

ปัจจัยการผลิตกล้วยหอมผงโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งหมุน

นฤดี พงศ์กิจวิฑูร¹ สุวิช ศิริวัฒนโยธิน²
สายลม สัมพันธ์เวชโสภา² และ ทิพาพร อยู่วิทยา³
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของปัจจัยการผลิตที่มีต่อความชื้นและคุณภาพทางด้านสีของกล้วยหอมผง เพื่อนำมาใช้ในการพัฒนาสมการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล และสมการจลนศาสตร์การเกิดสีน้ำตาลของกล้วยหอมในระหว่างการอบแห้ง โดยปัจจัยการผลิตที่ศึกษาได้แก่ ระดับการสุกหรือดัชนีสีเปลือกของกล้วยหอม (Peel Color Index, PCI) ความเข้มข้นของกล้วยบด อุณหภูมิผิวลูกกลิ้ง และความหนาของฟิล์มอาหาร กล้วยบดที่เตรียมจากกล้วยที่มีระดับการสุก PCI 5 และ PCI 6 มีความเข้มข้นร้อยละ 80 และ 90 (น้ำหนัก/น้ำหนัก) โดยเติมสารละลายโพแทสเซียมเมตาไบซัลไฟต์ และเลกซิดินจากถั่วเหลืองร้อยละ 1 อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งหมุนที่อุณหภูมิผิวลูกกลิ้ง 120 130 และ 140 องศาเซลเซียส และปรับระยะระหว่างลูกกลิ้งและลูกกลิ้งเท่ากับ 0.15 และ 0.30 มิลลิเมตร พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของกล้วยหอมอยู่ในช่วง 1.38×10^{-9} ถึง 4.11×10^{-9} ตารางเมตรต่อวินาที ค่าพลังงานกระตุ้นในการแพร่ความชื้นของกล้วยที่มีระดับการสุก PCI 5 และ PCI 6 เท่ากับ 43.18 และ 54.56 กิโลจูลต่อโมล ตามลำดับ จลนศาสตร์การเกิดสีน้ำตาลของกล้วยหอมระหว่างการอบแห้งเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง โดยค่าพลังงานกระตุ้นในการเกิดสีน้ำตาลของกล้วยที่มีระดับการสุก PCI 5 และ PCI 6 เท่ากับ 77.63 และ 64.63 กิโลจูลต่อโมล ตามลำดับ จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยการผลิตที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล และค่าคงที่ของอัตราการเกิดสีน้ำตาล พบว่า ระดับการสุกของกล้วยหอม และอุณหภูมิผิวลูกกลิ้งเท่านั้นที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ : กล้วยผง / เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งหมุน / จลนศาสตร์การเกิดสีน้ำตาล / ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล

¹ นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร

² อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร

³ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร

Processing Effects on Banana Powder Qualities using Drum Dryer

Narudee Phongkitwithoon¹ Suwit Siriwattanayotin²

Sailom Sampanvejsobha² and Tipaporn Yoovidhya³

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Toongkru, Bangkok 10140

Abstract

The effects of process parameters using drum dryer (banana maturity or peel color index (PCI), banana puree concentration, drum surface temperature and film thickness) on color and moisture content of the banana powder were studied. Mathematical models were developed to predict the effective moisture diffusivity coefficient and the browning kinetics of banana during drying. The Gros Michel banana with maturity of PCI 5 and PCI 6 were used in this study. The banana puree with concentration of 80 and 90 percent were prepared by mixing with potassium metabisulphite solution and 1 % soy lecithin. The puree was then fed to drum dryer at specific process conditions, the process parameters were drum surface temperature (120, 130 and 140 °C) and drum clearances or film thickness (0.15 and 0.30 mm). It was found that the effective moisture diffusivity coefficient of banana varied from 1.38×10^{-9} to 4.11×10^{-9} m²/s, their activation energy were 43.18 and 54.56 kJ/mol for banana with PCI 5 and PCI 6, respectively. The browning behavior of banana was found to follow the first order of kinetic reaction and their activation energy were 77.63 and 64.63 kJ/mol for banana with PCI 5 and PCI 6, respectively. From statistical analysis, it indicated that banana maturity and drum surface temperature had significant effects on the effective moisture diffusivity coefficient and the browning rate constant.

Keywords : Banana Powder / Drum Dryer / Browning Kinetics / Effective Moisture Diffusivity Coefficient

¹ Graduate Student, Department of Food Engineering.

² Lecturer, Department of Food Engineering.

³ Assistant Professor, Department of Food Engineering.

1. บทนำ

กล้วยหอมทอง เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งของประเทศ สามารถปลูกได้ทั่วไป และให้ผลผลิตตลอดปี ในบางฤดูกาลมีกล้วยหอมมากเกินความต้องการ รวมทั้งกล้วยหอมที่ใช้บริโภคสดมีอายุการเก็บเพียง 5-7 วัน ก่อนเน่าเสีย ก่อให้เกิดการสูญเสียทางเศรษฐกิจ ดังนั้น การแปรรูปกล้วยหอมให้เป็นกล้วยหอมผง จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถแก้ปัญหาในส่วนนี้ได้ กล้วยหอมผงเป็นผลิตภัณฑ์ที่ถือว่าเป็น secondary raw material ใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตอาหารชนิดต่างๆ เช่น ผลิตภัณฑ์ขนมอบ ไอศกรีม อาหารทารก เป็นต้น การที่ผลิตภัณฑ์มีลักษณะแห้งเป็นผง ทำให้สะดวกต่อการนำไปใช้ มีน้ำหนักเบา และสามารถเก็บรักษาได้นานโดยไม่ต้องเก็บในที่อุณหภูมิต่ำ การผลิตกล้วยหอมแบบลูกกลิ้งหมุนเป็นวิธีที่ประหยัด ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพดี และสูญเสียปริมาณของแข็งระหว่างขั้นตอนการผลิตน้อย ผลิตภัณฑ์กล้วยหอมผงจะมีศักยภาพในการส่งออกสูงขึ้นในอนาคต คุณภาพที่สำคัญของผลิตภัณฑ์กล้วยหอม ได้แก่ สี และความชื้น ซึ่งมีผลต่ออายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์โดยคุณภาพเหล่านี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยในการผลิตที่ใช้ [1] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาผลของปัจจัยการผลิตที่มีต่อความชื้นและคุณภาพทางด้านสีของกล้วยหอมผง รวมทั้งศึกษาผลของปัจจัยการผลิตที่มีต่อพารามิเตอร์ที่ควบคุมกระบวนการอบแห้งและการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลในการอบแห้งกล้วยหอม ซึ่งได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ประสิทธิภาพ (effective moisture diffusivity coefficient) และค่าคงที่ของอัตราการเกิดสีน้ำตาล (browning constant rate) นำไปสู่การพัฒนาสมการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ประสิทธิภาพ และสมการจลนศาสตร์การเกิดสีน้ำตาลของกล้วยหอมในระหว่างการอบแห้ง เพื่อใช้เป็นแนวทางในการขยายขนาดการผลิตเป็นระดับอุตสาหกรรมต่อไป

