทยสมัคร คุณแม่ชญาภา ไทยสมัคร และคุณธนัญชนก ไทยสมัคร ที่ให้การเลี้ยงดูอบรม ส่งเสริมการศึกษา เป็นกำลังใจที่ดี ให้การสนับสนุนทั้งในด้านการเรียนและการดำเนินชีวิต ให้คำปรึกษา จนทำให้ผู้จัดทำโครงงานประสบความสำเร็จในการเรียน

ท้ายที่สุดนี้ ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์เล่มนี้คงเป็นประโยชน์สำหรับผู้อ่านไม่มากก็น้อยต่อไป

พิรุฬห์รัชย์ ไทยสมัคร

มีนาคม 2557

สารบัญ

หน้า

สารบัญตาราง

สารบัญภาพ

สารบัญตารางผนวก

สารบัญภาพผนวก

อักษรย่อและสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
A	อัตราการถ่ายเทมวล	กิโลกรัมต่อชั่วโมง
C	ความเข้มข้นของเหลว	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
Cp_{da}	ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ	จูลต่อกิโลกรัม องศาเซลเซียส
Cp_{dp}	ความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุ	จูลต่อกิโลกรัม องศาเซลเซียส
D_{eff}	สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล	ตารางเมตรต่อวินาที
D_0	สัมประสิทธิ์การแพร่คงที่	ตารางเมตรต่อวินาที
d	มวลแห้งของวัสดุ	กิโลกรัม
E_a	พลังงานกระตุ้นที่ใช้ในการอบแห้ง	กิโลจูลต่อโมล
H	หน่วยการถ่ายโอนตามความหนาชั้นวัสดุ	เมตร
h_{fg}	ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ	จูลต่อกิโลกรัม
K	ค่าคงที่หน่วยการถ่ายโอน	ชั่วโมง$^{-1}$
k	ค่าคงที่การอบแห้งชั้นบาง	ชั่วโมง$^{-1}$
MR	อัตราส่วนความชื้น	ไร้หน่วย
M_{eq}	ความชื้นสมดุล	มาตรฐานแห้ง
M_p	ความชื้นของวัสดุ	มาตรฐานแห้ง
$MR_{\exp}$	อัตราส่วนความชื้นจากการทดลอง	ไร้หน่วย
MR_{pre}	อัตราส่วนความชื้นจากการทำนาย	ไร้หน่วย
N	จำนวนค่าสังเกต	ไร้หน่วย
TR	อัตราส่วนอุณหภูมิ	ไร้หน่วย
T_p	อุณหภูมิของวัสดุ	องศาเซลเซียส
T_{ao}	อุณหภูมิอากาศร้อนบริเวณทางเข้า	องศาเซลเซียส
T_{am}	อุณหภูมิอากาศแวดล้อม	องศาเซลเซียส
t	เวลาการอบแห้ง	องศาเซลเซียส
X	ความหนาชั้นวัสดุ	เมตร
V_{a0}	ความเร็วลมบริเวณทางเข้า	เมตรต่อวินาที
ρ_{da}	ความหนาแน่นของอากาศ	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
ρ_{dp}	ความหนาแน่นของวัสดุ	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
υ	ตัวแปรไร้มิติของตัวแปรความหนา	ไร้หน่วย
θ	ตัวแปรไร้มิติของตัวแปรเวลา	ไร้หน่วย
ε_m	ประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลไร้มิติ	ไร้หน่วย
ε_t	ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนไร้มิติ	ไร้หน่วย
$\%RH$	เปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์	ไร้หน่วย

บทที่ 1
บทนำ

ความสำคัญของปัญหา

พริกไทย มีชื่อทางวิทยาศาสตร์คือ *Piper nigrum* L. เป็นพืชสมุนไพรที่ได้รับความนิยมอย่างมากในกลุ่มสมุนไพรเครื่องเทศ ทำให้ได้รับสมญานามว่า "ราชาแห่งเครื่องเทศ" (king of spices) ด้วยความที่เม็ดพริกไทยมีรสอุ่น ช่วยในการขับลม ขับเหงื่อ ช่วยย่อยอาหาร ลดไขมันในเส้นเลือด ด้วยสรรพคุณที่หลากหลาย จึงส่งผลให้พริกไทยเป็นสมุนไพรทางเลือกชนิดหนึ่งสำหรับคนที่รักสุขภาพ พริกไทยที่พบเห็นในท้องตลาดทั่วไปมีอยู่มากมายหลายรูปแบบ ได้แก่ พริกไทยสด พริกไทยขาว พริกไทยดำ พริกไทยผง เป็นต้น โดยแหล่งเพาะปลูกพริกไทยส่วนใหญ่ของประเทศอยู่ในพื้นที่จังหวัดจันทบุรี พื้นที่เพาะปลูกพริกไทยในจังหวัดนี้คิดเป็นร้อยละ 95 ของพื้นที่ปลูกทั้งหมดภายในประเทศ ส่วนอีกร้อยละ 5 นั้นเป็นพื้นที่เพาะปลูกที่อยู่ภายในจังหวัด ชลบุรี ระยอง ตราด เป็นต้น ซึ่งผลผลิตพริกไทยได้ทำรายได้จากการส่งออกให้กับประเทศปีละ 30-60 ล้านบาท (สำนักเศรษฐกิจการเกษตร, 2555)

การอบแห้งด้วยการสลับทิศทางลมร้อน เป็นวิธีการอบแห้งที่ถูกพัฒนามาจากการอบแห้งแบบ Batch ซึ่งการอบแห้งแบบดังกล่าวในกระบวนการอบแห้งอากาศร้อนที่มาจากแหล่งความร้อนจะถูกบังคับทิศทางให้เป็นไปในทิศทางเดียวนั่นคือ จากด้านล่างขึ้นด้านบนของชั้นวัสดุเท่านั้น โดยความชื้นจะถูกระบายออกในทิศทางเดียว ทำให้เกิดการแห้งของวัสดุจากด้านล่างขึ้นด้านบน ซึ่งส่งผลให้ใช้เวลาในการอบแห้งนาน อีกทั้งในระหว่างกระบวนการอบแห้ง อาจต้องมีการพลิกกลับวัสดุเพื่อทำให้วัสดุด้านบนสัมผัสกับอากาศร้อน แต่ในกระบวนการพลิกกลับอาจทำให้ส่งผลกระทบบางส่วนซึ่งบางครั้งไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ เช่น การสูญเสียความร้อนจากการเปิดตู้ ความเสียหายของผลิตภัณฑ์บางส่วนที่เกิดการแตกหรือบุบ ในระหว่างกระบวนการพลิกกลับ เป็นต้น แต่การอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อนจะเป็นการบังคับให้อากาศร้อนไหลเข้าได้ทั้งด้านล่างและด้านบน โดยใช้วาล์วในการบังคับทิศทางการให้เป็นไปทีละด้าน วิธีการอบแห้งด้วยการสลับทิศทางลมร้อนสามารถช่วยลดปัญหาผลผลิตแห้งไม่สม่ำเสมอได้ เนื่องจากการสลับทิศทางลมร้อนทำให้เกิดการพาความชื้นออกได้ 2 ทิศทาง อีกทั้งการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อนยังช่วยลดความยุ่งยากในขั้นตอนการพลิกกลับ และลดความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นในระหว่างการพลิกกลับ ซึ่งช่วยลดความเสียหายของผลิตภัณฑ์และลดต้นทุนการผลิตได้ในระดับหนึ่ง

การผลิตพริกไทยในระดับอุตสาหกรรม ส่วนใหญ่เป็นกระบวนการแปรรูปพริกไทยโดยกระบวนการอบแห้ง ลักษณะของพริกไทยดำดังแสดงในภาพ 1 ในการอบแห้งต้องใช้เวลาในการอบแห้งประมาณ 4 ชั่วโมง อีกทั้งต้องใช้แรงงานคนในการพลิกกลับพริกไทยเพื่อให้พริกไทยสัมผัสอากาศร้อนได้อย่างทั่วถึง ซึ่งในกระบวนการอบแห้งพริกไทยโดยทั่วไป จะทำการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนซึ่งในบางครั้ง คุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งด้วยลมร้อนไม่เป็นไปตามมาตรฐานและไม่สม่ำเสมอ Vipa *et al.* (2013) ได้ทำการศึกษาการลดต้นทุนในการผลิตพริกไทยผงในระดับอุตสาหกรรมด้วยการสลับทิศทางลมร้อนระหว่างการอบแห้ง โดยวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษากระบวนการอบแห้งที่เหมาะสมด้วยเทคนิคการสลับลมร้อน ซึ่งผลจากงานวิจัยได้กระบวนการอบแห้งด้วยเทคนิคการสลับลมร้อนที่เหมาะสมและนำไปประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์ และได้แนวทางในการดัดแปลงเครื่องอบแห้งในระดับอุตสาหกรรม

ภาพ 1 ลักษณะของพริกไทยดำ

อย่างไรก็ตามในงานวิจัยของ Vipa *et al.* (2013) ไม่ได้มีการศึกษาเชิงลึกถึงการกระจายความร้อนภายในชั้นของการอบแห้งพริกไทย และการหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้ง โดยการหาสภาวะที่เหมาะสมสามารถทำได้ด้วยการออกแบบการทดลองโดยการกำหนดเงื่อนไขในการทดลองที่เกี่ยวข้องได้แก่ ความหนาของชั้นพริกไทย ระยะเวลาในการสลับทิศทางลมร้อน เป็นต้น ซึ่งหากต้องทำการทดลองจำเป็นต้องใช้จำนวนการทดลองที่มาก ส่งผลต้องใช้ต้นทุนของวัสดุในการทดลองมากตามไปด้วย ดังนั้นงานวิจัยที่เสนอนี้จึงเป็นงานวิจัยต่อ

Janjai *et al.* (2011) ได้ทำการศึกษาการอบแห้งลำไยด้วยตู้อบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อน โดยได้กล่าวว่าการอบแห้งลำไยด้วยการสลับทิศทางลมร้อนช่วยลดความยุ่งยากในขั้นตอนการพลิกกลับ และลดการใช้แรงงานคนในการพลิกกลับด้วย และผลจากงานวิจัยพบว่าการใช้กระบวนการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อนให้ผลของการกระจายอุณหภูมิและความชื้นที่สม่ำเสมอ และคุณภาพของลำไยที่ได้หลังการอบมีคุณภาพดีเทียบเท่ากับลำไยที่มีคุณภาพในท้องตลาด แต่ทั้งนี้ในการออกแบบหรือปรับปรุงตู้อบจะใช้ต้นทุนสูง ใช้ระยะเวลานานและอาจยาวนานต่อเนื่อง เนื่องจากต้องทำการหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้ง วิธีการที่ช่วยลดปัญหา

ระยะเวลาและต้นทุนในการทดลองที่ได้รับความนิยมคือ วิธีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งเป็นวิธีการที่สำคัญอย่างหนึ่งในกระบวนการการอบแห้งอาหารที่สามารถทำนายลักษณะพฤติกรรมของการอบแห้งโดยใช้ข้อมูลการกระจายอุณหภูมิและความชื้น นอกจากผลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ จะสามารถใช้อธิบายพฤติกรรมและทำนายอุณหภูมิ ความชื้นการอบแห้งของพริกไทยดำ ยังสามารถนำผลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไปเป็นแนวทางหรือพื้นฐานในการหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อนได้แม่นยำขึ้น และสามารถประยุกต์ใช้กับเตาอบแห้งขนาดต่าง ๆ ได้

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลของการกระจายอุณหภูมิและความชื้นระหว่างการอบแห้งในการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อน และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งผลจากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำให้สามารถทำนายอุณหภูมิและความชื้นในการอบแห้ง ซึ่งสามารถใช้ประกอบการปรับปรุงกระบวนการอบแห้ง และนำไปประยุกต์ใช้กับเตาอบแห้งขนาดต่าง ๆ
2. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีต่อรูปแบบการไหลของลมร้อน (การไหลแบบธรรมดาและการไหลแบบสลับทิศทางลมร้อน) โดยเปรียบเทียบจากผลของอัตราส่วนความชื้นและอัตราส่วนอุณหภูมิที่แปรผันตามเวลาและชั้นความหนาวัสดุ และทำการหาระดับชั้นความหนาที่เหมาะสมโดยใช้แบบจำลองเพื่อปรับใช้ในระดับอุตสาหกรรม

ขอบเขตของการวิจัย

1. พริกไทยที่นำมาทำงานวิจัยนี้ จะถูกเตรียมโดยบริษัท นิธิฟู้ดส์ จำกัด จังหวัดเชียงใหม่
2. เตาอบแห้งที่ใช้ในการทดลอง เป็นเตาอบแห้งรุ่นบินวัน ขนาด 1 ตัน ของบริษัท เลิศลานนาไทย จำกัด

ประโยชน์ที่จะได้รับ

1. ได้ผลของการกระจายอุณหภูมิในระหว่างการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อน ซึ่งสามารถนำรูปแบบการกระจายอุณหภูมิที่ได้นำไปใช้ในการกำหนดเงื่อนไขในการอบแห้ง และนำไปประกอบการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งได้

2. ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อธิบายพฤติกรรมการอบแห้งพริกไทยดำด้วยการสลับทิศทางลมร้อน โดยผลจากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำให้สามารถทำนายพฤติกรรมการอบแห้ง และเป็นแนวทางหรือพื้นฐานในการหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อนได้แม่นยำขึ้นและสามารถประยุกต์ใช้กับเตาอบแห้งขนาดต่าง ๆ ได้

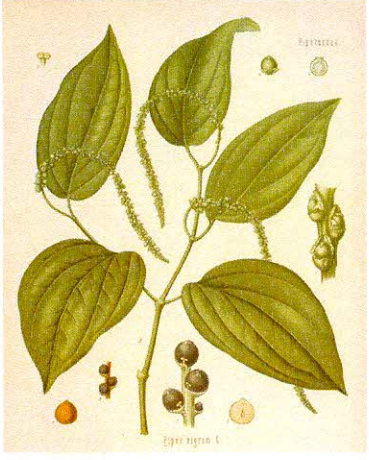
บทที่ 2

การตรวจเอกสาร

พริกไทย

ความรู้ทั่วไป

พริกไทย มีชื่อทางวิทยาศาสตร์คือ *Piper nigrum* L. มีถิ่นกำเนิดในประเทศศรีลังกา อินเดีย และไทย ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของพริกไทย เป็นไม้เลื้อยเนื้อแข็ง เลื้อยได้ไกลถึง 4 เมตร มีอายุยืน ลำต้นเป็นข้อ ๆ คล้ายต้นพลู มีรากขนาดเล็กออกมาตามข้อทุกข้อสำหรับเกาะจับตามต้นไม้หรือค้าง ส่วนรากที่หยั่งลงสู่พื้นดินมีขนาดใหญ่ มีลักษณะใบเป็นใบเดี่ยวรูปไข่สีเขียวหนา ปลายแหลมมีสีเขียวสด ดอกมีขนาดเล็กออกเป็นช่อยาว ไม่มีก้านดอก มีสีขาวปนเหลือง ผลมีลักษณะกลมจัดเรียงตัวแน่นอยู่บนแกน ผลอ่อนมีสีเขียวเมื่อผลสุกจะมีสีแดง ตั้งแต่เริ่มออกดอกจนกระทั่งเก็บเกี่ยวใช้เวลานาน 6 เดือน เจริญเติบโตได้ดีพื้นที่ดินร่วนซุย มีอินทรียวัตถุสูง ไม่มีน้ำขัง และสภาพอากาศร้อนชื้น อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเพาะปลูกอยู่ระหว่าง 10-30 องศาเซลเซียส ลักษณะโดยทั่วไปของต้นพริกไทยดังภาพ 2 เมื่อเข้าสู่ฤดูการเก็บเกี่ยวการเก็บพริกไทยสามารถแบ่งตามวิธีการเก็บและการเตรียมได้ 2 ชนิด คือ พริกไทยดำ (black pepper) และพริกไทยล่อน (white pepper) การปลูกพริกไทยส่วนใหญ่สำรวจพบในเขตร้อนชื้น จากการสำรวจพบว่า ในประเทศไทยมีการปลูกพืชสกุลพริกไทยทั้งสิ้น 43 ชนิด (อรุณรัตน์ และคณะ, 2552) พันธุ์พริกไทยที่เกษตรกรเพาะปลูกได้แก่ พันธุ์มาเลย์ พันธุ์จันทบุรี พันธุ์ปะเหลียน พันธุ์ซาราวัค และพันธุ์กระบี่ เป็นต้น



ภาพ 2 ลักษณะทั่วไปของต้นพริกไทย

ที่มา: Linh Hoang, www (2013)

พริกไทยดำ (black pepper) เป็นพริกไทยที่มีรสชาติเผ็ดร้อนด้วยเพราะในพริกไทยดำนั้นมีน้ำมันหอมระเหย เช่น Piperine ที่ทำให้มีกลิ่นหอม พริกไทยดำมีปริมาณสารอาหารและแร่ธาตุที่เป็นประโยชน์ต่อร่างกายมากมาย เช่น โพแทสเซียม, เหล็ก, แมงกานีส เป็นต้น ซึ่งแร่ธาตุเหล่านี้ช่วยในการควบคุมอัตราการเต้นของหัวใจและความดันโลหิต อีกทั้งในการผลิตเซลล์เม็ดเลือด อีกทั้งยังมีวิตามินอีกหลายชนิดเช่น วิตามินซี ที่ช่วยในการต้านอนุมูลอิสระ และอุดมไปด้วยโพลีฟีฟลาโวนอยด์ที่ต่อต้านอนุมูลอิสระซึ่งสารเหล่านี้ช่วยป้องการเกิดโรคมะเร็งได้ จากข้อมูลการวิเคราะห์สารอาหารที่อยู่ในพริกไทยดำแสดงดังตาราง 1

ตาราง 1 ปริมาณสารอาหารที่อยู่ในพริกไทยดำ 100 กรัม

สารอาหาร	คุณค่าทางอาหาร
Energy	255 Kcal
Carbohydrates	64.81 g
Protein	10.95 g
Total Fat	3.26 g
Cholesterol	0 mg
Dietary Fiber	26.5 g
Choline	11.3 mg
Folic acid	10 mcg
Niacin	1.142 mg
Pyridoxine	0.340 mg
Riboflavin	0.240 mg
Thiamin	0.109 mg
Vitamin A	299 IU
Vitamin C	21 mg
Vitamin E-γ	4.56 mg
Vitamin K	163.7 mcg
Sodium	44 mg
Potassium	1259 mg
Calcium	437 mg
Copper	1.127 mg
Iron	28.86 mg
Magnesium	194 mg
Manganese	5.625 mg
Phosphorus	173 mg
Zinc	1.42 mg

ที่มา: USDA National nutrient data base, (2012)

ทฤษฎีการอบแห้ง

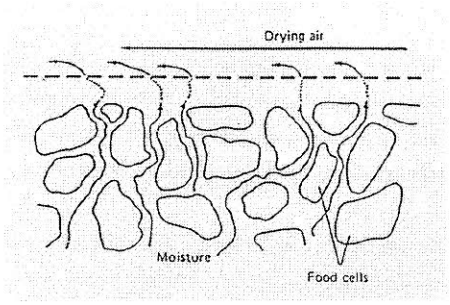
พื้นฐานการอบแห้ง

การตากแห้งและการอบแห้งอาหาร (food drying and dehydration) เป็นกระบวนการที่ใช้ในการแปรรูปหรือใช้ในการถนอมอาหาร การตากแห้งเป็นการระเหยน้ำออกจากของแข็ง ส่วนการอบแห้งอาหารเป็นการระเหยน้ำออกจากอาหารโดยใช้เครื่องมือ ดังนั้นการตากแห้งและการอบแห้งจะเป็นการใช้ความร้อนภายใต้สภาวะควบคุม เพื่อกำจัดน้ำส่วนใหญ่ในอาหารโดยการระเหยน้ำออก วัตถุประสงค์เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาอาหาร โดยการลดค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ (a_w) ซึ่งทำให้ช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ (วิไล, 2543) นอกจากนั้นการลดน้ำหนักและปริมาณของอาหาร ยังช่วยให้ลดค่าใช้จ่ายในการเก็บรักษาและการขนส่ง เพิ่มความหลากหลายของผลิตภัณฑ์และความสะดวกแก่ผู้บริโภค ตลอดจนทำให้มีใช้ในยามขาดแคลน นอกฤดูกาลหรือพื้นที่ห่างไกลและเก็บไว้ได้นานโดยไม่ต้องแช่เย็น (สุคนธ์ชื่น, 2546)

กลไกการอบแห้งและกราฟการอบแห้ง

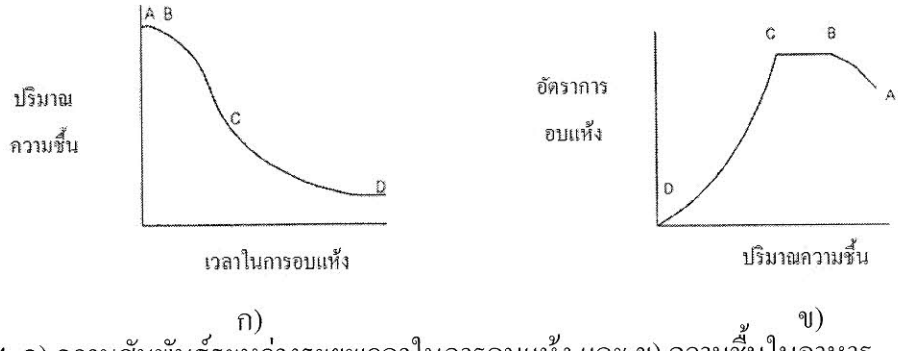
การอบแห้งคือ กระบวนการที่ความร้อนถูกถ่ายเทด้วยวิธีใดวิธีหนึ่ง เพื่อไล่ความชื้นออกโดยการระเหยน้ำ โดยอาศัยความร้อนที่ได้รับซึ่งเป็นความร้อนแฝงของการระเหย สิ่งที่สำคัญที่สุดในการอบแห้งคือ การถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุอบแห้งอย่างมีประสิทธิภาพที่สุด โดยทั่วไปการอบแห้งมักใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้ง ความร้อนจะถ่ายเทไปยังผิวของวัสดุโดยส่วนใหญ่จะถูกนำไปใช้ในการระเหยน้ำ ซึ่งไอน้ำจะเคลื่อนที่จากผิววัสดุมายังกระแสอากาศ ดังภาพ 3 และถ้าวัสดุมีปริมาณน้ำอยู่มาก อุณหภูมิและความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิวจะคงที่ ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและอัตราการอบแห้งคงที่ เมื่อผิววัสดุมีปริมาณน้ำลดลงเหลือน้อย อุณหภูมิและความเข้มข้นของไอน้ำจะลดลงส่งผลให้อัตราการอบแห้งลดลง น้ำที่อยู่ภายในอาหารจะเคลื่อนที่ไปยังผิวหน้าอาหารด้วยกลไก ดังนี้ (กอบพัชรกุล, 2550)

1. การเคลื่อนที่ของของเหลว ด้วยแรงแคพพิลารี่ (capillary force)
2. การแพร่ของของเหลวเนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของตัวถูกละลาย (solute) ในบริเวณต่าง ๆ ของอาหาร
3. การแพร่ของของเหลวที่ถูกดูดซับอยู่ที่บริเวณผิวของอนุภาคของของแข็งที่เป็นองค์ประกอบของอาหาร
4. ไอน้ำในช่องว่างระหว่างองค์ประกอบที่เป็นของแข็งในอาหาร เนื่องจากความแตกต่างของความดันไอ



ภาพ 3 การเคลื่อนที่ของความชื้นออกจากชิ้นอาหารระหว่างการอบแห้ง
ที่มา: นิธิยา (2544)

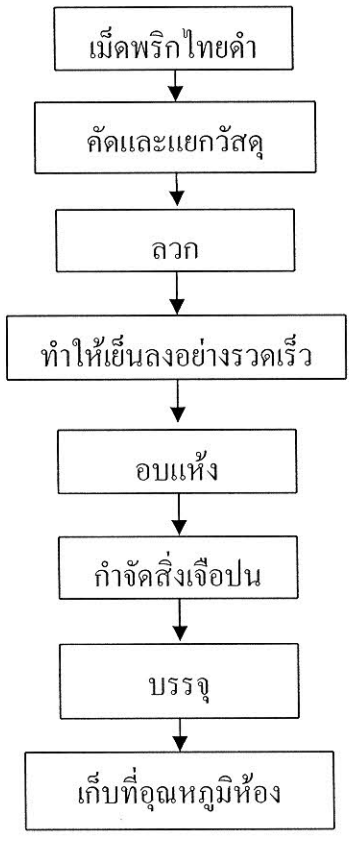
เมื่อนำอาหารมาไว้ในเครื่องอบแห้งช่วงเวลาสั้น ๆ ตอนเริ่มอบแห้งจะเป็นเวลาที่ใช้ในการทำให้ผิวหน้าของอาหารมีอุณหภูมิสูงขึ้นถึงอุณหภูมิกระเปาะเปียก ซึ่งเป็นช่วง AB ดังแสดงในภาพ 4 หลังจากนั้นจะเป็นช่วงการอบแห้ง โดยน้ำจะเคลื่อนที่จากด้านในของอาหารออกมาด้วยความเร็วเท่ากับน้ำที่ระเหยออกไป ผิวหน้าจึงยังเปียกอยู่ เรียกว่าช่วงอัตราคงที่ (constant rate period, BC) และช่วงต่อเนื่องไปจนถึงความชื้นวิกฤต (critical moisture content) แต่ในทางปฏิบัติผิวหน้าของอาหารจะค่อย ๆ แห้งด้วยอัตราเร็วที่แตกต่างกัน และอัตราการอบแห้งโดยรวมจะค่อย ๆ ลดลงในช่วงอัตราคงที่ จุดความชื้นวิกฤตของอาหารแต่ละชนิดจึงไม่เท่ากัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณของอาหารในเครื่องอบแห้ง และอัตราการทำให้แห้ง สมบัติของอากาศขณะที่มีอัตราการระเหยออกของน้ำคงที่คือ ต้องมีอุณหภูมิกระเปาะแห้งสูง มีค่าความชื้นสัมพัทธ์ต่ำและอากาศเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง เมื่อความชื้นของอาหารลดลงต่ำกว่าความชื้นวิกฤต อัตราการทำแห้งก็จะลดลงจนเข้าใกล้ศูนย์ที่ความชื้นสมดุลหรือที่เรียกว่าเป็นช่วงอัตราลดลง (falling rate period, CD) (วิไล, 2543)



ภาพ 4 ก) ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการอบแห้ง และ ข) ความชื้นในอาหาร
ที่มา: วิไล (2543)

กระบวนการอบแห้งพริกไทยดำ

กระบวนการผลิตพริกไทยดำในอุตสาหกรรมเริ่มด้วยการนำพริกไทยดำดิบ ผ่านกระบวนการคัดเกรดและคัดขนาด หลังจากนั้นเข้าสู่การคัดเศษวัสดุแปลกปลอมออกจากพริกไทย ถัดมาทำการทำความสะอาดพริกไทยเบื้องต้นด้วยการล้างและลวกพริกไทยเพื่อทำลายจุลินทรีย์บางชนิดที่อยู่ในพริกไทย จากนั้นนำพริกไทยที่ผ่านการลวกเข้าสู่กระบวนการลดอุณหภูมิให้เย็นลงอย่างรวดเร็ว กระบวนการนี้จะช่วยระงับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ได้ จากนั้นเข้าสู่กระบวนการอบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งที่แตกต่างกันไป ทำการอบแห้งจนกระทั่งความชื้นของพริกไทยเหลือประมาณร้อยละ 10-12 หลังจากนั้นทำการแยกสิ่งปนเปื้อนออกจากพริกไทยอีกครั้งด้วยการใช้แรงดึงดูดจากแม่เหล็ก เมื่อผ่านกระบวนการนี้แล้วจะเข้าสู่การบรรจุผลิตภัณฑ์ และเก็บพริกไทยที่ผ่านการบรรจุในที่แห้งและอุณหภูมิห้อง โดยภาพ 5 แสดงกระบวนการการอบแห้งพริกไทยดำอย่างเป็นลำดับขั้นตอน



ภาพ 5 กระบวนการอบแห้งพริกไทยดำ

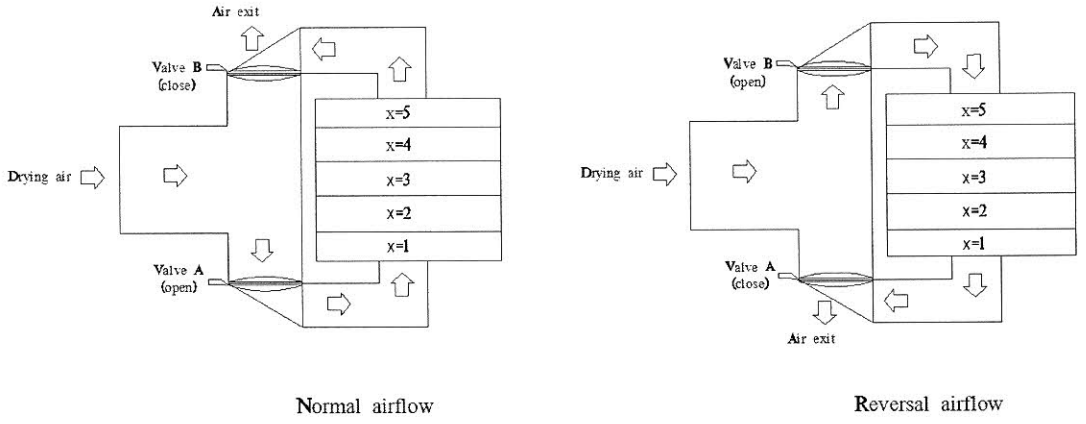
ที่มา: นิธิฟู้ดส์ (2555)

