

บทที่ 3 การหาสถานะที่เหมาะสมสำหรับการฟัฟฟิงกล้วยแผ่นอบกรอบ ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง

3.1 บทนำ

กล้วยประกอบไปด้วยวิตามิน A, B และ C อีกทั้งยังมีโปรแตสเซียมและใยอาหารที่สูง ซึ่งส่วนประกอบดังกล่าวล้วนมีประโยชน์ต่อสุขภาพ นอกจากนี้ยังสามารถช่วยป้องกันโรคความดันโลหิตสูง และโรคหัวใจ การทำงานของระบบประสาท และแผลในกระเพาะอาหาร เป็นต้น ส่วนใหญ่แล้วนิยมรับประทานกล้วยในรูปของผลสด แต่เนื่องจากกล้วยมีระยะเวลาการเก็บรักษาได้ไม่นาน จึงเกิดการเน่าเสียได้ง่าย ดังนั้น การแปรรูปจึงเป็นวิธีการที่สามารถลดการสูญเสียดังกล่าวได้ อีกทั้งยังสามารถเพิ่มมูลค่าให้กับกล้วยได้เช่นกัน ปัจจุบันนิยมแปรรูปกล้วยแผ่นกรอบด้วยการทอด แต่กล้วยทอดอาจจะมีระยะเวลาการเก็บรักษาที่สั้น เนื่องจากมีกลิ่นหืนของน้ำมัน นอกจากนี้แล้ววิธีการอบแห้งก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่ง เพื่อแก้ปัญหากลิ่นหืนในกระบวนการ แต่การอบแห้งอาจจะใช้เวลานาน ส่งผลต่อการหดตัวของผลิตภัณฑ์ได้ ขณะที่เทคนิคการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze drying) สามารถลดการสูญเสียของอาหาร เนื่องจากความร้อน และลดการทำลายเนื้อเยื่อ และโครงสร้างอาหาร ทำให้ได้อาหารแห้งที่มีคุณภาพ (Shishgarha et al., 2002) การอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งเป็นการทำแห้ง (Dehydration) ด้วยการแช่เยือกแข็ง (Freezing) โดยให้น้ำเปลี่ยนสถานะเป็นผลึกน้ำแข็งก่อน แล้วจึงลดความดันเพื่อให้ผลึกน้ำแข็งระเหิด (Sublimation) เป็นไอน้ำด้วยการลดความดันให้ต่ำกว่าบรรยากาศ ซึ่งจะช่วยป้องกันการการหดตัวของรูปร่างวัสดุ (Ratti et al., 2001) ดังนั้นการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง จึงสามารถลดการหดตัวได้มากกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน แต่อย่างไรก็ตามการอบแห้งด้วยวิธีดังกล่าวอาจจะมีข้อจำกัดในระดับอุตสาหกรรม เนื่องจากมีราคาแพง และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการที่สูง ดังนั้นการนำเทคนิคการอบแห้งแบบเยือกแข็งมาประยุกต์ใช้กับวัสดุอาหาร จึงมีข้อจำกัดในการเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้แล้วทางเลือกหนึ่งในการแปรรูปอาหาร เพื่อให้ได้คุณภาพด้านเนื้อสัมผัสใกล้เคียงกับการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งคือ เทคนิคการฟัฟฟิง โดยกระบวนการฟัฟฟิงหรือกระบวนการพองตัว เกิดจากแรงดันไอน้ำที่อยู่ภายในวัสดุเดือด และระเหยอย่างรวดเร็ว ขณะที่ใช้ความร้อนที่สูงด้วยระยะเวลาสั้น ดังนั้นวัสดุจึงเกิดการขยายตัวได้ ซึ่งเทคนิคนี้สามารถพัฒนาด้านการขยายตัวของโครงสร้างภายใน โดยมีหลากหลายวิธีการสำหรับกระบวนการพองตัว เช่น การฟัฟฟิงด้วยเทคนิคฟลูอิดเซชัน การอบแห้งด้วยแรงดันไอน้ำต่ำ (Low-pressure superheated steam drying) ไมโครเวฟ และ (Controlled sudden decompression) เทคนิคการลดความดันอย่างรวดเร็ว เป็นต้น สำหรับเทคนิคฟลูอิดเซชันเป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่มีการถ่ายเทความร้อนที่สูง และอากาศร้อนสัมผัสกับวัสดุได้อย่างทั่วถึง (Reyes et al., 2002) ดังนั้นความร้อน

จึงทำให้ความชื้นที่อยู่ภายในวัสดุระเหยจนกลายเป็นไอน้ำได้อย่างรวดเร็ว และทำให้วัสดุเกิดการขยายตัวได้ดี

งานวิจัยที่ศึกษาปัจจัยของการพффฟที่มีต่อการขยายตัวของวัสดุ เช่น ข้าว (Karel et al., 2007) มันฝรั่ง (Nath et al., 2008, Varnalis et al., 2004, Nath et al., 2007, Shilton et al., 1998) และเมล็ดทานตะวัน (Inoue et al., 2009) ผลจากการศึกษาดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่า อุณหภูมิ และเวลาพффฟ และความชื้นเริ่มต้นก่อนการพффฟเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการขยายตัวของวัสดุ ซึ่งความเหมาะสมของปัจจัยในการพффฟ เพื่อให้เกิดการขยายตัวสูงสุดขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยด้วยกัน เช่น ลักษณะของวัสดุ ขนาด และปัจจัยอื่นๆ นอกจากนี้แล้วคุณภาพของขนมขบเคี้ยว เช่น สี และเนื้อสัมผัสเป็นอีกคุณลักษณะหนึ่งที่มีผลต่อการยอมรับของผู้บริโภค ดังนั้นเพื่อให้ได้คุณภาพที่เหมาะสมภายใต้เงื่อนไขของการพффฟที่หลากหลาย จึงเป็นความยุ่งยาก เนื่องจากความแตกต่างของปัจจัยและตัวแปรการออกแบบการทดลองด้วยฟลูแฟคทอเรียลเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในการหาเงื่อนไขที่เหมาะสม (Fnides et al., 2011, Xin et al., 2008) โดยการออกแบบด้วยฟลูแฟคทอเรียล ทำให้ได้ข้อมูลสมบูรณ์เกี่ยวกับความสัมพันธ์ของปัจจัยที่หลากหลายในการทดสอบ ดังนั้นเพื่อค้นหาเงื่อนไขที่เหมาะสม วิธีการพื้นผิวตอบสนองเป็นเทคนิคทางสถิติที่นำมาใช้ในการหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการ (Qing et al., 2010) วิธีการดังกล่าวเป็นเทคนิคการวิเคราะห์ทางสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลจากการออกแบบการทดลอง เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของแต่ละผลตอบสนอง (Giovanni et al., 1983)

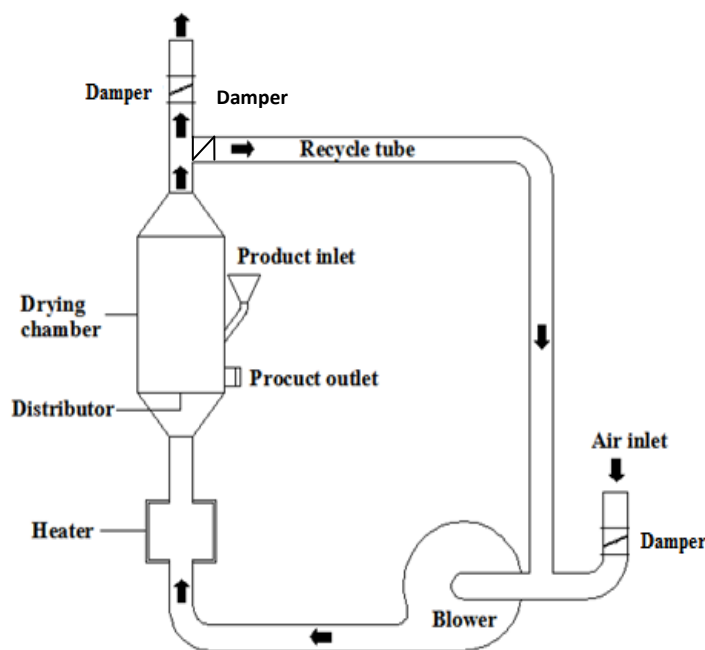
ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการศึกษาเพื่อศึกษาหาตัวแปรในการพффฟ ได้แก่ ความชื้นเริ่มต้นก่อนการพффฟ อุณหภูมิ และเวลาในการพффฟ ที่มีผลต่อคุณภาพของกล้วยแผ่นอบกรอบ ได้แก่ เนื้อสัมผัส สี และการขยายตัว การหาสภาวะที่เหมาะสมด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนองสามารถนำมาประยุกต์เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมภายใต้คุณภาพโดยรวมดังกล่าว

3.2 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.2.1 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดด้วยอากาศร้อน

เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดโดยใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลาง แสดงดังรูปที่ 3.1 ซึ่งมีส่วนประกอบดังนี้ ห้องอบแห้งเป็นรูปทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 cm สูง 140 cm อุปกรณ์ให้ความร้อนใช้หลอดความร้อนขนาด 18 kW โดยมี temperature controller เป็นตัวควบคุมให้ได้อุณหภูมิอบแห้งตามที่ต้องการ พัดลมที่ใช้ในการอบแห้งเป็นพัดลมชนิดแบบแรงเหวี่ยงใบพัดโค้ง