2. วัสดุและวิธีการทดลอง

นำกล้วยหอมทอง (จากตลาดปากคลองตลาด กรุงเทพฯ) ที่มีระดับการสุกหรือสีเปลือกสม่ำเสมอมาปอกเปลือก เติมน้ำ Potassium metabisulfite (KMS, food grade ผลิตโดย บริษัท RANAS-HOVAO จำกัด ประเทศเยอรมัน) 2000 ppm ของน้ำหนักกล้วยหอม เพื่อยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลและเอนไซม์ (ผลิตโดยบริษัท Central Soya จำกัด ประเทศสหรัฐอเมริกา) ร้อยละ 1 เพื่อทำให้น้ำกล้วยผสมสุกกลิ้งได้ดีขึ้น ผสมให้เข้ากันในเครื่องผสม (Merit, Model SP 306) และปั่นให้ละเอียดเป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่องบดอีกครั้ง อบแห้งกล้วยหอมด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งเดี่ยว (single drum dryer) ของบริษัท APV จำกัด ลูกกลิ้งทำจาก stainless steel ขนาดความยาว 11.5 นิ้ว เส้นผ่าศูนย์กลาง 12 นิ้ว วัดอุณหภูมิ (Data Taker, Model DT-600, Australia, Thermocouple type K และ Thermocouple Type K Surface Probe) ของกล้วยบดก่อนผ่านลูกกรีด อุณหภูมิห้อง อุณหภูมิผิวฟิล์มอาหาร เก็บตัวอย่างอาหารตามตำแหน่งต่างๆ รวมทั้งตัวอย่างอาหารก่อนอบแห้ง เพื่อหาปริมาณความชื้น โดยอบตัวอย่างในตู้อบแห้งที่อุณหภูมิ 105 °C จนกระทั่งน้ำหนักรวมของตัวอย่างคงที่ [2] และวัดค่าสีน้ำตาลของกล้วยผงทำโดยสกัดด้วยอะซิโตน (acetone) จากนั้นวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 420 nm. ด้วยเครื่อง spectrophotometer [3] ณ เวลาการอบแห้งต่างๆ

(ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงประมาณ 28 นาที ทุกช่วงเวลาประมาณ 4 นาที) โดยใช้ใบมีดขูดตัวอย่างอาหารใส่ใน moisture can ปิดฝาอย่างรวดเร็ว และเก็บไว้ใน desiccator เพื่อป้องกันการดูดความชื้นกลับ เนื่องจากกล้วยผงมีคุณสมบัติดูดความชื้นได้รวดเร็วมาก

ปัจจัยศึกษาได้แก่ กล้วยหอมที่มีระดับการสุก PCI 5 และ 6 ความเข้มข้นของกล้วยบดร้อยละ 80 และ 90 (น้ำหนัก/น้ำหนัก) อุณหภูมิผิวลูกกลิ้ง 120 130 และ 140 °C (ความดันไอน้ำ 1.4×10^5 , 2.1×10^5 และ 2.8×10^5 Pa) และระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งและลูกกรีด 0.15 และ 0.30 mm

3. ผลการทดลองและวิจารณ์

ผลของปัจจัยการผลิตที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล

จากข้อมูลลักษณะการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยระหว่างกรอบแห้ง ไม่ปรากฏช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ ดังในรูปที่ 1 มีเฉพาะช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเท่านั้น แสดงว่าการเคลื่อนที่ของความชื้นภายในฟิล์มมาที่ผิวเป็นตัวกำหนดกลไกการอบแห้ง ดังนั้นจึงใช้สมการของ Fick อธิบายการเคลื่อนที่ของน้ำ ดังนี้ [4]

$$MR_{ave}(t) = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(- (2n+1)^2 \pi^2 \frac{D_{eff} t}{4x_p^2}\right) \quad (1)$$

$$\text{โดย } MR_{ave} = \frac{M(t)}{M_0}$$

M = ความชื้นที่เวลาใดๆ มาตรฐานแห้ง

MR_{ave} = อัตราส่วนความชื้นเฉลี่ย

M_0 = ความชื้นเริ่มต้น มาตรฐานแห้ง

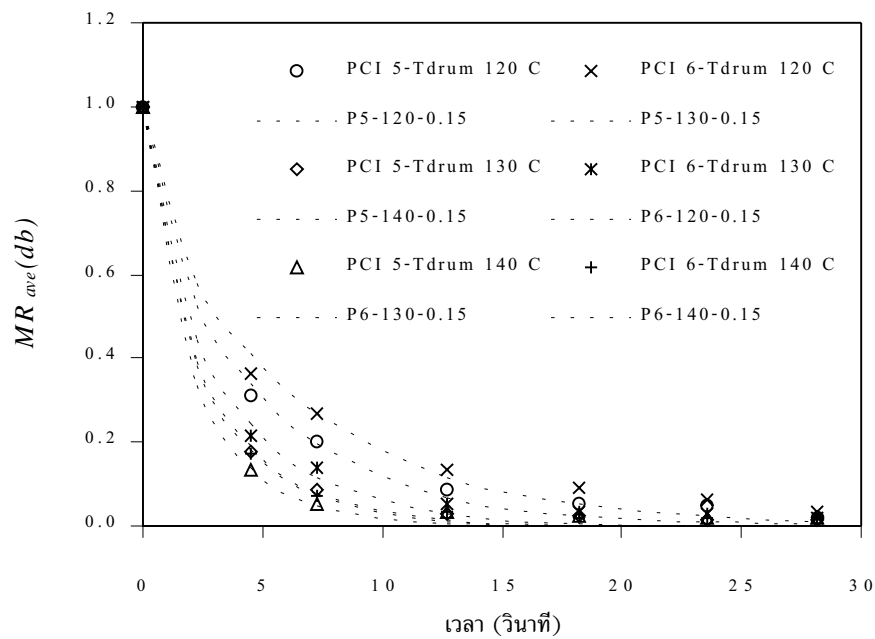
x_p = ความหนาฟิล์มอาหาร (mm)

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

t = เวลาอบแห้ง (s)

ภายใต้สมมติฐานว่า การทำงานของเครื่องอบแห้งและอากาศแวดล้อมอยู่ในสภาวะคงตัว การถ่ายเทความชื้นของฟิล์มอาหารอยู่ในสภาวะการแพร่ไม่คงตัว การถ่ายเทความร้อนเข้าสู่สมดุลง่ายเร็วมาก ไม่คิดความต้านทานความร้อนสัมผัสระหว่างผิวลูกกลิ้งกับผิวฟิล์มอาหาร ความหนาของฟิล์มอาหารต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกกลิ้งน้อยมาก ฟิล์มอาหารบนลูกกลิ้งไม่เดือด การถ่ายเทความชื้นเกิดจากผลต่างของความชื้นเท่านั้น ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นมาก และไม่คิดความต้านทานการถ่ายเทมวลที่ผิวอาหารสู่สภาวะแวดล้อม