การอบแห้งด้วยเทคนิคการสลับทิศทางลม

การอบแห้งแบบสลับทิศทางลม (reversal airflow drying) เป็นการอบแห้งที่ถูกพัฒนามาจากการอบแห้งแบบ Batch ซึ่งการอบแห้งแบบ Batch จะมีการไหลของอากาศร้อนไปในทิศทางเดียวคือ จากด้านบนลงด้านล่าง หรือจากด้านล่างขึ้นด้านบน เท่านั้น ส่วนการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อน ศุภศักดิ์ (2544) ได้กล่าวไว้ว่า อากาศจะไหลเข้าทางด้านบนและด้านล่างของห้องอบซึ่งมีการควบคุมทิศทางการไหลของอากาศให้มีการไหลทีละด้านโดยนำวาล์วเข้ามาใช้ในการควบคุม ซึ่งการอบแห้งด้วยวิธีนี้จะทำให้ผลิตภัณฑ์ในห้องอบแห้งได้รับความร้อนทั้งส่วนบนและส่วนล่าง ทำให้การกระจายความร้อนเป็นไปอย่างทั่วถึง ซึ่งอากาศร้อนที่ไหลผ่านผลิตภัณฑ์จะมีความชื้นปะปนอยู่ การพาความชื้นออกสามารถทำได้ทั้งสองทิศทาง โดยอาศัยการบังคับของระบบท่อส่งลมและพัดลม วัตถุประสงค์ในการสลับทิศทางลมร้อนเพื่อให้ความร้อนสัมผัสกับผลิตภัณฑ์อย่างทั่วถึง และผลจากการศึกษาได้ระบุว่าเครื่องอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อนให้ผลคุณภาพผลิตภัณฑ์ไม่แตกต่างกับวิธีพลิกกลับ แต่มีข้อดีเนื่องจากใช้แรงงานน้อยและไม่มีการแตกหักเสียรูปทรง

Janjai *et al.* (2011) ได้ทำการศึกษาการจำลองการอบแห้งแบบ Batch ด้วยเทคนิคการสลับลมร้อนโดยใช้ความร้อนจากแหล่งเชื้อเพลิงชีวมวล โดยศึกษาการอบแห้งลำไย โดยในการทดลองทำการอบแห้งลำไยที่ปริมาณต่างกัน พบว่า ผลของอุณหภูมิและความชื้นในแต่ละตำแหน่งไม่มีความแตกต่างกันทางนัยสำคัญ ส่วนผลของเวลาในการอบแห้งจะแตกต่างกันไปตามปริมาณของลำไย อีกทั้งยังพบว่าการอบแห้งด้วยการสลับทิศทางลมร้อนสามารถช่วยให้ความร้อนกระจายสู่ชั้นเบดได้อย่างทั่วถึง

การอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อนมีรูปแบบการไหลของอากาศแตกต่างจากการอบแห้งแบบธรรมดา โดยการไหลแบบธรรมดาคือการบังคับให้อากาศร้อนไหลผ่านชั้นวัสดุในทิศทางเดียวคือจากด้านล่างขึ้นด้านบนจนกว่าการอบแห้งสิ้นสุด (เปิดวาล์ว A ปิดวาล์ว B) ส่วนการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อนจะทำการบังคับอากาศร้อนให้ไหลไปในทิศทางเดียว (เปิดวาล์ว B ปิดวาล์ว A) และทำการเปลี่ยนทิศทางลมเมื่อถึงเวลาที่เหมาะสมในการสลับทิศทาง (ทำการสลับทิศทางลมโดยการเปิด-ปิดวาล์วควบคุมทิศทาง) ดังแสดงในภาพ 6



ภาพ 6 รูปแบบการไหลของทิศทางลมในกระบวนการอบแห้ง

ที่มา: Ruiz Lopez (2008)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง

แบบจำลองการอบแห้งชั้นบางทางทฤษฎี

การอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงในทางทฤษฎี ตัวแปรที่มีอิทธิพลมากที่สุดคือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของน้ำภายในวัสดุ (diffusion) ซึ่งหากสมมติว่าการเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัสดุทดสอบส่วนใหญ่อยู่ในรูปของเหลว (สายสุนีย์ และอนุวัฒน์, 2550) ความแตกต่างความเข้มข้นของของเหลวจะสามารถเขียนได้ตามกฎของ Fick คือ

$$\dot{m}_w = -AD_{eff}\frac{\partial C}{\partial x} \qquad (1)$$

เมื่อ $\dot{m}_w$ คือ อัตราการถ่ายเทมวล (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)

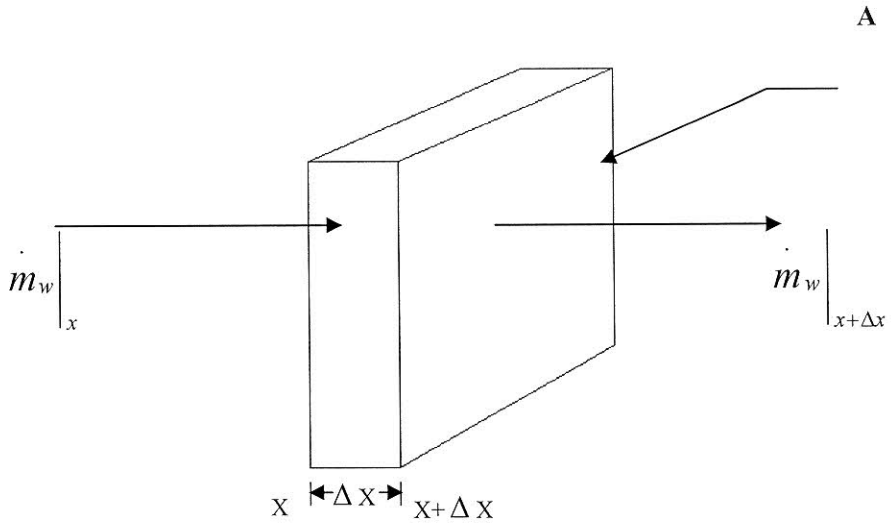
A คือ พื้นที่การถ่ายเทมวล (ตารางเมตร)

D_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (ตารางเมตรต่อชั่วโมง)

C คือ ความเข้มข้นของเหลว (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

X คือ ระยะทาง (เมตร)

กรณีวัสดุรูปร่างเป็นแผ่นระนาบ (ณัฐวุฒิ, 2546) พิจารณาการเคลื่อนที่ของน้ำเข้าออกปริมาณควบคุมในแนวแกนพิกัดฉากในทิศทางในแนวราบ (แกน X) ดังภาพ 7



ภาพ 7 ปริมาณควบคุมในทิศทางแนวราบ
ที่มา: ณัฐวุฒิ (2546)

อัตราการการถ่ายเทมวลที่ตำแหน่ง X คือ

$$\dot{m}_W\Big|_X = -AD_{eff}\frac{\partial C}{\partial X}\Big|_X \tag{2}$$

อัตราการการถ่ายเทมวลที่ตำแหน่ง $X+\Delta X$ คือ

$$\dot{m}_W\Big|_{X+\Delta X} = -AD_{eff}\frac{\partial C}{\partial X}\Big|_{X+\Delta X} \tag{3}$$

อัตราการเปลี่ยนแปลงมวลในปริมาตรควบคุมหาได้จากอัตราการถ่ายเทมวลที่ออกจากปริมาตรควบคุม ($X+\Delta X$) ลบด้วยอัตราการถ่ายเทมวลที่เข้าปริมาตรควบคุม (X)

$$\dot{m}_W\Big| = A\frac{\partial C}{\partial t}\cdot\Delta X \tag{4}$$

จากการทำสมดุลมวลอัตราการเคลื่อนที่ของมวลเข้าปริมาตรควบคุมย่อมเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงของมวลภายในปริมาตรควบคุมบวกกับอัตราการเคลื่อนที่ของมวลออกจากปริมาตรควบคุม

$$\frac{\partial}{\partial X}\left(D_{eff}\frac{\partial C}{\partial X}\right) = \frac{\partial C}{\partial t} \tag{5}$$

นำสมการ 5 หารด้วยความหนาแน่นของวัตถุ จะได้ดังสมการ 6

$$\frac{\partial}{\partial X}\left(D_{eff}\frac{\partial M}{\partial X}\right)=\frac{\partial M}{\partial t} \tag{6}$$

จัดรูปสมการ 6 ใหม่ได้ดังสมการ 7

$$\frac{\partial M}{\partial t}=D_{eff}\left(\frac{\partial^2 M}{\partial X^2}\right) \tag{7}$$

กำหนดสภาวะเริ่มต้นและสภาวะขอบเขตว่า ที่เวลาเริ่มต้น ความชื้นเริ่มต้นที่ทุกตำแหน่งมีค่าสม่ำเสมอเท่ากับความชื้นเริ่มต้น และที่เวลาใด ๆ ความชื้นมีค่าเท่ากับความชื้นสมดุล เขียนได้ดังสมการ 8

$$\begin{aligned} M(X,0)&=M_0 \\ M(0,t)&=M(1,t)=M_{eq} \end{aligned} \tag{8}$$

จากสมการ 7 กับสภาวะเริ่มต้นและสภาวะขอบเขตในสมการ 8 สามารถหาคำตอบได้ดังสมการ 9

$$MR=\frac{M-M_{eq}}{M_o-M_{eq}}=\frac{8}{\pi^2}\sum_{n=0}^{\infty}\frac{1}{(2n+1)}\exp\left(-\frac{(2n+1)^2\pi^2(D_{eff})t}{L^2}\right) \tag{9}$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น (ไร้หน่วย)

M คือ ความชื้นผลผลิต ณ เวลาใด ๆ (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง)

M_0 คือ ค่าความชื้นเริ่มต้นของผลผลิต (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง)

M_{eq} คือ ความชื้นสมดุล (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง)

L คือ ความหนาของแผ่นชิ้นทดสอบ (เมตร)

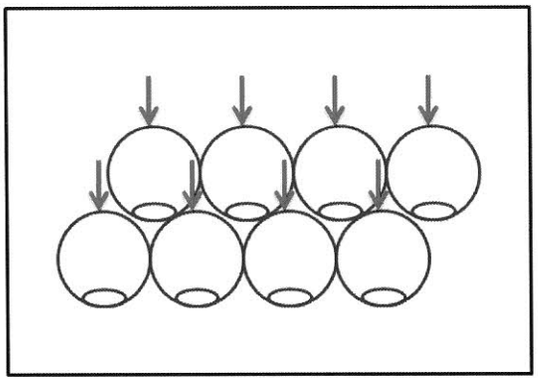
t คือ เวลาอบแห้ง (ชั่วโมง)

n คือ จำนวนข้อมูล (0, 1, 2, ...)

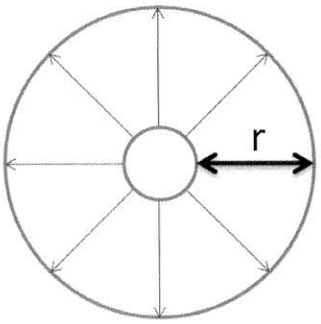
สำหรับการอบแห้งที่ใช้เวลานาน สมการ 9 สามารถทำให้เข้าใจได้ง่าย โดยให้มีเฉพาะเทอมแรก ดังสมการ 10

$$MR=\frac{8}{\pi^2}\exp\left(-\frac{\pi^2(D_{eff})t}{L^2}\right) \tag{10}$$

กรณีที่วัสดุมีรูปร่างเป็นทรงกลม เมื่อให้ความร้อนแก่วัสดุด้วยรังสีอินฟราเรดดังภาพ 8 การแพร่ของความชื้นจะเกิดขึ้นทุกทิศทางตามแนวรัศมี r ดังแสดงในภาพ 9 โดยแบบจำลองการอบแห้งเชิงทฤษฎีที่นิยมอย่างแพร่หลายได้แก่แบบจำลองการแพร่ของ Fick (Fick's second law) (Crank, 1975)



ภาพ 8 การให้ความร้อนแก่วัสดุในระหว่างการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด
ที่มา: กัญญารัตน์ และเบญจมาศ (2552)



ภาพ 9 ทิศทางการแพร่ความชื้นในวัสดุกลมกลวง
ที่มา: กัญญารัตน์ และเบญจมาศ (2552)

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff}\left[\frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \left(\frac{c}{r}\right)\frac{\partial M}{\partial r}\right] \tag{11}$$

เมื่อ r คือ รัศมีของทรงกลม (มิลลิเมตร)

c คือ 2 (สำหรับการแพร่ความชื้นในแนวรัศมีของวัสดุทรงกลม)

จากสมการ 11 สามารถแก้โดยใช้วิธี Separation of variables จะได้ผลลัพธ์ออกมาเป็นความสัมพันธ์ ดังนี้

$$\frac{M_t - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} = \frac{6}{\pi^2}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n^2}\exp\left(\frac{-D_{eff}n^2\pi^2 t}{r^2}\right) \tag{12}$$

จากสมการ 12 ประกอบด้วยจำนวนเทอมที่ไม่มีที่สิ้นสุดและเทอมท้าย ๆ จะมีค่าลดลง เรื่อย ๆ ดังนั้นจึงอาจตัดเทอมท้าย ๆ ออกไปได้ โดยคงไว้เฉพาะเทอมแรก ซึ่งคำตอบที่ได้อาจจะไม่ผิดไปมากนัก โดยเฉพาะเมื่อเวลาการอบแห้งมีค่ามาก จึงสามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$MR = \frac{6}{\pi^2}\exp\left(-\frac{D_{eff}\pi^2 t}{r^2}\right) \tag{13}$$

กรณีที่วัสดุมีรูปร่างทรงกระบอก (วัชรินทร์ และคณะ, 2552) ถ้าพิจารณาการเคลื่อนที่ของมวลเข้าและออกจากปริมาตรบังคับ จะสามารถเขียนสมการในระบบพิกัดโพลาร์สองมิติได้ว่า

$$\frac{\partial M}{\partial t}(r,t) = D_{eff}\left(\frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \frac{c\partial M}{r\partial r}\right) \tag{14}$$

เมื่อ c คือ 1 (ค่าคงที่สำหรับทรงกระบอก)

โดยที่สภาวะเริ่มต้นและสภาวะขอบเขตมีข้อสมมุติฐานคือ ความชื้นภายในวัสดุเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} &t = 0\ ,\ 0 \le r \le r_c\ ,\ M = M_{in} \\ &t > 0\ ,\ \ r = r_c\ ,\ M = M_{eq} \\ &t > 0\ ,\ \ r = 0\ ,\ \frac{\partial M}{\partial r} = 0 \end{aligned} \tag{15}$$

เมื่อ r_c คือ รัศมีที่วัดจากจุดศูนย์กลางของวัสดุ (เมตร)

เมื่อแทนค่า เงื่อนไขสภาวะเริ่มต้นและสภาวะขอบเขตตามที่ระบุไว้ในสมการ 15 คำตอบของสมการ 16 จะมีรูปแบบดังนี้

$$MR(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{b_n^4} \exp\left(\frac{-b^2 n D_{eff} t}{r_c^2} \right) \tag{16}$$

เมื่อ b คือ รากของฟังก์ชันเบสเซลอันดับที่ศูนย์

แบบจำลองการอบแห้งชั้นบางกึ่งทฤษฎี

จากสมการการอบแห้งชั้นบางทางทฤษฎี ในการหาคำตอบโดยการคงเทอมต่าง ๆ ไว้เพียงเทอมเดียวจะเรียกว่า สมการอบแห้งชั้นบางกึ่งทฤษฎี (ณัฐวุฒิ, 2546) และยังเป็นรูปแบบผลเฉลยอย่างง่ายของ สมการการแพร่กระจายของ Fick (Sogi *et al.*, 2003)

เมื่อกำหนดให้เงื่อนไขเริ่มต้น $M(0) = M_{in}$ และ $M(t) = M$ จะมีรูปแบบดังสมการ 17

$$MR = \frac{M - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} = \exp(-kt) \tag{17}$$

เมื่อ k คือ ค่า Drying rate constant (ชั่วโมง$^{-1}$)

ค่าคงที่ของการอบแห้ง (k) เป็นคุณสมบัติเฉพาะของวัสดุหนึ่ง ๆ ภายในช่วงสภาวะอากาศอบแห้งและวัสดุอบแห้งที่ทำการทดลองเท่านั้น และจากสมการ 17 จะสามารถหาค่าความชื้นที่เวลาอบแห้งใด ๆ ได้เมื่อทราบค่าคงที่การอบแห้ง ดังสมการ 18

$$M(t) = M_{eq} + (M_{in} - M_{eq}) \exp(-kt) \tag{18}$$

แบบจำลองการอบแห้งเอมไพริเคิล

แบบจำลองจลนศาสตร์ของการอบแห้งเอมไพริเคิลคือ แบบจำลองที่สร้างจากแนวโน้มข้อมูลการทดลองสำหรับผลิตภัณฑ์ในช่วงอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วของอากาศอบแห้งหนึ่ง ๆ ซึ่งพบว่าสามารถใช้ทำนายอัตราการอบแห้งได้ดี แต่มีข้อจำกัดที่การนำไปใช้งานต้องอยู่ภายใต้สภาวะทดสอบที่สร้างแบบจำลองเท่านั้น

ณรงค์ อึ้งกิมบ้วน และคณะ (2554) ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งพริกไทยด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50-90 องศาเซลเซียส โดยพริกไทยที่ใช้ในการทดลองมีความชื้นเริ่มต้นประมาณร้อยละ 190 มาตรฐานแห้ง ซึ่งแบบจำลองจะทำนายอัตราส่วนความชื้นตลอดการทดลอง พบว่า แบบจำลอง Logarithmic สามารถทำนายอัตราส่วนความชื้นในช่วงอุณหภูมิที่ทำการทดลองดีที่สุด เมื่อเทียบกับแบบจำลองอื่น ๆ

อัจฉรา แซ่โค้ว และคณะ (2555) ได้นำเสนอจลนศาสตร์การอบแห้งพริกไทยดำ โดยกระบวนการอบแห้งแบบพาความร้อนด้วยลมร้อน การแผ่รังสีด้วยรังสีใต้แดง และคลื่นไมโครเวฟ โดยการสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายจลนศาสตร์การอบแห้งภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ ด้วยวิธีการวิเคราะห์ความถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยการทดลองด้วยการพาความร้อนใช้อุณหภูมิในการทดลองเท่ากับ 50-80 องศาเซลเซียส พบว่า แบบจำลองของ Page สามารถทำนายจลนศาสตร์การอบแห้งแบบพาความร้อนได้ดีที่สุด แบบจำลองเอมไพริเคิลของการทำนายจลนศาสตร์การอบแห้งพริกไทยและวัสดุอื่น ๆ โดยแบบจำลองเอมไพริเคิลที่ใช้ในการทำนายจลนศาสตร์การอบแห้งได้แก่

ตาราง 2 แบบจำลองเอมไพริเคิล

Model name	Model expression
Newton	$MR = \exp(-kt)$
Page	$MR = \exp(-kt^n)$
Modified Page	$MR = \exp((-kt)^n)$
Henderson and Pebis	$MR = a\exp(-kt)$
Logarithmic	$MR = a\exp(-kt) + c$

เมื่อ a, n, c คือ ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับวัสดุ

ซึ่งในแบบจำลองเอมไพริเคิลในตาราง 2 เป็นสมการที่ได้รับความนิยมอย่างมากในการใช้อธิบายพฤติกรรมการอบแห้งของวัสดุที่มีรูปร่างแผ่นระนาบ รูปทรงกลม หรือเหมาะสมกับการอบแห้งที่มีความหนาของชิ้นทดสอบไม่มาก

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งแบบชั้นหนาอยู่กับที่

สมดุลพลังงานในกระบวนการอบแห้ง

การอบแห้งแบบชั้นหนาอยู่กับที่เป็นกระบวนการถ่ายเทความร้อนแบบสภาวะไม่คงที่ (unsteady state) โดยผลของความชื้นและอุณหภูมิเปลี่ยนผันตามความหนา (thickness, x) และเวลาในการอบแห้ง (time, t) โดย Aregba *et al.* (2006) ได้ศึกษาการจำลองการอบแห้งแบบชั้น

หนาอยู่กับที่ กำหนดให้ $M_p(x,t)$ คือความชื้นของผลิตภัณฑ์ $T_a(x,t)$ คืออุณหภูมิอากาศในชั้นวัสดุ และในการสร้างแบบจำลองแบบชั้นหนาอยู่กับที่ได้ทำการสมมติเงื่อนไขเพื่อสร้างแบบจำลอง โดยสมมติให้ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำในเมล็ดพืชมีค่าเท่ากับการเปลี่ยนแปลงความร้อนสัมผัสของอากาศที่ไหลผ่านเมล็ดพืช และสมมติให้ความหนาแน่นของเมล็ดพืชคงที่ และความชื้นเริ่มต้นของเมล็ดพืชในแต่ละชั้นเท่ากัน จากการกำหนดสมมติฐานเบื้องต้น Hukill (1954)ได้นำเสนอสมการสมดุลพลังงานที่ใช้ในการจำลองการอบแห้งได้ดังนี้ (Aregba *et al.*, 2006; Hukill, 1954)

$$\rho_{da} V_{a0} Cp_{da} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} = \rho_{dp} h_{fg} \frac{\partial M}{\partial t} \tag{19}$$

จากสมการ ρ_{da} คือ ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3), ρ_{dp} คือ ความหนาแน่นของวัสดุ (kg/m^3), ρ_{da} คือ ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3), Cp_{dp} คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ ($J/kg\ ^\circ C$), h_{fg} คือ ค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (J/kg), V_{a0} คือ ความเร็วลมบริเวณทางเข้า (m/s) โดยสมการสมดุลพลังงาน (19) สามารถแก้สมการความสัมพันธ์ให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์อย่างง่ายโดยการใช้วิธีการ Exponential

การกำหนดเงื่อนไขและขอบเขต

การกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นและขอบเขต (initial and boundary condition) โดย Hukill (1971)ได้ตั้งสมมติฐานเงื่อนไขเริ่มต้นและขอบเขตการจำลองอุณหภูมิดังนี้

เงื่อนไขเริ่มต้น
$$\frac{T_a(x,0) - T_{am}}{T_a(0,t) - T_{am}} = e^{-\frac{x}{H}} \tag{20}$$

ขอบเขต
$$T_a(0,t) = T_{a0} \tag{21}$$

จากสมการ 21 T_{a0} คือ อุณหภูมิอากาศร้อนบริเวณทางเข้า ($^\circ C$), T_{am} คือ อุณหภูมิอากาศแวดล้อม ($^\circ C$), x คือ ความหนาของวัสดุ (m), H คือ หน่วยการถ่ายโอนตามความความหนาวัสดุ (m) และทำการตั้งสมมติฐานให้อุณหภูมิบริเวณทางเข้ามีค่าคงที่ และการตั้งเงื่อนไขเริ่มต้นและขอบเขตของการจำลองความชื้นมีรูปแบบเดียวกับการจำลองอุณหภูมิ ดังนี้

เงื่อนไขเริ่มต้น
$$\frac{M_p(0,t) - M_{eq}}{M_p(x,0) - M_{eq}} = e^{-Kt} \tag{22}$$

ขอบเขต
$$M_p(x,0) = M_{pi} \tag{23}$$

จากสมการ 23 M_{pi} คือ ความชื้นเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ (มาตรฐานแห้ง), K คือ ค่าคงที่ของการอบแห้งแบบชั้นบาง, M_{eq} คือ ความชื้นสมดุล

ตัวแปรไร้มิติสำหรับในแบบจำลองชั้นหนาอยู่กับที่

ในหัวข้อนี้กล่าวถึงคำจำกัดความของตัวแปรไร้มิติที่อยู่ในแบบจำลองชั้นหนาอยู่กับที่ซึ่งปรับใช้ในการสร้างแบบจำลอง ในสมการเงื่อนไขเริ่มต้นของการจำลองอุณหภูมิและความชื้น จะปรากฏตัวแปรสองตัวซึ่งไม่ทราบค่า ตัวแปรดังกล่าว Aregba *et al.* (2006) ได้นำเทคนิคทฤษฎีหน่วยการถ่ายโอน (theory of transfer units) เข้ามาเพื่อให้คำจำกัดความตัวแปรทั้งสอง โดยกำหนดให้ H คือ หน่วยการถ่ายโอนตามความหนา และ K คือค่าคงที่การอบแห้งแบบชั้นบางที่ได้มาจากสมการการอบแห้งแบบชั้นบาง สมการ 24-27 เป็นระบบสมการเชิงอนุพันธ์ของแบบจำลองชั้นหนาอยู่กับที่ ซึ่งมีตัวแปรไร้มิติที่กล่าวข้างต้นอยู่ในสมการ ซึ่งสมการดังกล่าวเป็นรูปแบบสมการที่ใช้ประกอบการสร้างแบบจำลอง

$$MR(x,t) = \frac{M_p(x,t) - M_{eq}}{M_{pi} - M_{eq}} \tag{24}$$

$$TR(x,t) = \frac{T_a(x,t) - T_{am}}{T_{ao} - T_{am}} \tag{25}$$

$$\theta = Kt \tag{26}$$

$$\upsilon(x) = \frac{L_v K \rho_{dp}\left(M_p(x,t) - M_{eq}\right)}{\rho_{da} V_{a0} Cp_{da}\left(T_{a0} - T_{am}\right)} = \frac{x}{H} \tag{27}$$

จากสมการ 24-27 สามารถกำหนดตัวแปรความหนาและเวลา (x,t) ให้อยู่ในเทอมตัวแปรไร้มิติ (υ,θ) ซึ่งสามารถคำนวณ อัตราส่วนความชื้นไร้มิติและอัตราส่วนอุณหภูมิไร้มิติที่เปลี่ยนแปลงตามความหนาและเวลาได้ตามสมการ

$$MR(\upsilon,\theta) = \frac{e^{\upsilon}}{e^{\upsilon} + e^{\theta} - 1} = \frac{e^{\frac{x}{H}}}{e^{\frac{x}{H}} + e^{Kt} - 1} \quad \text{เมื่อ } \upsilon > 0, \quad \theta > 0 \tag{28}$$

$$TR(\upsilon,\theta) = \frac{e^{\theta}}{e^{\upsilon} + e^{\theta} - 1} = \frac{e^{Kt}}{e^{\frac{x}{H}} + e^{Kt} - 1} \quad \text{เมื่อ } \upsilon > 0, \quad \theta > 0 \tag{29}$$

จากตัวแปรไร้มิติสามารถคำนวณหาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและมวล (heat and mass transfer efficiency) ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$\varepsilon_m(x,t) = \frac{M_{pi} - M_p(x,t)}{M_{pi} - M_{eq}} \tag{30}$$

$$\varepsilon_t(x,t) = \frac{T_{a0} - T_a(x,t)}{T_{a0} - T_{am}} \tag{31}$$

โดยตัวแปรไร้มิติ ε_m คือประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลสาร และ ε_t คือประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน

สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล

สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (D_{eff}) คือ สมบัติเฉพาะทางกายภาพที่แสดงถึงความสามารถในการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุ ซึ่งสมบัติดังกล่าวจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความชื้นเริ่มต้น อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วของอากาศ (อีลีหยัะ และคณะ, 2555) การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล ซึ่งใช้กับวัสดุทรงกลม รูปแบบสมการการจำลองการแพร่ของ Fick (Fick's second law) ดังได้กล่าวแล้วในสมการ 13

ซึ่งเมื่อทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์หาค่าความชัน เพื่อให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล

$$Slope = m = \frac{-\pi^2 D_{eff}}{r^2} \tag{32}$$

แบบจำลอง Arrhenius ถือได้ว่าเป็นอีกแบบจำลองหนึ่งที่มีความน่าเชื่อถือในการใช้ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (Keey, 1972) ซึ่งจากสมการดังกล่าวสามารถหาค่าพลังงานกระตุ้น และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คงที่ได้ ซึ่งมีรูปแบบดังสมการ 35

$$D_{eff} = D_0 \exp\left[-\frac{E_a}{R(T+273.16)}\right] \tag{33}$$

เมื่อ E_a คือ พลังงานกระตุ้นที่ใช้ในการอบของการอบแห้ง (กิโลจูลต่อโมล)

D_0 คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คงที่ (ตารางเมตรต่อวินาที)

R คือ ค่าคงที่สากลของก๊าซ (8.314 กิโลจูลต่อโมล เคลวิล)

โดยค่า E_a และค่า D_0 หาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ln (D_{eff}) กับ $\frac{1}{T}$

คุณสมบัติเชิงความร้อนและฟิสิกส์ของอาหาร

ความชื้นในวัสดุ

ความชื้น (moisture) เป็นตัวบอกปริมาณน้ำที่มีอยู่ในวัสดุเมื่อเทียบกับมวลชื้นหรือแห้ง ความชื้นในวัสดุสามารถแสดงได้ 2 แบบ คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก และความชื้นมาตรฐานแห้ง

ความชื้นมาตรฐานเปียก

$$M_w = \frac{W - d}{W} \tag{34}$$

ความชื้นมาตรฐานแห้ง

$$M_d = \frac{W - d}{d} \tag{35}$$

เมื่อ W คือ มวลของวัสดุ, (กิโลกรัม)

d คือ มวลแห้งของวัสดุ(ไม่มีความชื้น), (กิโลกรัม)

ความชื้นสมดุล

ความชื้นสมดุลของวัสดุ (equilibrium moisture content: M_{eq}) เมื่อทำการอบแห้งวัสดุด้วยสภาวะคงที่ ความชื้นจะต่ำลงจนถึงจุด ๆ หนึ่ง ซึ่งจะทำให้วัสดุมีความชื้นคงที่โดยที่ความชื้นของวัสดุในขณะนั้นจะมีค่าความดันไอเท่ากับความดันไอของอากาศที่อยู่รอบ ๆ และอุณหภูมิของวัสดุจะมีค่าเท่ากับอุณหภูมิอากาศรอบ ๆ เรียกความชื้นค่านี้ว่าความชื้นสมดุล ค่าความชื้นสมดุลนี้ขึ้นกับอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ และชนิดของวัสดุ

วิธีการหาความชื้นสมดุลมีหลักสำคัญคือ การปล่อยให้วัสดุสัมผัสกับอากาศแวดล้อมเป็นระยะเวลานานพอที่จะทำให้ความชื้นวัสดุไม่เปลี่ยนแปลงอีกในสภาวะอากาศนั้น ๆ ซึ่งถ้าอากาศแวดล้อมไม่มีการเคลื่อนที่เรียกว่า วิธีเชิงสถิต และถ้ามีการไหลของอากาศแวดล้อมเรียกว่าวิธีเชิงจลน์ Sae-Khow *et al.* (2013) ได้ศึกษาไอโซเทอมการดูดความชื้นและจลนศาสตร์การอบแห้งพริกไทยดำ โดยช่วงอุณหภูมิที่ศึกษาคือ 40-65 องศาเซลเซียสและช่วงความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 10-90% ผลจากการศึกษาพบว่า แบบจำลอง Modified Oswin สามารถทำนายผลได้ดีเมื่อเทียบกับข้อมูลการทดลอง