หลังโดยใช้มอเตอร์ขนาด 1.5 kW เป็นตัวขับเคลื่อนพัดลม และมีตัวปรับความเร็วรอบของพัดลมให้ได้ อัตราการไหลของอากาศตามต้องการ และมีระบบการนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่ 80% โดยใช้ล้นปีก ผีเสื้อที่ทางออกของเครื่องอบแห้ง และที่ท่ออากาศเวียนกลับ เพื่อใช้สำหรับปรับปริมาณอากาศ ไหลเวียนกลับ



รูปที่ 3.1 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบดด้วยอากาศร้อน

3.2.2 การเตรียมตัวอย่าง

กล้วยหอมทองระยะสุกที่ 3 (*Musa Sapientum* L.) ซึ่งมีปริมาณของแข็งละลายได้ในช่วง 17-18 °Brix โดยความชื้นเริ่มต้นของกล้วยแผ่นก่อนการฟritที่ประมาณ 300-400% d.b. ก่อนการทดลอง นำกล้วยมาปอกเปลือก และหั่นเป็นรูปทรงแบบแผ่น โดยมีความหนาประมาณ 3.5 mm จากนั้นจึงนำกล้วยไปแช่ในสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ที่ความเข้มข้น 0.07% (w/v) นาน 5 นาที ซึ่งเพียงพอต่อการยับยั้งปฏิกิริยาสีน้ำตาล หลังจากนั้นนำตัวอย่างมาซับน้ำด้วยทิชชู และนำไปจัดเรียงบนตระแกรงก่อนเข้าเครื่องอบแห้ง

3.2.3 กระบวนการฟฟิง

ขั้นตอนการฟฟิงกล้วยด้วยลมร้อนประกอบด้วย 3 ขั้นตอน โดยในขั้นตอนแรกนำกล้วยไปอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 90°C ซึ่งใช้ความเร็วเฉลี่ยของอากาศก่อนเข้าห้องอบแห้งประมาณ 2 m/s และอบแห้งกล้วยให้เหลือความชื้นประมาณ 15 25 และ 35% d.b. จากนั้นนำกล้วยไปผ่านกระบวนการฟฟิงด้วยฟลูอิดไคเซชันที่อุณหภูมิอากาศร้อน 140 160 และ 180°C โดยใช้เวลาใน

การพ่นผงประมาณ 1 1.5 และ 2 นาที่ ด้วยความเร็วลมอากาศก่อนเข้าห้องอบแห้งประมาณ 3.5 m/s และความเร็วต่ำสุดประมาณ 2.4 m/s ซึ่งในขั้นตอนการพ่นผงด้วยฟลูอิดไอเซชันนี้จะใช้กล้วยแผ่นประมาณ 30 g สำหรับการพ่นผงต่อครั้ง ทั้งนี้เนื่องจากหากใช้น้ำหนักมากกว่านี้ กล้วยแผ่นจะไม่เกิดการลอยตัวระหว่างการพ่นผงในเครื่องอบแห้งฟลูอิดไอเซชัน หลังจากนั้นจึงนำตัวอย่างกล้วยที่ผ่านการพ่นผงไปอบแห้งด้วยลมร้อนที่สภาวะเดียวกับขั้นตอนแรกจนกระทั่งได้ความชื้นสุดท้ายที่ต้องการประมาณ 4% d.b.

3.2.4 การหาความชื้นของกล้วย

ในการหาน้ำหนักแห้งของผลไม้อบตามวิธีมาตรฐานด้วยสุญญากาศ (Vacuum Oven) ที่อุณหภูมิ 70°C (AOAC, 1995) สำหรับในการศึกษานี้ ทำการหาน้ำหนักแห้งด้วยการใช้ตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 103°C (Mettler, model no, ULE500, Schwabach, Germany) เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ซึ่งความชื้นที่คำนวณมีความคลาดเคลื่อนประมาณ 0.4-0.6% เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งด้วยสุญญากาศ การหาน้ำหนักแห้งสามารถทำได้โดยการนำเนื้อผลไม้ไปบดหรือสับให้ละเอียดประมาณ 3-5 g และนำไปอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน แล้วนำมาชั่งน้ำหนักหลังจากอบแห้งจะได้น้ำหนักแห้งของตัวอย่าง แล้วคำนวณเป็นความชื้นมาตรฐานแห่งดังสมการที่ 3.1

$$M_d = \left(\frac{w - d}{d} \right) \quad (3.1)$$

เมื่อ	M_d	=	ความชื้นมาตรฐานแห้ง, เศษส่วน
	w	=	มวลของวัสดุ, g
	d	=	มวลของวัสดุแห้ง (ไม่มีน้ำ), g

3.2.5 การทดสอบคุณภาพด้านการหดรตัว

การทดสอบคุณภาพด้านการหดรตัวของกล้วยแผ่นใช้วิธีแทนที่ปริมาตรกล้วยในของแข็งทั้งก่อนและหลังการอบแห้ง ซึ่งแต่ละการทดลองใช้กล้วยแผ่นประมาณ 10 ชิ้น โดยของแข็งที่ใช้ทดสอบคือ Glass Beads มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.106-0.212 mm (Hwang และ Hayakawa, 1980) โดยทำการหาความหนาแน่นเฉลี่ยของ Glass Beads (ρ_b) ตามสมการที่ (3.2) และการหาปริมาตรของกล้วยแผ่น โดยการนำ Glass Beads มาใส่ลงในกระบอกตวงซึ่งใส่ประมาณครึ่งหนึ่งของกระบอกตวง และนำกล้วยที่ต้องการหาปริมาตรวางลงบน Glass Beads แล้วเท Glass Beads ใส่ให้เต็มกระบอกตวง จากนั้นนำไปชั่ง และบันทึกค่าน้ำหนักต่างๆ และคำนวณหาปริมาตรของกล้วยได้จากสมการที่ (3.3)

จากนั้นนำผลการคำนวณปริมาตร เพื่อคำนวณหาร้อยละการหดตัวเทียบกับปริมาตรของกล้วยสดได้จากสมการ (3.4)

$$\rho_b = \frac{M_b}{V_b} \quad (3.2)$$

$$V = \frac{M_b - [M_{s+b} - M_v - M_s]}{\rho_b} \quad (3.3)$$

$$\%Shrinkage = \frac{V_0 - V}{V_0} \times 100 \quad (3.4)$$

โดย	ρ_b	คือ ความหนาแน่นของ Glass Beads, g/cm ³
	M_b	คือ น้ำหนักของ Glass Beads ในกระบอกตวง, g
	V_b	คือ ปริมาตรของกระบอกตวง, cm ³
	V_0	คือ ปริมาตรของกล้วยแผ่นสด, cm ³
	V	คือ ปริมาตรของกล้วยหลังจากการอบแห้ง, cm ³
	M_b	คือ น้ำหนักของ Glass Beads ในกระบอกตวง, g
	M_{s+b}	คือ น้ำหนักของกระบอกตวงและน้ำหนักของ Glass Beads, g
	M_v	คือ น้ำหนักของกระบอกตวง, g
	M_s	คือ น้ำหนักของตัวอย่างกล้วยที่เงื่อนไขต่างๆ, g

3.2.6 การทดสอบคุณภาพด้านสี

คุณภาพด้านสีของกล้วยแผ่นทำการวัดโดยใช้เครื่องวัดสียี่ห้อ Hunter Lab รุ่น ColorFlex โดยวัดค่าสีของกล้วยแผ่นตามระบบ Hunter ซึ่งแสดงในเทอมของ L , a และ b โดย L (Lightness Parameter) แสดงค่าความสว่าง a (Redness Parameter) แสดงค่าสีแดงและสีเขียว และ b (Yellowness Parameter) แสดงค่าสีเหลืองและน้ำเงิน นอกจากนี้แล้วคุณภาพด้านสีในแง่ของค่าความสว่างและค่าเฉดสี (hue angle) ซึ่งคำนวณมาจาก $(\theta) = (b/a)$ โดยที่ค่าเฉดสีของผลิตภัณฑ์มีค่าเข้าใกล้ 0° จะจัดอยู่ในกลุ่มสีแดง และค่าเข้าใกล้ 90° จะจัดอยู่ในกลุ่มสีเหลือง โดยก่อนจะวัดสีของกล้วยด้วยเครื่องวัดดังกล่าว ต้องทำการทดสอบเปรียบเทียบ (Calibrate) ด้วยแผ่นสีมาตรฐาน ที่มีลักษณะเป็นแผ่นแบนสีด้ามวางบนช่องทดสอบของเครื่อง จากนั้นนำแผ่นสีวางช่องทดสอบ เมื่อทำการทดสอบเปรียบเทียบเสร็จแล้วจึงเข้าสู่โหมดสำหรับการวัด ในการวัดสีของกล้วยจะใช้กล้วย 10 ตัวอย่าง และแต่ละตัวอย่างถูก

วัดที่ตำแหน่งต่างๆประมาณ 5 จุดต่อหนึ่งตัวอย่างโดยการนำตัวอย่างของกล้วยมาวางลงบนช่องทดสอบแล้วครอบด้วยฝาใส่อีกชั้นจากนั้นจึงทำการวัด