เมื่อนำข้อมูลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยของกล้วยอบแห้งที่สภาวะการทดลองต่างๆ มาวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลด้วยสมการที่ (1) โดยวิธีวิเคราะห์การถดถอย ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยระหว่างการอบแห้ง ที่ความเข้มข้นกล้วยบด 80% w/w และความหนาฟิล์ม 0.15 mm (เส้นประ แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าจากการคำนวณ)

ตารางที่ 1 ผลของปัจจัยหลักที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (D_{eff})

ระดับการสุก	ค่าเฉลี่ย D_{eff} (m^2/s)	ความหนาฟิล์ม(mm)	ค่าเฉลี่ย D_{eff} (m^2/s)
PCI 5	2.91×10^{-9} ^a	0.15	2.59×10^{-9} ^a
PCI 6	2.30×10^{-9} ^b	0.30	2.62×10^{-9} ^a
(lsd)	(7.44×10^{-11})	(lsd)	(8.06×10^{-11})
ความเข้มข้น (%)		อุณหภูมิผิวลูกกลิ้ง ($^{\circ}C$)	
80	2.64×10^{-9} ^a	120	1.74×10^{-9} ^a
90	2.58×10^{-9} ^a	130	2.64×10^{-9} ^b
(lsd)	(9.07×10^{-11})	140	3.43×10^{-9} ^c
		(lsd)	(9.11×10^{-11})

¹ อักษรกำกับบนที่เหมือนกันในปัจจัยการผลิตเดียวกัน หมายถึง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ที่ $P < 0.05$

² least significant difference (lsd) หมายถึง ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างระดับของปัจจัยนั้น

เมื่อวิเคราะห์ผลของระดับการสุกที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล ซึ่งแสดงในตารางที่ 1 พบว่ากล้วยหอมที่มีระดับการสุก PCI 6 (ปริมาณน้ำตาล 17.62%) มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลเฉลี่ยต่ำกว่ากล้วยที่มีระดับการสุก PCI 5 (ปริมาณน้ำตาล 13.17%) เนื่องจาก ปริมาณน้ำตาลแปรตามระดับการสุกของกล้วย เมื่อกล้วยสุกมากจะมีปริมาณน้ำตาลในเนื้อกล้วยสูง [1] ซึ่งน้ำตาลสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำ ทำให้ความต้านทานการถ่ายเทความชื้นภายในฟิล์มอาหารเพิ่มขึ้น และอัตราการแพร่ความชื้นในเนื้อกล้วยสู่ผิวฟิล์มช้าลง ส่งผลให้

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลต่ำลง เช่นเดียวกับผลการศึกษาปริมาณน้ำตาลในเนื้อกล้วย ต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของกล้วยที่อบแห้งแบบอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วลม 0.62 m/s ซึ่งพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อปริมาณน้ำตาลในเนื้อกล้วยเพิ่มขึ้น [5]

เมื่อพิจารณาปัจจัยเนื่องจากอุณหภูมิผิวลูกกล้วยพบว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นมีผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลสูงขึ้น โดยที่อุณหภูมิผิวลูกกล้วย 140 °C ให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 3.43×10^{-9} m²/s เมื่อลดอุณหภูมิผิวลูกกล้วยลง ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมีแนวโน้มลดลง โดยค่าเฉลี่ยต่ำสุดที่อุณหภูมิผิวลูกกล้วย 120 °C เท่ากับ 1.74×10^{-9} m²/s เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิตั้งแต่เป็นการเพิ่มความแตกต่างระหว่างความดันไอภายในฟิล์มอาหาร และความดันไอของอากาศที่ผิวฟิล์ม อัตราการแพร่ความชื้นจากภายในสู่ผิวฟิล์มเร็วขึ้น ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลสูงขึ้น สอดคล้องกับผลการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของกล้วยอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 50-70 °C ความเร็วลม 0.5-1.5 m/s [6] [7]

เมื่อวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยการผลิตที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (ตารางที่ 1) โดยพิจารณาอิทธิพลของปัจจัยหลัก พบว่ามีเพียงปัจจัยจากระดับการสุกและอุณหภูมิผิวลูกกล้วยเท่านั้น ที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($P < 0.001$)

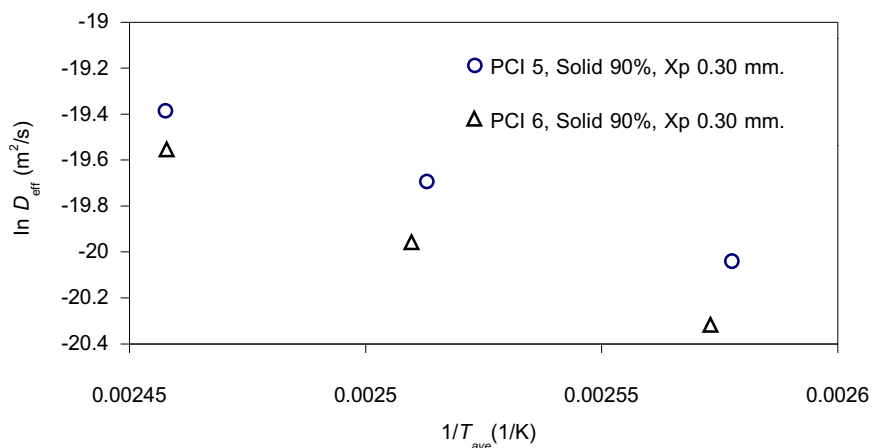
จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลที่เกิดจากอิทธิพลของปัจจัย 2 และ 3 ชนิดรวมกัน ดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่าเฉพาะอิทธิพลร่วมระหว่างระดับการสุกของกล้วยและอุณหภูมิผิวลูกกล้วยเท่านั้นที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$)

ตารางที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล ที่ระดับการสุกและอุณหภูมิผิวลูกกล้วยต่าง ๆ

ระดับการสุก	อุณหภูมิผิวลูกกล้วย (°C)		
	120	130	140
PCI 5	2.02×10^{-9b}	3.02×10^{-9d}	3.69×10^{-9f}
PCI 6	1.46×10^{-9a}	2.27×10^{-9c}	3.18×10^{-9e}

a, b, c, d, e, f อักษรกำกับบนที่เหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ $P < 0.05$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\ln D_{eff}$ กับส่วนกลับของอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิผิวลูกกล้วยและผิวฟิล์ม ($1/T_{ave}$) จะได้กราฟตามรูปที่ 2 สำหรับค่าพลังงานกระตุ้นของการแพร่ความชื้น (E_{ad}) และ $\ln D_0$ หาได้จากความชันและจุดตัดแกนตั้งของกราฟ ตามลำดับ [8] ค่าพลังงานกระตุ้นของการแพร่ความชื้นและ $\ln D_0$ ของกล้วยหอมที่สภาวะการทดลองต่างๆ แสดงในตารางที่ 3



รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln D_{eff}$ กับ $1/T_{ave}$
 (PCI = ระดับการสุกของกล้วยหอม, Solid = ความเข้มข้นของกล้วยบด, Xp = ความหนาฟิล์ม)

ตารางที่ 3 แสดงค่าพลังงานกระตุ้นของการแพร่ความชื้น (E_{ad}^1) และ $\ln D_o^1$

ระดับการสุก	ความเข้มข้น กล้วยบด (%)	ความหนาฟิล์ม (mm)	E_{ad}^1 (kJ/mol)	$\ln D_o^1$
PCI 5	80	0.15	42.03	-6.99
		0.30	42.96	-6.61
	90	0.15	42.89	-6.73
		0.30	44.86	-6.13
PCI 6	80	0.15	55.73	-4.05
		0.30	54.49	-3.46
	90	0.15	53.12	-3.90
		0.30	54.89	-3.35

¹ เฉลี่ยจากผลการทดลอง 2 ซ้ำ

เมื่อวิเคราะห์ความแปรปรวน เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยการผลิตต่อค่าพลังงานกระตุ้นของการแพร่ความชื้น (E_{ad}) และ $\ln D_o$ พบว่าระดับการสุกมีผลอย่างมีนัยสำคัญยิ่งต่อค่าทั้งสอง ($P < 0.001$) ค่าเฉลี่ยของพลังงานกระตุ้นและ $\ln D_o$ ที่ระดับการสุก PCI 5 (43.18 kJ/mol และ -6.61 ตามลำดับ) ต่ำกว่าที่ระดับการสุก PCI 6 (54.56 kJ/mol และ -3.69 ตามลำดับ) แสดงว่ากล้วยที่สุกมากต้องการพลังงานเพื่อใช้ในการแพร่ความชื้นสูงกว่ากล้วยที่สุกน้อย

จากการวิเคราะห์สมการถดถอยเชิงเส้นโค้งแบบพหุ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล กับระดับการสุกของกล้วยซึ่งแสดงในรูปของปริมาณน้ำตาลในกล้วยหอม และอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิผิวลูกกล้วยและผิวฟิล์ม ตามสมการของ Arrhenius จะได้อัตรา [9]

$$D_{eff} = \exp\left((0.66X - 15.79) - \left(\frac{2.40X + 9.73}{RT_{ave}}\right)\right) \quad (2)$$

เมื่อ D_{eff} = ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (m^2/s); X = ปริมาณน้ำตาลในกล้วยหอม (%); R = ค่าคงที่ของก๊าซ (8.314×10^{-3} kJ/g mol K) และ T_{ave} = อุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิผิวลูกกล้วยและผิวฟิล์ม (K)

สมการดังกล่าวสามารถปรับใช้เพื่อประเมินค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลเมื่ออบแห้งกล้วยหอมที่มีระดับการสุก PCI 5 (ปริมาณน้ำตาล 13.17%) และ PCI 6 (ปริมาณน้ำตาล 17.62%) อุณหภูมิผิวลูกกล้วยอยู่ระหว่าง 120-140 °C ความเข้มข้นของกล้วยอบ 80-90% ระยะห่างระหว่างลูกกล้วยและลูกรีด 0.15-0.30 mm.

เมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลจากผลการคำนวณและจากผลการทดลองพบว่า สมการสามารถทำนายค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลได้ด้วยความผิดพลาดไม่เกิน 5.22% ($R^2=94.78\%$) ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของกล้วยอบแห้งที่สภาวะการทดลองอยู่ในช่วง 1.38×10^{-9} ถึง 4.11×10^{-9} m^2/s ที่อุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิผิวลูกกล้วยและผิวฟิล์มประมาณ 114.8-133.5 °C ใกล้เคียงกับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของแป้งที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกล้วยหมุน มีค่าระหว่าง 2.18×10^{-9} ถึง 3.00×10^{-9} m^2/s ที่อุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิผิวลูกกล้วยและผิวฟิล์มประมาณ 118.0-142.5 °C [4] และพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของกล้วยที่ได้จากผลการทดลอง มีค่าสูงกว่ากล้วยที่อบแห้งแบบใช้อากาศร้อนที่อุณหภูมิ 50-70 °C ความเร็วลม 0.62 m/s โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลอยู่ในช่วง 2.62×10^{-10} ถึง 6.35×10^{-10} m^2/s [6] และสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของกล้วยน้ำว้าอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศร้อน 50-85 °C ซึ่งเท่ากับ 6.66×10^{-10} m^2/s [7] ทั้งนี้อาจเนื่องจากระดับของอุณหภูมิผิวลูกกล้วยในสภาวะทดลองสูงกว่าอุณหภูมิของอากาศร้อนที่ใช้ในงานวิจัยดังกล่าว

เมื่อนำค่าของส่วนกลับอุณหภูมิสัมบูรณ์จากผลงานวิจัยต่างๆ แทนค่าในสมการ (2) โดยกำหนดให้ปริมาณน้ำตาลในกล้วยหอมเท่ากับ 13.17% (PCI 5) จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลใกล้เคียงกับผลการทดลองของงานวิจัยข้างต้น โดยพบว่าที่ระดับอุณหภูมิอากาศร้อน 50-85 °C ได้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลอยู่ในช่วง 1.63×10^{-10} ถึง 7.32×10^{-10} m^2/s แสดงว่าวิธีการอบแห้งไม่น่าจะมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของกล้วยอบแห้ง ดังนั้นสมการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (2) อาจจะใช้กับผลิตภัณฑ์กล้วยที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งชนิดอื่นได้ และจากการตรวจสอบความถูกต้องของสมการพบว่า Normal probability plot มีการกระจายเป็นปกติและมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง สำหรับ Residuals plot ไม่มีรูปแบบเฉพาะใดๆ (structureless) ข้อมูลส่วนใหญ่ตกอยู่ในช่วงกลางๆ แสดงว่าสมการที่เลือกใช้มีความเหมาะสมและสมมติฐานที่ตั้งไว้ถูกต้อง กล่าวคือ ระดับการสุก อุณหภูมิผิวลูกกล้วย และอิทธิพลร่วมของทั้งสองปัจจัยมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล

จากสมการการถ่ายเทมวลสำหรับการแพร่ในสภาวะที่ไม่คงที่ของ Fick (1) กำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลคงที่ไม่ว่าจะปรับระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งและลูกรีดกว้างขึ้นหรือแคบลงก็ตาม ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลเฉลี่ยของกล้วยหอมที่ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งและลูกรีดเท่ากับ 0.15 และ 0.30 mm จากตารางที่ 1 จะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลเฉลี่ยที่ระยะห่าง 0.30 mm มีค่ามากกว่าที่ระยะห่าง 0.15 mm เล็กน้อย แต่เมื่อวิเคราะห์ผลทางสถิติพบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ การที่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลจากผลการทดลองมีค่าไม่เท่ากันเมื่อปรับระยะห่าง อาจเกิดจากอุณหภูมิของฟิล์มอาหารไม่คงที่ตลอดความหนาฟิล์มอย่างแท้จริง ทำให้การแพร่ของความชื้นภายในฟิล์มอาหารเกิดจากทั้งแรงขับเคลื่อนของผลต่างของความชื้น และผลต่างของอุณหภูมิของฟิล์มอาหาร ซึ่งจากเหตุผลดังกล่าวจะพบว่าขัดแย้งกับสมมติฐาน ซึ่งถือว่าการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่สมดุลง่ายมาก แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อน และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลจะพบว่า ที่สภาวะการทดลองโดยใช้กล้วยหอมที่มีระดับการสุก PCI 6 ความเข้มข้นของกล้วยบด 80% w/w อุณหภูมิผิวลูกกลิ้ง 130 °C ความหนาฟิล์ม 0.15 mm ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนมีค่ามากกว่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลถึง 5200 เท่า รวมทั้งฟิล์มอาหารมีความหนาน้อยมาก จนอาจถือได้ว่าไม่มีผลต่างของอุณหภูมิภายในแผ่นฟิล์ม [10] ดังนั้นการที่กำหนดให้อุณหภูมิฟิล์มอาหารคงที่ตลอดช่วงความหนาของฟิล์มอาหารน่าจะยอมรับได้ และถือว่าแรงขับเคลื่อนจากผลต่างของอุณหภูมิมีผลต่อการแพร่เล็กน้อยเท่านั้น

จากตารางที่ 3 พบว่า ค่าพลังงานกระตุ้นของการแพร่ความชื้นที่คำนวณได้อยู่ในช่วง 42.03-55.73 kJ/mol สูงกว่าค่าพลังงานกระตุ้นของการแพร่ความชื้นของกล้วยที่อบแห้งแบบอากาศร้อน (อุณหภูมิอากาศร้อน 50-70 °C) ซึ่งมีค่าระหว่าง 15.50-25.32 kJ/mol [6] ซึ่งอาจเป็นผลมาจากน้ำตาลในกล้วยทั้งสองชนิดมีรูปแบบต่างกัน มีผลให้การแพร่ของน้ำภายในเนื้อกล้วยแตกต่างกัน กล่าวคือ น้ำตาลในผลกล้วยจะอยู่ในรูป amorphous เมื่อเตรียมเป็นกล้วยบดเพื่อใช้อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งหมุน น้ำตาลจะอยู่ในรูปของสารละลาย [10] ซึ่งต้องใช้พลังงานในการแพร่ความชื้นสูงกว่า ดังนั้นค่าพลังงานกระตุ้นของการแพร่ความชื้นในกล้วยบดจึงสูงกว่าค่าพลังงานกระตุ้นในผลกล้วย

ผลของปัจจัยการผลิตต่ออัตราการเกิดสีน้ำตาลและค่าคงที่ของอัตราการเกิดสีน้ำตาล

การเกิดสีน้ำตาลของกล้วยขณะอบแห้งอาจเกิดจากปฏิกิริยา Maillard และปฏิกิริยา Caramelization อย่างใดอย่างหนึ่ง หรืออาจเกิดขึ้นพร้อมกัน อย่างไรก็ตาม สำหรับในงานวิจัยนี้ การเปลี่ยนแปลงสีของกล้วยผงบระหว่างการอบแห้ง คาดว่าเกิดจากผลของปฏิกิริยา Caramelization เพียงอย่างเดียว เนื่องจากในการทดลองใช้อุณหภูมิในการอบแห้งกล้วยสูงมาก (120, 130 และ 140 °C) และได้เติม Potassium metabisulfite (KMS) เพื่อยับยั้งการเกิดสีน้ำตาลเนื่องจากการกระทำของเอนไซม์ที่เกิดขึ้นระหว่างการเตรียมกล้วยบด ซึ่ง KMS มีผลในการยับยั้งปฏิกิริยา Maillard ระหว่างการอบแห้ง แต่มีบทบาทการยับยั้งปฏิกิริยา Caramelization น้อยมาก [11] ดังนั้น การเกิดสีน้ำตาลในการทดลองนี้น่าจะเกิดจากปฏิกิริยา Caramelization เท่านั้น

ในการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลแบบไม่ใช้เอนไซม์ของงานวิจัยที่ผ่านมา จะวัดการเปลี่ยนแปลงสารสีน้ำตาลที่เกิดขึ้นจากคุณสมบัติทางกายภาพของอาหาร แทนการวัดความเข้มข้นของสารสีน้ำตาลที่เกิดขึ้นโดยตรง ซึ่งอาจวัดสีของตัวอย่างด้วยระบบ Hunter Lab หรือใช้วิธีการสกัดสารสีน้ำตาลจากตัวอย่าง แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance, Abs.) ที่ความยาวคลื่น 420 nm แต่เนื่องจากตัวอย่างของงานวิจัยนี้คือ กล้วยบด (ความเข้มข้น 80-90%) ที่ผ่านการอบแห้งเป็นเวลาดังๆ ดังนั้นสถานะของตัวอย่างจึงมีการเปลี่ยนแปลงจากของเหลวเป็นของแข็งเมื่อสิ้นสุดการอบแห้ง จึงทำให้การวัดสีด้วยระบบ Hunter มีความคลาดเคลื่อนจากผลของขนาดอนุภาคที่ใช่วัด กล่าวคือ จากการวัดสีของตัวอย่างเดียวกัน แต่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกันจะให้ค่าสี Lab ไม่เท่ากัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธีวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 420 nm แสดงการเกิดสีน้ำตาลในกล้วยอบแห้ง เพื่อหลีกเลี่ยงความคลาดเคลื่อนดังกล่าวที่อาจเกิดขึ้น