ประกายดาว และวริศรา (2556) ได้ทำการศึกษาความชื้นสมดุลของเม็ดพริกไทยโดยความชื้นสมดุลแบบดูดความชื้นของเม็ดพริกไทยดำ หาด้วยด้วยวิธีเชิงสถิต ที่อุณหภูมิ 30 ถึง 50 องศาเซลเซียส ที่ช่วงความชื้นสัมพัทธ์ตั้งแต่ 6 ถึง 93.6 เปอร์เซ็นต์ และ ความชื้นสมดุลแบบคาย

ความชื้นของเม็ดพริกไทยดำที่อุณหภูมิ 60 ถึง 80 องศาเซลเซียส ที่ช่วงความชื้นสัมพัทธ์ตั้งแต่ 6 ถึง 93.6 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจากการศึกษาการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงแบบจำลองความชื้นสมดุลที่สามารถทำนายผลได้ดีคือ แบบจำลอง Modified Oswin โดยแบบจำลองที่ได้จากงานวิจัยทั้งสอง นำเสนอดังตาราง 3

ตาราง 3 แบบจำลองความชื้นสมดุล

งานวิจัยของ	แบบจำลอง	ช่วงอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	แบบจำลองและค่าคงที่
Sae-Khow *et al.* (2013)	Modified Oswin	40-60	$M_{eq} = (2.3165 - 0.0143(T) + 0.00002T^2)\left(\frac{RH}{1-RH}\right)^{1.54416} + 0.05981$
ประกายดาว และ วริศรา (2556)	Modified Oswin	60-80	$M_{eq} = (0.150 - 0.004(T) + 0.0000353T^2)\left(\frac{RH}{1-RH}\right)^{0.647} + 0.020$

ความหนาแน่นปรากฏ

ความหนาแน่นแบ่งออกเป็น *2* ชนิดคือ ความหนาแน่นปรากฏ (bulk density) และความหนาแน่นจริง (true density) ความหนาแน่นปรากฏจะใช้กับวัสดุที่เป็นเมล็ดกองรวมกันอยู่และปริมาตรของวัสดุที่กองรวมดันนั้นจะมีปริมาตรของช่องว่างอากาศแทรกร่วมอยู่ด้วย ดังนั้นความหนาแน่นปรากฏหมายถึง อัตราส่วนระหว่างมวลวัสดุต่อปริมาตรทั้งหมดของวัสดุที่กองรวมกัน ดังสมการ

$$\rho_b = \frac{W}{V_b} \tag{36}$$

เมื่อ W คือ มวลของวัสดุ, (กิโลกรัม)

V_b คือ ปริมาตรของวัสดุบวกกับปริมาตรของช่องว่างอากาศ, (ลูกบาศก์เมตร)

ρ_b คือ ความหนาแน่นปรากฏ, (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

การตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองด้วยการวิเคราะห์ทางสถิติ

การวิเคราะห์จลนศาสตร์การอบแห้ง ในการทำการวิเคราะห์แต่ละครั้งจะมีการประเมินความถูกต้องแม่นยำในกระบวนการการอบแห้งโดยใช้การวิเคราะห์ทางสถิติได้แก่ สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2), Root mean square error (RMSE), Mean bias error (MBE) เป็นต้น

$$R^2 = 1 - \frac{\Sigma_{i=1}^{N}(MR_{pred,i} - MR_{\exp,i})^2}{\Sigma_{i=1}^{N}(\overline{MR}_{pred} - MR_{pred,i})^2} \tag{37}$$

$$RSME = \left[\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^{N}(MR_{pred,i} - MR_{\exp,i})^2\right]^{1/2} \tag{38}$$

$$MBE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(MR_{\exp,i} - MR_{pre,i}\right)^2 \tag{39}$$

เมื่อ $MR_{pred,i}$ คือ อัตราความชื้นจากการทำนาย และ $MR_{exp,i}$ คือ อัตราความชื้นจากการทดลอง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ณรงค์ อึ้งกิมบ้วน และคณะ (2554) ได้ทำการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์เชิงความร้อนของพริกไทย ได้แก่ ความหนาแน่นปรากฏ, ความจุความร้อนจำเพาะ และร้อยละช่องว่างของอากาศที่ความชื้นพริกไทยในช่วงค่า 0-1.93 มาตรฐานแห้ง โดยนำเสนอออกมาในรูปแบบของสมการทำนาย พบว่าสมบัติทางความร้อนทั้งหมดมีความสัมพันธ์กับความชื้น ด้วยการวิเคราะห์ความถดถอยแบบเชิงเส้น นั่นคือทุกตัวแปรมีค่าลดลงเมื่อความชื้นมีค่าลดลง โดยค่าความหนาแน่นปรากฏมีค่าอยู่ในช่วง 493.44 ± 9.75 kg/m^3 ค่าความจุความร้อนจำเพาะของพริกไทยมีค่าอยู่ในช่วง 1902.75 ± 125.53 J/kg °C และค่าร้อยละช่องว่างของอากาศที่ความชื้นพริกไทย มีค่าอยู่ในช่วง 32.17 ± 0.29 ซึ่งสมการทำนายที่ได้จากงานวิจัยสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้และสามารถนำข้อมูลที่ได้ไปใช้สำหรับงานอุตสาหกรรมได้

บุญคง คำครุฑลาวงษ์ (2544) ได้ศึกษาการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางของเมล็ดกาแฟสายพันธุ์คาร์มิเตอร์ โดยวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทางทฤษฎี กึ่งทฤษฎี และแบบจำลองเอมไพริเคิล พร้อมทั้งพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของพารามิเตอร์ต่างๆที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ และทำการเปรียบเทียบผลอัตราส่วนความชื้น ผลการวิจัยพบว่า ขนาด ปริมาตร ความหนาแน่นปรากฏ ร้อยละช่องว่างของอากาศ มีค่าเพิ่มขึ้นตามความชื้นและพบว่าอุณหภูมิในการอบแห้งมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น

สุนีย์รัตน์ ตุ้ยดา (2544) ได้ทำการศึกษาการอบแห้งลำไยแบบแกะเปลือก จากเครื่องอบแห้งของเกษตรกรและเครื่องอบแห้งแบบสลับทิศทางลม โดยวัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือการหาความเร็วลมและช่วงเวลาในการสลับทิศทางลมร้อนที่เหมาะสม โดยผลการศึกษาพบว่าความเร็วลมมีผลต่อการลดความชื้นและเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง และการสลับทิศทางลมร้อนไม่มีผลต่อการลดความชื้น เนื่องจากการเครื่องอบแห้งที่ใช้ในงานวิจัยมีทางเข้าของลมร้อน 3 ทิศทาง และจากการศึกษาคุณภาพของการอบแห้งพบว่าคุณภาพหลังการอบแห้งของเครื่องอบแห้งทั้งสองแบบให้ผลเป็นที่ยอมรับได้ในท้องตลาด ทั้งในด้านสี ความแห้ง และเนื้อสัมผัส

อัจฉรา แซ่โคว้ และคณะ (2556) ได้ทำการศึกษาการและเมินความชื้นสมดุลของพริกไทยดำด้วยวิธีการ Gravimetric-static และทำการศึกษาจลนศาสตร์การอบแห้งพริกไทยดำของการอบแห้งหลากหลายรูปแบบ เช่น การอบแห้งด้วยลมร้อน การอบแห้งด้วยรังสีใต้แดง และการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ เป็นต้น โดยทำการศึกษาทั้งการอบแห้งแบบใช้แหล่งความร้อนเดียวและแหล่งความร้อนผสม ความชื้นสมดุลของพริกไทยที่ทำการศึกษาอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 40-65 °C และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศโดยรอบอยู่ในช่วง 10-90 % จากการทดลองพบว่า ค่า EMC มีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และแบบจำลองที่สามารทำนายผล EMC ได้ดีที่สุดคือแบบจำลอง Modified Oswin และจากการทดลองยังพบว่า ค่าความสิ้นเปลืองพลังงาน (SEC) จะมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งเพิ่มขึ้น

อัจฉรา แซ่โค้ว และคณะ (2556) งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาปัจจัยของสภาวะในการอบแห้งต่อจลนศาสตร์และคุณภาพหลังการอบแห้งพริกไทยดำ ซึ่งศึกษากระบวนการอบแห้งด้วยการพาความร้อน, การแผ่รังสีใต้แดง และการแผ่รังสีไมโครเวฟร่วมกับการพาความร้อนด้วยลมร้อน โดยพริกไทยดำที่ใช้ในการทดลองมีความชื้นเริ่มต้นอยู่ในช่วงร้อยละ 300-400 มาตรฐานแห้ง และความชื้นสุดท้ายอยู่ในช่วงร้อยละ 12-16 มาตรฐานแห้ง จากการทดลองพบว่า ภายใต้อุณหภูมิเดียวกันการอบแห้งด้วยการแผ่รังสีใต้แดงมีอัตราการอบแห้งและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลสูงที่สุด ซึ่งจากกระบวนการอบแห้งทั้งสามแบบ การอบแห้งด้วยการพาความร้อนให้ค่า

สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลอยู่ในช่วง $1.20-1.98\times10^{-9}$ m^2/s ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ที่แสดงผลนั้นเหมาะสมกับกระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อิลียะ สนิโซ และคณะ (2555) ได้ทำการศึกษาหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ความสิ้นเปลืองพลังงาน และอัตราการอบแห้งจำเพาะของการอบแห้งผลหมากแบบไม่ผ่าซีก โดยกระบวนการอบแห้งด้วยลมร้อน, การแผ่รังสีไมโครเวฟ และการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับการแผ่รังสีไมโครเวฟ ซึ่งอุณหภูมิการอบแห้งอยู่ในช่วง 60-80 องศาเซลเซียสและกำลังคลื่นไมโครเวฟ 180-600 วัตต์ โดยความชื้นเริ่มต้นของผลหมากเท่ากับร้อยละ 85.5 มาตรฐานแห้ง จากการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของการอบแห้งด้วยลมร้อนอยู่ในช่วง $7.0-91.8\times10^{-3}$ cm^2/min และการอบแห้งด้วยลมร้อนใช้พลังงานในการกระตุ้นมากกว่าการอบแห้งรูปแบบอื่น ๆ ดังนั้นจึงพบว่ากระบวนการอบแห้งและอุณหภูมิในการอบแห้งมีผลต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น พลังงานกระตุ้น และอัตราการระเหยน้ำจำเพาะ

Aregba *et al.* (2006) ได้ทำการศึกษาการเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระหว่างแบบจำลอง Logarithmic และ แบบจำลอง Ginner's differential ซึ่งใช้เพื่อจำลองกระบวนการอบแห้งเมล็ดข้าว ซึ่งแบบจำลอง Logarithmic มีวิธีการแก้สมการเพื่อหาผลเฉลยด้วยทฤษฎีหน่วยการถ่ายโอน โดยการแปลงตัวแปรที่ไม่ทราบค่าให้อยู่ในรูปของตัวแปรไร้มิติ และทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าตัวแปรไร้มิติสำหรับใช้ในการทำนายผล ผลการศึกษาพบว่าแบบจำลอง Logarithmic สามารถทำนายพฤติกรรมการอบแห้งได้ และได้สภาวะการอบแห้งที่แบบจำลองนี้สามารถอธิบายพฤติกรรมได้ดีกว่าแบบจำลอง Ginner's differential

Dai-Chyi and Din sue Fon (2013) ได้ทำการศึกษาการจำลองการอบแห้งโดยโปรแกรม MATLAB โดยวัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือ พัฒนาโปรแกรมเพื่อจำลองการอบแห้ง โดยโปรแกรมที่พัฒนาได้สามารถทำนายพฤติกรรมการอบแห้งซึ่งช่วยลดต้นทุนในการหาวภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งได้ จากการพัฒนาโปรแกรมจะได้โปรแกรมที่สามารถทำนาย สมบัติของอากาศ ความต้านทานการไหลของอากาศ และความชื้นสมดุลได้ ซึ่งโปรแกรมนี้เหมาะสมกับการอบแห้งที่มีลักษณะการอบในรูปแบบการอบแห้งแบบชั้นบาง หรือการอบแห้งแบบชั้นหนาที่เป็นการวิเคราะห์ตามลักษณะชั้นบางวางซ้อนกันเป็นชุด

Herman *et al.* (2001) ได้ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งแครอทหั่นบางเพื่ออธิบายกระบวนการอบแห้ง ซึ่งสมการที่ใช้ได้แก่ สมการอนุพันธ์ย่อยแบบไม่เป็นเชิงเส้น การแก้สมการใช้วิธีการเชิงตัวเลขแบบ Finite difference ด้วยระเบียบวิธีเชิงปริยาย และระเบียบวิธี Runge-Kutta ซึ่งในการทดลองทำการศึกษาที่ความหนา 1.0 และ 0.1 cm อุณหภูมิในการอบแห้งเท่ากับ 50-60 °C ผลการทำนายของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่ามีการเคลื่อนที่ของน้ำ

ถูกควบคุมโดยการแพร่ภายในแผ่นบาง 1.0 cm และพบว่ามีเกิดการพาความร้อนที่ความหนา 0.1 cm ซึ่งผลของงานวิจัยทำให้ทราบศาสตร์ของการถ่ายโอนที่เกิดขึ้นภายในวัสดุ และสามารถนำไปวิเคราะห์เพื่อเลือกเครื่องมือที่เหมาะสมกับกระบวนการโดยปราศจากการใช้ข้อสมมติฐานได้

Ruiz-Lopez *et al.* (2008) ได้ทำการศึกษาการทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งแบบ Batch ของอาหารโดยการใช้เทคนิคการสลับลมร้อน ซึ่งงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการทำแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในอาหาร โดยแบบจำลองจะอธิบายการถ่ายเทความร้อนของอาหารในลักษณะการแบ่งอาหารเป็นชั้นบาง ซึ่งวางทับซ้อนกันอย่างต่อเนื่อง ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ แครอท การทดลองได้ทำการศึกษาสภาวะในการอบแห้งดังต่อไปนี้ ความเร็วลม 0.2 m/s, เวลาในการสลับทิศทางลมร้อน 15 และ 30 นาที, ความหนาของผลิตภัณฑ์ต่อความหนาของชั้นวัสดุทั้งหมด (thickness/bed) 0.001/0.05 และ 0.01/0.1 m, อุณหภูมิ 50 และ 70 °C ซึ่งผลจากการทำแบบจำลอง ให้ผลของการทำนายอุณหภูมิและความชื้นที่ยอมรับได้เมื่อเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ถูกพัฒนาขึ้นสามารถนำไปใช้ในการหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งได้ อีกทั้งยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์รูปทรงอื่นได้อีกด้วย

Janjai *et al.* (2011) ได้ทำการศึกษาการจำลองการอบแห้งแบบ Batch ด้วยเทคนิคการสลับลมร้อนโดยใช้ความร้อนจากแหล่งเชื้อเพลิงชีวมวล โดยศึกษาการอบแห้งลำไย โดยในการทดลองทำการอบแห้งลำไยที่ปริมาณต่างกัน ได้แก่ 2,000 1,500 และ 1,000 kg ซึ่งเมื่อทำการเก็บข้อมูลการทดลอง ผ่านการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่า ผลของอุณหภูมิและความชื้นในแต่ละตำแหน่งไม่มีความแตกต่างกันทางนัยสำคัญ ส่วนผลของเวลาในการอบแห้งจะแตกต่างกันไปตามปริมาณของลำไย นั่นคือ เวลาในการอบแห้งมีค่าแปรผันตรงกับปริมาณลำไยที่อบในแต่ละครั้ง ซึ่งการอบแห้งจะต้องทำการอบจนความชื้นสุดท้ายเหลือประมาณ 12 % w.b. และในการทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ผลจากการใช้แบบจำลองทำนายผลของความชื้นและอุณหภูมิให้ผลที่ยอมรับได้แลมีแนวโน้มไปไปในทางเดียวกันเมื่อเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบและหาสภาวะที่เหมาะสมในการออกแบบตู้อบต่อไปได้

สรุปกรอบแนวคิด

จากการรวบรวมข้อมูลงานวิจัยที่ได้กล่าวไปเบื้องต้น ทำให้ทราบแนวทางในการดำเนินงานและการประยุกต์ใช้ทฤษฎีบางส่วนที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย โดยการนำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งพริกไทย ซึ่งเกี่ยวเนื่องกับการถ่ายเทความร้อนและมวลสาร

รูปแบบสมการที่สามารถนำมาใช้เป็นแนวทางในการศึกษาได้จากงานวิจัยของ Aregba *et al.* (2006) ได้ศึกษาการจำลองการอบแห้งแบบชั้นหนาอยู่กับที่ โดยแบบจำลองถูกนำเสนอในรูปแบบอัตราส่วนอุณหภูมิไร้มิติและอัตราส่วนความชื้นไร้มิติซึ่งเปลี่ยนแปลงตามเวลาและชั้นความหนา และ Dai-Chyi and Din sue Fon. (2013) ซึ่งนำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งแบบ Deep-bed ซึ่งเป็นการอบแห้งที่คล้ายคลึงกับการวิจัย และจากงานวิจัย Herman *et al.* (2001), Janjai *et al.* (2011) ทำให้ทราบแนวทางในการกำหนดตำแหน่งการเก็บข้อมูล และในการทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งมีสมบัติทางเทอร์ไดนามิกส์เข้าเกี่ยวข้อง ซึ่งสมบัติเหล่านี้สามารถนำแนวทางของงานวิจัย ณรงค์ อึ้งกิมบ้วน และคณะ (2554) และ อัจฉรา แซ่โค้ว (2556) เข้ามาใช้ประกอบในการทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ โดยสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังแสดงในตาราง 4

ตาราง 4 สรุปผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ชื่องานวิจัย และผู้ทำวิจัย	กระบวนการอบแห้ง	ค่าตัวแปรที่ศึกษา	วัสดุทดสอบ	ลักษณะชิ้นทดสอบ	ความชื้นเริ่มต้น	พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์
สมบัติทางฟิสิกส์เชิงความร้อนของเม็ดพริกไทย *ณรงค์ อึ้งกิมบ้วน, อรอุมา หนูทอง และ ภาณุพงศ์ บุญเพียร*	ลมร้อน	70 °C	พริกไทย	ทรงกลม	190 % d.b.	- ความหนาแน่นปรากฏ - ร้อยละช่องว่างอากาศ - ความร้อนจำเพาะ
แบบจำลองการอบแห้งชั้นบางเมล็ดกาแฟ *บุญคง คำครุฑลาวงษ์*	ลมร้อน	50-70 °C	เมล็ดกาแฟ	ทรงกลม	241.05-248.72 %d.b.	-สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น - ความร้อนจำเพาะ - ความหนาแน่นปรากฏ - ร้อยละช่องว่างอากาศ
ปัจจัยการอบแห้งด้วยแหล่งพลังงานความร้อนแบบการพาและการแผ่รังสีความร้อนที่มีต่อจลนศาสตร์และคุณภาพของพริกไทยดำ *อัจฉรา แซ่โคว์, สุภวรรณ ฎีระวณิชย์กุล และ ยุทธนา ฎีระวณิชย์กุล*	ลมร้อน รังสีใต้แดง คลื่นไมโครเวฟ	80 °C 1,000 W 400 W	พริกไทยดำ	ทรงกลม	300-400 %d.b.	- SEC - สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล - EMC
สัมประสิทธิ์หารแพร่ความชื้น ความสิ้นเปลืองพลังงานและอัตราการระเหยน้ำจำเพาะของการอบแห้งผลหมากด้วยพลังงานความร้อนร่วม *อีลียะ สนิโส, ฟารามี สะอุดี และ รัชดาภรณ์ ฮานาฟี*	ลมร้อน คลื่นไมโครเวฟ	60-80 °C 180-600W	ผลหมาก	ทรงกลม	85.5 %d.b.	-สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น - ร้อยละช่องว่างอากาศ - SEC

ตาราง 4 (ต่อ)

ชื่องานวิจัย และผู้ทำวิจัย	กระบวนการอบแห้ง	ค่าตัวแปรที่ศึกษา	วัสดุทดสอบ	ลักษณะชิ้นทดสอบ	ความชื้นเริ่มต้น	แบบจำลองที่ใช้
Mathematical modeling and simulation of batch drying of food in fixed-bed with air flow reversal. *Ruiz-Lopez , Martinez-Sanchez, Cobos-Vivaldo, Herman-Lara*	ลมร้อน	50, 70 °C	แครอท	ทรงกระบอก	685 % d.b.	Fixed-bed model
Experimental and simulated performance of a batch type dryer with air flow reversal using biomass burner as a heat source. *Janjai, Lamlert, Mahayothee, Sruamsiri, Precoppe, Bala and Muller*	ลมร้อน	80 °C	ลำไย	ทรงกลม	74 %w.b.	แบบจำลองทางทฤษฎี
Stationary deep-bed drying: A comparative study between a logarithmic model and a non-equilibrium model *Aregba, Sabastian and Nadeau*	ลมร้อน	45 °C	เมล็ดพันธุ์พืช			- Logarithmic model -Non equilibrium model

บทที่ 3
อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้แบ่งการดำเนินงานออกเป็น 2 ขั้นตอน ตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย โดยขั้นตอนแรกคือ ทำการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมการอบแห้ง ซึ่งข้อมูลจากการทดลองจะถูกใช้ในการดำเนินงานขั้นตอนที่สองคือ การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้ง โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งแบบชั้นหนาอยู่กับที่ (fixed deep-bed model) ที่ถูกพัฒนาโดย Barre *et al.* (1971) เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีต่อการอบแห้งด้วยเทคนิคการสลับลมร้อน และศึกษาหาความสูงของชั้นพริกไทยที่เหมาะสมในการอบแห้งด้วยเทคนิคการสลับลมร้อน

วัสดุ อุปกรณ์

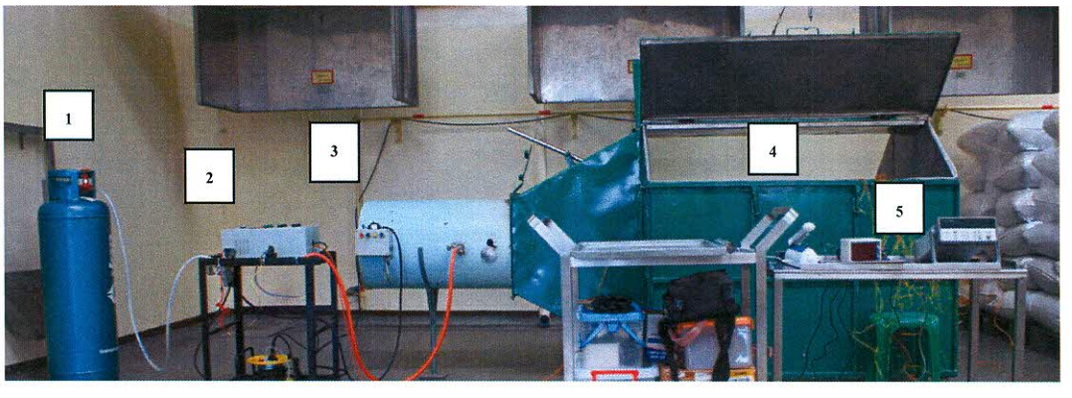
1. พริกไทยดำ
2. ตู้อบสลับทิศทางลมร้อน ขนาด 1 ตัน ของบริษัท เลิศลานนาไทย จำกัด 1 เครื่อง
3. ตู้ควบคุมปริมาณเชื้อเพลิงอิเล็กทรอนิกส์ ที่มีระบบควบคุมอัตโนมัติ 1 เครื่อง
4. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบตัวเลข ยี่ห้อ Sartorius รุ่น CP 3202S 1 เครื่อง
5. เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์ ยี่ห้อ Sila 1 เครื่อง
6. ชุดอุปกรณ์เก็บข้อมูลอุณหภูมิ ยี่ห้อ Agilent technology รุ่น 34970A 1 เครื่อง
7. สายเทอร์โมคับเปิ้ล Type K 1 ม้วน
8. เครื่องคอมพิวเตอร์ 1 เครื่อง
9. เครื่องปั่น ยี่ห้อ Ladyhouse 1 เครื่อง
10. ตู้อบลมร้อน ยี่ห้อ Mammert 1 เครื่อง
11. เครื่อง seal 1 เครื่อง
12. ถุงฟลอยล์ 1 กล่อง
13. ถุงพลาสติกสำหรับเก็บตัวอย่างแบบซิบล็อก 1 กล่อง

การทดลองและการวิเคราะห์

ในการทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งพริกไทยดำ เป็นการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายอุณหภูมิและความชื้นในการอบแห้ง การดำเนินงานจะแบ่งออกเป็นสองส่วน โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

1. เครื่องอบแห้งที่สามารถสลับทิศทางลมร้อนได้

การศึกษาพฤติกรรมการอบแห้งพริกไทยดำในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องอบแห้งที่ถูกดัดแปลงจากเครื่องอบแห้งลำไยทั้งเปลือกของบริษัทเลิศลานนาไทย เพื่อให้เหมาะสมกับการอบแห้งพริกไทยดำโดยปรับปรุงตู้ให้ถูกสุขลักษณะและเหมาะสมกับการใช้ในการอบแห้งอาหาร หลักการทำงานของเครื่องเริ่มจากจุดไฟหัวเผาเพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับอากาศ ในการเพิ่มความเร็วให้กับอากาศร้อนทำโดยการเปิดพัดลม สำหรับการอบแห้งแบบธรรมดาอากาศร้อนจะถูกบังคับให้ไหลจากด้านล่างสู่ด้านบน โดยการบังคับทิศทางการไหลของอากาศทำได้โดยการเปิด-ปิดวาล์วควบคุมทิศทาง เครื่องอบแห้งที่ใช้ในงานวิจัยและชุดอุปกรณ์ดังแสดงในภาพ 10



1.ถังบรรจุแก๊สแอลพีจี 2.ชุดควบคุมอุณหภูมิอบแห้ง 3.ชุดพัดลมพร้อมใบพัดขนาด 1/3 แรงม้า 4.กระบะสำหรับบรรจุพริกไทย 5.ชุดอุปกรณ์เก็บข้อมูลการทดลอง

ภาพ 10 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

2. การศึกษาผลของการกระจายอุณหภูมิและความชื้นระหว่างการอบแห้งในการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อน

การศึกษาการกระจายอุณหภูมิและความชื้นของการอบแห้งพริกไทยดำทั้งสองกรณีจะศึกษาพฤติกรรมที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา

ก. การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองถูกออกแบบให้สอดคล้องกับการทำงานของบริษัท โดยการทดลองจะแบ่งการอบแห้งออกเป็น 2 กรณีตามการเตรียมพริกไทย โดยการอบแห้งทั้งสองกรณีจะใช้อุณหภูมิในการอบแห้งต่างกัน คือ พริกไทยไม่ผ่านการลวก (อบด้วยอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส) และ พริกไทยผ่านการลวก (อบด้วยอุณหภูมิ 115 องศาเซลเซียส) ตามลำดับ โดยตัวแปรที่ศึกษา คือ ความหนาของชั้นพริกไทย และรูปแบบการไหลของอากาศ โดยพริกไทยดำที่ใช้ในการศึกษามีความหนาแน่นคือ กรณีพริกไทยไม่ผ่านการลวก เท่ากับ 550 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร กรณีพริกไทยผ่านการลวก เท่ากับ 430 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความเร็วลมบริเวณทางเข้ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.25 เมตรต่อวินาที สภาวะการอบแห้งที่ศึกษาดังแสดงใน ตาราง 5

ข. การเตรียมตัวอย่าง

พริกไทยที่ใช้ในการทดลองเป็นพริกไทยที่ผ่านการเตรียมด้วยวิธีการของทางบริษัท นิธิฟูดส์ เท่านั้น (นิธิฟูดส์, 2555) คือ พริกไทยที่ไม่ผ่านการลวก (no blanching pre-treatment) และพริกไทยที่ผ่านการลวก (blanching pre-treatment)

ตาราง 5 สภาวะการอบแห้งที่ทำการศึกษา

Pre-treatment	Bed thickness (cm)	Type of airflow
No blanching pre-treatment	20	Normal airflow
		Reversal airflow
	30	Normal airflow
		Reversal airflow
	40	Normal airflow
		Reversal airflow
Blanching pre-treatment	20	Normal airflow
		Reversal airflow
	30	Normal airflow
		Reversal airflow
	40	Normal airflow
		Reversal airflow

ค. วิธีการทดลอง

1) เดินเครื่องอบแห้งก่อนใส่ตัวอย่างให้ได้อุณหภูมิการอบแห้งที่กำหนดในแต่ละสภาวะการอบแห้ง

2) ทำการบันทึกน้ำหนักพริกไทยก่อนการอบแห้งแล้วทำการบรรจุพริกไทยลงในกระบะอบแห้ง ให้ได้ความสูงตามที่กำหนดในแต่ละสภาวะการทดลอง

3) ตรวจเช็คตำแหน่งอุปกรณ์เก็บข้อมูล ความเรียบร้อยก่อนปิดตู้อบแห้ง

4) บันทึกข้อมูล อุณหภูมิทุก ๆ 30 นาที และทำการสุ่มตัวอย่างเพื่อนำมาหาค่าความชื้น ทุก ๆ 30 นาที จนกระทั่งความชื้นสุดท้ายมีค่าประมาณ 0.07 มาตรฐานแห้ง

5) ขณะทำการทดลอง ทำการวัดอุณหภูมิลมร้อน ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในห้องอบ อุณหภูมิอากาศแวดล้อม ความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อม อุณหภูมิบริเวณทางเข้าห้องอบ ความชื้นสัมพัทธ์บริเวณทางเข้าห้องอบ ทุก 30 นาที จนสิ้นสุดการทดลอง

6) นำตัวอย่างที่สุ่มได้ในแต่ละจุด หาความชื้นโดยนำไปปั่นและอบในตู้อบลมร้อน และนำตัวอย่างพริกไทยดำก่อนการอบแห้งไปหาน้ำหนักแห้ง เพื่อหาความชื้นเริ่มต้น ด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 103 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง (AOAC, 1995)