3.2.7 การทดสอบคุณภาพด้านเนื้อสัมผัส

การทดสอบคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสหลังการอบแห้งจะทดสอบโดยใช้เครื่อง Texture analyzer รุ่น TA-XT. plus (Stable Microsystems Texture Technologies Inc., UK โดยจะทำการทดสอบในลักษณะของแรงกด ใช้หัวกดแบบ (Cutting Probe : HDP-BSK) และความเร็วในการกด 2 mm/s กดจนกระทั่งตัวอย่างแยกออกจากกัน พิจารณาคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของกล้วยจากค่าความแข็ง (Hardness) จำนวนยอด (Number of Peaks) ที่มีค่า Threshold Force ตั้งแต่ 30 g ขึ้นไป และความชันเริ่มต้น (Initial Slope) ซึ่งค่า Threshold Force คือผลต่างของแรงที่กระทำต่อกล้วย ณ จุดสุดท้ายของความชันค่าหนึ่งของเส้นกราฟแรงกับระยะทาง

3.2.8 การออกแบบการทดลองและวิเคราะห์สถิติ

สำหรับการศึกษานี้ตัวแปรอิสระที่นำมาพิจารณาและประเมินผลของปัจจัยในการพuffing ที่มีผลต่อคุณภาพด้านความกรอบของกล้วยได้แก่ ความชื้นก่อนการพuffing (M_c , รหัส X_1) อุณหภูมิ (PT, รหัส X_2) และเวลาในการพuffing (P_t , รหัส X_3) โดยระดับของตัวแปรในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 1 และจำนวนการทดลองในการศึกษานี้ 27 การทดลองจำนวน 2 ซ้ำแสดงผลการทดลองดังตารางที่ 2 ด้วยการออกแบบฟูลแฟคทอเรียลโดยประเมินคุณภาพของกล้วยอบกรอบได้แก่ การหดตัว (Y_1) คุณลักษณะเนื้อสัมผัสด้านความแข็ง (Y_2) ความชันเริ่มต้น (Y_3) จำนวนยอด (Y_4) และคุณภาพด้านสี L-value (Y_5) และ hue angle (Y_6) โดยใช้สมการโพลิโนเมียลกำลังสองดังสมการที่ 3.5 ในการทำนายแต่ละผลตอบสนอง

$$Y_k = b_0 + \sum_{i=1}^3 b_i X_i + \sum_{i=1}^3 b_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j}^3 b_{ij} X_i X_j \quad (3.5)$$

เมื่อ Y_k คือผลตอบสนองของตัวแปรอิสระ X_i และ b_0 คือค่าคงที่ b_i , b_{ii} , b_{ij} แสดงค่าสัมประสิทธิ์ในเทอมของ linear, quadratic และ interaction ตามลำดับ สำหรับ X_i , X_i^2 , X_{ij} แสดงผลของตัวแปรตามในเทอมของ linear, quadratic และ interaction ตามลำดับ

วิเคราะห์ค่าความแปรปรวนด้วย (ANOVA) ซึ่งใช้ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรอิสระในเทอมของ linear, quadratic และ interaction ระดับนัยสำคัญของทุกเทอมในสมการโพลิโนเมียลประเมิน โดยการวิเคราะห์สถิติจาก F-value ที่ระดับนัยสำคัญที่กำหนด $p < 0.05$

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรอิสระสำหรับการศึกษากระบวนการพuffing โดยกำหนดเป็น 3 ปัจจัย 3 ระดับ

Independent variable	Symbol		Level	
	coded	uncoded	coded	uncoded
Intermediate moisture content (% d.b.)	X_1	Mc	-1	15
			0	25
			1	35
Puffing temperature ($^{\circ}\text{C}$)	X_2	PT	-1	140
			0	160
			1	180
Puffing time (min)	X_3	Pt	-1	1
			0	1.5
			1	2

ตารางที่ 3.2 ผลการทดลองที่เงื่อนไขต่างๆ

Exp No.	Code levels			Experimental result					
	X_1	X_2	X_3	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6
1	0	-1	0	13.4	23.1	40.6	12	41.3	64.1
2	0	0	1	6.1	20.1	46.8	23	41.5	59.9
3	0	0	-1	10.6	20.4	45.4	18	45.2	66.0
4	-1	1	0	7.1	22.2	37.9	13	32.8	48.9
5	-1	-1	0	21.5	23.5	35.4	11	43.5	67.4
6	1	1	1	9.6	20.9	40.9	18	37.5	57.2
7	0	0	0	8.2	20.6	47.2	20	43.8	64.1
8	-1	-1	-1	21.4	24.4	31.3	9	43.8	67.8
9	1	0	-1	19.5	26.4	33.1	12	42.4	65.1
10	-1	0	1	12.9	20.8	36.5	15	36.1	54.7
11	-1	-1	1	16.9	24.1	33.5	10	44.1	64.1
12	1	-1	0	22.9	32.1	32.7	9	45.2	65.3
13	1	0	0	16.5	24.8	37.2	13	41.4	65.6
14	0	-1	0	14.1	24.5	41.2	11	42.1	63.3
15	1	1	0	8.5	23.0	39.4	17	39.2	61.3
16	-1	1	-1	6.4	20.9	40.7	16	33.9	54.1
17	-1	-1	0	18.9	24.6	32.8	13	44.9	67.8
18	1	0	1	14.2	26.3	35.9	12	42.9	63.7
19	0	-1	1	11.9	22.5	43.4	13	41.9	64.1
20	1	0	0	18.3	24.8	37.2	13	41.0	65.6
21	1	-1	-1	24.6	32.6	31.6	8	47.1	68.3
22	1	-1	1	20.8	30.8	33.3	8	42.8	35.8
23	-1	1	1	6.4	19.7	40.2	15	31.2	47.9
24	0	-1	-1	15.5	23.3	40.9	7	41.6	65.5
25	-1	1	-1	7.5	21.1	37.4	15	33.7	53.6
26	1	-1	1	18.4	30.8	33.3	8	45.2	35.8
27	0	0	1	5.1	19.8	48.5	25	42.3	60.9
28	0	1	0	2.1	18.4	47.5	24	36.8	56.5
29	1	1	-1	14.5	22.2	36.0	16	40.2	63.5
30	0	1	1	3.5	17.4	51.2	27	32.4	53.6
31	0	-1	-1	14.9	23.3	40.9	7	42.2	65.5
32	-1	1	1	7.5	19.2	35.4	17	31.8	47.7
33	-1	0	0	14.2	22.6	34.2	12	34.2	55.4
34	-1	1	0	8.3	23.6	42.1	15	32.4	49.1

35	1	-1	-1	26.2	33.2	32.4	7	47.1	68.8
36	1	0	1	15.8	25.4	36.4	11	43.5	65.8
37	0	0	0	7.5	21.1	47.5	21	44.0	63.9
38	1	0	-1	18.6	27.5	32.4	11	43.2	66.3
39	-1	-1	1	17.5	23.5	36.7	10	44.3	63.7
40	-1	0	0	13.6	23.4	35.6	11	35.4	55.6
41	0	-1	1	12.8	22.9	42.3	12	41.5	64.4
42	0	0	-1	9.3	21.2	44.8	17	44.8	65.9
43	1	1	0	10.9	24.1	36.5	15	37.4	63.9
44	1	1	1	10	19.8	38.4	19	36.7	62.0
45	0	1	1	2.6	17.6	52.4	28	33.2	53.6
46	-1	0	-1	17.4	21.3	36.3	14	35.4	56.9
47	1	-1	0	24.7	33.4	33.6	8	46.0	69.1
48	-1	-1	-1	23.8	22.8	32.5	10	44.2	68.3
49	0	1	-1	4.1	19.8	46.2	25	37.9	60.3
50	-1	0	1	14.2	19.7	33.5	16	33.1	54.7
51	0	1	-1	5.5	18.4	49.1	25	38.5	62.0
52	0	1	0	2.8	19.5	46.8	26	36.0	56.7
53	1	1	-1	12.4	23.8	35.7	11	41.2	64.0
54	-1	0	-1	15.8	19.5	34.2	15	37.6	57.4

Y_1 = การหดตัว Y_2 = ความแข็ง (N) Y_3 = ความชันเริ่มต้น (N/mm) Y_4 = จำนวนยอด
 Y_5 = ความสว่าง (L) Y_6 = Hue angle