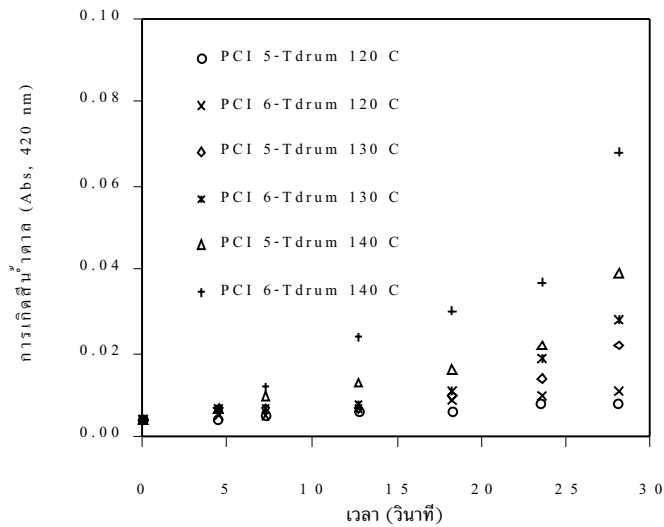
จากการวิเคราะห์ข้อมูลการเกิดสีน้ำตาลพบว่า การเปลี่ยนแปลงการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลของกล้วยระหว่างการอบแห้งเป็นปฏิกิริยาอันดับใกล้เคียงกับหนึ่ง เนื่องจากกลไกการเกิดปฏิกิริยามีความซับซ้อน เกิดจากขั้นตอนย่อยหลายขั้นตอน ในงานวิจัยนี้เลือกใช้อันดับของปฏิกิริยาที่เป็นจำนวนเต็มแทนแบบทศนิยม เพราะสะดวกต่อการใช้ประโยชน์ โดยมีความผิดพลาดไม่มาก การเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างตามปฏิกิริยาอันดับหนึ่งจึงเป็น

$$\ln\left(\frac{B}{B_0}\right) = kt \quad (3)$$

โดย B_0 , B = ค่าการเกิดสีน้ำตาลของตัวอย่างที่เวลาเริ่มต้นและที่อบแห้งเป็นเวลา t (Abs., 420 nm); k = ค่าคงที่ของอัตราการเกิดสีน้ำตาล และ t = เวลาการอบแห้ง (s)

การเปลี่ยนแปลงการเกิดสีน้ำตาลของกล้วยที่มีระดับการสุก PCI 5 และ 6 แสดงในรูปที่ 3 จากกราฟจะเห็นว่า กล้วยหอมที่มีระดับการสุกสูงมีอัตราการเกิดสีน้ำตาลเร็วกว่ากล้วยที่มีระดับการสุกต่ำ ทั้งนี้อาจเป็นผลจาก กล้วยที่มีระดับการสุกสูงมีปริมาณน้ำตาลสูงกว่ากล้วยที่มีระดับการสุกต่ำ ซึ่งน้ำตาลเป็นสารตั้งต้นของปฏิกิริยา Caramelization ดังนั้นเมื่อกล้วยมีปริมาณน้ำตาลสูงจึงมีผลให้อัตราการเกิดสีน้ำตาลเร็วขึ้น

เมื่อทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยการผลิตที่มีต่อค่าคงที่ของอัตราการเกิดสีน้ำตาล โดยพิจารณาอิทธิพลของปัจจัยหลัก อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย พบว่ามีเพียงปัจจัยจากระดับการสุกและอุณหภูมิผิวลูกกล้วยเท่านั้น ที่มีผลต่อค่าคงที่ของอัตราการเกิดสีน้ำตาลอย่างมีนัยสำคัญยิ่งที่ $P < 0.001$ ส่วนความเข้มข้นของกล้วยบดและความหนาของฟิล์มไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าคงที่ของอัตราการเกิดสีน้ำตาล แต่มีผลอย่างมีนัยสำคัญในระดับปัจจัยร่วม ($P < 0.05$) ขณะที่อิทธิพลร่วมระหว่างระดับการสุกและอุณหภูมิผิวลูกกล้วยมีผลอย่างมีนัยสำคัญยิ่งต่อค่าคงที่ของอัตราการเกิดสีน้ำตาลเช่นกัน ($P < 0.01$)



รูปที่ 3 ผลของระดับการสุกของกล้วยหอมและอุณหภูมิผิวลูกกล้วยต่อการเปลี่ยนแปลงการเกิดสีน้ำตาล ระหว่างการอบแห้งที่ความเข้มข้นของกล้วยบด 80% w/w และความหนาฟิล์ม 0.15 mm

ผลของระดับการสุกที่มีต่อค่าคงที่ของอัตราการเกิดสีน้ำตาล แสดงในตารางที่ 4 จะเห็นว่ากล้วยหอมที่มีระดับการสุก PCI 6 มีค่าคงที่ของอัตราการเกิดสีน้ำตาลเฉลี่ยสูงกว่าที่ระดับการสุก PCI 5 อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ $P < 0.05$ ทั้งนี้อาจเป็นผลจากการลดอินทรีย์ในกล้วยบดมีส่วนในการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล ซึ่งค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา Caramelization ของสารละลายซูโครส ที่อุณหภูมิ 45-65 °C pH 4-6 มีค่าสูงสุดที่ pH เท่ากับ 5 [12] อันเป็นสภาวะของกล้วยบดที่ระดับการสุก PCI 6

ตารางที่ 4 ค่าคงที่ของอัตราการเกิดสีน้ำตาล (k) เนื่องจากผลของปัจจัยหลัก

ระดับการสุก	ค่าเฉลี่ย $k^1(1/s)$	ความหนาฟิล์ม (mm)	ค่าเฉลี่ย $k^1(1/s)$
PCI 5	0.0548 ^{a1}	0.15	0.0627 ^a
PCI 6	0.0695 ^b	0.30	0.0615 ^a
(lsd)	(0.0012)	(lsd)	(0.0022)
ความเข้มข้น (%)		อุณหภูมิผิวลูกกล้วย (°C)	
80	0.0617 ^a	120	0.0329 ^a
90	0.0625 ^a	130	0.0629 ^b
(lsd)	(0.0013)	140	0.0906 ^c
		(lsd)	(0.0015)

¹อักษรกำกับบนที่เหมือนกันในปัจจัยการผลิตเดียวกัน หมายถึง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$)

²least significant difference หมายถึง ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างระดับของปัจจัยนั้น

อุณหภูมิผิวลูกกล้วยมีผลต่อค่าคงที่ของอัตราการเกิดสีน้ำตาล ดังแสดงในตารางที่ 4 โดยพบว่าค่าคงที่ของอัตราการเกิดสีน้ำตาลเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิผิวลูกกล้วยสูงขึ้น ซึ่งอุณหภูมิเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อปฏิกิริยา Caramelization [13] เมื่ออุณหภูมิของระบบสูงขึ้นมีผลให้

สัดส่วนของโมเลกุลน้ำตาลที่มีพลังงานสูงกว่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยามากขึ้น จึงทำให้ค่าคงที่ของอัตราการเกิดสีน้ำตาลสูงขึ้น [14] นั่นคือ ที่อุณหภูมิผิวลูกกลิ้ง 140 °C ให้ค่าคงที่ของอัตราการเกิดสีน้ำตาลเฉลี่ยสูงสุด รองลงมาคือที่ 130 และ 120 °C ตามลำดับ