7) ทำการทดลองซ้ำข้อที่ 1-6 โดยเปลี่ยนสภาวะการอบแห้งดังตาราง 5

ง. การเก็บข้อมูลการทดลอง

1) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

การเก็บข้อมูลอุณหภูมิภายในกระบะที่บรรจุพริกไทยดำ วัดอุณหภูมิอากาศภายในกระบะด้วยเทอร์โมคับเปิ้ล Type K ที่ถูกเชื่อมต่อกับชุดอุปกรณ์เก็บข้อมูล Agilent technology รุ่น 34970A โดยในการทดลองออกแบบตำแหน่งการเก็บอุณหภูมิ 3 ตำแหน่ง ในแต่ละตำแน่งทำการเก็บข้อมูลอุณหภูมิย่อย 5 ระดับ (x=1, 2, …, 5) ซึ่งจะเปลี่ยนระดับไปตามความหนาของชั้นพริกไทย ส่วนการเก็บข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศบริเวณทางเข้า ทางออก และภายนอก วัดค่าโดยใช้เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์ยี่ห้อ Sila ดังภาพ 11

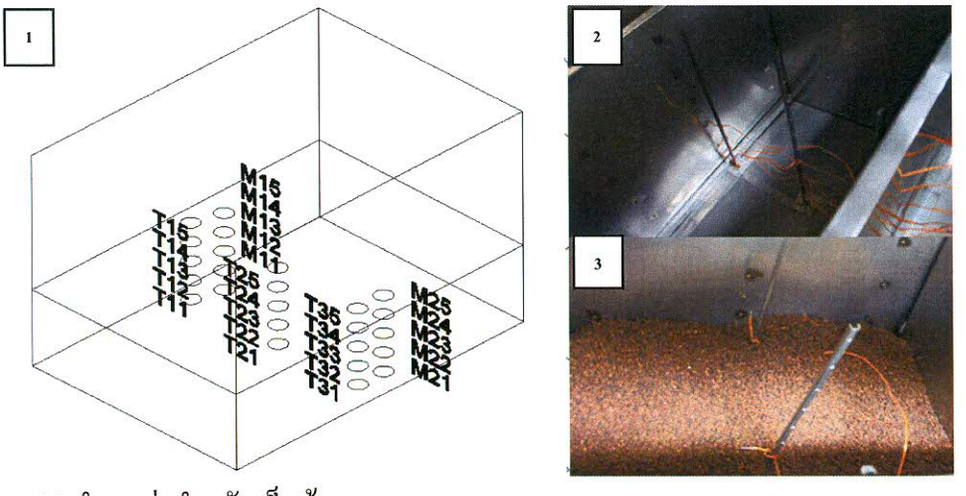
(1) อุปกรณ์เก็บอุณหภูมิ (2) อุปกรณ์เก็บความชื้นสัมพัทธ์

ภาพ 11 อุปกรณ์สำหรับเก็บข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์

2) การเปลี่ยนแปลงความชื้น

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงความชื้นในการอบแห้งพริกไทยดำ มีวิธีการโดยการสุ่มตัวอย่างพริกไทยจากตำแหน่งที่กำหนด 2 ตำแหน่ง ซึ่งในแต่ละตำแหน่งแบ่งเป็น 5 ระดับย่อย เช่นเดียวกับการเก็บข้อมูลอุณหภูมิ โดยการหาความชื้นของพริกไทยใช้วิธีการตามมาตรฐาน AOAC

การเก็บข้อมูลอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ การสุ่มตัวอย่างพริกไทยเพื่อหาความชื้น จะทำการเก็บข้อมูลทุก 30 นาที จนกว่าการทดลองจะเสร็จสิ้น โดยกำหนดให้การทดลองเสร็จสิ้นเมื่อความชื้นสุดท้ายของพริกไทยมีค่าเท่ากับ 0.07 มาตรฐานแห้ง ตำแหน่งการเก็บข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นดังแสดงในภาพ 12 และตำแหน่งโดยรวมของการเก็บข้อมูลทั้งหมดดังแสดงในภาพ 13

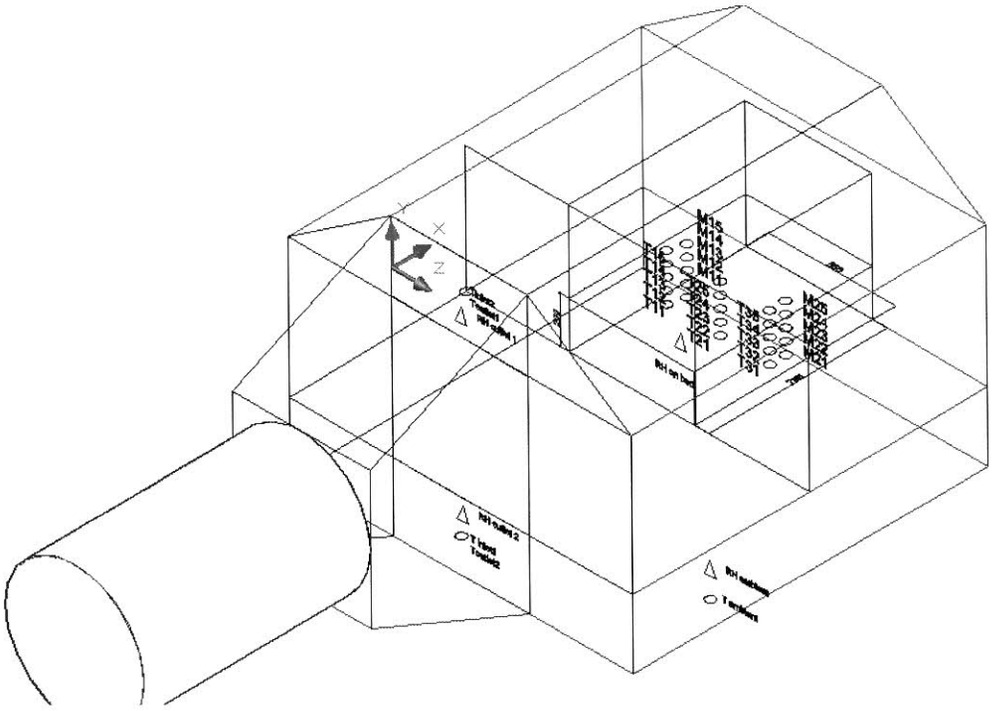


ภาพ 12 (1) ตำแหน่งสำหรับเก็บข้อมูล

(2) กระบะสำหรับบรรจุพริกไทย

(3) กระบะที่บรรจุพริกไทยพร้อมติดตั้งตำแหน่งเก็บข้อมูล

ภาพ 11 (1) แสดงตำแหน่งสำหรับการเก็บอุณหภูมิ (T) และตำแหน่งสำหรับข้อมูลน้ำหนัก (M) (โดย T11 คือ ตำแหน่งที่ 1 ของการเก็บข้อมูลและชั้นความหนา x=1) เช่นเดียวกับตำแหน่งการเก็บความชื้น



ภาพ 13 องค์ประกอบโดยรวมของตู้อบแห้งที่ใช้ในการทำการทดลอง

3. การวิเคราะห์ผลของสภาวะการอบแห้งที่มีต่ออัตราการอบแห้ง

ทำการวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองตามสภาวะการทดลอง โดยวิเคราะห์เปรียบเทียบแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นเทียบกับเวลา และอัตราส่วนอุณหภูมิเทียบกับเวลา โดยอัตราส่วนความชื้นและอัตราส่วนอุณหภูมิ คำนวณได้จากสมการ 24, 25 ที่กล่าวถึงในบทที่ 2

4. การวิเคราะห์ตัวแปรไร้มิติของแบบจำลองแบบชั้นหนาอยู่กับที่

จากสมการ 28 และ 29 ในบทที่ 2 ซึ่งกำหนดตัวแปรความหนาและเวลา (x, t) ให้อยู่ในเทอมตัวแปรไร้มิติ (υ,θ) ซึ่งตัวแปรไร้มิติดังกล่าวถูกจัดรูปแบบให้อยู่ในรูปของค่าคงที่หน่วยการถ่ายโอน (K, H) ซึ่งสามารถทำการวิเคราะห์ค่าคงที่ดังกล่าวได้ ใช้เทคนิคการวิเคราะห์ความถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear regression) โดยใช้โปรแกรม SPSS ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1) นำอัตราส่วนความชื้นที่คำนวณได้ วิเคราะห์ความถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยใช้ตัวแปรที่เกี่ยวข้องในสมการ 28

2) ผลการวิเคราะห์จะได้ค่าคงที่หน่วยการถ่ายโอน K, H และ R^2

3) ทำซ้ำ ข้อ 1-2 โดยเปลี่ยนสภาวะการอบแห้ง ซึ่งจะได้ค่าคงที่หน่วยการถ่ายโอนของแต่ละสภาวะการทดลอง

4) ทำซ้ำข้อ 1-3 โดยเปลี่ยนจากอัตราส่วนความชื้นอัตราส่วนอุณหภูมิ ซึ่งใช้สมการ 29

5. การวิเคราะห์เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลอง

จากหัวข้อที่ผ่านมาเป็นการวิเคราะห์ค่าคงที่ของหน่วยการถ่ายโอนซึ่งได้ค่าคงที่ทั้งหมด 2 ชุด จากนั้นนำค่าคงที่ที่ได้คำนวณตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายอัตราส่วนความชื้นและอัตราส่วนอุณหภูมิ ในหัวข้อนี้จะทำการวิเคราะห์ความแตกต่างของข้อมูลโดยทำการวิเคราะห์ด้วยค่าจริงซึ่งค่าที่นำมาวิเคราะห์จะถูกแบ่งตามระดับชั้นย่อยในชั้นพริกไทย จากนั้นทำการวิเคราะห์ความแม่นยำของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อประเมินความเป็นไปได้ของแบบจำลองที่มีต่อการอบแห้งเพื่อเลือกระดับความหนาที่เหมาะสมต่อการจำลองการอบแห้ง และระดับความหนาที่เหมาะสมต่อการอบแห้งในการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อน โดยพิจารณาจากค่า สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2), ค่า Root mean square error (RMSE) และค่าความคลาดเคลื่อน (MBE) ซึ่งคำนวณจากสมการ 37, 38 และ 39 ตามลำดับ และพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยจากการทดลองและแบบจำลองกับระยะเวลาในการอบแห้ง เช่นเดียวกันกับอัตราส่วนอุณหภูมิ

6. การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและมวลไร้มิติ

เมื่อได้ผลจากการทำนายอัตราส่วนความชื้นไร้มิติและอุณหภูมิไร้มิติ ถัดมาทำการคำนวณประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนได้โดยใช้วิธีการกำหนดตัวแปรไร้มิติ ซึ่งการคำนวณหาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและมวลไร้มิติ (heat and mass transfer efficiency dimensionless variables) ที่เปลี่ยนแปลงตามความหนาและเวลา ทำได้ด้วยวิธีการคำนวณแบบ NTU-ε โดยวิธีการคำนวณแบบนี้จะใช้ในกรณีที่ไม่ทราบค่าอุณหภูมิของไหลที่ทางออก (ประเสริฐ, 2552) ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$\varepsilon_m(x,t) = \frac{M_{pi} - M_p(x,t)}{M_{pi} - M_{eq}} \tag{40}$$

$$\varepsilon_t(x,t) = \frac{T_{a0} - T_a(x,t)}{T_{a0} - T_{am}} \tag{41}$$

โดยตัวแปรไร้มิติ ε_m คือประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลสาร และ ε_t คือประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน จากนั้นเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าที่คำนวณได้กับค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการถ่ายเท ซึ่งค่าความแตกต่างที่ได้จะแสดงในรูปของเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง และทำการวิเคราะห์ผลเพื่อนำไปสู่การเลือกสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้ง

7. สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (D_{eff})

จากบทที่ 2 ได้กล่าวถึงการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล ซึ่งใช้กับวัสดุชั้นบาง ตามรูปแบบสมการการจำลองการแพร่ของ Fick (Fick's second law) ซึ่งเมื่อทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln (MR) กับ เวลาการอบแห้ง (drying time) เพื่อหาค่าความชัน (อีลีหยัะ และคณะ, 2555) สำหรับคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของการอบแห้งพริกไทยดำที่สภาวะต่าง ๆ

$$D_{eff} = -\frac{Slope(r^2)}{\pi^2} \tag{42}$$

ก. การวิเคราะห์ค่าพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นให้น้ำเคลื่อนที่ออกจากวัสดุ (activation energy)

พลังงานกระตุ้น (E_a) ของการอบแห้งพริกไทยดำ พิจารณาได้จากสมการความสัมพันธ์ของ Arrhenius ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้นการเคลื่อนที่ของสสาร และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คงที่ได้ จากสมการ 43 โดยการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ln (D_{eff}) กับ $\frac{1}{T}$ โดยค่าพลังงานกระตุ้นเคลื่อนที่ของสสาร คำนวณได้จากความชันของเส้นกราฟ (อัจฉรา และคณะ, 2556) ซึ่งคำนวณได้ตามสมการ 44

$$\ln D_{eff} = -\frac{E_a}{R(T+273.15)} + \ln D_0 \tag{43}$$

$$E_a = Slope \times R \tag{44}$$

ข. การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล

จากการคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล ตามสมการของ Fick จะได้ค่า D_{eff} ของแต่ละสภาวะการทดลองซึ่งเปลี่ยนแปลงตามตัวแปรที่ศึกษา นั่นคือ อุณหภูมิอบแห้ง (100, 115 องศาเซลเซียส), ระดับชั้นความหนาของวัสดุ (20, 30 และ 40 เซนติเมตร) และความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่เวลาใด ๆ จากข้อมูลดังกล่าวสามารถสร้างสมการเพื่อทำนายค่า D_{eff} ได้โดยใช้การวิเคราะห์เชิงพหุ (multiple regression analysis)

การวิเคราะห์สมการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล ดังสมการ 45

$$D_{eff} = \beta_0 + \beta_1(Ta) + \beta_2(X) + \beta_3(M_p) \tag{45}$$

เมื่อ D_{eff} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (ตารางเมตรต่อวินาที)

X คือ ระดับความหนาของชั้นวัสดุ (เซนติเมตร)

T_a คือ ระดับอุณหภูมิอุณหภูมิอบแห้ง (องศาเซลเซียส)

M_p คือ ความชื้นผลิตภัณฑ์ (มาตรฐานแห้ง)

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิจารณ์

จากงานวิจัยนี้สามารถแบ่งการวิเคราะห์และวิจารณ์ผลการทดลองออกเป็น 5 ส่วน คือ การวิเคราะห์ผลอัตราการอบแห้ง, การวิเคราะห์ผลค่าคงที่ของหน่วยการถ่ายโอนความร้อน (transfer unit) ของแบบจำลองแบบชั้นหนาอยู่กับที่ (fixed deep-bed model) ที่มีต่อสภาวะการอบแห้ง, การศึกษาความเป็นไปได้ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีต่อสภาวะการอบแห้งและความหนาที่เหมาะสม และการศึกษาแบบจำลองการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล ซึ่งได้ผลดังนี้

1. การวิเคราะห์ผลอัตราการอบแห้ง

จากการทดลองอบแห้งพริกไทยดำกรณีพริกไทยที่ไม่ผ่านการลวก และ กรณีพริกไทยดำที่ผ่านการลวก ซึ่งปัจจัยที่ศึกษาคือ ความหนาของชั้นพริกไทยดำ (20, 30, 40 cm) และรูปแบบการไหลของอากาศ (การไหลแบบธรรมดาและการไหลแบบสลับทิศทางลมร้อนทุก 1 ชั่วโมง) พบว่า ในทุกสภาวะการทดลองความหนาของชั้นวัสดุและรูปแบบการไหลของอากาศมีผลต่ออัตราการอบแห้งและอัตราส่วนอุณหภูมิ โดยการทดลองพบว่า สมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ที่ถูกอบด้วยกระบวนการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อนมีค่าใกล้เคียงกับค่ามาตรฐาน ซึ่งสมบัติทางกายภาพที่ใช้ในการประเมินคุณภาพคือ ค่าความชื้น และระยะเวลาในการอบแห้ง ดังแสดงในตาราง 6

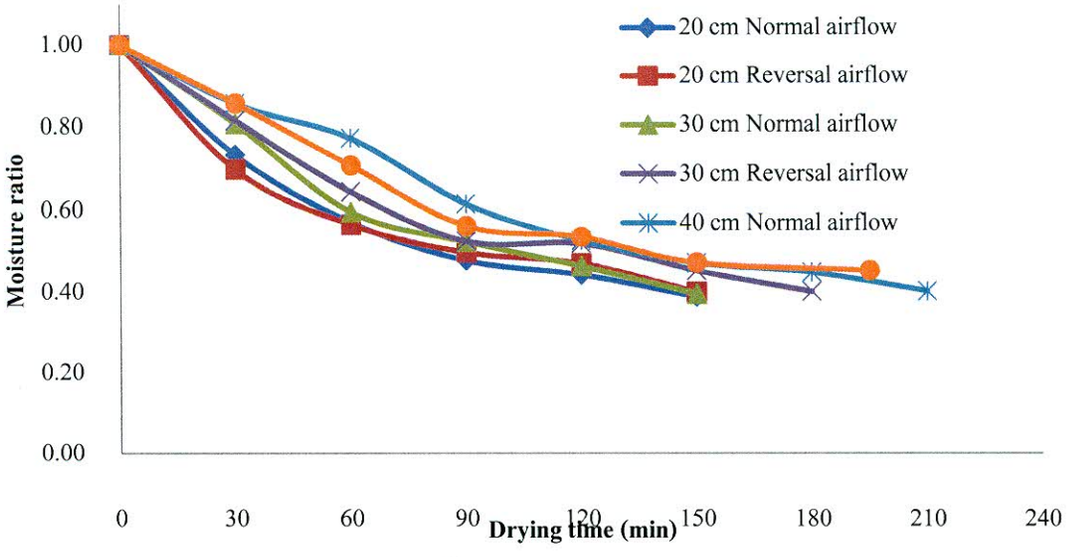
ภาพ 14 และ 15 เป็นการพิจารณาผลของสภาวะการอบแห้งที่มีต่ออัตราการอบแห้งและอัตราส่วนอุณหภูมิ ในกรณีการอบแห้งพริกไทยดำที่ไม่ผ่านการลวก (no blanching pre-treatment) โดยภาพ 14 แสดงถึงอัตราการอบแห้งตามปัจจัยที่ศึกษา พบว่า รูปแบบการไหลของอากาศมีผลต่อการอบแห้ง โดยเมื่อทำการเปรียบเทียบที่ระดับความหนา 40 cm อัตราการลดความชื้นของรูปแบบการไหลแบบสลับทิศทางลมร้อนมีแนวโน้มดีกว่ารูปแบบการไหลแบบธรรมดา เนื่องจากการสลับทิศทางลมร้อนสามารถกระจายความร้อนสู่วัสดุได้อย่างทั่วถึง ซึ่งสอดคล้องกับภาพ 15 เมื่อพิจารณาผลของรูปแบบการไหลอากาศซึ่งผลต่ออัตราส่วนอุณหภูมิ นั่นคือ รูปแบบการไหลแบบสลับทิศทางลมร้อนทำให้เกิดการกระจายอุณหภูมิได้อย่างทั่วถึงภายในชั้นวัสดุ ซึ่งทำให้อัตราส่วนอุณหภูมิมีแนวโน้มดีกว่ารูปแบบการไหลแบบธรรมดา เมื่อทำการเปรียบเทียบในช่วงการอบแห้งที่เวลา 30-90 นาที

ตาราง 6 ข้อมูลจากการทดลองอบแห้งพริกไทยดำ

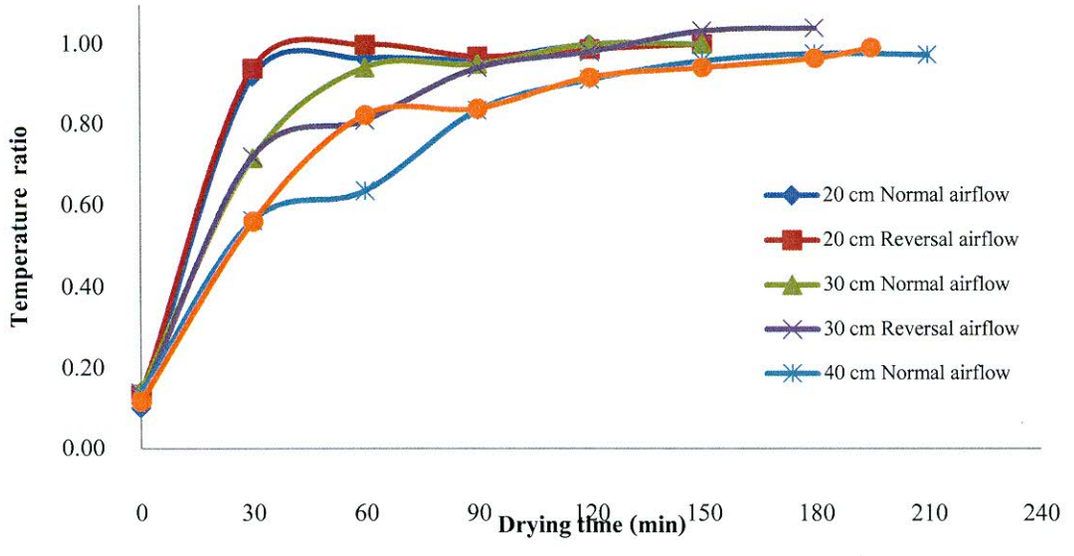
Condition			Drying time (min)	Final moisture content (d.b.)	Initial weight (kg)	Final weight (kg)
Pre-treatment	Bed thickness (cm)	Airflow				
No blanching	20	Normal airflow	150	0.066	50.00	45.70
		Reversal airflow	150	0.068	50.00	45.70
	30	Normal airflow	150	0.067	75.00	68.70
		Reversal airflow	180	0.068	75.00	68.14
	40	Normal airflow	210	0.068	100.00	90.60
		Reversal airflow	195	0.068	100.00	90.15
Blanching	20	Normal airflow	150	0.061	30.00	29.50
		Reversal airflow	150	0.067	30.00	29.40
	30	Normal airflow	180	0.069	50.00	48.20
		Reversal airflow	270	0.068	50.00	48.50
	40	Normal airflow	300	0.067	75.00	74.60
		Reversal airflow	210	0.065	75.00	74.30

จากตาราง 6 กรณีการอบแห้งพริกไทยดำที่ไม่ผ่านการลวก (100 °C) โดยความชื้นเริ่มต้นของพริกไทยดำที่ไม่ผ่านการลวกมีค่าประมาณ 0.170 มาตรฐานแห้ง เมื่อความหนาของชั้นวัสดุเพิ่มขึ้นจะใช้ระยะเวลาในการอบแห้ง 150, 150 และ 210 นาที (รูปแบบการไหลแบบธรรมดา) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความหนาที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งนานขึ้นเมื่อทำการอบแห้งด้วยอุณหภูมิคงที่ และใช้ระยะเวลาในการอบแห้ง 150, 180 และ 195 นาที (รูปแบบการไหลแบบสลับทิศทางลมร้อน) สำหรับกรณีการอบแห้งพริกไทยดำที่ผ่านการลวก (115 °C) ซึ่งความชื้นเริ่มต้นของพริกไทยที่ผ่านการลวกมีค่าประมาณ 1.203 มาตรฐานแห้ง เมื่อทำการอบแห้งด้วยอุณหภูมิคงที่พบว่า ปัจจัยที่ศึกษา (ระดับความหนาและรูปแบบการไหลของอากาศ) มีผลต่ออัตราการอบแห้ง ซึ่งอัตราส่วนความชื้นตลอดการทดลองดังแสดงในภาพ 16 การอบแห้งใช้ระยะเวลาในการอบแห้ง 150, 180 และ 300 นาที (รูปแบบการไหลแบบธรรมดา) และ 150, 270 และ 210 นาที (รูปแบบการไหลแบบสลับทิศทางลมร้อน) ซึ่งแสดงให้เห็นว่ารูปแบบการไหลของอากาศและระดับความหนาของชั้นวัสดุที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อระยะเวลาในการอบแห้ง และจากการทดลองพบว่าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศมีผลต่อการระเหยความชื้นออกจากวัสดุซึ่งสังเกตเห็นได้ชัดในการทดลองที่ระดับความหนา 30 เซนติเมตร เนื่องจากความชื้นสัมพัทธ์อากาศที่มีค่าสูงทำให้ความ

แตกต่างระหว่างอัตราส่วนความชื้นของวัสดุและลมร้อนมีมากขึ้น เป็นผลให้เกิดการถ่ายเทมวลเป็นไปอย่างช้า ๆ จึงทำให้การระเหยความชื้นออกจากวัสดุเป็นไปอย่างช้า ๆ สอดคล้องกับงานวิจัยของพลรัชต์ (2551)



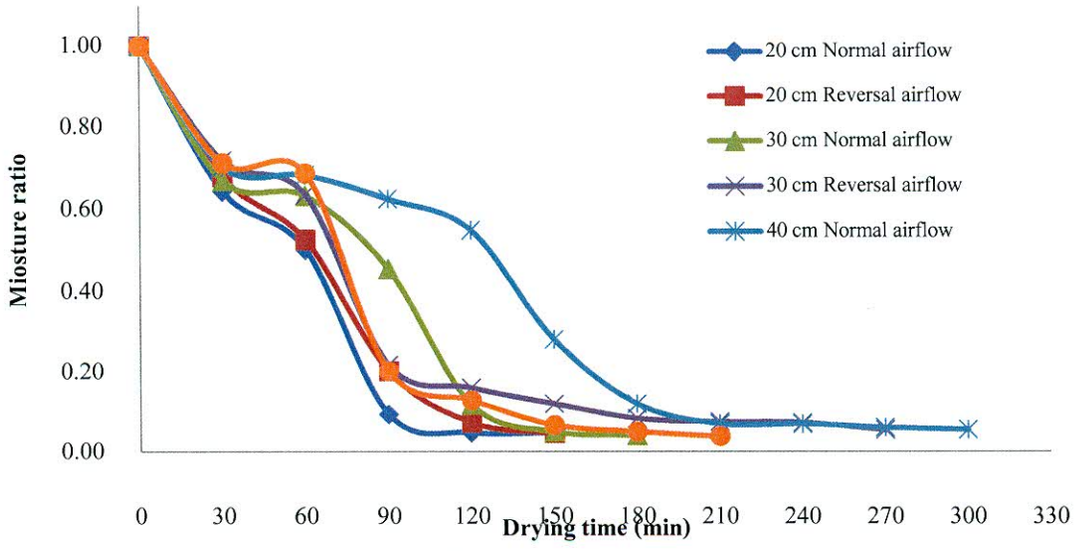
ภาพ 14 การเปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้น (MR) ของการอบแห้งพริกไทยดำที่ไม่ผ่านการลวก



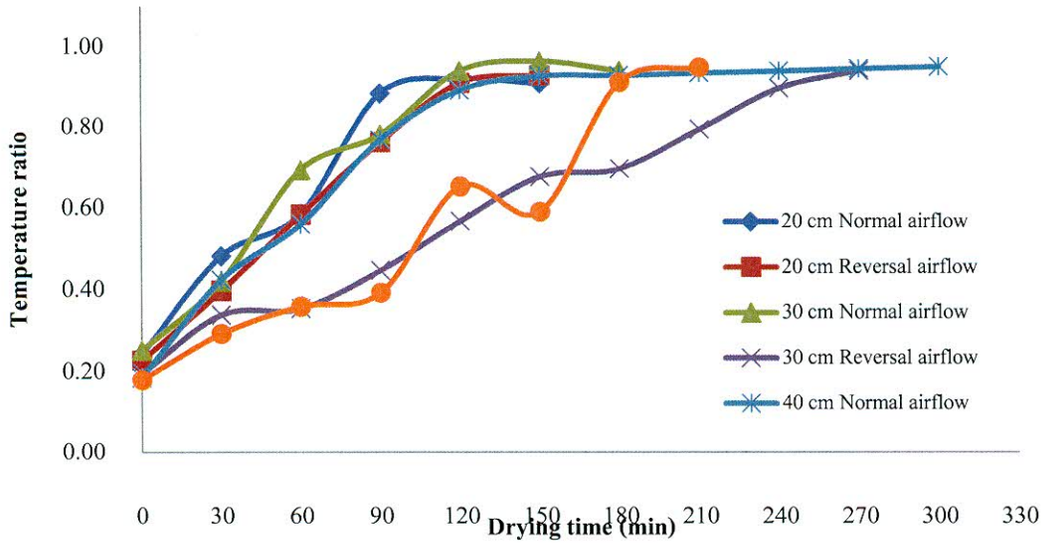
ภาพ 15 การเปรียบเทียบอัตราส่วนอุณหภูมิ (TR) ของการอบแห้งพริกไทยดำที่ไม่ผ่านการลวก

เมื่อพิจารณาอัตราส่วนอุณหภูมิของการทดลองดังภาพ 17 พบว่าระดับความหนาของชั้นวัสดุมีผลต่อการกระจายอุณหภูมิในชั้นวัสดุ สืบเนื่องจากพริกไทยดำที่ผ่านการลวกมีความชื้นเริ่มต้นสูงจึงเป็นผลให้การกระจายความร้อนเป็นไปอย่างช้า ๆ ในช่วงเริ่มต้นการอบแห้ง และเมื่อเปรียบเทียบจากรูปแบบการไหลของอากาศ พบว่ารูปแบบการไหลทั้งสองรูปแบบให้

แนวโน้มต่างกัน แต่ด้วยรูปแบบการไหลแบบสลับทิศทางลมร้อนทำให้เกิดการกระจายอุณหภูมิได้สม่ำเสมอกว่าจึงเป็นผลให้อัตราการอบแห้งดีกว่าซึ่งเห็นได้ชัดในการอบแห้งที่ระดับความหนา 40 cm สอดคล้องกับผลการทดลองของนักวิจัยหลายท่าน เช่น สุนีย์รัตน์ (2544) ซึ่งทำการทดลองเปรียบเทียบอัตราการลดความชื้นของลำไย ด้วยเครื่องอบแห้งของเกษตรกรและเครื่องอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อน



ภาพ 16 การเปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้น (MR) ของการอบแห้งพริกไทยดำที่ไม่ผ่านการลวก