3.2.9 การหาเงื่อนไขที่เหมาะสม

การศึกษานี้ใช้โปรแกรม Minitab Release version 16 สำหรับการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมต่อคุณภาพกลัวยอบกรอบ ในการคำนวณหาสภาวะที่เหมาะสมจำเป็นต้องกำหนดค่าเป้าหมายของแต่ละผลตอบแทนภายใต้ความพึงพอใจ และความเหมาะสมของแต่ละผลตอบแทน ยกตัวอย่างเช่น ค่าเป้าหมายของคุณลักษณะด้านความแข็งกำหนดให้มิต่ำที่สุด เนื่องจากความแข็งมีความสัมพันธ์กับความกรอบ โดยลักษณะความแข็งน้อยแสดงถึงผลิตภัณฑ์ที่มีความกรอบมาก ส่วนค่าเป้าหมายของคุณภาพด้านความชันเริ่มต้น จำนวนยอด ความสว่าง และ hue angle กำหนดให้มิต่ำที่สุด จากผลตอบแทนดังกล่าวจะเห็นได้ว่าแต่ละผลตอบแทนมีการกำหนดค่าเป้าหมายที่ต้องการแตกต่างกัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องปรับให้มีสเกลที่เหมือนกัน โดยสามารถเลือกพิจารณาได้จากค่า (d_k) คือค่าความพึงพอใจของผลตอบแทนมีค่าระหว่าง 0-1 (Derringer et al., 1980) หากกำหนดค่าเป้าหมายของผลตอบแทนสูงสุดสามารถหาได้จากสมการที่ (3.6)

$$d_k = \frac{Y_k - Y_{\min}}{Y_{\max} - Y_{\min}} \quad (3.6)$$

หากกำหนดค่าเป้าหมายของผลตอบสนองต่ำสุดสามารถหาได้จากสมการที่

$$d_k = \frac{Y_{\max} - Y_k}{Y_{\max} - Y_{\min}} \quad (3.7)$$

เมื่อ $Y_{\max}$ และ $Y_{\min}$ คือค่าสูงสุด และค่าต่ำสุดของผลตอบสนอง ตามลำดับ และแต่ละผลตอบสนองสามารถหาความพึงพอใจได้ดังสมการที่ (3.8)

$$d_i = f(y_i)^{w_i} \quad (3.8)$$

การหาจุดที่เหมาะสมของปัจจัยสามารถเลือกใช้ฟังก์ชันความพึงพอใจโดยรวม (Desirability Function) เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยได้ สำหรับการวัดความพึงพอใจโดยรวม (Overall Desirability, D) คือค่า D เป็นค่าของแต่ละผลตอบสนองของ $y(x)$ โดยจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 โดย 1 หมายถึงได้รับความพึงพอใจสูงสุด และ 0 หมายถึงผลตอบไม่ได้รับความพึงพอใจ โดยค่า D สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.9)

$$D = (d_1^{w_1} \times d_2^{w_2} \times \dots \times d_k^{w_k})^{1/(I_1 + I_2 + \dots + I_k)} \quad (3.9)$$

เมื่อ w_k และ I_k คือค่าน้ำหนักของเป้าหมายของแต่ละผลตอบสนอง และค่าความสำคัญระหว่างผลตอบสนองตามลำดับ โดยค่าน้ำหนัก (w) จะพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงของฟังก์ชันความพึงพอใจ ซึ่งค่าน้ำหนักของแต่ละผลตอบสนองสามารถกำหนดได้โดยมีค่าระหว่าง 0.1-10 หากเลือกพิจารณา w ให้มีค่าเท่ากับ 10 แสดงว่าให้ความสำคัญต่อค่าเป้าหมายมาก ดังนั้นค่าผลตอบที่ได้จะมีค่าเข้าใกล้ค่าเป้าหมายมากเช่นกัน และส่งผลต่อระดับความพึงพอใจสูง สำหรับการกำหนดด้วยกรณีดังกล่าวอาจจะเหมาะที่จะนำมาประยุกต์ใช้กับกรณีที่ทำให้ความสำคัญมากต่อการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตามเพียงเล็กน้อย ซึ่งอาจส่งผลต่อการยอมรับของผลตอบสนองมาก เช่น การผสมสัดส่วนของยาที่ได้รับประทานเพื่อรักษาโรคต่างๆ หากสัดส่วนของยาที่เพิ่มขึ้นหรือน้อยกว่าค่าเป้าหมายที่กำหนดซึ่งไม่สามารถยอมรับได้ เนื่องจากอาจเป็นอันตรายต่อผู้ป่วย ดังนั้นงานในลักษณะนี้จึงควรเลือกกำหนดให้ความสำคัญต่อเป้าหมายมาก ขณะเดียวกันหากเลือก w มีค่าเท่ากับ 0.1 แสดงว่าให้ความสำคัญต่อค่าเป้าหมายน้อย ดังนั้นค่าผลตอบสนองอาจจะห่างจากค่าเป้าหมายมาก แต่ก็สามารถยอมรับกับผลตอบนี้ได้ ซึ่งให้ผลต่อระดับความพึงพอใจสูงเช่นกัน แต่สำหรับกรณีนี้อาจจะเหมาะกับการนำมาประยุกต์ใช้กับวัสดุที่ไม่ค่อยไวต่อการเปลี่ยนแปลง เช่น คุณภาพทางด้านอาหาร ซึ่งการเปลี่ยนแปลงคุณภาพดังกล่าวอาจมีค่าความคลาดเคลื่อนที่ค่อนข้างสูง ดังนั้นจึงสามารถยอมรับการเปลี่ยนแปลงของผลตอบที่อาจจะห่างจากค่าเป้าหมายมากได้ สำหรับงานวิจัยนี้กำหนดค่าน้ำหนักของแต่ละผลตอบสนองเท่ากันคือ 1 เนื่องจากต้องการให้ความสำคัญกับเป้าหมาย และขอบเขตเท่ากันสำหรับค่าความสำคัญ I แสดงถึงความสำคัญระหว่างผลตอบสนอง โดยมีค่าระหว่าง 0.1-10 หากให้

ความสำคัญกับผลตอบแทนน้อย แสดงถึงให้ความสำคัญกับผลตอบแทนน้อย หากให้ความสำคัญกับผลตอบแทนมากแสดงถึงให้ความสำคัญกับผลตอบแทนนั้นมาก ในงานวิจัยนี้จะให้ความสำคัญกับทุกผลตอบแทนเท่ากันทั้งคุณภาพด้านเนื้อสัมผัส และคุณภาพด้านสี

3.3 ผลการทดลองและวิจารณ์

3.3.1 การวิเคราะห์สถิติ

อิทธิพลของตัวแปรอิสระได้แก่ ความชื้นเริ่มต้นก่อนพффิง อุณหภูมิและเวลาในการพффิงที่มีผลต่อตัวแปรตามได้แก่ ความแข็ง ความชื้นเริ่มต้น จำนวนยอด การหดตัว ความสว่าง และ hue angle ซึ่งแสดงดังตารางที่ 3.2 จากนั้นนำข้อมูลจากการทดลองที่ได้จากตารางที่ 3.2 มาวิเคราะห์ทางสถิติและนำไปใช้วิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรกับค่าผลตอบแทน โดยใช้สมการโพลีโนเมียลกำลังสอง ดังสมการที่ 3 สำหรับการพิจารณาว่าสมการถดถอยที่ทำนายมีความเหมาะสมกับข้อมูลหรือไม่สามารถพิจารณาได้จากการวิเคราะห์ทางสถิติซึ่งมีด้วยกันหลายดัชนีได้แก่ R^2 CV และ lack of fit เป็นต้น เพื่อใช้สำหรับประเมินความแปรปรวนของสมการถดถอย สำหรับ R^2 คือค่าที่แสดงสัดส่วนหรือเปอร์เซ็นต์ของความแปรผันทั้งหมดใน Y ที่สามารถอธิบายโดยความแปรผันใน X หรืออธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง X กับ Y ดังนั้นจึงเป็นค่าที่ใช้วัดว่าสมการที่ประมาณมีความเหมาะสมกับข้อมูลเพียงไร ถ้า R^2 มีค่ามาก แสดงว่าสมการถดถอยที่ประมาณมีความเหมาะสมกับข้อมูลมาก (Haber et al., 1977) ส่วนค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน CV แสดงถึงความสัมพันธ์ของจุดการกระจายของการทดลองเทียบกับสมการถดถอยที่ทำนาย

จากตารางที่ 3.3 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของแต่ละผลตอบแทนที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ได้แก่ R^2 CV และ lack of fit สำหรับการทดสอบค่า lack of fit เป็นการทดสอบว่าฟังก์ชันถดถอยหรือแบบจำลองการถดถอยที่ใช้มีความเหมาะสมกับข้อมูลหรือไม่ ซึ่งพิจารณาจากค่า P-value โดยกำหนดระดับนัยสำคัญ (α) น้อยกว่า 0.05 ผลจากการวิเคราะห์สถิติ พบว่า การทดสอบค่า lack of fit ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในเทอมของ ความชื้นเริ่มต้น ซึ่งแสดงว่าสมการถดถอยที่ทำนายมีความเหมาะสมกับข้อมูล ขณะที่ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ สำหรับผลตอบแทนได้แก่ การหดตัว ความแข็ง จำนวนยอด ค่าความสว่าง (L-value) และ hue angle ซึ่งแสดงว่าสมการถดถอยที่ทำนายอาจจะไม่เหมาะสมกับข้อมูล ทั้งนี้เนื่องมาจากค่าความคลาดเคลื่อน (Pure error) ที่เกิดขึ้นจากการทดลองน้อยมาก ดังนั้นจึงทำให้ผลการทดสอบ Lack of fit มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