ผลของปัจจัยร่วมที่มีต่อค่าคงที่ของอัตราการเกิดสีน้ำตาล ดังแสดงในตารางที่ 5 พบว่าที่ระดับการสุก PCI 5 และ 6 ค่าคงที่ของอัตราการเกิดสีน้ำตาลเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เมื่ออุณหภูมิผิวลูกกลิ้งสูงขึ้น และลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่ออุณหภูมิผิวลูกกลิ้งต่ำลง โดยที่ระดับการสุก PCI 5 และอุณหภูมิผิวลูกกลิ้ง 120 °C ให้ค่าคงที่ของอัตราการเกิดสีน้ำตาลเฉลี่ยต่ำสุด ขณะที่ค่าเฉลี่ยสูงสุดที่ PCI 6 และอุณหภูมิผิวลูกกลิ้ง 140 °C

ตารางที่ 5 ค่าคงที่ของอัตราการเกิดสีน้ำตาล (k) เนื่องจากผลของระดับการสุกและอุณหภูมิผิวลูกกลิ้ง

ระดับการสุก	อุณหภูมิผิวลูกกลิ้ง (°C)		
	120	130	140
PCI 5	0.0263 ^a	0.0569 ^c	0.0811 ^e
PCI 6	0.0395 ^b	0.0688 ^d	0.1001 ^f

อักษรกำกับบนที่เหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ P<0.05

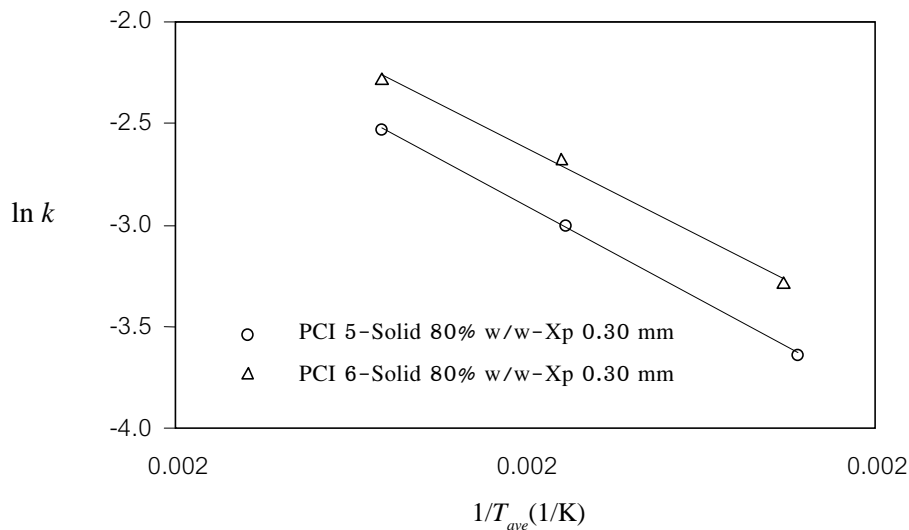
ผลของปัจจัยร่วมระหว่างความเข้มข้นของกล้วยบดและความหนาของฟิล์มต่อค่าคงที่ของอัตราการเกิดสีน้ำตาล ดังแสดงในตารางที่ 6 พบว่า ที่ระดับความหนาฟิล์ม 0.30 mm ค่าคงที่ของอัตราการเกิดสีน้ำตาลเฉลี่ยไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกล้วยบดจาก 80% w/w เป็น 90% w/w ส่วนที่ระดับความหนาฟิล์ม 0.15 mm ค่าคงที่ของอัตราการเกิดสีน้ำตาลเฉลี่ยเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อความเข้มข้นของกล้วยบดเพิ่มขึ้น อาจเป็นผลจากสภาวะความเป็นกรดต่างของกล้วยบด ดังนั้น ที่สภาวะความเข้มข้นของกล้วยบด 90% w/w จึงเกิดปฏิกิริยาได้เร็วกว่า อีกทั้งอุณหภูมิผิวฟิล์มอาหารอาจไม่คงที่ตลอดช่วงความหนาฟิล์มอย่างแท้จริง โดยฟิล์มอาหารในตำแหน่งที่ใกล้กับแหล่งให้ความร้อน (ผิวลูกกลิ้ง) มากกว่า อาจมีอุณหภูมิสูงกว่าที่ตำแหน่งอื่นๆ ทำให้ที่ความหนาฟิล์ม 0.15 mm และที่ระดับความเข้มข้นของกล้วยบด 90% w/w มีอัตราการเกิดสีน้ำตาลเร็วกว่า ทำให้มีค่าคงที่ของอัตราการเกิดสีน้ำตาลเฉลี่ยสูงกว่า

ตารางที่ 6 ค่าคงที่ของอัตราการเกิดสีน้ำตาล (k) เนื่องจากผลของความเข้มข้นของกล้วยบดและความหนาของฟิล์ม

ความหนาของฟิล์ม (mm)	ความเข้มข้นของกล้วยบด (% w/w)	
	80	90
0.15	0.0615 ^a	0.0640 ^b
0.30	0.0620 ^a	0.0611 ^a

อักษรกำกับบนที่เหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ P<0.05

ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งกับค่าคงที่ของอัตราการเกิดสีน้ำตาล สามารถแสดงในรูปของสมการ Arrhenius เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\ln k$ กับส่วนกลับของอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิผิวลูกกลิ้งและผิวฟิล์ม ($1/T_{ave}$) จะได้กราฟตามรูปที่ 4 ค่าพลังงานกระตุ้นของการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลและ $\ln k_0$ ได้จากความชันและจุดตัดแกนตั้งของกราฟตามลำดับ [14] ในตารางที่ 7 แสดงค่าพลังงานกระตุ้นของการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลและ $\ln k_0$ ที่สภาวะการทดลองต่างๆ



รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln k$ กับ $1/T_{ave}$
(PCI = ระดับการสุกของกล้วยหอม Solid = ความเข้มข้นของกล้วยบด Xp = ความหนาฟิล์ม)

ตารางที่ 7 ค่าพลังงานกระตุ้นของการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล (E_{ad}) และ $\ln k_0$

ระดับการสุก	ความเข้มข้นกล้วยบด (%)	ความหนาฟิล์ม (mm)	E_{ad}^1 (kJ/mol)	$\ln k_0^1$
PCI 5	80	0.15	76.84	20.23
		0.30	79.34	21.01
	90	0.15	76.54	20.18
		0.30	77.81	20.52
PCI 6	80	0.15	63.79	16.52
		0.30	64.78	16.84
	90	0.15	64.22	16.69
		0.30	65.75	17.14

¹ เฉลี่ยจากผลการทดลอง 2 ซ้ำ

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยการผลิตต่อค่าพลังงานกระตุ้นของการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลและ $\ln k_0$ พบว่า ระดับการสุกมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าทั้งสองที่ $P < 0.01$ โดยที่ระดับการสุก PCI 5 ค่าเฉลี่ยของค่าพลังงานกระตุ้นของการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล และ $\ln k_0$ เท่ากับ 77.63 kJ/mol และ 20.48 ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าที่ระดับการสุก PCI 6 เท่ากับ 64.63 kJ/mol และ 16.79 ตามลำดับ แสดงว่ากล้วยที่สุกมากต้องการพลังงานเพื่อใช้ในการเกิดปฏิกิริยา Caramelization ต่ำกว่ากล้วยที่สุกน้อย จึงเกิดปฏิกิริยาได้ง่ายกว่า