ภาพ 17 การเปรียบเทียบอัตราส่วนอุณหภูมิ (TR) ของการอบแห้งพริกไทยดำที่ผ่านการลวก

2. การวิเคราะห์ตัวแปรไร้มิติของแบบจำลองแบบชั้นหนาอยู่กับที่

จากการทดลองอบแห้งพริกไทยดำ ตามสภาวะการอบแห้งที่กล่าวไปแล้วในบทที่ 3 ข้อมูลที่ได้จากการทดลองประกอบด้วย ความชื้นและอุณหภูมิ ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาการอบแห้ง โดยข้อมูลที่ได้จะถูกแบ่งเป็นข้อมูลตามระดับย่อยที่ได้กำหนดตำแหน่งการเก็บตามภาพ 12 ในบทที่ 3 เพื่อนำมาวิเคราะห์การกระจายความชื้นและอุณหภูมิ จากนั้นทำการคำนวณอัตราส่วนความชื้นและอัตราส่วนอุณหภูมิ เพื่อนำผลที่ได้ไปใช้ในการวิเคราะห์ค่าคงที่ของหน่วยการถ่ายโอนในแบบจำลอง ซึ่งทำได้โดยกำหนดตัวแปรความหนาและเวลา (x, t) ให้อยู่ในเทอมตัวแปรไร้มิติ (υ,θ) ซึ่งตัวแปรไร้มิติดังกล่าวถูกจัดรูปแบบให้อยู่ในรูปของค่าคงที่หน่วยการถ่ายโอน (K, H) และทำการวิเคราะห์ค่าคงที่ดังกล่าวโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ความถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear regression)

การวิเคราะห์ค่าคงที่ของหน่วยการถ่ายโอนของการทดลองตามสภาวะที่ศึกษา คือ ระดับความหนาของชั้นพริกไทย 20, 30 และ 40 เซนติเมตร และรูปแบบการไหลของอากาศทั้งสองรูปแบบ (การไหลแบบธรรมดาและการไหลแบบสลับทิศทาง) โดยการวิเคราะห์ค่าคงที่จะได้ค่าคงที่ของหน่วยการถ่ายโอน 2 ชุด คือ ค่าคงที่หน่วยการถ่ายโอนของอัตราส่วนความชื้น (MR) และค่าคงที่หน่วยการถ่ายโอนของอัตราส่วนอุณหภูมิ (TR) ได้ผลการวิเคราะห์ค่าคงที่หน่วยการถ่ายโอนของอัตราส่วนความชื้น ดังแสดงในตาราง 7

ตาราง 7 ค่าคงที่หน่วยการถ่ายโอนอัตราส่วนความชื้น (MR) ตามสภาวะการทดลอง

Drying condition		No blanching			Blanching		
		K	H	R^2	K	H	R^2
20 cm	Normal airflow	0.007	-1.985	0.935	0.023	0.198	0.936
	Reversal airflow	0.007	1.894	0.889	0.013	0.148	0.795
30 cm	Normal airflow	0.007	3.275	0.971	0.015	0.453	0.910
	Reversal airflow	0.006	5.029	0.932	0.012	1.335	0.905
40 cm	Normal airflow	0.005	3.043	0.977	0.010	0.639	0.919
	Reversal airflow	0.005	15.026	0.958	0.016	0.526	0.917

ค่าคงที่หน่วยการถ่ายโอนที่ประมาณได้จากการวิเคราะห์โดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นด้วยโปรแกรม SPSS พบว่า การเตรียมตัวอย่างก่อนการอบแห้งมีผลต่อ

ค่าคงที่หน่วยการถ่ายโอน ซึ่งอาจเนื่องมาจากการเตรียมตัวอย่างก่อนการอบแห้งมีผลต่อความชื้นเริ่มต้นของตัวอย่าง โดยจากการหาความชื้นเริ่มต้นของตัวอย่างพริกไทยดำพบว่าความชื้นเริ่มต้นของพริกไทยดำที่ไม่ผ่านการลวกมีค่าประมาณ 0.170 มาตรฐานแห้ง และพริกไทยดำที่ผ่านการลวกมีค่าความชื้นเริ่มต้นประมาณ 1.203 มาตรฐานแห้ง ดังนั้นผลของค่าคงที่ของทั้งสองรูปแบบจึงมีความแตกต่างกันโดยค่าคงที่การอบแห้ง (K) เป็นตัวแปรที่ใช้ประเมินเวลาในการอบแห้งโดยค่าต่ำแสดงถึงการใช้ระยะเวลาในการอบแห้งต่ำ โดยการอบแห้งพริกไทยดำที่ไม่ผ่านการลวกให้ผลการวิเคราะห์อยู่ในช่วง 0.005-0.007 ซึ่งเมื่อต่างจากการอบแห้งพริกไทยดำที่ผ่านการลวกที่มีค่าอยู่ในช่วง 0.010-0.023 และผลการวิเคราะห์ค่าคงที่หน่วยการถ่ายโอนของอัตราส่วนอุณหภูมิ ดังแสดงในตาราง 8

ตาราง 8 ค่าคงที่หน่วยการถ่ายโอนของอัตราส่วนอุณหภูมิ (TR) ตามสภาวะการทดลอง

Drying condition		No blanching			Blanching		
		K	H	R^2	K	H	R^2
20 cm	Normal airflow	0.004	0.037	0.810	0.001	0.048	0.841
	Reversal airflow	0.004	0.036	0.851	0.001	0.039	0.730
30 cm	Normal airflow	0.002	0.074	0.859	0.001	0.081	0.870
	Reversal airflow	0.002	0.073	0.789	0.001	0.083	0.604
40 cm	Normal airflow	0.001	0.138	0.831	0.001	0.082	0.886
	Reversal airflow	0.001	0.100	0.812	0.001	0.076	0.720

ผลของค่าคงที่จากการวิเคราะห์อัตราส่วนอุณหภูมิพบว่า ค่าคงที่ของหน่วยการถ่ายโอนไม่มีความแตกต่างกัน ซึ่งหากพิจารณาจากอุณหภูมิในการอบแห้ง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งมีค่าคงที่ตลอดการอบแห้ง และมีอัตราลดลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งจากการวิเคราะห์ให้ค่าคงที่การอบแห้ง (K) อยู่ในช่วง K= 0.001-0.004 (no blanching) และ K=0.001 (blanching) และค่าคงที่หน่วยการถ่ายโอนตามความสูง (H) ซึ่งผลจากการวิเคราะห์การอบแห้งทั้งสองอุณหภูมิมีค่าใกล้เคียงกันแต่แตกต่างกันเมื่อพิจารณาจากรูปแบบการไหลของอากาศซึ่งพบว่ารูปแบบการไหลแบบสลับทิศทางให้ค่าคงที่การถ่ายโอนตามความสูงต่ำกว่ารูปแบบการไหลแบบธรรมดา

3. การวิเคราะห์ความหนาที่เหมาะสมในการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากหัวข้อที่ผ่านมาเป็นการวิเคราะห์ผลพฤติกรรมการอบแห้งโดยเปรียบเทียบผลที่ได้จากแบบจำลองและข้อมูลการทดลอง ซึ่งทำการเปรียบเทียบผลตามระดับชั้นย่อยโดยผลการวิเคราะห์ให้แนวโน้มว่า แบบจำลองชั้นหนาอยู่กับที่ (fixed deep-bed model) สามารถทำนายผลอัตราส่วนความชื้นและอัตราส่วนอุณหภูมิได้ทุกสภาวะการทดลอง ดังนั้นหัวข้อต่อไปนี้จะนำเสนอระดับความหนาที่เหมาะสมที่แบบจำลองสามารถทำนายผลได้ ทั้งในกรณีการไหลของอากาศแบบธรรมดาและแบบสลับทิศทางลมร้อน โดยนำเสนอในรูปแบบอัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยและอัตราส่วนอุณหภูมิเฉลี่ยของผลของแบบจำลองทั้ง 5 ระดับย่อย การวิเคราะห์ความหนาที่เหมาะสมทำโดยการนำผลการทำนายและข้อมูลการทดลองที่หาค่าเฉลี่ยแล้วทำการวิเคราะห์ผลความแม่นยำทางสถิติด้วยค่า RMSE และ MBE ผลการวิเคราะห์ความแม่นยำทางสถิติของแต่ละสภาวะการทดลองดังแสดงในตาราง 9 และ 10

ตาราง 9 การวิเคราะห์ความแม่นยำทางสถิติของอัตราส่วนความชื้นด้วยค่า RMSE และ MBE

Drying condition		MR			
		No blanching		Blanching	
		RMSE	MBE	RMSE	MBE
20 cm	Normal airflow	0.059	0.0035	0.059	0.0035
	Reversal airflow	0.070	0.0049	0.044	0.0019
30 cm	Normal airflow	0.036	0.0013	0.120	0.0143
	Reversal airflow	0.040	0.0021	0.060	0.0035
40 cm	Normal airflow	0.028	0.0007	0.073	0.0053
	Reversal airflow	0.039	0.0015	0.056	0.0031

จากตาราง 9 และ 10 เมื่อพิจารณาค่า RMSE ซึ่งพิจารณาจากสภาวะการอบแห้งที่มีค่า RMSE ต่ำ แสดงถึงการกระจายข้อมูลมีค่าต่ำซึ่งมีความแม่นยำที่สูง เมื่อพิจารณาอัตราส่วนความชื้นกรณีการอบแห้งพริกไทยดำที่ไม่ผ่านการลวก (100 °C) พบว่า ค่า RMSE ในช่วง 0.028-0.070 และกรณีการอบแห้งพริกไทยที่ผ่านการลวก (115 °C) ให้ค่า RMSE อยู่ในช่วง 0.044-0.120 และเมื่อพิจารณาอัตราส่วนอุณหภูมิกรณีการอบแห้งพริกไทยที่ไม่ผ่านการลวก (100 °C) พบว่า ค่า

RMSE ในช่วง 0.037-0.076 และกรณีการอบแห้งพริกไทยที่ผ่านการลวก (115 °C) ให้ค่า RMSE อยู่ในช่วง 0.037-0.246

ตาราง 10 การวิเคราะห์ความแม่นยำทางสถิติของอัตราส่วนอุณหภูมิด้วยค่า RMSE และ MBE

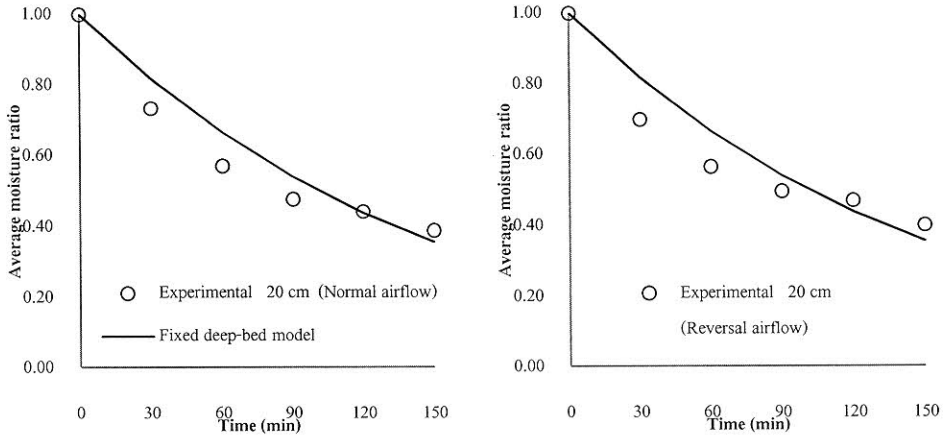
Drying condition		TR			
		No blanching		Blanching	
		RMSE	MBE	RMSE	MBE
20 cm	Normal airflow	0.037	0.0013	0.037	0.0013
	Reversal airflow	0.038	0.0014	0.073	0.0053
30 cm	Normal airflow	0.041	0.0016	0.129	0.0088
	Reversal airflow	0.076	0.0058	0.246	0.0603
40 cm	Normal airflow	0.093	0.0086	0.080	0.0064
	Reversal airflow	0.066	0.0043	0.308	0.0951

เมื่อพิจารณาค่า MBE ซึ่งพิจารณาจากสภาวะการอบแห้งที่มีค่า MBE ต่ำ แสดงถึงความเคลื่อนของข้อมูลทั้งสองชุดที่ค่าต่ำ และแสดงถึงความแม่นยำที่สูง การเปรียบเทียบค่า MBE เมื่อพิจารณาอัตราส่วนความชื้นกรณีการอบแห้งพริกไทยที่ไม่ผ่านการลวก (100 °C) พบว่า MBE อยู่ในช่วง 0.0007-0.0048 และกรณีการอบแห้งพริกไทยที่ผ่านการลวก (115 °C) ให้ค่า MBE อยู่ในช่วง 0.0019-0.0143 และเมื่อพิจารณาอัตราส่วนอุณหภูมิกรณีการอบแห้งพริกไทยที่ไม่ผ่านการลวก (100 °C) พบว่า MBE อยู่ในช่วง 0.0013-0.0086 และกรณีการอบแห้งการอบแห้งพริกไทยที่ผ่านการลวก (115 °C) ให้ค่า MBE อยู่ในช่วง 0.0013-0.060 โดยค่า RMSE และ MBE เป็นค่าพารามิเตอร์ที่ใช้บ่งบอกความผิดพลาดในการทำนายค่าระหว่างค่าที่ได้จากแบบจำลองและข้อมูลการทดลอง ดังนั้นค่า RMSE และ MBE ควรมีค่าน้อย และ R^2 ควรมีค่ามาก (Tomislav, 2012)

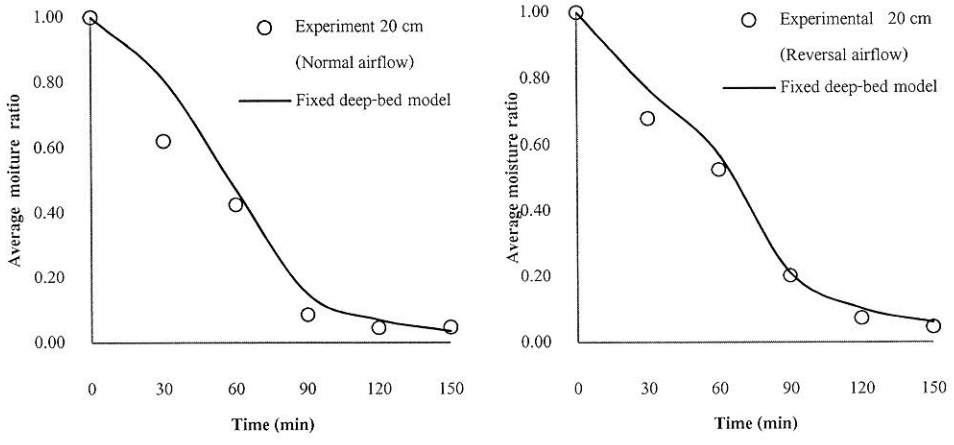
4. ผลการเปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยเพื่อหาชั้นความหนาที่เหมาะสม

จากการวิเคราะห์ความแม่นยำทางสถิติ ผลจากการทำนายอัตราส่วนความชื้นจากแบบจำลองชั้นหนาอยู่กับที่ (fixed deep-bed model) ของการอบแห้งด้วยชั้นความหนาของพริกไทยเท่ากับ 20 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพ 18 พบว่า แบบจำลองสามารถทำนายอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งได้ใกล้เคียงกับข้อมูลการทดลอง เมื่อทำการวิเคราะห์ความแม่นยำทางสถิติด้วย RMSE

(root mean square error) และ MBE (mean bias error) รูปแบบการไหลของอากาศมีผลต่ออัตราการอบแห้ง โดยแบบจำลองสามารถทำนายอัตราส่วนความชื้นของการไหลของอากาศแบบธรรมดาได้ดีกว่าการไหลแบบสลับทิศทางลมร้อน สอดคล้องกับค่าความแม่นยำทางสถิติ คือ การไหลแบบธรรมดาให้ค่า RMSE ต่ำกว่า และ MBE ต่ำกว่า การไหลแบบสลับทิศทาง



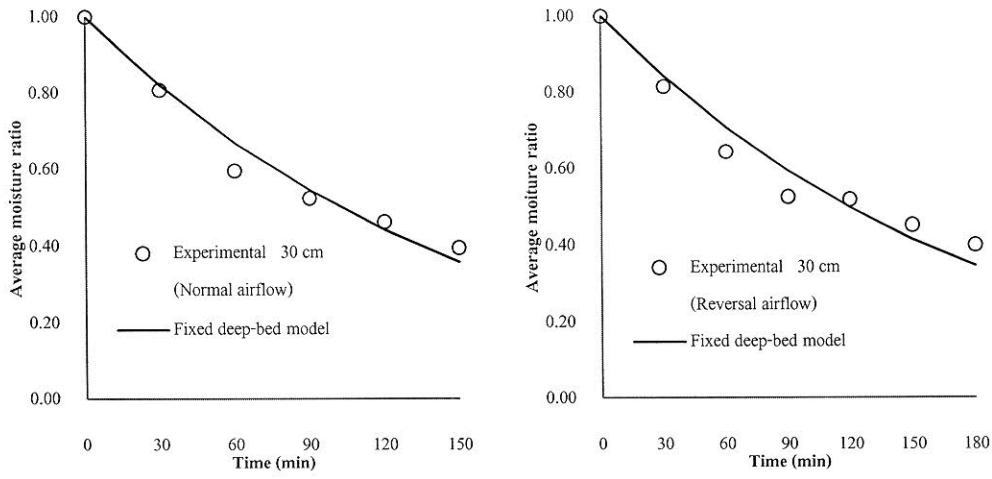
(1) No blanching pre-treatment



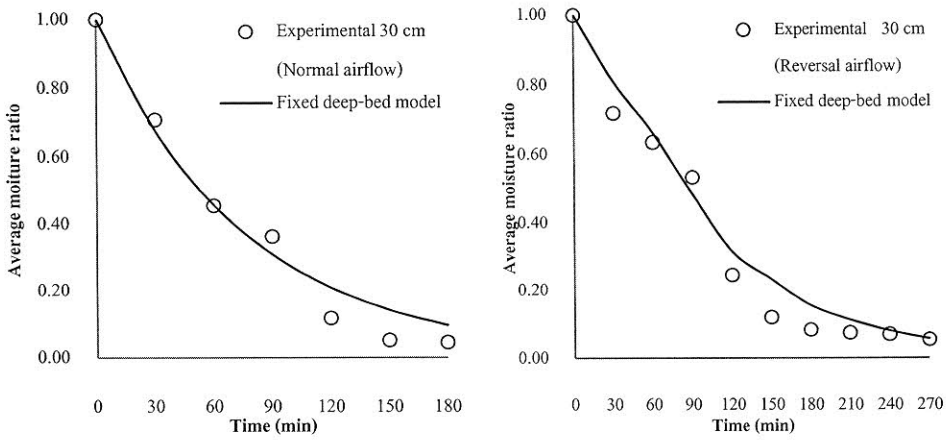
(2) Blanching pre-treatment

(ก) การไหลแบบธรรมดา (ข) การไหลแบบสลับทิศทาง

ภาพ 18 การลดลงของความชื้นในการอบแห้งพริกไทยดำ ชั้นความหนา 20 เซนติเมตร ที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลอง โดยเปรียบเทียบตามรูปแบบการไหลของอากาศแบบธรรมดาและแบบสลับทิศทางลมร้อน



(1) No blanching pre-treatment



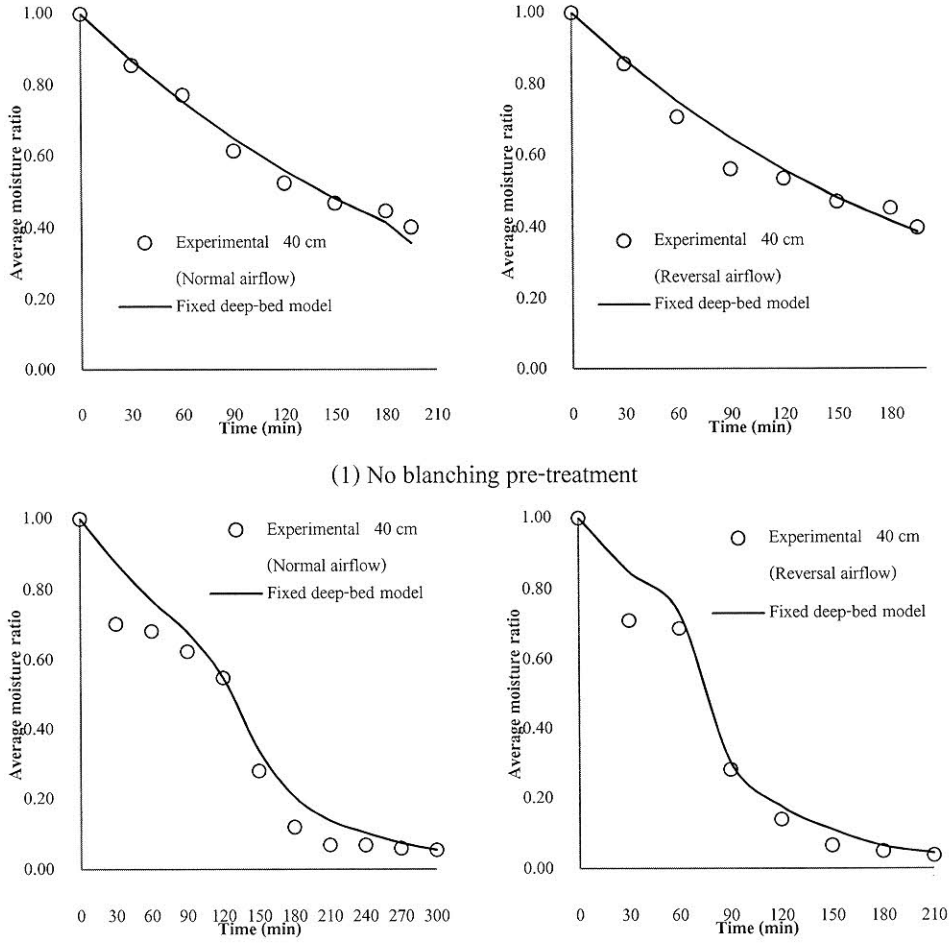
(2) Blanching pre-treatment

(ก) การไหลแบบธรรมดา (ข) การไหลแบบสลับทิศทาง

ภาพ 19 การลดลงของความชื้นในการอบแห้งพริกไทยดำ ชั้นความหนา 30 เซนติเมตร ที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลอง โดยเปรียบเทียบตามรูปแบบการไหลของอากาศแบบธรรมดาและแบบสลับทิศทางลมร้อน

จากภาพ 19 เมื่อทำการเปรียบเทียบการลดลงของความชื้นในการอบแห้งพริกไทยดำ พบว่าอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลองและอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทำนายให้ผลใกล้เคียงกัน เมื่อทำการวิเคราะห์ความแม่นยำพบว่า แบบจำลองสามารถทำนายพฤติกรรมการอบแห้งของรูปแบบหารไหลแบบสลับทิศทางลมร้อนได้ดีกว่าการไหลแบบธรรมดา ซึ่งการไหลแบบสลับทิศทางลมร้อนให้ค่า RMSE และ MBE ต่ำกว่า และเมื่อพิจารณาความหนาของชั้นพริกไทย 40 เซนติเมตร พบว่า แบบจำลองสามารถทำนายอัตราส่วนความชื้นได้ใกล้เคียงกับข้อมูล

การทดลอง โดยเมื่อเปรียบเทียบจากรูปแบบการไหลของอากาศรูปแบบการไหลแบบสลับทิศทางลมให้ค่า RMSE และ MBE ต่ำกว่าการไหลแบบธรรมดา ดังภาพ 20

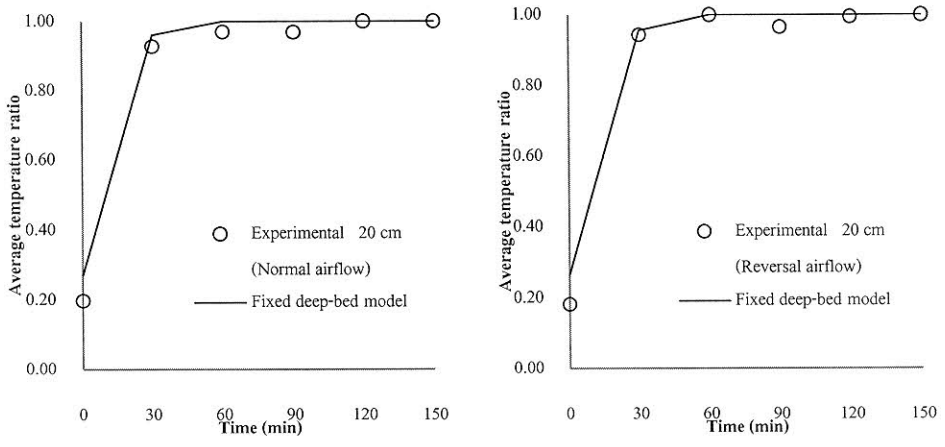


(ก) การไหลแบบธรรมดา (ข) การไหลแบบสลับทิศทาง

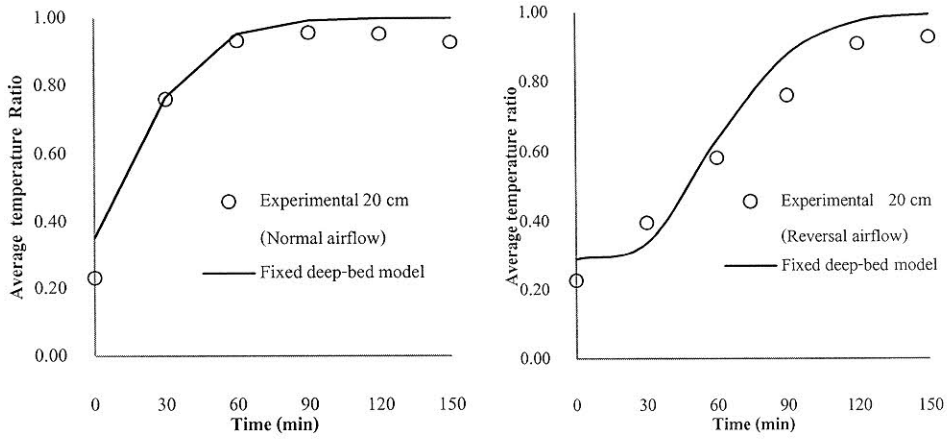
ภาพ 20 การลดลงของความชื้นในการอบแห้งพริกไทยดำ ชั้นความหนา 40 เซนติเมตร ที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลอง โดยเปรียบเทียบตามรูปแบบการไหลของอากาศแบบธรรมดาและแบบสลับทิศทางลมร้อน

5. ผลการเปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยเพื่อหาชั้นความหนาที่เหมาะสม

ผลจากการทำนายอัตราส่วนความชื้นจากแบบจำลองชั้นหนาอยู่กับที่ (fixed deep-bed model) ของการอบแห้งด้วยชั้นความหนาของพริกไทยดำเท่ากับ 20 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพ 21



(1) No blanching pre-treatment

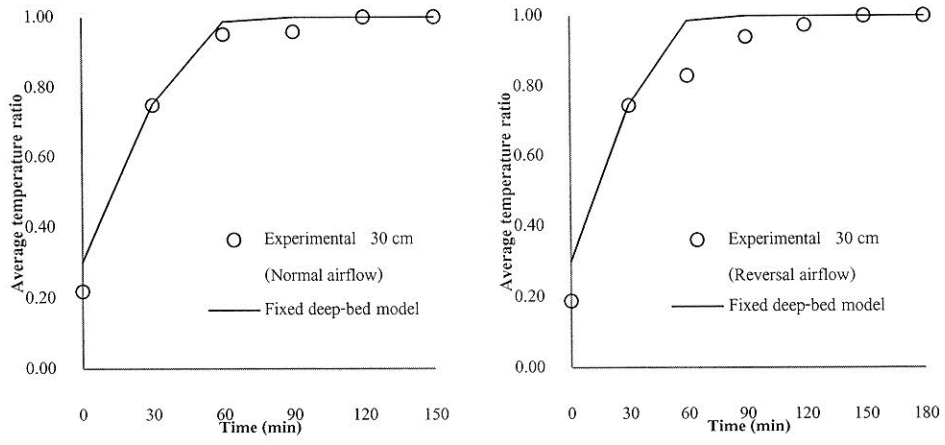


(2) Blanching pre-treatment

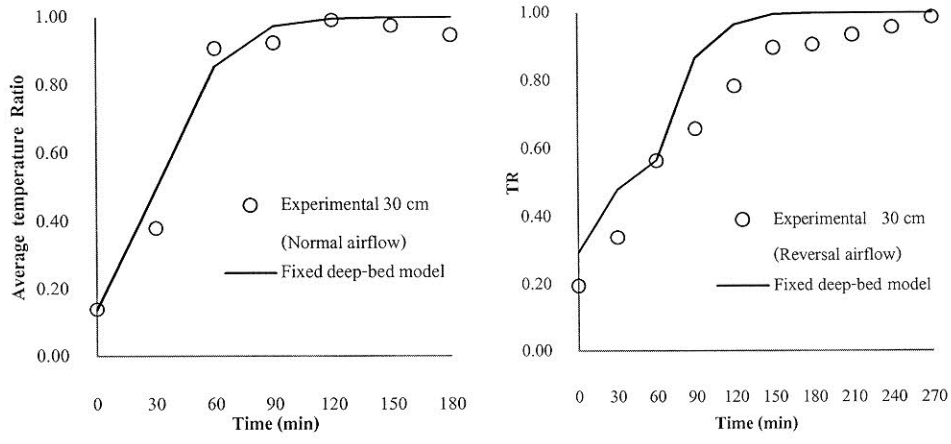
(ก) การไหลแบบธรรมดา (ข) การไหลแบบสลับทิศทาง

ภาพ 21 การลดลงของอุณหภูมิในการอบแห้งพริกไทยดำ ชั้นความหนา 20 เซนติเมตร ที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลอง โดยเปรียบเทียบตามรูปแบบการไหลของอากาศแบบธรรมดาและแบบสลับทิศทางลมร้อน