อย่างไรก็ตามถึงแม้ผลการวิเคราะห์ Lack of fit จะมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติสำหรับผลตอบสนองได้แก่ การหดตัว ความแข็ง จำนวนยอด ค่าความสว่าง (L-value) และ hue angle ซึ่งแสดงว่าสมการถดถอยที่ทำนายอาจจะไม่เหมาะสมกับข้อมูล แต่เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน CV แสดงถึงความสัมพันธ์ของจุดการกระจายของการทดลองเทียบกับสมการถดถอยที่ทำนาย โดยผลการวิเคราะห์ของผลตอบสนองทั้งหมดอยู่ในช่วง 2-12% ซึ่งแสดงว่าการกระจายของการทดลองเทียบกับสมการถดถอยที่ทำนายแตกต่างกันน้อย นอกจากนี้ยังสามารถพิจารณาเพิ่มเติมได้จากค่า R^2 ซึ่งมีค่าสูงกว่า 0.80 ยกเว้นผลตอบสนองสำหรับ hue angle ที่มีค่า R^2 ต่ำคือ 0.62 อย่างไรก็ตามค่า R^2 ที่ต่ำนี้จะถูกนำไปวิเคราะห์ต่อไป (Malcolmson et al., 1993) ด้วยเหตุผลดังกล่าวจะเห็นได้ว่าดัชนีการวิเคราะห์ทางสถิติบางตัวอาจจะไม่เหมาะสม แต่ก็ไม่ได้หมายความว่าสมการถดถอยที่ทำนายได้ไม่สามารถนำมาใช้สำหรับการหาสภาวะที่เหมาะสมได้ ซึ่งจะยังถูกนำมาใช้ต่อไป แต่อย่างไรก็ตามเพื่อตรวจสอบว่าโมเดลที่ทำนายมีความถูกต้อง ควรทำการทดลองเปรียบเทียบระหว่างผลจากการทำนาย และผลจากการทดลอง (Box et al., 1987 and Torregiani et al., 1995)

ตารางที่ 3.3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับเงื่อนไขการพัวพันในทอมของ linear quadratic และ interaction ของแต่ละผลตอบสนอง

Source of variation	DF	Sum of squares					
		Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6
Regression	9	2054.75*	775.76*	1581.47*	1381.19*	899.81*	1944.00*
Linear	3	1421.26*	512.00*	350.96*	859.39*	845.38*	967.23*
Square	3	615.68*	182.11*	1222.71*	502.72*	10.13	133.75
Interaction	3	17.80*	81.65*	7.81	19.08	44.29*	843.02*
Residual Error	44	66.06	40.91	128.11	300.06	188.25	1055.92
Lack of fit	17	37.08*	27.49*	69.33	268.06*	171.21*	1027.67*
Pure Error	27	28.97	13.42	58.79	32.00	17.04	28.24
CV (%)		4.93	2.56	2.51	12.40	3.81	5.00
R^2		0.96	0.94	0.92	0.82	0.82	0.64

* Significant at $p < 0.05$

ตารางที่ 3.4 ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการถดถอยโพลิโนเมียล โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง
ตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม (กรณีเลือกใช้รหัสในการวิเคราะห์)

	Shrinkage Y ₁	Hardness Y ₂	Initial slope Y ₃	Number of peaks Y ₄	L-value Y ₅	Hue angle Y ₆
constant	8.305*	20.764*	45.974*	19.703*	40.700*	64.059*
X ₁	1.530*	2.361*	-0.283	-0.583	2.433*	2.000*
X ₂	-5.847*	-2.883*	2.927*	4.694*	-4.055*	-3.144*
X ₃	-1.716*	-0.577*	1.047*	1.222*	-1.055*	-3.603*
(X ₁) ²	7.158*	3.638*	-10.088*	-6.361*	-0.600	-2.178
(X ₂) ²	-0.158	0.988*	-0.088	-1.194	-0.666	-1.944
(X ₃) ²	0.200	-0.977*	-0.313	0.055	0.200	-1.619
X ₁ X ₂	0.212	-1.787*	-0.062	0.833	1.158*	5.275*
X ₁ X ₃	-0.420	-0.362	0.566	0.291	-0.191	-2.100*
X ₂ X ₃	0.720*	-0.275	0.020	0.125	-0.683	1.700

* Significant at p<0.05, DF= degree of freedom

3.3.2 การหาค่า

ผลการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน และค่าสัมประสิทธิ์ของสมการถดถอยของระดับการหาค่าของ
กล้วยแผ่นอบกรอบแสดงดังตารางที่ 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ โดยค่าสัมประสิทธิ์สมการถดถอย
สำหรับระดับการหาค่าแสดงปัจจัยของความชื้นเริ่มต้นก่อนการพффิง อุณหภูมิ และเวลาพффิงที่มี
ต่อการหาค่าในเทอมของ linear ขณะที่ปัจจัยของความชื้นเริ่มต้นก่อนการพффิงมีผลในเทอมของ
quadratic และอุณหภูมิและเวลาพффิงมีผลในเทอมของ interaction ซึ่งสมการถดถอยสำหรับระดับ
การหาค่าแสดงได้ดังนี้

$$\% \text{ Shrinkage: } Y_1 = 8.33 + 1.53X_1 - 5.84X_2 - 1.71X_3 + 7.15X_1^2 + 0.72X_2X_3 \quad R^2 = (0.96)$$

(3.10)

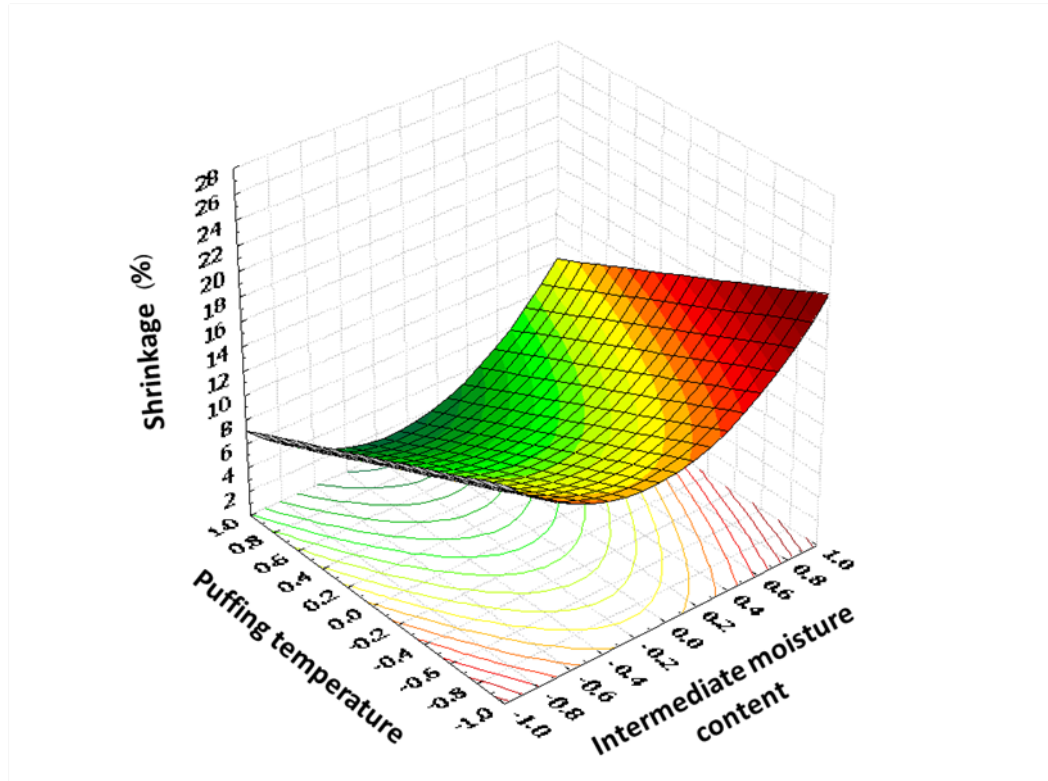
จากสมการที่ (3.10) เมื่อพล็อตระดับการหาค่าเทียบกับปัจจัยของความชื้นเริ่มต้นก่อนการพффิง
อุณหภูมิ และเวลาพффิง แสดงดังรูปที่ 3.2 (b) อุณหภูมิพффิงที่สูงขึ้นหรือพффิงเป็นเวลานาน ส่งผล
ต่อระดับการหาค่าลดลง โดยพффิงด้วยอุณหภูมิสูงเป็นระยะเวลาสั้น ทำให้อัตราการระเหย
ของความชื้นเพิ่มขึ้น มีผลต่อแรงดันไอน้ำที่สูงขึ้นภายในวัสดุ ซึ่งทั้งสองปัจจัยทำให้ตัวอย่างเกิด
การขยายตัวหรือมีระดับการหาค่าลดลง