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของอัตราการเกิดสีน้ำตาลกับระดับการสุกของกล้วยซึ่งแสดงในรูปของปริมาณน้ำตาลในกล้วยหอม และอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิผิวลูกกล้วยและผิวฟิล์มตามสมการของ Arrhenius [14] ได้จากการวิเคราะห์สมการถดถอยเชิงเส้นโค้งแบบพหุ (Multiple Non-Linear Regression) ดังนี้

$$k = \exp\left(-0.39X + 22.89 - \left(\frac{-1.46X + 87.74}{RT_{ave}}\right)\right) \quad (4)$$

ค่าพลังงานกระตุ้นของการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่คำนวณได้อยู่ระหว่าง 63.79-79.34 kJ/mol ซึ่งอยู่ในช่วงเดียวกับค่าพลังงานกระตุ้นของการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลแบบไม่ใช้เอนไซม์ในอาหารอบแห้งทั่วไป (38-167 kJ/mol) [14] สำหรับค่าพลังงานกระตุ้นของการเกิดปฏิกิริยา Caramelization ในอาหารอบแห้งไม่มีผลงานวิจัยรายงานไว้ แต่ในระบบแบบจำลองมีค่าพลังงานกระตุ้นของการเกิดปฏิกิริยา Caramelization อยู่ในช่วง 104.6-200.83 kJ/mol ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำตาลในระบบ และพบว่าค่าพลังงานกระตุ้นของการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลของกล้วยหอมที่ได้ใกล้เคียงกับผลไม้สดแช่แข็งที่ได้รับความร้อน (อุณหภูมิ 56-94 °C) ซึ่งมีค่าระหว่าง 45.06-67.78 kJ/mol [15]

4. สรุป

จากผลการศึกษาข้างต้นจะเห็นว่า ระดับการสุกของกล้วยหอมและอุณหภูมิอบแห้ง มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่ออัตราการอบแห้งและการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลของกล้วยผง โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิภาพมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อใช้กล้วยที่สุกน้อยและอบแห้งที่อุณหภูมิผิวลูกกล้วยสูง ส่วนอัตราการเกิดสีน้ำตาลมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้กล้วยที่สุกน้อยเช่นกัน แต่อบแห้งที่ระดับอุณหภูมิผิวลูกกล้วยต่ำ ซึ่งสภาวะการผลิตกล้วยผงที่ให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นต่ำ มีสีเหลืองสด ไม่คล้ำ จะต้องมีความชื้นประสิทธิภาพแพร่ความชื้นประสิทธิภาพสูงและมีอัตราการเกิดสีน้ำตาลต่ำ ถ้าเลือกใช้สภาวะการผลิตที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิภาพสูงจะส่งผลให้อัตราการเกิดสีน้ำตาลสูงด้วย ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการให้เกิดในผลิตภัณฑ์ ดังนั้นสภาวะการผลิตที่เหมาะสมคือที่ระดับการสุกของกล้วยหอม PCI 5 อุณหภูมิผิวลูกกล้วย 130 °C และใช้ระยะห่างระหว่างลูกกล้วยและลูกกล้วยเท่ากับ 0.15 mm เนื่องจากให้อัตราการอบแห้งที่สูงกว่าที่ 0.30 mm รวมทั้งเตรียมกล้วยบดให้มีความเข้มข้นเท่ากับ 80% w/w ซึ่งจะให้ค่าคงที่ของอัตราการเกิดสีน้ำตาลต่ำกว่าที่ 90% w/w

เอกสารอ้างอิง

1. Mao, W. W., 1974, "Banana Fruit Technology: I. Dehydration of Banana Puree by Drum Drying. II. Properties of Amylase in Banana", *Ph.D. Thesis*, Department of Food Technology, Cornell University, New York, 150 p.
2. AOAC., 1995, *Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists*, 16th ed., The Association of Official Agricultural Chemists, Virginia.
3. Henig, Y. and Mannheim, C. H., 1971, "Drum Drying of Tomato Concentrate," *Food Technology*, Vol. 25, No. 2, pp. 59-62.
4. ชัยรัตน์ ตั้งดวงดี, 2535, "การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งหมุน", *วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี*, 117 หน้า.
5. Sankat, C. K., Castaigne, F., and Maharaj, R., 1996, "The Air Drying Behaviour of Fresh and Osmotically Dehydrated Banana Slices," *International Journal of Food Science and Technology*, Vol. 31, pp. 123-135.
6. Nogueira, R. I. and Park, K. J., 1992, "Drying Parameters to Obtain Banana Passa", *Drying'92*, Elsevier Science Publisher, New York, pp. 874-883.
7. ศิวะ อัจฉริยวิริยะ และ สมชาย โสภณรณฤทธิ์, 2532, การศึกษาหาพารามิเตอร์ที่จำเป็นต้องใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งกล้วยน้ำว้า, *วิศวกรรมสาร*, เล่มที่ 4, หน้า 80.
8. Zogzas, N. P., Maroulis, Z. B., and Marinou-Kouris, D., 1996, "Moisture Diffusivity Data Compilation in Foodstuffs," *Drying Technology*, Vol. 14, No. 10, pp. 2225-2253.
9. Okos, R. M., Narsimhan, G., Singh, K. R., and Weitnauer, C. A., 1992, "Food Dehydration", *Handbook of Food Engineering*, Marcel Dekker Inc., New York, pp. 463-475.
10. Aguilera, J. M. and Stanley, D. M., 1990, *Microstructural Principles of Food Processing and Engineering*, Elsevier Science Publishers Ltd, London, pp. 297, 310.
11. Brekke, J. E. and Allen, L., 1967, "Dehydrated Bananas," *Food Technology*, Vol. 21, pp. 101-105.
12. Buera, M. P., Chirife, J., Resnik, L., and Lozano, R. D., 1987, "Nonenzymatic Browning in Liquid Model Systems of High Water Activity: Kinetics of Color Changes due to Caramelization of Various Single Sugars," *Journal of Food Science*, Vol. 52, No. 4, pp. 1059-1062.

13. Wedzicha, B. L., 1984, *Chemistry of Sulphur Dioxide in Foods*, Elsevier Applied Science Publishers, New York, pp. 205-206, 219-226.
14. Villota, R. and Hawkes, J. G., 1992, "Reaction Kinetics in Food Systems", *Handbook of Food Engineering*, Marcel Dekker Inc., New York, pp. 39-58, 118-123.
15. Lozano, J. E. and Ibarz, A., 1997, "Color Changes in Concentrated Fruit Pulp during Heating at High Temperature," *Journal of Food Engineering*, Vol. 31, No.3, pp. 365-373.