จากภาพ 21 แสดงการเปรียบเทียบอัตราส่วนอุณหภูมิในการอบแห้งพริกไทยดำที่ชั้นความหนา 20 เซนติเมตร พบว่าผลของอัตราส่วนอุณหภูมิที่ได้จากการทำนายโดยแบบจำลองให้ค่าใกล้เคียงกับผลจากข้อมูลการทดลอง โดยแบบจำลองสามารถทำนายผลได้ดีตลอดการอบแห้ง ซึ่งประเมินได้จากค่าความแม่นยำทางสถิติโดยรูปแบบการไหลแบบสลับทิศทางลมร้อนให้ค่า RMSE และ MBE ต่ำกว่ารูปแบบการไหลแบบธรรมดา ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ความแม่นยำทางสถิติ



(1) No blanching pre-treatment

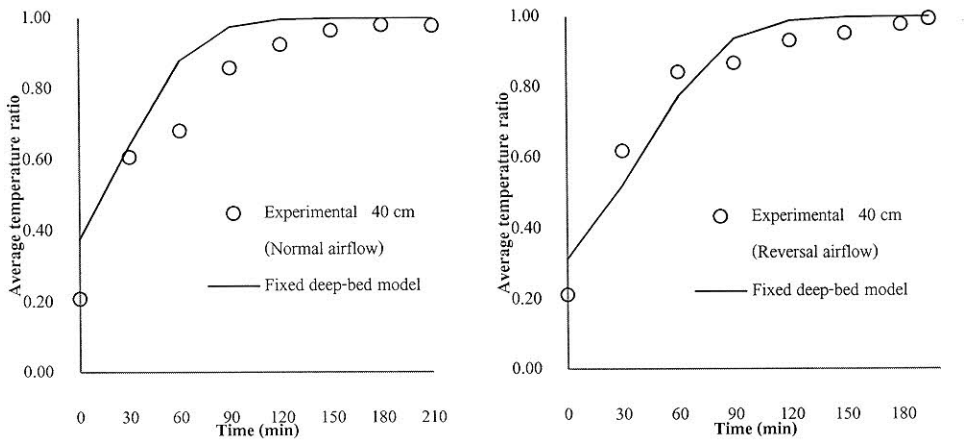


(2) Blanching pre-treatment

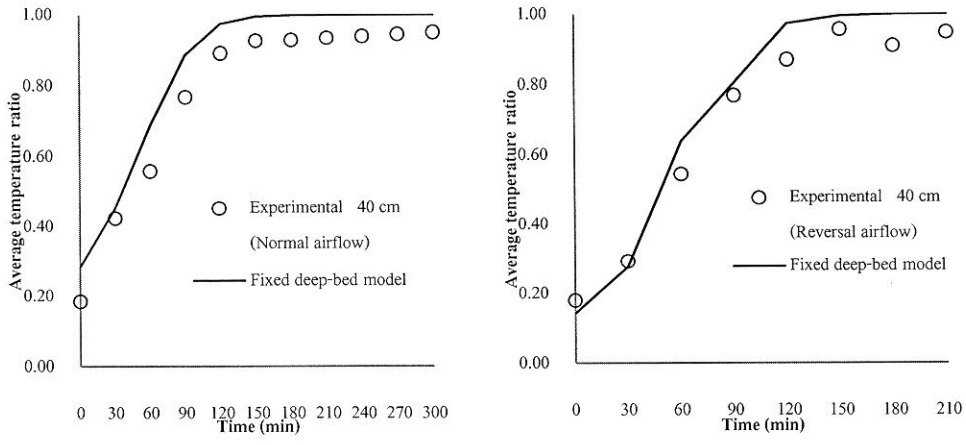
(ก) การไหลแบบธรรมดา (ข) การไหลแบบสลับทิศทาง

ภาพ 22 การลดลงของอุณหภูมิในการอบแห้งพริกไทยดำ ชั้นความหนา 30 เซนติเมตร ที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลอง โดยเปรียบเทียบตามรูปแบบการไหลของอากาศแบบธรรมดาและแบบสลับทิศทางลมร้อน

จากภาพ 22 แสดงให้เห็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอัตราส่วนอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองและข้อมูลการทดลอง โดยจากกราฟความสัมพันธ์แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถทำนายผลได้ใกล้เคียงกับข้อมูลการทดลอง ที่มีรูปแบบการไหลของอากาศแบบธรรมดามากกว่าการไหลแบบสลับทิศทางลมร้อน



(1) No blanching pre-treatment



(2) Blanching pre-treatment

(ก) การไหลแบบธรรมดา (ข) การไหลแบบสลับทิศทาง

ภาพ 23 การลดลงของอุณหภูมิในการอบแห้งพริกไทยดำ ชั้นความหนา 40 เซนติเมตร ที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลอง โดยเปรียบเทียบตามรูปแบบการไหลของอากาศแบบธรรมดาและแบบสลับทิศทางลมร้อน

จากภาพ 23 แสดงให้เห็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอัตราส่วนอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองและข้อมูลการทดลอง โดยจากกราฟความสัมพันธ์แสดงให้เห็นว่าแบบจำลอง

สามารถทำนายผลได้ใกล้เคียงกับข้อมูลการทดลอง ที่มีรูปแบบการไหลของอากาศแบบธรรมดามากกว่าการไหลแบบสลับทิศทางลมร้อน

จากการวิเคราะห์เพื่อหาความหนาที่เหมาะสมที่แบบจำลองสามารถทำนายผลได้ดีในกรณีการไหลแบบสลับทิศทางลมร้อน โดยแบ่งชั้นความหนาที่เหมาะสมตามกรณีการเตรียมตัวอย่าง ในกรณีการอบแห้งพริกไทยที่ไม่ผ่านการลวกพบว่าแบบจำลองสามารถอธิบายพฤติกรรมการอบแห้งได้ดีทุกชั้นความหนา ตั้งแต่ 20 ถึง 40 เซนติเมตร และในกรณีการอบแห้งพริกไทยที่ผ่านการลวกพบว่าแบบจำลองสามารถทำนายพฤติกรรมได้ดีที่ความหนาต่ำ นั่นคือ 20 เซนติเมตร ทั้งนี้เนื่องจากความหนาชั้นวัสดุมีผลต่ออัตราการอบแห้ง และในหลายงานวิจัยได้กล่าวถึงการอบแห้งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งแบบชั้นหนาอยู่กับที่เหมาะสมกับการอบแห้งประเภทเมล็ดพันธุ์ที่มีความชื้นต่ำ หรือวัสดุที่มีความพรุน และหลายงานวิจัยได้กล่าวถึงการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อนเหมาะสมกับวัสดุที่มีความพรุน เช่น Janjai *et al.* (2011) ได้ใช้การอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อนและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งลำไย และ Ruiz Lopez *et al.* (2011) ได้ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อนของแครอท โดยศึกษาผลของความหนาของชิ้นแครอทต่อการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อน

6. การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและมวลไร้มิติ

จากการคำนวณประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและมวลสาร โดยใช้สมการตัวแปรไร้มิติจะได้ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและมวลสารซึ่งเปลี่ยนแปลงตามชั้นความหนาและเวลา จากนั้นทำการหาค่าเฉลี่ย (mean) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนในแต่ละสภาวะการทดลอง ซึ่งได้ผลการคำนวณเปรียบเทียบประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยดังแสดงในตาราง 11 และ 12 โดยตาราง 11 นำเสนอประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและมวลเฉลี่ย (mean mass transfer efficiency) กรณีการอบแห้งที่พริกไทยดำที่ไม่ผ่านการลวก และตาราง 12 นำเสนอประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและมวลเฉลี่ย (mean mass transfer efficiency) กรณีการอบแห้งที่พริกไทยดำที่ผ่านการลวก

ตาราง 11 ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและมวลเฉลี่ย กรณีการอบแห้งที่พริกไทยดำที่ไม่ผ่านการลวก

Drying condition		Mean mass transfer efficiency	Mean heat transfer efficiency
Bed thickness (cm)	Type of Airflow		
20	Normal airflow	0.400	0.156
	Reversal airflow	0.400	0.152
30	Normal airflow	0.410	0.220
	Reversal airflow	0.380	0.190
40	Normal airflow	0.360	0.224
	Reversal airflow	0.380	0.272

จากตาราง 11 แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลเฉลี่ยในแต่ละสภาวะการทดลอง เมื่อพิจารณาที่ชั้นความหนา 20 เซนติเมตร พบว่า ประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลมีค่าเท่ากัน อาจเนื่องมาจากอากาศร้อนสามารถถ่ายเทความร้อนสู่วัสดุได้อย่างทั่วถึงและรวดเร็ว ซึ่งสอดคล้องกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้งที่ทั้งสองรูปแบบการไหลใช้เวลาในการอบแห้งเท่ากัน คือ 150 นาที ซึ่งเมื่อวิเคราะห์ข้อมูลโดยรวมแล้ว สามารถกล่าวได้ว่าความหนาและรูปแบบการไหลของอากาศมีผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทมวล และผลการคำนวณประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยพบว่า ที่ทุกระดับชั้นความหนา รูปแบบการไหลแบบธรรมดาให้ผลประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยมากกว่าแบบสลับทิศทางลมร้อน ซึ่งค่าที่คำนวณได้จากสองรูปแบบไม่แตกต่างกันมาก แต่ความแตกต่างอาจเกิดจากการการสลับทิศทางลมร้อนเกิดการเปลี่ยนทิศทางของลมร้อนในช่วงเวลาที่กำหนด โดยเมื่อรูปแบบการไหลของอากาศเป็นแบบธรรมดา อากาศร้อนจะเข้าสู่ห้องอบแห้งโดยความร้อนจะถูกใช้ในการลดความชื้นของระดับย่อยที่ 1 ก่อน แต่เมื่อทำการสลับทิศทางลมร้อนอากาศร้อนจะเข้าสู่ห้องอบแห้งโดยความร้อนจะถูกใช้ในการลดความชื้นของระดับย่อยที่ 5 ดังนั้นจึงเกิดการถ่ายเทความร้อนไม่ต่อเนื่องไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง ซึ่งอาจมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนที่ไม่ต่อเนื่องส่งผลให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของรูปแบบการไหลแบบสลับทิศทางลมร้อนมีค่าน้อยกว่ารูปแบบการไหลแบบธรรมดา

ตาราง 12 ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและมวลเฉลี่ย กรณีการอบแห้งที่พริกไทยดำที่ผ่านการลวก

Drying condition		Mean mass transfer efficiency	Mean heat transfer efficiency
Bed thickness (cm)	Type of Airflow		
20	Normal airflow	0.610	0.330
	Reversal airflow	0.580	0.370
30	Normal airflow	0.580	0.290
	Reversal airflow	0.670	0.430
40	Normal airflow	0.620	0.230
	Reversal airflow	0.640	0.460

แต่เมื่อพิจารณาผลการคำนวณในกรณีพริกไทยดำผ่านการลวกพบว่า ประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลและประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน ของรูปแบบการไหลแบบสลับทิศทางลมร้อนที่ทุกระดับความหนา มีค่ามากกว่ารูปแบบการไหลแบบธรรมดา ซึ่งผลที่ได้อาจเกิดจากการถ่ายเทความร้อนในชั้นวัสดุเป็นไปอย่างช้า ๆ เนื่องจากพริกไทยที่ผ่านการลวกมีความชื้นสูงและความหนาแน่นสูงขึ้น อีกทั้งความเร็วลมที่ใช้อาจมีไม่มากพอสำหรับพาอากาศร้อนทะลุทะลวงสู่ชั้นวัสดุ การลดความชื้นจึงเป็นไปอย่างช้า ๆ ซึ่งเมื่อเทียบกับรูปแบบการไหลแบบสลับทิศทางลมร้อน การสลับทิศทางทำให้อากาศร้อนไหลเข้าสองทิศทางซึ่งช่วยเกิดการถ่ายเทความร้อนทั้งสองด้าน ทำให้การลดความชื้นทำได้ดี ส่งผลให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนดีด้วย จากการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและมวลสาร สามารถนำผลการวิเคราะห์ยืนยันผลของสมมติฐานที่ว่า การอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อนดีกว่าการอบแห้งแบบธรรมดา

จากนั้นนำค่าเฉลี่ยที่ได้ในแต่ละสภาวะการทดลองไปคำนวณค่าความแตกต่างระหว่างค่าที่คำนวณได้และค่าเฉลี่ย โดยผลของความแตกต่างที่ได้จะเป็นค่าความแตกต่างที่เปลี่ยนแปลงตามความหนาและเวลา จากค่าความแตกต่างที่ได้สามารถแสดงถึงแนวโน้มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและมวลสาร

จากการวิเคราะห์ที่กล่าวมาทั้งหมด ผลการวิเคราะห์เป็นไปตามสมมติฐานที่ผู้วิจัยได้ตั้งไว้ นั่นคือ แบบจำลองชั้นหนาอยู่กับที่ที่พัฒนาโดย Barre *et al.* (1971) สามารถใช้ทำนายพฤติกรรมการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อนได้ การอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อนมีรูปแบบ

การกระจายอุณหภูมิและความชื้นดีกว่าการอบแห้งแบบธรรมดา ความหนาของชั้นวัสดุและความเร็วลมมีผลต่อการทำนายพฤติกรรมของแบบจำลองแบบชั้นหนาอยู่กับที่ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ สุนีย์รัตน์ (2544) ที่นำเสนอถึงปัจจัยที่เกี่ยวข้องและมีอิทธิพลต่อการอบแห้ง และพลรัชต์ (2551) ที่ทำการศึกษาจลน์ศาสตร์การอบแห้งเนื้อสับปะรดแว่น

7. การศึกษาสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล

เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลเฉลี่ยของการอบแห้งที่มีค่าสูงจะทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยลง ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลเฉลี่ยดังแสดงในตาราง 13

ตาราง 13 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลเฉลี่ยจากการคำนวณโดยใช้สมการเส้นตรง

Pre-treatment	Bed thickness (cm)	Type of airflow	$D_{eff}(m^2/s)$	R^2
No blanching	20	Normal airflow	4.456E-11	0.947
		Reversal airflow	4.106E-11	0.923
	30	Normal airflow	4.456E-11	0.972
		Reversal airflow	3.091E-11	0.953
	40	Normal airflow	3.225E-11	0.983
		Reversal airflow	3.100E-11	0.965
Blanching	20	Normal airflow	3.692E-10	0.918
		Reversal airflow	3.692E-10	0.960
	30	Normal airflow	2.603E-10	0.919
		Reversal airflow	1.670E-10	0.928
	40	Normal airflow	1.678E-10	0.926
		Reversal airflow	2.806E-10	0.965

จากตาราง 13 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลเฉลี่ยของทุกสภาวะการทดลอง โดยพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลเฉลี่ยมีแนวโน้มลดลงเมื่อความหนาของชั้นวัสดุเพิ่มมากขึ้น ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลเฉลี่ยแสดงถึง การเคลื่อนที่ของน้ำภายใน

วัสดุซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในรูปของการแพร่อันเนื่องมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น โดยมีปัจจัยของรูปทรงทางเรขาคณิต ลักษณะเฉพาะของวัสดุและพื้นผิวในการถ่ายเทพลังงานและมวลเข้ามาเกี่ยวข้อง (อัจฉรา และคณะ, 2555) อีกทั้งการอบแห้งพริกไทยดำที่ผ่านการลวก มีปริมาณความชื้นเริ่มต้นสูงจึงทำให้ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลเฉลี่ยต่างจากการอบแห้งพริกไทยดำที่ไม่ผ่านการลวก และรูปแบบการไหลแบบสลับทิศทางลมให้ค่าดีกว่ารูปแบบการไหลแบบธรรมดา โดยการอบแห้งพริกไทยดำที่ไม่ผ่านการลวกให้ค่าสูงสุดเท่ากับ 4.456×10^{-11} (m^2/s) (ที่ระดับความสูง 20 cm, การไหลแบบธรรมดา) ค่าต่ำสุดเท่ากับ 3.091×10^{-11} (m^2/s) (ที่ระดับความสูง 30 cm, การไหลแบบสลับทิศทางลมร้อน) และการอบแห้งพริกไทยดำที่ผ่านการลวก ให้ค่าสูงสุดเท่ากับ 3.692×10^{-10} (m^2/s) (ที่ระดับความสูง 20 cm, การไหลแบบสลับทิศทางลมร้อน) ค่าต่ำสุดเท่ากับ 1.670×10^{-10} (m^2/s) (ที่ระดับความสูง 30 cm, การไหลแบบสลับทิศทางลมร้อน)

ก. ค่าพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นให้น้ำเคลื่อนที่ออกจากวัสดุ (activation energy)

เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ln (D_{eff}) กับ $\frac{1}{T}$ จะสามารถคำนวณค่าพลังงานในการกระตุ้น (E_a) และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คงที่ (D_0) ในการอบแห้งพริกไทยดำด้วยลมร้อน ซึ่งตาราง 14 แสดงผลจากการคำนวณจากทุกสภาวะการทดลอง จากตารางเมื่อเปรียบเทียบค่าพลังงานกระตุ้นในการอบแห้งพริกไทยดำ พบว่า รูปแบบการไหลของอากาศ ระดับความหนาชั้นวัสดุและการเตรียมตัวอย่างมีผลต่อค่าพลังงานกระตุ้น โดยเมื่อพิจารณารูปแบบการไหลของอากาศ ค่าพลังงานกระตุ้นของรูปแบบการไหลแบบสลับทิศทางลมร้อนมีค่าต่ำกว่ารูปแบบการไหลแบบธรรมดา เมื่อพิจารณาความหนาชั้นวัสดุ ค่าพลังงานกระตุ้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อชั้นความหนาเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาการเตรียมตัวอย่าง ค่าพลังงานกระตุ้นกรณีพริกไทยดำที่ผ่านการเตรียมมีค่าสูงกว่ากรณีพริกไทยดำที่ไม่ผ่านการลวก โดยค่าพลังงานกระตุ้นกรณีพริกไทยดำที่ไม่ผ่านการลวก (100 °C) มีค่าอยู่ในช่วง 5,641.29-7,710.320 J/mol และค่าพลังงานกระตุ้นกรณีพริกไทยดำที่ผ่านการลวก (115 °C) มีค่าอยู่ในช่วง 11,258.424-17,627.342 J/mol

ตาราง 14 ค่าพลังงานกระตุ้นและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คงที่ของการอบแห้งพริกไทยดำ

Pre-treatment	Bed thickness (cm)	Type of airflow	Ea (J/mol)	Do (m^2/s)
No blanching	20	Normal airflow	5,862.78	5.918E-12
		Reversal airflow	5,641.29	4.106E-12
	30	Normal airflow	6,985.26	3.959E-12
		Reversal airflow	6,460.39	3.455E-12
	40	Normal airflow	7,710.32	2.323E-12
		Reversal airflow	7,483.10	2.420E-12
Blanching	20	Normal airflow	11,745.19	6.586E-12
		Reversal airflow	11,285.42	7.621E-12
	30	Normal airflow	17,627.34	7.025E-13
		Reversal airflow	14,811.39	9.249E-13
	40	Normal airflow	13,544.34	1.721E-12
		Reversal airflow	12,599.87	3.167E-12

ข. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล

จากผลการทดลองอบแห้งพริกไทยดำ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลเฉลี่ยซึ่งหาได้จากสมการอารีเนียส พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลยังประกอบไปด้วยอุณหภูมิการอบแห้ง ระดับชั้นความหนา และ ความชื้นของผลิตภัณฑ์ จึงหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลเฉลี่ยซึ่งเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิการอบแห้ง ระดับชั้นความหนา และ ความชื้นของผลิตภัณฑ์ โดยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุ (linear regression analysis) ซึ่งการวิเคราะห์ผลทางสถิตินี้จะใช้โปรแกรม SPSS V.17.0

ได้สมการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลเฉลี่ย ได้ผลดังสมการ 46 ซึ่งได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.849

$$D_{eff} = -1.0\times10^{-9} + (1.14\times10^{-11})T_{in} + (-3.8\times10^{-12})X + \left(-1.99\times10^{-10}\right)M_p \quad (46)$$

จากการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้ง พบว่าแบบจำลองที่ถูกพัฒนาโดย Barre *et al.* (1971) สามารถอธิบายพฤติกรรมการอบแห้งพริกไทยดำ ได้ทั้งสองรูปแบบ นั่นคือ การอบแห้งแบบธรรมดา และการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อน จากการศึกษาดังกล่าวยังได้สมการความสัมพันธ์ที่ใช้สำหรับทำนายสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลซึ่งสามารถนำไปประกอบการจำลองการอบแห้งได้ อีกทั้งยังได้พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับการจำลองการอบแห้ง ซึ่งสามารถสรุปพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องดังตาราง 15

ตาราง 15 พารามิเตอร์สำหรับการจำลองการอบแห้งของพริกไทยดำ

Parameter		Reference
Moisture diffusion (m^2/s)	$D_{eff} = -1.0\times10^{-9} + (1.14\times10^{-11})T_{in} + (-3.8\times10^{-12})X + (-1.99\times10^{-10})M_p$	พิรุฬห์รัชย์ ไทยสมัคร (2557)
Solid mass concentration (kg/m^3)	$\rho_s = 430.66 + 0.882M_p$	ณรงค์ อึ้งกิมบ้วน (2554)
Thermal conductivity $(J/m\,s\quad K)$	$k_{eff} = 1.418\times10^{-1} + 4.93\times10^{-1}M_p$	Murlidhar Meghwal and T K Goswami (2011)
Equilibrium moisture content for black pepper.	$M_{eq} = (0.150 - 0.004(T) + 0.0000353T^2)\left(\frac{RH}{1-RH}\right)^{0.647} + 0.020$	ประกายดาว และวริศรา (2556)
Sorption heat (J/kg) **for pure water**	$\lambda = 2.8894\times10^6\left(1-\frac{\theta_i}{647.13}\right)^{0.3199-0.212\left(\frac{\theta_i}{647.13}\right)+0.25795\left(\frac{\theta_i}{647.13}\right)^2}$	Perry *et al.* (1997)
Sorption heat (273.15 K) (J/kg) **for pure water**	$\lambda^{\circ} = 2.5014\times10^6$	Geankoplis C. J. (1993)
Bed porosity	$\varepsilon = 31.94 + 0.0234M_p$	ณรงค์ อึ้งกิมบ้วน (2554)
Specific heat of black pepper $(J/kg.K)$	$C_p = 2003.4 + 7.5844M_p$	ณรงค์ อึ้งกิมบ้วน (2554)

บทที่ 5
สรุปและข้อเสนอแนะ

1. สรุปผลการวิเคราะห์

ก. การอบแห้งด้วยรูปแบบการไหลของอากาศแบบสลับทิศทางลมร้อนมีอัตราการลดความชื้น, อัตราส่วนอุณหภูมิ, การกระจายอุณหภูมิ และเวลาในการอบแห้งดีกว่ารูปการไหลของอากาศแบบธรรมดา เมื่อพิจารณาจากความหนาของชั้นเบดที่หนาที่สุด

ข. จากการเปรียบเทียบผลการทดลองและการทำนายของแบบจำลอง ซึ่งเปรียบเทียบในระดับชั้นย่อยของเบดพริกไทย พบว่าแบบจำลองชั้นหนาอยู่กับที่ (Fixed deep-bed model) สามารถอธิบายพฤติกรรมการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อนได้

ค. การเตรียมวัสดุมีผลต่อการอบแห้ง และมีผลต่อการทำนายของแบบจำลอง เนื่องจากการเตรียมวัสดุด้วยการลวกเป็นการเพิ่มความชื้นและความหนาแน่นวัสดุ ทำให้การลดความชื้นเป็นไปอย่างช้า ๆ

ง. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบชั้นหนาอยู่กับที่ สามารถทำนาย อัตราส่วนความชื้นไร้มิติ และอัตราส่วนอุณหภูมิไร้มิติ ได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองในกรณีการอบแห้งพริกไทยดำที่ไม่ผ่านการลวก

จ. แบบจำลองสามารถวิเคราะห์ชั้นความหนาที่เหมาะสมในการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อน โดยวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการทดลองกับค่าที่ทำนายได้จากแบบจำลอง ชั้นความหนาที่เหมาะสมในกรณีการอบแห้งพริกไทยดำที่ไม่ผ่านการลวก อยู่ในช่วง 20-40 เซนติเมตร และในกรณีการอบแห้งพริกไทยดำที่ผ่านการลวก คือ 20 เซนติเมตร ซึ่งสามารถนำไปปรับใช้ในการกำหนดสภาวะการอบแห้งในระดับอุตสาหกรรม

ฉ. การเตรียมตัวอย่างก่อนการอบแห้งมีผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลสารและความร้อนเฉลี่ย โดยกรณีการอบแห้งพริกไทยดำที่ไม่ผ่านการลวก มีค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลสารและความร้อนเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.360-0.410 และ 0.152-0.272 ตามลำดับ และกรณีการอบแห้งพริกไทยดำที่ผ่านการลวก มีค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลสารและความร้อนเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.580-0.670 และ 0.230-0.460 ตามลำดับ

ช. สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลเฉลี่ยของการอบแห้งพริกไทยดำที่ไม่ผ่านการลวก และการอบแห้งพริกไทยดำที่ผ่านการลวก อยู่ในช่วง 3.091×10^{-11} - 3.692×10^{-10} m^2/s

ซ. รูปแบบการไหลของอากาศ ระดับความหนาชั้นวัสดุ และการเตรียมตัวอย่างมีผลต่อพลังงานกระตุ้น โดยค่าพลังงานกระตุ้นโดยกรณีการอบแห้งพริกไทยดำที่ไม่ผ่านการลวก มี

ค่าอยู่ในช่วง 5,641.29 - 7,710.320 J/mol และค่าพลังงานกระตุ้นกรณีการอบแห้งพริกไทยดำที่ผ่านการลวก มีค่าอยู่ในช่วง 11,258.424 - 17,627.342 J/mol

ฌ. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลเฉลี่ยซึ่งเป็นฟังก์ชันของ อุณหภูมิการอบแห้ง ระดับชั้นความหนา และ ความชื้นของผลิตภัณฑ์ ได้สมการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลเฉลี่ย ซึ่งได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.849 ดังนี้

$$D_{eff} = -1.0\times10^{-9} + (1.14\times10^{-11})T_{in} + (-3.8\times10^{-12})X + \left(-1.99\times10^{-10}\right)M_p$$

2. ข้อเสนอแนะ

ก. ควรมีการศึกษาวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และหาสภาวะที่เหมาะสม เช่น ระยะเวลาในการสลับทิศทางลมร้อน เป็นต้น

ข. ควรมีการศึกษาแบบจำลองการอบแห้งแบบชั้นหนาอยู่กับที่กับการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อนที่มีการนำอากาศกลับมาใช้ในระบบ

บรรณานุกรม

กัญญารัตน์ จันทวงศ์ และ เบญจมาศ ยศเมา. 2552. **สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลแบบรวมการหดตัวเชิงปริมาตรในการอบแห้งเนื้อลำไยด้วยรังสีอินฟราเรด.** เชียงใหม่: โครงงานวิศวกรรมปริญญาตรี. มหาวิทยาลัยแม่โจ้. 122 น.

กอบพัชรกุล เป็นบุญ รัตนา อัตตปัญโญ และ สายลม สัมพันธ์เวชโสภา. 2550. การทำแห้งลำไยแผ่นโดยใช้เตาอบพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับเตาอบลมร้อน. **ว.วิทยาศาสตร์ กษ.** 35(5): 309-312.

นิธิยา รัตนาปนนท์. 2544. **หลักการแปรรูปอาหารเบื้องต้น.** กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์. 148 น.

บุญคง คำครุฑลาวงษ์. 2552. **แบบจำลองการอบแห้งชั้นบางเมล็ดกาแฟ.** ชลบุรี: วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยบูรพา. 131 น.

ประกายดาว คำมา และ วริศรา นันไชย. 2555. **ไอโซเทอมความชื้นสมดุลของเมล็ดพริกไทยดำ.** เชียงใหม่: โครงงานวิศวกรรมปริญญาตรี. มหาวิทยาลัยแม่โจ้. 90 น.

ประเสริฐ อินประเสริฐ. 2552. **การคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์รีซิสแทนซ์สำหรับตัวแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อซ้อนชนิดไหลขนานในทิศทางเดียวกัน**. ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 4. เชียงใหม่.

ณรงค์ อึ้งกิมบ้วน, อรอุมา หนูทอง และ ภาณุพงศ์ บุญเพียร. 2554. สมบัติทางฟิสิกส์เชิงความร้อนของเม็ดพริกไทย. **วิทยาศาสตร์เกษตร 42: 1(พิเศษ)**: 326-329.

ณัฐวุฒิ ดุษฎี. 2546. **เอกสารประกอบการสอน วิชา พร. 409 การอบแห้งผลิตภัณฑ์เกษตรด้วยพลังงานทดแทน.** เชียงใหม่: คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้.

พลรัชต์ บุญมี. 2551. **จลนพลศาสตร์การอบแห้งเนื้อสับปะรดแว่น.** เชียงใหม่: วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 146 น.

วิไล รังสาดทอง. 2543. **เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร.** กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 401 น.

วัชรินทร์ ดงบัง วรเชษฐ์ ภิรมย์ภักดิ์ และ กิตติชัย ไตรรัตนศิริชัย. 2552. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งฝักถั่วลิสงด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด. ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23. เชียงใหม่.

สายสุนีย์ สุทธปา และ อนุวัฒน์นันทะยานา. 2550. **จลนศาสตร์การอบแห้งลำไยแผ่นด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรด**. เชียงใหม่: โครงงานวิศวกรรมปริญญาตรี. มหาวิทยาลัยแม่โจ้.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2555. **สถิติการส่งออกพริกไทยดำหรือขาว**. [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา : http://www.oae.go.th/oae_report/export_import/export_result.php (16 March 2013).

สุคนธ์ชื่น ศรีงาม และคณาจารย์ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร. 2546. **วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร**. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สุนีย์รัตน์ ตุ้ยดา. 2544. **การอบแห้งลำไยแบบแกะเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบสลับทิศทางลม**. เชียงใหม่: วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 96 น.

ศุภศักดิ์ ลิมปิติ. 2544. **การพัฒนาเครื่องอบแห้งลำไยทั้งเปลือกด้วยระบบสลับหมุนเวียนลมร้อน**. เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 39 น.

อรุณรัตน์ ฉวีราช, ธวัชชัย ธานี, รุ่งลาวัลย์ สุดมูล และ ปิยะ โมคมูล. 2552. **พืชสกุลพริกไทยในประเทศไทย.** ขอนแก่น: พิมพ์ครั้งที่ 2. ขอนแก่นการพิมพ์. 163 น.