นอกจากนี้แล้วความชื้นก่อนการพффิงยังมีผลต่อการหดตัวเช่นกัน แต่มีความสำคัญน้อยกว่าปัจจัยของอุณหภูมิพффิงพิจารณาได้จากรูปที่ 3.2 (a) ปัจจัยของความชื้นก่อนการพффิงมีผลทั้งเชิงบวกและเชิงลบต่อการหดตัว โดยความชื้นก่อนการพффิงน้อยประมาณ 15% d.b. ทำให้เกิดแรงดันไอน้ำภายในวัสดุต่ำ ดังนั้นจึงทำให้วัสดุเกิดการขยายตัวได้น้อยระหว่างขั้นตอนการพффิง นอกจากนั้นแล้วความชื้นก่อนการพффิงที่สูงประมาณ 35% d.b. อาจจะทำให้เกิดแรงดันไอน้ำที่เพิ่มขึ้น แต่การหดตัวของวัสดุยังคงเกิดขึ้นสูง ทั้งนี้เนื่องมาจากความชื้นภายในวัสดุยังสูงหลังผ่านกระบวนการพффิงประมาณ (20-22% d.b.) และเนื้อของวัสดุค่อนข้างนิ่ม ดังนั้นโครงสร้างจึงเกิดการหดตัวในขั้นตอนต่อมา นอกจากนี้แล้วการลดลงของปริมาตรจะเกิดขึ้นในขั้นตอนสุดท้ายของการอบแห้ง ผลจากการวัดการหดตัว พบว่า ปริมาตรลดลงประมาณ 10% โดยการลดลงของปริมาตรเนื่องมาจากความเค้นเมื่อความชื้นเคลื่อนที่ออกจากวัสดุ เป็นสาเหตุทำให้แรงดันภายในวัสดุไม่สมดุลระหว่างภายในและภายนอกวัสดุ ซึ่งมีผลต่อการเกิดความเค้นที่บริเวณผิว จึงทำให้วัสดุเกิดการหดตัว (Mayer et al., 2004)

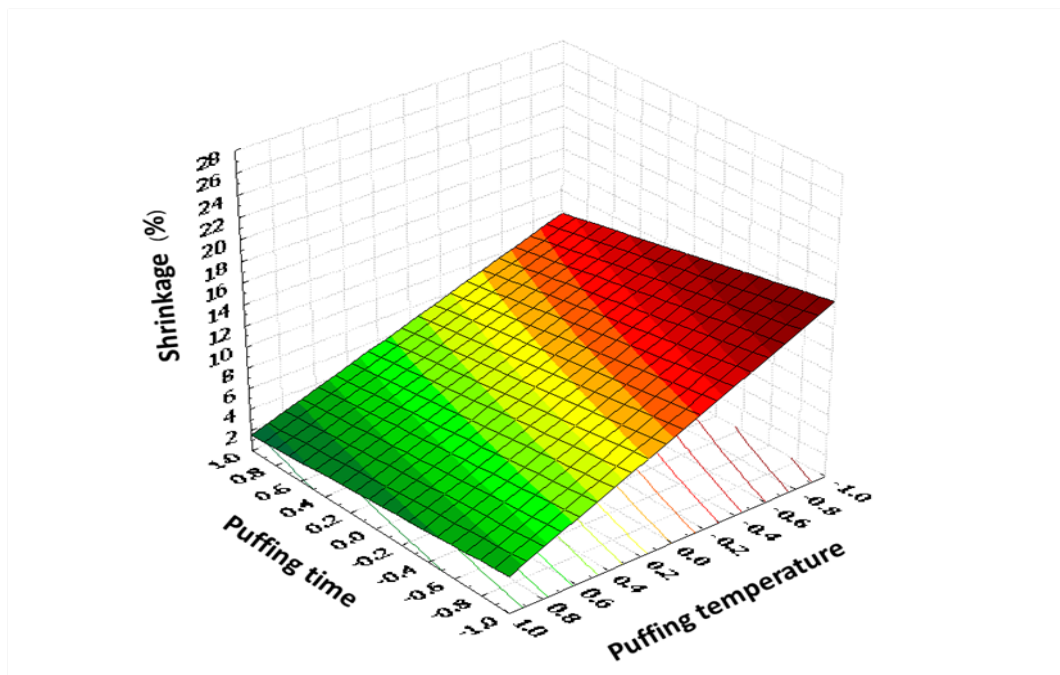
เมื่อความชื้นก่อนการพффิงน้อยกว่า 35% d.b. ยกตัวอย่างเช่น 15 และ 25% d.b. สำหรับการศึกษาการหดตัวหลังจากการพффิง และการอบแห้งต่อในขั้นตอนสุดท้ายไม่เกิดขึ้น เนื่องมาจากวัสดุหลังจากการพффิงมีความชื้นเหลืออยู่น้อย และบริเวณผิวค่อนข้างแข็ง จากข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าความชื้นเริ่มต้นของก๊วยก่อนการพффิงที่เหมาะสมประมาณ 25% d.b. นอกจากนี้แล้วความชื้นที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับวัสดุด้วย สำหรับข้าวบาเล่ย์ พบว่าความชื้นก่อนการพффิงที่ส่งผลต่อการขยายตัวสูงสุดมีค่าประมาณ 20% d.b. (Hoke et al., 2007) ขณะเดียวกันเกิดการขยายตัวน้อยสำหรับมันฝรั่ง หากความชื้นเริ่มต้นมีค่าต่ำกว่า 51% d.b. และการขยายตัวสูงที่ความชื้นก่อนการพффิงที่สูง (Varnalis et al., 2001)

จากรูปที่ 3.3 แสดงลักษณะโครงสร้างภายในของก๊วยแผ่นที่ผ่านการอบแห้งในขั้นตอนสุดท้าย โดยลักษณะโครงสร้างที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงขั้นตอนเดียวจะมีลักษณะเนื้อแน่นและมีรูพรุนน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับก๊วยที่ผ่านการพффิงด้วยอุณหภูมิ 160°C เป็นเวลา 2 นาที ตัวอย่างเกิดการขยายตัว ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างภายในเมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 3.3 (a) สำหรับรูปที่ 3.3 (b)-3.3 (d) แสดงลักษณะโพรงและรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ของตัวอย่าง และไม่มี ความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดภายใต้เงื่อนไขของความชื้นเริ่มต้นก่อนการพффิงที่แตกต่างกันระหว่าง 15-35% d.b. ส่วนผลการหดตัวเชิงปริมาตร แสดงให้เห็นว่าความชื้นเริ่มต้นก่อนการพффิงมีผลต่อการหดตัว เมื่อเปรียบเทียบกับกรอบแห้งก๊วยแผ่นแบบแช่เยือกแข็ง พบว่ามีรูปแบบและความเป็นรูพรุนน้อย (Pan et al., 2008) โดยปริมาตรของก๊วยหลังผ่านการอบแห้งแบบแช่เยือก

แข็งเกิดการหดตัว 5.9% (Pan et al., 2008) ซึ่งใกล้เคียงกับการศึกษาในภายใต้เงื่อนไขของการพuffing ที่เหมาะสม

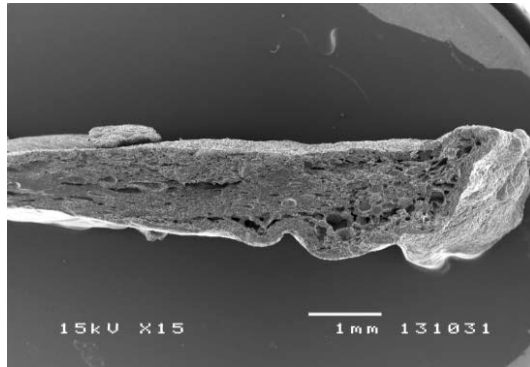


a) เวลาพuffing 2 นาที

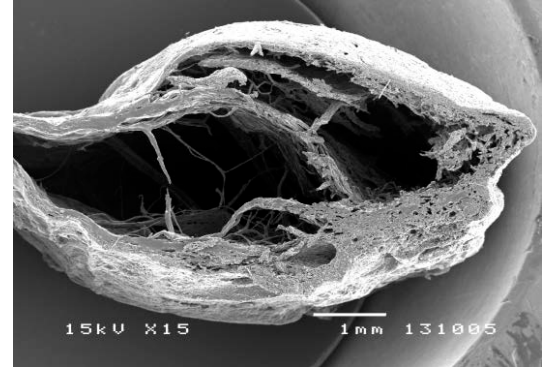


b) ความชื้นเริ่มต้นก่อนการพuffing 25% d.b.

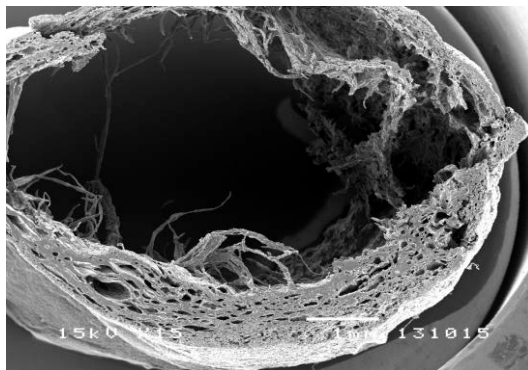
รูปที่ 3.2 (a-b) ผลของความชื้นของกล้วยก่อนการฟัฟฟิง อุณหภูมิ และเวลาฟัฟฟิงที่มีต่อระดับการหดตัวของกล้วยแผ่น (รหัสอ้างอิงจากตารางที่ 1)



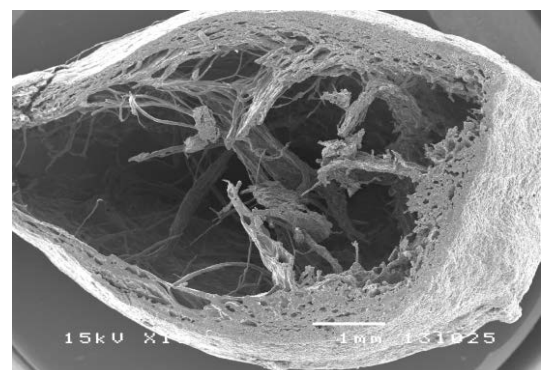
a) Single stage drying (90°C)



b) 15% d.b.



c) 25% d.b.



d) 35% d.b.

รูปที่ 3.3 ภาคตัดขวางของกล้วยแผ่นหลังการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับการฟัฟฟิงที่ระดับความชื้นของกล้วยก่อนการฟัฟฟิงต่างๆ ด้วยอุณหภูมิ 160°C เป็นเวลา 2 นาที

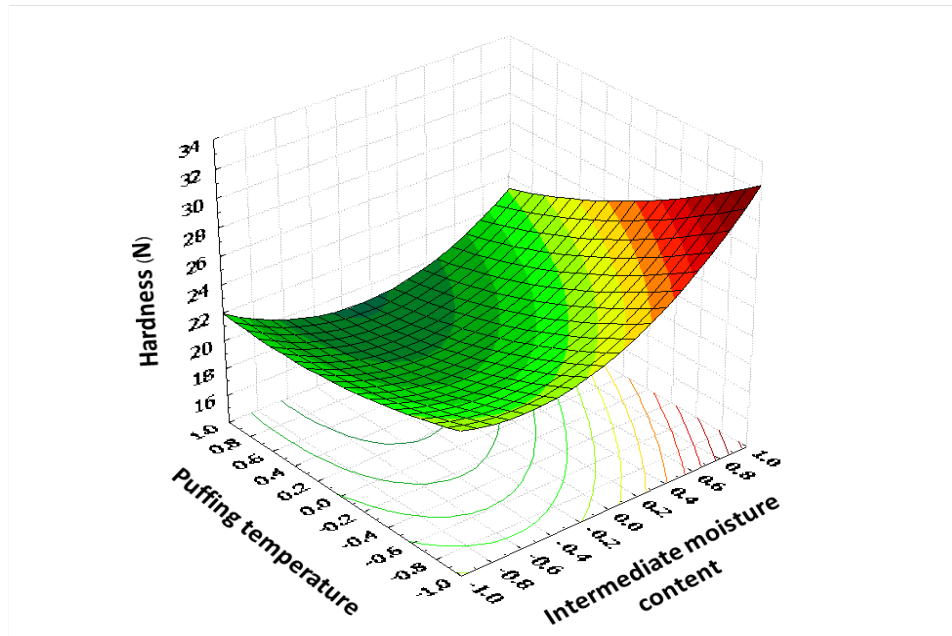
3.3.3 ความแข็ง

จากตารางที่ 3.4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สำหรับคุณภาพด้านความแข็งที่ได้จากสมการที่ 3.5 โดยความชื้นเริ่มต้น อุณหภูมิและเวลาพัพฟิง มีผลต่อความแข็งในเทอมของ linear และ quadratic ส่วนความชื้นเริ่มต้น และอุณหภูมิพัพฟิง มีผลในเทอมของ interaction ซึ่งสมการถดถอยที่สามารถอธิบายตัวแปรที่มีผลต่อความแข็งแสดงดังสมการที่ (3.11)

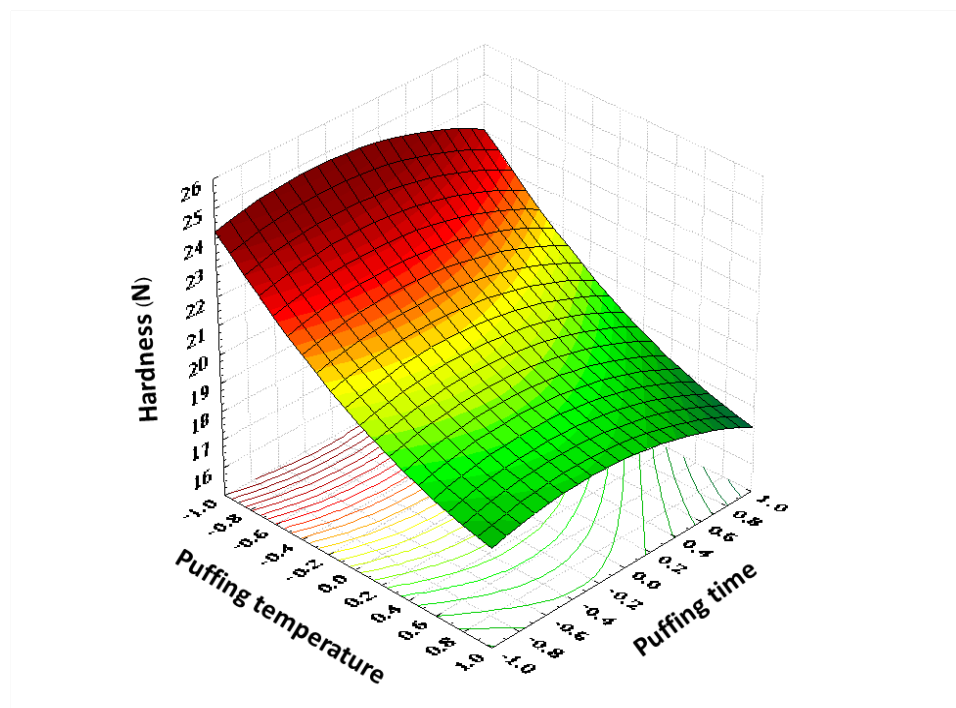
$$\text{Hardness: } Y_2 = 20.76 + 2.36X_1 - 2.88X_2 - 0.55X_3 + 3.63X_1^2 + 0.98X_2^2 - 0.97X_3^2 - 1.78X_1X_2 \quad (R^2=0.94)$$

(3.11)

จากสมการที่ (3.11) แสดงอิทธิพลของความชื้นเริ่มต้น อุณหภูมิและเวลาพัพฟิงที่มีผลต่อคุณภาพด้านความแข็งของกล้วยแผ่นซึ่งแสดงผลดังรูปที่ 3.4 (a)-(b) จากรูปที่ 3.4 (a) ความแข็งของกล้วยแผ่นภายใต้เงื่อนไขของอุณหภูมิพัพฟิงที่ค่อนข้างสูง และความชื้นเริ่มต้นก่อนการพัพฟิงที่ต่ำ จะเห็นได้ว่าการลดลง และการเพิ่มขึ้นของความชื้นมีผลต่อความแข็งที่เพิ่มขึ้น โดยความชื้นเริ่มต้นก่อนการพัพฟิงประมาณ 25% d.b. ที่เงื่อนไขของการพัพฟิงที่อุณหภูมิต่างๆ มีผลต่อความแข็งลดลง ขณะที่ความแข็งเพิ่มสูงขึ้นที่ระดับของความชื้นเริ่มต้นก่อนการพัพฟิงประมาณ 35% d.b. หรือต่ำกว่า 15% d.b. ซึ่งปัจจัยของความชื้นดังกล่าวมีความสัมพันธ์ต่อระดับการหดตัวของวัสดุ ซึ่งแสดงผลดังรูปที่ 3.2 (a) โดยความชื้นเริ่มต้นก่อนการพัพฟิงสูง ส่งผลต่อระดับการหดตัวที่สูงขึ้น ซึ่งแสดงว่าวัสดุมีความเป็นรูพรุนน้อยหรือโครงสร้างแน่น ด้วยสาเหตุดังกล่าวจึงส่งผลต่อความแข็งของกล้วยแผ่นที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้อุณหภูมิพัพฟิงที่สูงขึ้น ยังทำให้ระดับการหดตัวของกล้วยแผ่นลดลง ดังนั้นจึงมีค่าความแข็งน้อย โดยค่าความแข็งน้อยสามารถอธิบายได้ว่าเป็นผลระหว่าง Solid Matrix ภายในกล้วยปรับตัวลดลงที่ระดับการหดตัวต่ำ สำหรับปัจจัยของเวลาพัพฟิง แสดงดังรูปที่ 3.4 (b) พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงความแข็งเพียงเล็กน้อยภายใต้เงื่อนไขของเวลาในการพัพฟิงระหว่าง 1-2 นาที จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของเวลาพัพฟิงมีความสำคัญน้อยกว่าความชื้นเริ่มต้นก่อนการพัพฟิง และอุณหภูมิพัพฟิง



a) เวลาพuffing 2 นาที



b) ความชื้นเริ่มต้นก่อนการพuffing 25% d.b

รูปที่ 3.4 (a-b) ผลของความชื้นของกล้วยก่อนการพuffing อุณหภูมิ และเวลาพuffing ที่มีต่อความแข็งของกล้วยแผ่น (รหัสอ้างอิงจากตารางที่ 1)