อีลีย๊ะ สนิโส, ฟารามี สะอุดี และ รัชดาภรณ์ ฮานาฟี. 2555. สัมประสิทธิ์หารแพร่ความชื้น ความสิ้นเปลืองพลังงาน และอัตราการระเหยน้ำจำเพาะของการอบแห้งผลหมากด้วยพลังงานความร้อนร่วม. **ว.วิทยาศาสตร์บูรพา.** 17: 142-149.

Aregba A.W., P. Sabastian, J.P. Nadeau. 2006. Stationary deep-bed drying: A comparative study between a logarithmic model and a non-equilibrium model. **Journal of Food Engineering**. *77*: 27-40.

AOAC. 1995. **Official Method of Analysis**, 16th ed. Arlington, Verginia, USA: The Association of Official Analytical Chemists. Inc.

Crank, J. 1975. **The Mathematics of Diffusion**. London: Oxford University Press.

Dai-chyi Wang, Din-Sue Fon. Applications of MATLAB-based software to drying simulation. [Online] Available: http://www.ecaa.ntu.edu.tw/weifang/matlab%20tutor/drying/applications%20of%20matlab-based%20software%20to%20drying%20simulation.pdf (10 March 2013).

Barre, H. J., G.R. Baughaman, M.Y. Hamdy. 1971. Application of the logarithmic model to cross-flow deep-bed drying. **Transection of the ASAE**. 14: 1061-1064.

Herman, E., G. C. Rodrguez, , M. A. Garca. 2001. Mathematical modeling for fixed-bed drying considering heat and mass transfer and interfacial phenomena. **Drying Technology** 19(9): 2343–2362.

Janjai S. , N. Lamlert, B. Mahayothee, P. Sruamsiri, M. Precoppe, B. K. Bala and J. Muller. 2011. Experimental and simulation performances of a batch – type longan dryer with airflow reversal using biomass burner as a heat source. **Drying Technology.** 29: 1439-1451.

Keey R G. 1972. **Principle of Drying**. London: Oxford University Press.

Linh Hoang. 2008. Black Pepper. [Online] Available: http://mason.gmu.edu/~lhoang3/projects/plant/plant.html. (10 October 2013).

Hukill, W. V. 1954. Grain drying. In: J.A., Anderson, A.W. Alcock (Eds.), Storage of Cereal Grain and Their Products. American Associate Cereal Chemical. St. Paul, Minn.

Narong U., B. Panupong and H. Wanphen, 2011. Models of pepper drying using hot air oven. **Agricultural Sci**. 42: 533-536.

Nithi foods CO., LTD. 2012. **Dehydrated Black Pepper**. Sanpatong, Chiang Mai. Thailand.

Perry R. H., D. W. Green, J. O. Maloney. 1997. **Perry's Chemical Engineers Handbook**. 7th ed. New York: McGraw-Hill.

Ruiz-Lopez I. I., C. E. Martinez-Sanchez, R. Cobos-Vivaldo, E. Herman-Lara. 2008. Mathematical modeling and simulation of batch drying of foods in fixed-beds with airflow reversal. **Journal of Food Engineering.** 89: 310-318.

Ratti C. and A. S. Mujumdar. 1995. Simulation of packed bed drying of foodstuff with airflow reversal. **Journal of Food Engineering** 26: 259-271.

Sae-Khow A., S. Tirawanichakul, Y. Tirawanichakul. 2013. Isotherm adsorption behavior and dryimg kinetics of black pepper. **J. Advanced Material Research**. 622-623: 1580-1585.

Sogi D. S., U. S. Shivhare, S. K. Garg and A. S. Bawa. 2003. Water Sorption Isotherm and Drying Characteristics of Tomato Seeds. **Biosystems Engineering**. 84(3): 297-301.

Stoer, J., R. Bulirsch. 1993. **Introduction to Numerical Analysis**, 2nd ed. New York: Springer-Verlag.

Suahams ali. 2003. Pepper processing. Practical Action. [online] Available: http://practicalaction.org/pepper-processing (20 February 2012).

Tomislav Jurendie and Branko Tripalo. 2012. Mathematical modeling of conductive, convective and irradiative drying of cereal based baby foods. **Journal of Agriculture and Food Technology**. 2(8): 126-133.

USDA. Nutritional value per 100 g of black pepper. [online] Available: http://www.nutrition-and-you.com/black_pepper.html (20 February 2012).

Wipa Teppinta, Jatuphong Varith, Somkiat Jaturonglumlert, Phirunrat Thaisamak and Chanawat Nitatwichit. 2013. Operation cost reduction for industrial pepper powder drying with alternative hot-air during drying process. **Journal of Agricultural Research and Extension**. 30(3)(Suppl.): 80-87.

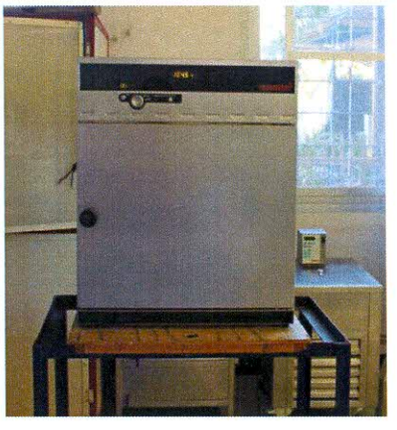
Zare, D., S. Minaei, M. Mohammadzadeh, M. Khoshtagaza. 2006. Computer simulation of rough rice drying in a batch dryer. **International Journal of Energy Conversion & Management.** 47(18-19): 3241-54.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

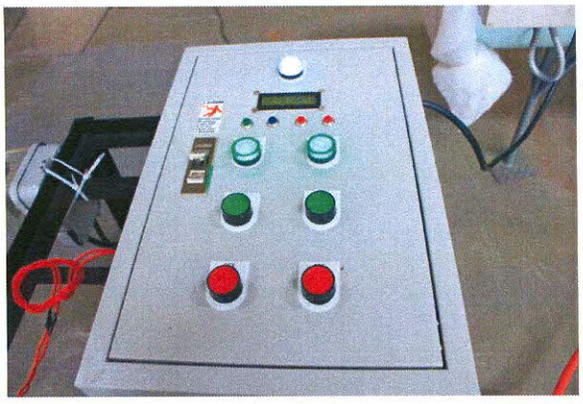
เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองและรูปผลการทดลอง

ภาพผนวก 1 เครื่องหาความชื้นของวัสดุด้วยหลอดอินฟาเรด



ภาพผนวก 2 ตู้อบลมร้อน ยี่ห้อ Memmert

ภาพผนวก 3 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบตัวเลข ยี่ห้อ Sartorius รุ่น CP 3202S

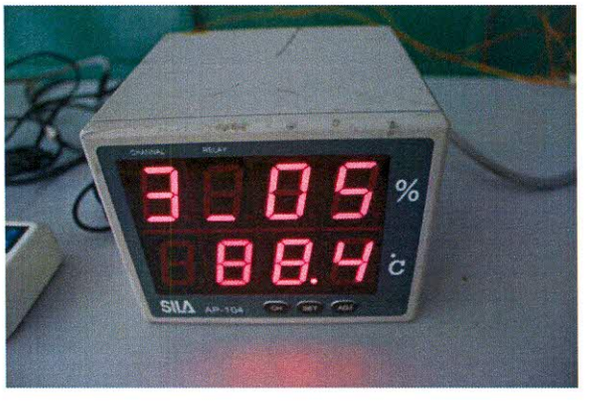


ภาพผนวก 4 ตู้ควบคุมปริมาณเชื้อเพลิงอิเล็กทรอนิกส์

ภาพผนวก 5 อุปกรณ์สำหรับพลิกกลับพริกไทยในการทดลอง ทำด้วยสแตนเลส

ภาพผนวก 6 ตู้อบสลับทิศทางลมร้อน ขนาด 1 ตัน

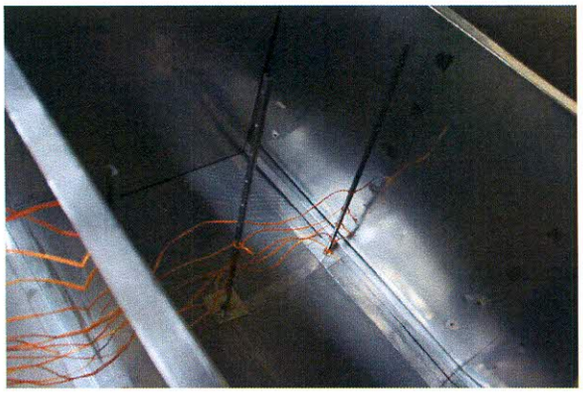
ภาพผนวก 7 ชุดอุปกรณ์เก็บข้อมูลอุณหภูมิ ยี่ห้อ Agilent technology รุ่น 34970A



ภาพผนวก 8 เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์ ยี่ห้อ Sila

ภาพผนวก 9 พริกไทยดำที่ใช้ในการอบแห้งกรณีพริกไทยดำที่ผ่านการลวก

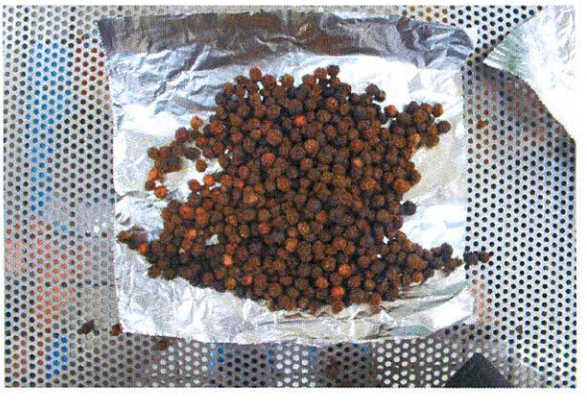
ภาพผนวก 10 พริกไทยที่ใช้ในการอบแห้งกรณีพริกไทยดำที่ไม่ผ่านการลวก



ภาพผนวก 11 ตำแหน่งการบันทึกอุณหภูมิในการอบแห้ง

ภาพผนวก 12 การบรรจุพริกไทยดำก่อนเริ่มการอบแห้ง

ภาพผนวก 13 บรรยากาศการทดลองภายในห้องอบแห้งของบริษัท นิธิฟูดส์ จำกัด



ภาพผนวก 14 พริกไทยหลังการอบแห้งกรณีพริกไทยดำที่ไม่ผ่านการลวก

ภาพผนวก 15 พริกไทยก่อนและหลังการอบแห้งกรณีพริกไทยดำที่ผ่านการลวก

ภาคผนวก ข

ข้อมูลการทดลองการอบแห้ง

ตารางผนวก 1 ข้อมูลการทดลองของการอบแห้งกรณีพริกไทยดำที่ไม่ผ่านการลวกชั้นความหนาพริกไทยดำ 20 เซนติเมตร รูปแบบการไหลอากาศแบบธรรมดา

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)									ค่าเฉลี่ยความชื้นความชื้น (d.b.)					ความชื้นสัมพัทธ์ (%)		
	ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิ					T_{in}	T_{out}	T_{amb}	T_{wb}								
	x=1	x=2	x=3	x=4	x=5					x=1	x=2	x=3	x=4	x=5	RH_{in}	RH_{out}	RH_{amb}
0	50.0	35.0	34.0	34.0	34.0	100.0	29.3	30.4	22.0	0.170	0.170	0.170	0.170	0.170	60	55	57
30	99.7	99.0	96.1	93.1	84.9	100.0	85.3	33.2	23.7	0.122	0.126	0.125	0.137	0.113	1	4	48
60	99.0	98.0	97.6	97.0	97.0	100.0	95.6	34.4	24.2	0.098	0.094	0.096	0.098	0.099	1	2	45
90	100.0	100.0	98.1	100.0	90.3	100.0	103.5	36.6	25.5	0.081	0.080	0.079	0.083	0.081	0	1	40
120	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	102.1	37.8	24.6	0.076	0.073	0.075	0.075	0.077	0	0	35
150	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	102.9	37.9	24.5	0.067	0.064	0.068	0.065	0.067	0	0	35

ตารางผนวก 2 ข้อมูลการทดลองของการอบแห้งกรณีพริกไทยดำที่ไม่ผ่านการลวก ชั้นความหนาพริกไทยดำ 30 เซนติเมตร รูปแบบการไหลอากาศแบบธรรมดา

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)									ค่าเฉลี่ยความชื้นความชื้น (d.b.)					ความชื้นสัมพัทธ์ (%)		
	ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิ					T_{in}	T_{out}	T_{amb}	T_{wb}								
	x=1	x=2	x=3	x=4	x=5					x=1	x=2	x=3	x=4	x=5	RH_{in}	RH_{out}	RH_{amb}
0	56.0	46.0	33.0	33.0	33.0	100.0	28.8	30.1	23.5	0.170	0.170	0.170	0.170	0.170	56	57	58
30	100.0	89.3	80.3	70.1	48.9	100.0	51.4	32.3	23.5	0.133	0.136	0.137	0.140	0.141	1	34	49
60	100.0	90.2	84.1	76.9	53.5	100.0	90.4	35.8	24.2	0.095	0.099	0.103	0.103	0.107	0	3	39
90	100.0	93.4	87.6	86.1	67.4	100.0	99.8	36.6	24.3	0.083	0.089	0.090	0.092	0.091	0	1	37
120	100.0	95.3	90.4	87.5	78.4	100.0	102.0	37.1	23.9	0.077	0.078	0.077	0.080	0.081	0	0	34
150	100.0	97.7	94.9	90.2	88.3	100.0	102.0	37.5	24.2	0.068	0.067	0.065	0.069	0.068	0	0	34

ตารางผนวก 3 ข้อมูลการทดลองของการอบแห้งกรณีพริกไทยดำที่ไม่ผ่านการลวก ชั้นความหนาพริกไทยดำ 40 เซนติเมตร รูปแบบการไหลอากาศแบบธรรมดา

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)									ค่าเฉลี่ยความชื้นความชื้น (d.b.)					ความชื้นสัมพัทธ์ (%)		
	ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิ					T_{in}	T_{out}	T_{amb}	T_{wb}								
	x=1	x=2	x=3	x=4	x=5					x=1	x=2	x=3	x=4	x=5	RH_{in}	RH_{out}	RH_{amb}
0	56.0	43.0	34.0	34.0	34.0	100.0	30.4	30.5	24.35	0.170	0.170	0.170	0.170	0.170	78	65	61
30	100.0	78.0	58.9	46.2	40.0	100.0	42.4	32.4	24.88	0.137	0.138	0.152	0.151	0.149	1	66	55
60	100.0	89.0	65.9	63.4	62.5	100.0	63.8	34.5	25.2	0.120	0.125	0.138	0.136	0.137	1	23	48
90	100.0	90.0	89.4	84.3	83.2	100.0	87.9	35.7	25.05	0.099	0.101	0.107	0.108	0.107	0	6	43
120	100.0	95.4	94.1	92.4	90.0	100.0	92.0	36.8	24.96	0.084	0.091	0.092	0.088	0.093	0	5	39
150	100.0	98.0	97.5	96.3	95.0	100.0	94.7	37.5	24.99	0.076	0.082	0.083	0.082	0.077	0	4	37
180	100.0	100.0	99.3	97.4	96.0	100.0	97.6	38.4	25.68	0.074	0.076	0.078	0.078	0.074	0	3	37
210	100.0	99.0	98.0	98.3	96.5	100.0	103.6	38.5	26.27	0.069	0.068	0.068	0.068	0.068	0	2	39

ตารางผนวก 4 ข้อมูลการทดลองของการอบแห้งกรณีพริกไทยดำที่ไม่ผ่านการลวก ชั้นความหนาพริกไทยดำ 20 เซนติเมตร รูปแบบการไหลอากาศแบบสลับทิศทางลมร้อน

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)									ค่าเฉลี่ยความชื้นความชื้น (d.b.)					ความชื้นสัมพัทธ์ (%)		
	ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิ					T_{in}	T_{out}	T_{amb}	T_{wb}								
	x=1	x=2	x=3	x=4	x=5					x=1	x=2	x=3	x=4	x=5	RH_{in}	RH_{out}	RH_{amb}
0	54.0	40.0	33.0	33.0	33.0	100.0	28.8	29.1	25.0	0.170	0.170	0.170	0.170	0.170	72	74	72
30	100.0	100.0	98.6	96.3	84.2	100.0	80.3	31.2	25.1	0.115	0.114	0.116	0.127	0.121	2	18	62
60	100.0	100.0	100.0	100.0	99.8	100.0	99.9	33.6	25.5	0.092	0.094	0.095	0.100	0.099	1	4	53
90	98.0	98.0	91.9	99.4	100.0	100.0	93.1	34.4	26.2	0.089	0.086	0.083	0.079	0.084	0	2	53
120	99.8	99.4	99.1	99.8	100.0	100.0	92.7	34.9	26.0	0.079	0.080	0.083	0.075	0.082	0	2	50
150	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	99.5	36.6	26.5	0.067	0.068	0.067	0.069	0.068	0	1	46

ตารางผนวก 5 ข้อมูลการทดลองของการอบแห้งกรณีพริกไทยดำที่ไม่ผ่านการลวก ชั้นความหนาพริกไทยดำ 30 เซนติเมตร รูปแบบการไหลอากาศแบบสลับทิศทางลมร้อน

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)									ค่าเฉลี่ยความชื้นความชื้น (d.b.)					ความชื้นสัมพัทธ์ (%)		
	ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิ					T_{in}	T_{out}	T_{amb}	T_{wb}								
	x=1	x=2	x=3	x=4	x=5					x=1	x=2	x=3	x=4	x=5	RH_{in}	RH_{out}	RH_{amb}
0	54.0	41.0	33.0	33.0	33.0	100.0	29.5	30.0	24.6	0.170	0.170	0.170	0.170	0.170	72	66	65
30	100.0	94.4	87.0	74.4	48.5	100.0	59.6	31.6	25.1	0.122	0.136	0.135	0.153	0.147	1	26	60
60	99.1	76.3	81.5	94.3	85.2	100.0	88.7	32.9	25.1	0.098	0.108	0.110	0.116	0.116	1	5	54
90	91.9	92.2	93.7	100.0	100.0	100.0	88.8	34.4	25.8	0.089	0.090	0.089	0.087	0.090	2	3	51
120	95.8	97.0	97.5	100.0	100.0	100.0	92.1	35.1	25.3	0.087	0.091	0.090	0.089	0.083	2	2	46
150	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	103.4	36.3	26.0	0.077	0.083	0.074	0.073	0.077	0	3	45
180	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	101.0	36.9	26.2	0.068	0.069	0.068	0.067	0.068	0	0	44

ตาราง ข. 6 ข้อมูลการทดลองของการอบแห้งกรณีพริกไทยดำที่ไม่ผ่านการลวก ชั้นความหนาพริกไทยดำ 40 เซนติเมตร รูปแบบการไหลอากาศแบบสลับทิศทางลมร้อน

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)									ค่าเฉลี่ยความชื้นความชื้น (d.b.)					ความชื้นสัมพัทธ์ (%)		
	ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิ					T_{in}	T_{out}	T_{amb}	T_{wb}								
	x=1	x=2	x=3	x=4	x=5					x=1	x=2	x=3	x=4	x=5	RH_{in}	RH_{out}	RH_{amb}
0	55.0	43.0	33.0	33.0	33.0	100.0	30.7	31.3	22.98	0.170	0.170	0.170	0.170	0.170	63	59	50
30	100.0	98.0	70.5	45.7	39.8	100.0	43.0	33.5	23.53	0.130	0.140	0.158	0.151	0.149	0	61	44
60	100.0	98.0	90.0	85.0	70.0	100.0	69.4	35.3	28.10	0.116	0.117	0.122	0.120	0.126	0	15	39
90	95.6	79.5	78.9	95.9	100.0	100.0	90.7	37.7	24.63	0.097	0.096	0.096	0.093	0.095	2	2	35
120	95.3	89.8	93.4	96.0	100.0	100.0	90.7	38.8	25.18	0.093	0.092	0.094	0.089	0.087	2	2	34
150	100.0	97.0	95.0	90.0	100.0	100.0	86.4	39.3	23.55	0.081	0.078	0.082	0.081	0.080	0	4	27
180	100.0	97.0	98.0	98.3	98.0	100.0	101.3	39.9	23.26	0.077	0.077	0.077	0.074	0.079	0	2	25
195	100.0	100.0	99.0	98.4	100.0	100.0	97.3	40.8	23.65	0.069	0.068	0.068	0.066	0.067	1	0	24

ตารางผนวก 7 ข้อมูลการทดลองของการอบแห้งกรณีพริกไทยดำที่ผ่านการลวก ชั้นความหนาพริกไทยดำ 20 เซนติเมตร รูปแบบการไหลอากาศแบบธรรมดา

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)									ค่าเฉลี่ยความชื้นความชื้น (d.b.)					ความชื้นสัมพัทธ์ (%)		
	ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิ					T_{in}	T_{out}	T_{amb}	T_{wb}								
	x=1	x=2	x=3	x=4	x=5					x=1	x=2	x=3	x=4	x=5	RH_{in}	RH_{out}	RH_{amb}
0	67.0	42.0	36.7	36.5	32.5	115.0	24.2	24.4	19.9	1.203	1.203	1.203	1.203	1.203	77	84	68
30	115.0	92.6	48.4	38.2	38.2	115.0	72.0	26.3	21.5	0.748	0.747	0.808	0.771	0.800	1	17	66
60	115.0	108.6	81.3	38.2	38.9	115.0	71.5	27.5	22.1	0.274	0.513	0.704	0.746	0.786	1	15	63
90	115.0	110.9	103.9	95.8	95.1	115.0	98.0	27.8	22.2	0.096	0.103	0.118	0.120	0.123	0	4	62
120	115.0	110.5	107.1	102.4	103.1	115.0	100.8	29.1	22.6	0.052	0.055	0.059	0.060	0.060	0	3	58
150	115.0	108.2	105.5	102.2	101.4	115.0	98.8	29.1	22.1	0.056	0.056	0.061	0.057	0.056	0	3	55

ตารางผนวก 8 ข้อมูลการทดลองของการอบแห้งกรณีพริกไทยดำที่ผ่านการลวกชั้นความหนาพริกไทยดำ 30 เซนติเมตร รูปแบบการไหลอากาศแบบธรรมดา

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)									ค่าเฉลี่ยความชื้นความชื้น (d.b.)					ความชื้นสัมพัทธ์ (%)		
	ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิ					T_{in}	T_{out}	T_{amb}	T_{wb}								
	x=1	x=2	x=3	x=4	x=5					x=1	x=2	x=3	x=4	x=5	RH_{in}	RH_{out}	RH_{amb}
0	69.0	48.0	31.5	32.4	31.0	115.0	25.3	25.2	18.0	1.203	1.203	1.203	1.203	1.203	68	80	61
30	115.0	58.2	57.0	36.8	36.8	115.0	64.0	27.2	21.5	0.852	0.813	0.791	0.794	0.780	0	18	53
60	115.0	98.6	106.3	61.0	48.8	115.0	67.9	27.9	20.7	0.549	0.778	0.837	0.835	0.807	0	15	48
90	115.0	103.7	107.8	89.5	55.1	115.0	62.1	28.5	20.3	0.437	0.375	0.611	0.654	0.661	0	20	47
120	115.0	109.9	114.1	109.6	97.9	115.0	90.9	29.4	20.9	0.141	0.180	0.154	0.108	0.124	0	2	43
150	115.0	108.4	112.5	111.5	110.3	115.0	97.1	27.5	20.7	0.062	0.065	0.061	0.058	0.054	0	1	55
180	115.0	106.3	109.9	109.0	106.0	115.0	94.3	26.6	20.0	0.055	0.046	0.050	0.046	0.047	0	1	59

ตารางผนวก 9 ข้อมูลการทดลองของการอบแห้งกรณีพริกไทยดำที่ผ่านการลวก ชั้นความหนาพริกไทยดำ 40 เซนติเมตร รูปแบบการไหลอากาศแบบธรรมดา

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)									ค่าเฉลี่ยความชื้นความชื้น (d.b.)					ความชื้นสัมพัทธ์ (%)		
	ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิ					T_{in}	T_{out}	T_{amb}	T_{wb}								
	x=1	x=2	x=3	x=4	x=5					x=1	x=2	x=3	x=4	x=5	RH_{in}	RH_{out}	RH_{amb}
0	65.0	43.0	28.9	29.3	28.7	115.0	27.5	27.9	21.8	1.203	1.203	1.203	1.203	1.203	74	58	59
30	93.2	89.2	51.3	38.0	38.0	115.0	72.9	29.3	23.0	0.808	0.769	0.861	0.904	0.886	0	11	54
60	113.0	106.0	75.1	38.9	37.7	115.0	73.0	29.7	22.4	0.800	0.786	0.800	0.856	0.863	0	11	54
90	115.0	111.7	105.8	90.4	45.0	115.0	76.6	31.1	22.8	0.541	0.805	0.815	0.811	0.788	0	9	50
120	115.0	108.2	105.7	104.4	90.7	115.0	78.0	29.0	21.1	0.602	0.624	0.648	0.688	0.737	0	8	56
150	115.0	108.4	106.6	106.4	104.4	115.0	79.3	27.3	21.9	0.271	0.233	0.369	0.398	0.414	0	7	63
180	115.0	107.5	105.8	106.6	106.6	115.0	86.9	26.7	21.4	0.141	0.153	0.155	0.152	0.120	0	4	67
210	115.0	108.8	106.5	107.4	106.2	115.0	93.0	24.8	20.3	0.078	0.082	0.083	0.086	0.089	0	2	74
240	115.0	109.0	106.5	107.8	107.8	115.0	94.8	26.2	20.3	0.076	0.085	0.088	0.087	0.080	0	2	70
270	115.0	109.4	107.9	108.9	108.4	115.0	95.0	26.4	22.2	0.067	0.074	0.073	0.070	0.077	0	2	71
300	115.0	109.9	108.3	109.7	108.8	115.0	95.2	26.3	22.3	0.065	0.072	0.066	0.064	0.063	0	2	72

ตารางผนวก 10 ข้อมูลการทดลองของการอบแห้งกรณีพริกไทยดำที่ผ่านการลวก ชั้นความหนาพริกไทยดำ 20 เซนติเมตร รูปแบบการไหลอากาศแบบสลับทิศทางลมร้อน

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)									ค่าเฉลี่ยความชื้นความชื้น (d.b.)					ความชื้นสัมพัทธ์ (%)		
	ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิ					T_{in}	T_{out}	T_{amb}	T_{wb}								
	x=1	x=2	x=3	x=4	x=5					x=1	x=2	x=3	x=4	x=5	RH_{in}	RH_{out}	RH_{amb}
0	68.0	45.0	32.3	30.2	27.7	115.0	24.2	24.4	18.7	1.203	1.203	1.203	1.203	1.203	70	61	59
30	115.0	88.8	37.9	37.0	37.1	115.0	58.6	26.1	29.0	0.780	0.847	0.836	0.811	0.814	0	25	58
60	115.0	102.2	83.2	38.1	37.1	115.0	68.9	26.0	19.5	0.325	0.704	0.699	0.712	0.724	0	13	55
90	69.3	76.5	96.9	106.9	115.0	115.0	81.5	33.4	22.6	0.104	0.092	0.205	0.494	0.321	7	4	40
120	98.7	99.7	107.9	110.9	115.0	115.0	96.6	29.3	20.6	0.082	0.081	0.074	0.106	0.097	11	1	46
150	115.0	107.0	109.3	105.4	104.2	115.0	96.1	27.9	20.2	0.059	0.048	0.055	0.053	0.061	0	1	50

ตารางผนวก 11 ข้อมูลการทดลองของการอบแห้งกรณีพริกไทยดำที่ผ่านการลวก ชั้นความหนาพริกไทยดำ 30 เซนติเมตร รูปแบบการไหลอากาศแบบสลับทิศทางลมร้อน

เวลา	อุณหภูมิ (°C)									ค่าเฉลี่ยความชื้นความชื้น (d.b.)					ความชื้นสัมพัทธ์ (%)		
	ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิ					T_{in}	T_{out}	T_{amb}	T_{wb}								
(นาที)	x=1	x=2	x=3	x=4	x=5					x=1	x=2	x=3	x=4	x=5	RH_{in}	RH_{out}	RH_{amb}
0	65.0	43.0	31.1	31.1	29.0	115.0	25.7	25.4	21.6	1.203	1.203	1.203	1.203	1.203	90	68	72
30	115.0	38.2	38.2	38.0	38.1	115.0	66.5	25.8	22.0	0.831	0.859	0.905	0.864	0.864	1	18	72
60	115.0	46.0	38.5	38.2	38.5	115.0	69.3	28.0	22.5	0.875	0.924	0.947	0.907	0.915	1	14	63
90	60.0	38.5	38.7	82.1	115.0	115.0	62.1	29.1	23.5	0.253	0.251	0.276	0.293	0.230	2	23	60
120	60.8	38.6	62.8	86.5	115.0	115.0	63.1	30.2	23.9	0.344	0.156	0.131	0.132	0.201	2	22	56
150	115.0	71.2	39.4	40.1	41.1	115.0	70.8	30.4	23.4	0.395	0.212	0.138	0.143	0.133	0	14	55
180	115.0	46.1	89.9	105.2	112.9	115.0	64.9	31.5	24.1	0.109	0.104	0.089	0.093	0.105	2	20	51
210	78.0	87.0	89.0	109.3	115.0	115.0	78.1	29.1	21.4	0.089	0.087	0.093	0.090	0.088	0	7	57
240	98.0	101.5	102.0	111.0	115.0	115.0	89.9	30.6	23.7	0.087	0.100	0.082	0.087	0.078	0	3	53
270	115.0	112.0	115.0	195.6	105.3	115.0	91.2	31.2	23.5	0.067	0.062	0.069	0.065	0.065	3	2	53

ตารางผนวก 12 ข้อมูลการทดลองของการอบแห้งกรณีพริกไทยดำที่ผ่านการลวก ชั้นความหนาพริกไทยดำ 40 เซนติเมตร รูปแบบการไหลอากาศแบบสลับทิศทางลมร้อน

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)									ค่าเฉลี่ยความชื้นความชื้น (d.b.)					ความชื้นสัมพัทธ์ (%)		
	ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิ					T_{in}	T_{out}	T_{amb}	T_{wb}								
	x=1	x=2	x=3	x=4	x=5					x=1	x=2	x=3	x=4	x=5	RH_{in}	RH_{out}	RH_{amb}
0	65.0	42.0	35.0	35.0	35.0	115.0	38.6	30.8	26.5	1.203	1.203	1.203	1.203	1.203	77	77	57
30	102.8	38.3	38.3	38.4	38.5	115.0	40.2	32.0	24.9	0.830	0.865	0.845	0.847	0.913	1	88	52
60	115.0	53.6	38.5	38.6	39.0	115.0	40.3	32.6	24.5	0.780	0.872	0.812	0.859	0.828	0	88	51
90	42.5	39.1	38.8	62.2	115.0	115.0	66.6	32.0	23.8	0.559	0.203	0.144	0.142	0.170	1	19	53
120	42.0	44.7	107.3	104.6	115.0	115.0	65.0	29.9	22.5	0.215	0.153	0.136	0.125	0.148	0	23	64
150	115.0	97.1	63.5	57.7	55.1	115.0	53.1	29.7	24.2	0.072	0.088	0.079	0.089	0.072	1	42	67
180	115.0	109.1	103.9	104.1	101.7	115.0	94.6	28.2	23.3	0.059	0.059	0.056	0.064	0.064	0	4	69
210	106.0	108.5	109.8	112.0	115.0	115.0	99.4	28.2	23.7	0.051	0.042	0.046	0.040	0.049	0	1	71

ภาคผนวก ค

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

JOURNAL OF
AGRICULTURAL RESEARCH AND EXTENSION
Office of Agricultural Research & Extension Maejo University
Vol. 30 No.3 (Suppl.) July – September 2013 ISSN 0125-8850

AGRI RESEARCH & EXTENSION

Journal of Agr. Research & Extension 30(3) (Suppl.): 68-79

Fixed Deep-beds Drying of Black Pepper: A Comparative Study between a Normal Airflow and Reverse Airflow

Phirunrat Thaisamak*, Wipa Teppinta, Chanawat Nitatwichit, Jatupong Varith and Somkiat Jaturonglumlert

Division of Food Engineering, Faculty of Engineering and Agro-Industry, Maejo University, Chiang Mai, Thailand 50290

*Corresponding author: phirunrat.thai@yahoo.co.th

Abstract

The purpose of this research study was to compare normal airflow and reversal airflow in fixed deep-bed drying of black pepper. The deep-bed model has temperature and moisture ratios which varied with depth and drying time. The batch drying process was divided into two parts. The first part included data collection of the temperature and moisture distribution, which was affected by two independent variables, the depth (at 20, 30 and 40 cm) and types of airflow (normal airflow vs. reverse airflow every 1 hour). The second part was to fit the experimental data to estimate dimensionless variable to be used in mathematical model to explain drying behavior. It was shown that temperature and moisture ratios of normal airflow and reverse airflow were similar in deep-bed model. The airflow reverse process could be used for drying at any depth of the drying bed, which the physical property was close to the standard and can reduce the drying cost. The model explained the behavior of drying process in nearby boundary condition and can be applied to adjust the dryer and drying process in the industry.

Keywords: fixed deep-bed drying, black pepper, reversal airflow, normal airflow

Introduction

Black pepper (*Piper nigrum* L.) is popular in healthy and spicy herb group. The product of pepper gives an annual export value (about 30-60 million baht) to country (Office of the Agricultural Economics, 2012). Drying is the method to prolong shelf life for high humidity product as well as to reduce the weight of product, cost of instrument and packaging. Reversal airflow drying was developed from batch type drying which the drying air flow is applied in one direction for some time and then the direction of the flow is reversed for the next period that may be repeated several times until the drying was completed. From this method, the hot air can go through and distribute to the product in both directions.

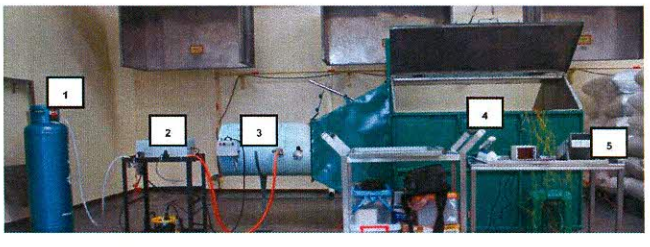
Journal of Agr. Research & Extension 30(3) (Suppl.): 68-79

Fixed-bed drying is a complex process which is used for black pepper in the industry. The possible option is stirring by experience workers during drying at regular intervals. This problem incurs high cost and labor intensive. Thus, the reversal airflow drying was used to reduce these problems, the drying time, heat loss between stirring time and cost of labor (Janjai *et al.*, 2011). However the designer process including or modification of the dryer was of high cost, time consuming and must take longer to find the optimal condition. Mathematical modeling is one of the most important methods in food drying process which deals with the behavior of drying by moisture and temperature distribution. This method reduced the number of trial and cost of material. The result of mathematical model could be applied to adjust drying process and was to modify the dryer.

Fixed deep-bed drying model was developed to describe the heat and mass transfer during drying. This model involves a few variables and parameters for simulation such as the drying constant of thin-layer, thermodynamic properties of air and grain. In this research, a fixed deep-bed model developed by Barre *et al.* (1971) was used to simulate numerically the fixed deep-bed drying of black pepper and study the feasibility of modeling for the types of airflow (normal airflow and reversal airflow) by comparing the moisture and temperature ratio vary with time and depth. Lastly the optimal depth of bed was determined by fixed deep-bed model to apply in the industry scale. Many researches in the field of mathematical modeling have studied the empirical model which could explain the varying behavior of drying with time only.

Materials and Methods

The mathematical model of fixed deep-bed drying was validated for the experimental data of black peppers by comparing the behavior of drying varied with two independent variables i.e. the depth of bed (20, 30, 40 cm) and the type of airflow (normal airflow and reverse airflow). In this work, the bulk density of black pepper was about 550 kg/m^3. The temperature of drying air was 100°C. The initial moisture content which determined by hot air oven method was 0.17 dry basis and the average air velocity at the entrance was 2.25 m/s. The implement of dryer shown in Figure 1.



1. Liquefied Petroleum Gas
2. Temperature controller
3. Blower 1/3 hp
4. Drying bin
5. Set of measurement

Figure 1 Implement of dryer in drying process

Journal of Agr. Research & Extension 30(3) (Suppl.): 69-79

To simulate the model, the drying air temperature, relative humidity and moisture content were determined throughout the experiment. K type thermocouple connecting with the data logger (Agilent technology 34970A) was used to measure the air temperature in the drying bin. Relative humidity of ambient air and drying air were measured with a hygrometer. The moisture content was determined with hot air oven method by sampling black pepper from drying bin at designated position. The experimental data were periodically collected at 30 minutes interval until the drying was completed. The position of thermocouples were periodically collected at 30 minutes interval for measurement temperature in the drying bin was defined three positions, and each position was divided into five sub-layers along at the depth of bed (at x=1, 2, ..., 5). The position of moisture content was also defined two positions. The position of measurement in drying bin is shown in Figure 2 for example T11 was the first position of thermocouple and sub-layer x=1. In the study of reversal airflow, the direction of airflow was reversed 1-hour at interval by repeating the reverse direction until the desired moisture content was reached (about 0.07 on dry basis).

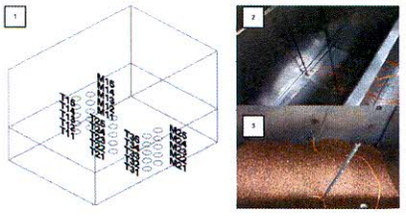
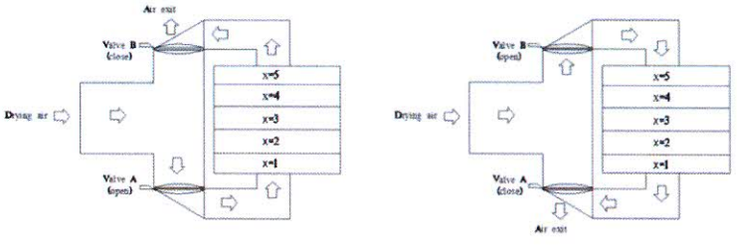


Figure 2 (1) Position of moisture content and temperature used to collect simulation data; (2) Tray used to contain material; (3) Tray containing black pepper and position of thermocouple for collecting temperature profile.

The patterns of airflow in both types are shown in Figure 3. In normal airflow, hot air was applied from the bottom to the top of black pepper bed. (open valve A close valve B) For reverse airflow, was applied (hot air) from the bottom to the top with interval time set then was reversed (the hot air) from the top to the bottom (close valve A open valve B), the reverse was repeated until the process was reached.



(1) (2)

Figure 3 Operation of the fixed-bed dryer using normal airflow (1), reversal airflow (2)

Journal of Agr. Research & Extension 30(3) (Suppl.): 68-79

Fixed deep-bed model

Fixed deep-bed drying is a non-stationary process Moisture content and temperature depended on the depth "x" of the bed and on the drying time "t". Aregba *et al.* (2006) was proposed a mathematical model of fixed deep-bed by define the moisture content of product as $M_p(x,t)$. The drying air temperature in bed as $T_a(x,t)$. The following assumption was made in deriving the equation: The sensible heat required to raise temperature is negligible compared to latent heat for moisture vaporization, The grain bulk density and latent heat vaporization are constant. The initial moisture content in the bed is equating all over the bin. Hukill (1954) was presented energy balance equation by the mention assumption.

$$\rho_{da} V_{a0} Cp_{da} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} = \rho_{dp} h_{fg} \frac{\partial M}{\partial t} \qquad (1)$$

With ρ_{da} is the density of drying air. (kg/m^3); ρ_{dp} is the bulk density of product, (kg/m^3); Cp_{dp} is specific heat of drying air,(J/kg); h_{fg} is latent heat vaporization of water, (J/kg); V_{a0} is inlet velocity of drying air, (m/s) The relation 1 which has been tentatively proposed is a sample form and was improved by using the exponential form. Hukill further assumed the following initial and boundary conditions, for drying temperature:

Initial $$\frac{T_a(x,0)-T_{am}}{T_a(0,t)-T_{am}} = e^{-\frac{x}{H}} \qquad (2)$$

Boundary $$T_a(0,t) = T_{a0} \qquad (3)$$

With T_{a0} is inlet temperature of the drying air; T_{am} is ambient air wet bulb temperature; x is coordinate along bed depth, (m) and H is Height of transfer unit. Assuming the inlet temperature of drying air is constant (equal to T_{a0}), as for temperature, the moisture content is given by

Initial $$\frac{M_p(0,t)-M_{eq}}{M_p(x,0)-M_{eq}} = e^{-Kt} \qquad (4)$$

Boundary $$M_p(x,0) = M_{pi} \qquad (5)$$

With M_{pi} is the initial moisture content of the product, K is thin-layer drying constant, and t is time.

Dimensionless fixed deep-bed model

The definition of some dimensionless variable in relation of fixed deep-bed model. In relation of initial and boundary conditions was expressed two unknown variables. Aregba et al. [4] presented the technique involved in this process corresponding to the theory of transfer units. Given H is the height of transfer unit and K is the drying constant of thin-layer kinetic equation. Equations 1-4 constitute the differential equation system of fixed deep-bed. The dimensionless variables are defined as follow:

$$MR(x,t) = \frac{M_p(x,t)-M_{eq}}{M_{pi}-M_{eq}} \qquad (6)$$

Journal of Agr. Research & Extension 30(3) (Suppl.): 68-79

$$TR(x,t) = \frac{T_a(x,t) - T_{am}}{T_{ao} - T_{am}} \quad (7)$$

$$\theta = Kt \quad (8)$$

$$\upsilon(x) = \frac{x}{H} \quad (9)$$

With M_{eq} is equilibrium moisture content of black pepper, calculated by Modified Oswin equation from the study, that is $M_{eq} = (0.150 - 0.004(T) + 0.0000353T^2)\left(\frac{RH}{1-RH}\right)^{0.647} + 0.020$. Equations 6-9, the depth, x and time, t are expressed in dimensionless term υ, θ. The moisture and temperature ratios for contain drying time and bed depth can be calculated as follow.

$$MR(\upsilon,\theta) = \frac{e^{\upsilon}}{e^{\upsilon} + e^{\theta} - 1} = \frac{e^{\frac{x}{H}}}{e^{\frac{x}{H}} + e^{Kt} - 1}$$

when $\upsilon > 0, \quad \theta > 0$ (10)

$$TR(\upsilon,\theta) = \frac{e^{\theta}}{e^{\upsilon} + e^{\theta} - 1} = \frac{e^{Kt}}{e^{\frac{x}{H}} + e^{Kt} - 1}$$

when $\upsilon > 0, \quad \theta > 0$ (11)

Non-linear regression with SPSS program was used for the analytical transfer units. After that, the equations 10, 11 with estimated values from analytical transfer unit were used to predict the moisture and temperature ratio. In this work R^2, RMSE and %error were used to validate between the predicted and experimental results. The fixed deep-bed model was in good agreement and acceptable with high R^2 and low RMSE value and % error (Narong *et al.*, 2011).

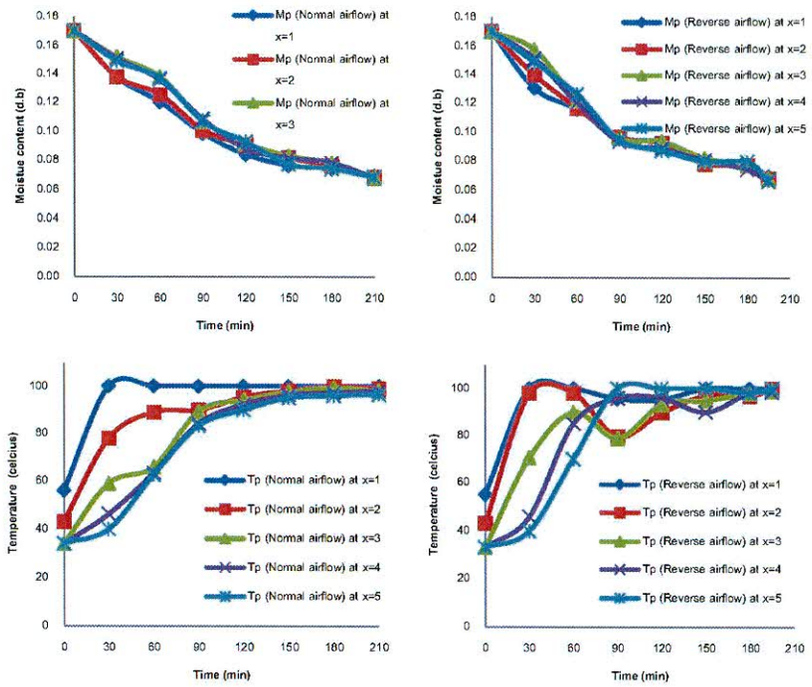
Results and Discussion

The operation of drying process was found to vary with the depth of bed and type of airflow. In this section, in the operation at 40 cm depth of bed is present, with defined Mp is the average moisture content at two positions and Ta is the average drying air temperature at three positions, and the average value was divided by sub-layers. When the experimental result between normal airflow and reverse airflow was compared, it was found that in normal airflow, the moisture content in each sub-layer tended to decrease continuously from sub-layer 1 to 5 when was applied hot air at the bottom of bed. Although stirring can distribute the hot air, the change of moisture content varied with the depth of bed. The moisture content in each sub-layer was similar when the drying time passed 150 minutes. In reverse airflow, the moisture content was different in each sub-layer that is, the moisture content at sub-layer 1 was low when dry air was applied at the bottom. Similar, sub-layer 5 had low moisture content when hot air was applied reversely at the top of bed. Moisture content tended to decrease rapidly when the drying time passed 90 minutes.

The temperature in the normal airflow tended to increase continuously from bottom to top of bed and was higher at sub-layers 1, 2 than at other sub-layers. Drying air temperature was stable when the drying time passed 150 minutes

Journal of Agr. Research & Extension 30(3) (Suppl.): 68-79

and was constant until the drying was completed. In the reversal airflow the moisture content decreased as the temperature increased which was high at sub-layers 1, 2 when hot air was applied at bottom of bed and was high at sub-layers 5, 4 when the reversing time took place. In this type of airflow, the profile of temperature was swinging at the beginning of drying and converge similar when the drying time passed 120 minutes. Figure 4 shows the change of moisture content and temperature profile in the bed in normal and reverse airflows.



(1) Normal airflow (2) Reverse airflow

Figure 4 Moisture and temperature profiles during drying at the condition of 40 cm with average moisture content in three positions and average temperature in two positions Mp = average moisture, Ta = average temperature

Journal of Agr. Research & Extension 30(3) (Suppl.): 69-79

From the experiment on drying, the solution of fixed deep-bed model is given by equations 10, 11. The result of the dimensionless moisture and temperature ratio fitted the predicted result. The analytical result of transfer units divided by moisture and temperature ratio, statistic analysis are shown in Table 1.

Table 1 Value of transfer units and statistic analysis

Depth of drying bed (cm)	Condition	MR					TR				
		K	H	R^2	RMSE	%Error	K	H	R^2	RMSE	%Error
20	Normal airflow	0.007	-1.985	0.935	0.0621	8.419	0.004	0.037	0.810	0.1377	7.679
	Reverse airflow	0.007	1.894	0.889	0.0711	10.260	0.004	0.036	0.851	0.1233	8.630
30	Normal airflow	0.007	3.275	0.971	0.0841	5.331	0.002	0.074	0.859	0.1785	7.813
	Reverse airflow	0.006	5.029	0.932	0.0530	7.473	0.002	0.073	0.789	0.1342	12.484
40	Normal airflow	0.005	3.043	0.977	0.0341	4.620	0.001	0.138	0.831	0.1556	17.959
	Reverse airflow	0.005	15.026	0.958	0.0069	5.184	0.001	0.100	0.812	0.0936	11.628

The predicted result for variation of moisture and temperature ratios under different drying conditions were obtained and compared with the experimental result. From Table 1, the minimum (R^2) between both types of airflow when considering moisture ratio was 0.971, 0.889 respectively, and when considering temperature ratio was 0.810, 0.789. It was shown that the simulate result of 40 cm was the best fitted (R^2=0.977, 0.958). The minimum value for RMSE were 0.0341, 0.0069 respectively when considering moisture ratio, and there were 0.1233, 0.0936 when considering temperature ratio. The maximum value for % Error were 8.14, 10.26 respectively when considering moisture ratio and 17.59, 12.63 in temperature ratio. From statistic analysis the best fitted with fixed deep-bed model was 40 cm, and the model was in good agreement with moisture ratio and over estimated in some conditions of temperature ratio.

Figure 5 shows comparison between the predicted result and experimental results of moisture ratio between normal airflow and reversal airflow of black pepper with varying depth. (The moisture ratio of normal and reversal airflows gave similar result in each condition of drying. The model provided good agreement between experimental and predicted result and good prediction when the run duration was less than 60 min.

Journal of Agr. Research & Extension 30(3) (Suppl.): 69-79

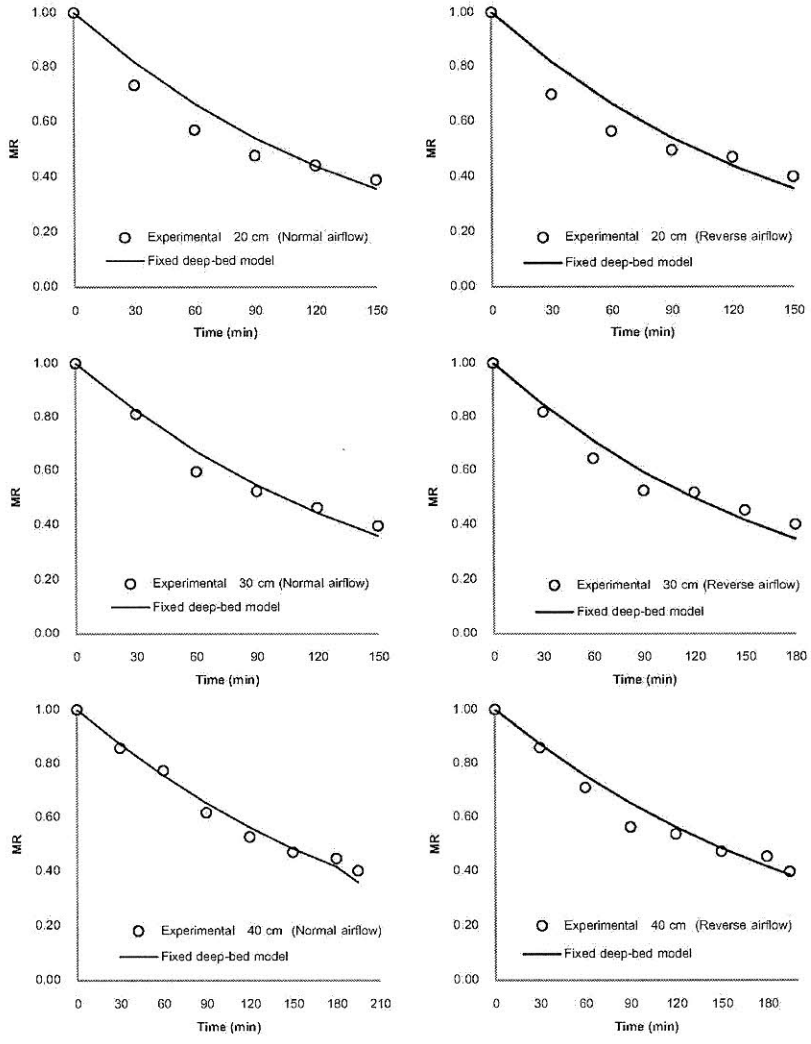


Figure 5 Comparison of the moisture ratio of experimental and fixed deep-bed model: normal airflow (left) and reverse airflow (right) at T_{ao}=100°C , Bed depth = 20, 30, 40 cm

Journal of Agr. Research & Extension 30(3) (Suppl.): 68-79

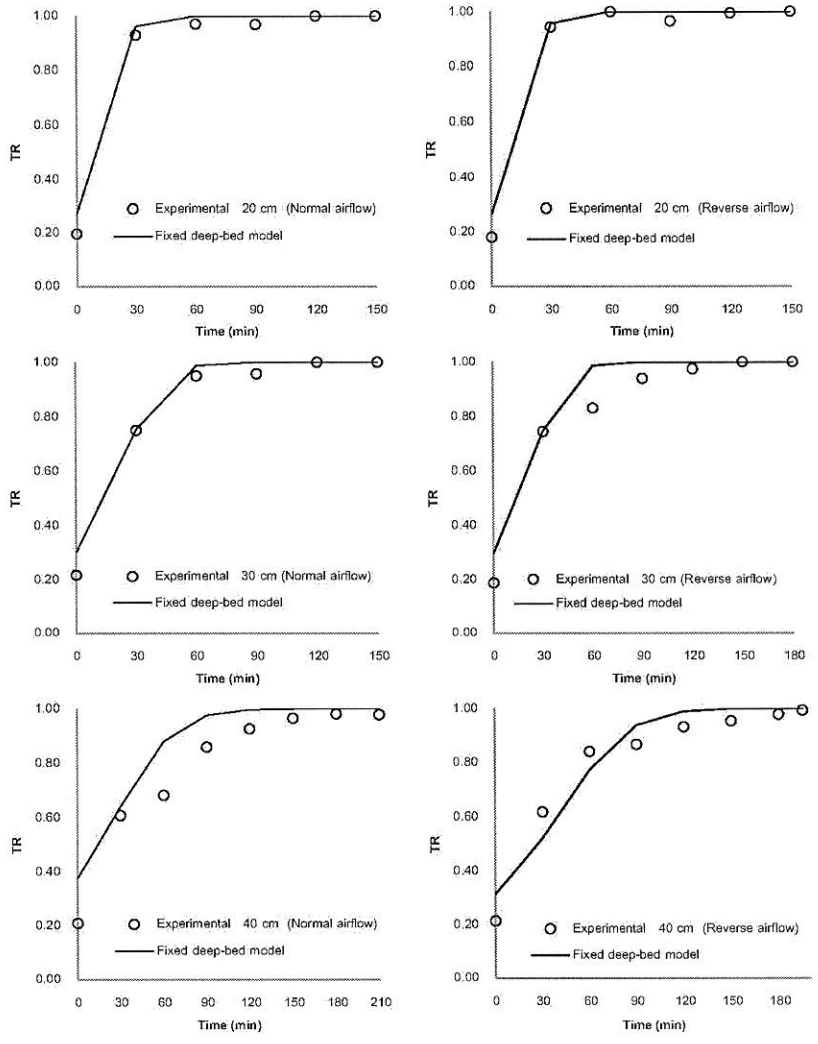


Figure 6 Comparison of the temperature ratio of experimental and fixed deep-bed model: normal airflow (left) and reverse airflow (right) at T_{ao} = 100°C, Bed depth = 20, 30, 40 cm.

Journal of Agr. Research & Extension 30(3) (Suppl.): 68-79

Figure 6 shows the comparison between the predicted and experimental result of temperature ratio between normal airflow and reverse airflow with varying bed depth. The temperature ratio of both types was not in good agreement in some conditions. The model provided good prediction in normal airflow and some tests of reverse airflow, but it was somewhat overestimated at the depth was more than 40 cm, although the discrepancies between the predicted and experimental value were acceptable. Therefore, the deep-bed dryer model describes the drying process with good accuracy in both types of airflow. The main errors between the predicted and experimental data are probably due to (1) lack of the estimate transfer unit, (2) insufficient precision of the moisture equilibrium iso-therm equation at relative humidity above 90%, (3) the error in the measurement of input parameters and actual performance of dryer (Zare *et al.*, 2006)

The physical property of final product by reversal airflow drying was close to the standard which the property in general drying industry such as water activity, moisture content and color of product was used. The final moisture content in this test was close to the standard of industry, i.e. about 0.07. Contamination by microorganisms in the final product was examined and analyzed in laboratory. It was found to pass and acceptable by the standard of drying industry [8]. The result of physical property was shown in Table 2. The before and final product was shown in Figure 7.

Table 2 Analysis of physical properties

Condition		Drying	Color			Water activity	Final	Initial	Final
Bed thickness (cm)	Airflow	time (min)	L*	a*	b*		moisture content (d.b.)	weight (kg)	weight (kg)
20	Normal airflow	150	40.20	4.65	15.96	0.465	0.066	50.00	45.70
	Reverse airflow	150	36.81	5.24	14.40	0.403	0.068	50.00	45.70
30	Normal airflow	150	39.44	4.23	14.98	0.663	0.067	75.00	68.70
	Reverse airflow	180	36.92	3.84	14.78	0.647	0.068	75.00	68.14
40	Normal airflow	210	36.88	4.73	13.65	0.426	0.068	100.00	90.60
	Reverse airflow	195	37.18	4.77	14.66	0.494	0.068	100.00	90.15

The drying behavior of black pepper for bed depth of 20, 30 and 40 cm were similar. The prediction of model can explain the behavior in every bed depth. So, in pragmatic drying, 30-40 cm of bed height was optimal in the industrial scale. In each batch of dryer, the product could be contained at the depth more than 20 cm which have no effect on the properties of final product. So the operating cost decreased with increased bed depth. It is suggested that the dryer with reverse airflow should be operated for economic application. The fixed deep-bed model reduced

Journal of Agr. Research & Extension 30(3) (Suppl.): 69-79

cost in the laboratory to ensure optimization. The model give good to explanation on the behavior of drying and is useful for the simulation of drying phenomena and dryer performance. This type of model can be used by decision support systems for the investigation on drier design problem.

Before After

Figure 7 Black pepper in drying process: before drying and after drying

Conclusion

A comparison between a normal airflow and reverse airflow was investigated by fixed deed-bed model which was derived from Hukill' s model. The variables of the model were formulated and estimated with non-linear regression. It was found that the deep-bed model gave similar result which could explain temperature and moisture ratio in both types of airflow. The reverse airflow could be used at all depth of drying bed, but was underestimated in the bed depth more than 40 cm. The simulation model could be used as a tool to optimize drying process and decreased cost of optimization in drying process. The model was useful for drier design to predict and explain behavior of drying process which can be applied to adjust the dryer and drying process in the industry.

Acknowledgements

We would like to thank the research project "Operation Cost Reduction for Industrial Pepper Power Drying with Alternating Hot-Air During Drying Process" funded by Wipa Tappinta, Thailand. We would also like to thank the executives and employees of NithiFoods Co., Ltd which provide facilities for this work.

Reference

Aregba, A.W., P. Sabastian and J.P. Nadeau. 2006. Stationary deep-bed drying: A comparative study between a logarithmic model and a non-equilibrium model. **J. of Food Engineering.** 77: 27-40.

Barre, H.J., G.R. Baughaman and M.Y. Hamdy 1971. Application of the logarithmic model to crossflow deep-bed drying. **Transection of the ASAE.** 14(6): 1061-1064.

Hukill, W.V. 1954. Grain drying. In J.A., Anderson, A.W. Alcock (Eds.) **Storage of Cereal Grain and Their Products**. St. Paul, Minn: American Associate Cereal Chemical.

Narong, U., B. Panupong and H. Wanphen. 2011. Models of pepper drying using hot air oven. **J. Agricultural Sci.** 42(3): 533-536.

Journal of Agr. Research & Extension 30(3) (Suppl.): 69-79

Janjai, S., N. Lamlert, B. Mahayothee, P. Sruamsiri, M. Precoppe, B.K. Bala and Muller J. 2011. Experimental and simulation performances of a batch–type longan dryer with air flow reversal using biomass burner as a heat source. **J. Drying technology.** 29: 1439-1451.

Office of the Agricultural Economics. 2012. **Import-export statistics, Ministry of Agricultural and Cooperative.** [Online]. Available http://www.oae.go.th (2013 February 20).

Thai Industrial Standards Institute, Thailand. 2004. **TCPS 491-2547 (2004) (Thai): Ground black and white pepper us government documents.** [Online]. Available https://law.resource.org (2013 March 10).

Zare, D., S. Minaei, M. Mohammadzadeh. and M. Khoshtagaza. 2006. Computer simulation of rough rice drying in a batch dryer. **International Journal of Energy Conversion and Management.** 47: 3241-54.

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นางสาวพิรุฬห์รัชย์ ไทยสมัคร
เกิดเมื่อ	19 มกราคม 2531
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2548 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนส่วนบุญโญปถัมถ์ ลำพูน จังหวัดลำพูน
	พ.ศ. 2553 ปริญญาตรี มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่