3.3.4 ความชันเริ่มต้น และจำนวนยอด

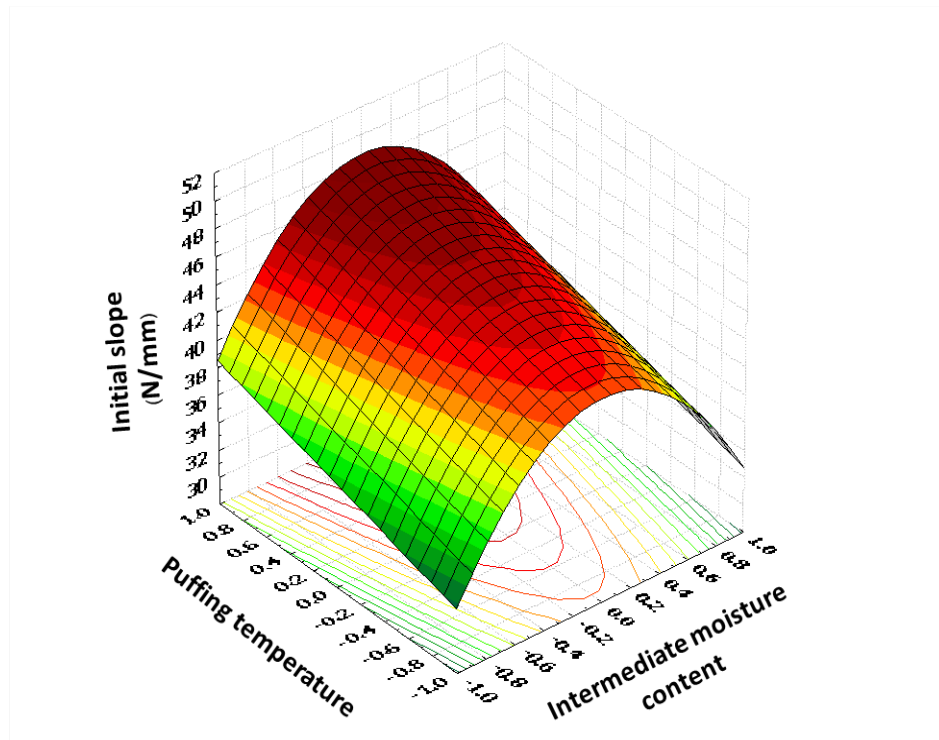
ความกรอบซึ่งพิจารณาผ่านแรงที่ลดลงอย่างรวดเร็วระหว่างการเคี้ยว โดยแรงมีความสัมพันธ์กับการแตกของวัสดุอาหาร โดยวัสดุที่มีช่องว่างหรือโพรงเล็กๆภายในโครงสร้างที่ค่อนข้างเปราะและแตกง่าย เมื่อผนังของโพรงหรือช่องว่างอากาศถูกทำลายไปก็จะเกิดเสียงดังขึ้น เสียงที่เกิดขึ้นนี้แสดงถึงความกรอบของวัสดุ ความกรอบพิจารณาได้จากจำนวนยอด และความชันเริ่มต้น ซึ่งได้จากการเปลี่ยนแปลงของแรงกับระยะทาง ขณะที่ความชันเริ่มต้น และจำนวนยอดมีความสัมพันธ์กับขนาดของโพรงภายในวัสดุ และการขยายตัว ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของความชันเริ่มต้นก่อนการพффิง อุณหภูมิ และเวลาพффิงที่มีต่อความชันเริ่มต้น และจำนวนยอด ซึ่งแสดงดังตารางที่ 3.4 โดยอุณหภูมิ และเวลาพффิงมีผลต่อความชันเริ่มต้น และจำนวนยอดอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ในเทอมของ linear ขณะที่ความชันเริ่มต้นก่อนการพффิงมีผลในเทอมของ quadratic สำหรับความชันเริ่มต้น และจำนวนยอด โดยสมการถดถอยจากการทำนายแสดงอิทธิพลของปัจจัยดังกล่าวที่มีผลต่อความชันเริ่มต้น และจำนวนยอดแสดงดังสมการที่ (3.12) และ (3.13) ตามลำดับ

$$\text{Initial slope: } Y_3 = 45.70 + 2.92X_2 + 1.04X_3 - 10.08X_1^2 \quad (R^2 = 0.91) \quad (3.12)$$

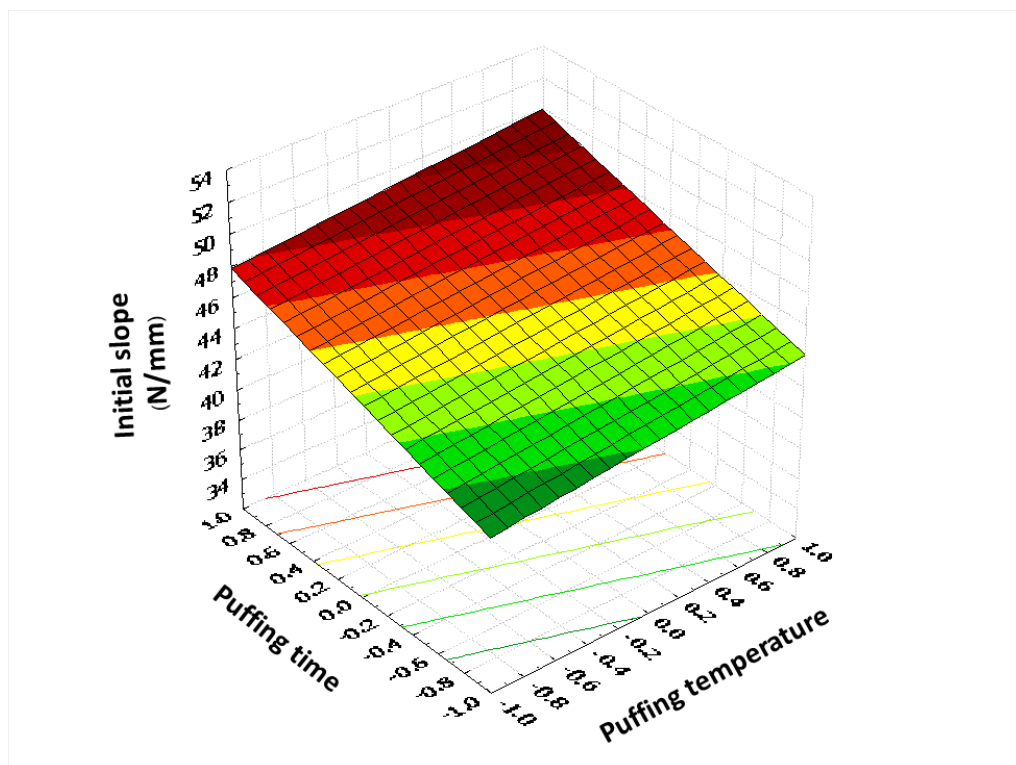
$$\text{Number of peak: } Y_4 = 18.94 + 4.69X_2 + 1.22X_3 - 6.36X_1^2 \quad (R^2 = 0.80) \quad (3.13)$$

การเปลี่ยนแปลงของความชันเริ่มต้น และจำนวนยอดภายใต้เงื่อนไขของความชันเริ่มต้นก่อนการพффิง อุณหภูมิและเวลาพффิงแสดงดังสมการที่ (3.12) และ (3.13) ตามลำดับ และแสดงผลดังรูปที่ 3.5 (a) และ 3.6 (a) ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิและเวลาพффิงมีผลเชิงบวกต่อความกรอบของกล้วยแผ่น ซึ่งการเพิ่มขึ้นทั้งอุณหภูมิ และเวลาพффิงทำให้ความชันเริ่มต้นและจำนวนยอดเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากเกิดการหดตัวน้อยลง และมีสัดส่วนช่องว่าง และความเป็นรูพรุนเพิ่มขึ้น สำหรับความชันเริ่มต้นก่อนการพффิงแสดงดังรูปที่ 3.5 (b) และ 3.6 (b) ซึ่งปัจจัยดังกล่าวมีผลเชิงลบหรือบวกต่อคุณลักษณะด้านความกรอบ โดยปัจจัยของอุณหภูมิพффิงที่สูงและความชันเริ่มต้นก่อนการพффิงประมาณ 25% d.b. ส่งผลต่อค่าความกรอบที่เพิ่มขึ้น ซึ่งพิจารณาได้จากจำนวนยอดและความชันเริ่มต้นเพิ่มขึ้น

จากผลการทดสอบด้านเนื้อสัมผัส พบว่าการใช้อุณหภูมิพัฟฟิงที่สูงเป็นเวลานาน จะช่วยให้เนื้อสัมผัสของกล้วยแผ่นมีความกรอบมากขึ้น และความแข็งลดลง ขณะที่ความชื้นเริ่มต้นก่อนการพัฟฟิงมีผลกระทบทั้งในเชิงลบ และเชิงบวกต่อความแข็ง และความกรอบ โดยระดับของความชื้นก่อนการพัฟฟิงที่เหมาะสม ส่งผลต่อเนื้อสัมผัสของกล้วยแผ่น ซึ่งจะมีความแข็งน้อย และมีความกรอบมาก โดยระดับความชื้นก่อนการพัฟฟิงที่เหมาะสมประมาณ 25% d.b. ภายใต้เงื่อนไขดังนี้กล่าวทำให้เกิดการหดตัวน้อย สำหรับกรณีของมันฝรั่ง พบว่า ความชื้นเริ่มต้นก่อนการพัฟฟิงมีผลต่อการหดตัว และเนื้อสัมผัสแตกต่างจากผลการศึกษานี้ โดยการเพิ่มขึ้นของความชื้นก่อนการพัฟฟิงของมันฝรั่ง ทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้น และปริมาตรของวัสดุลดลง (Varnalis et al., 2006) เช่นเดียวกันกับความแข็งของข้าว okara เพิ่มขึ้นหลังจากผ่านการพัฟฟิงภายใต้เงื่อนไขของความชื้นก่อนการพัฟฟิงที่สูงขึ้น (Xie et al., 2008)

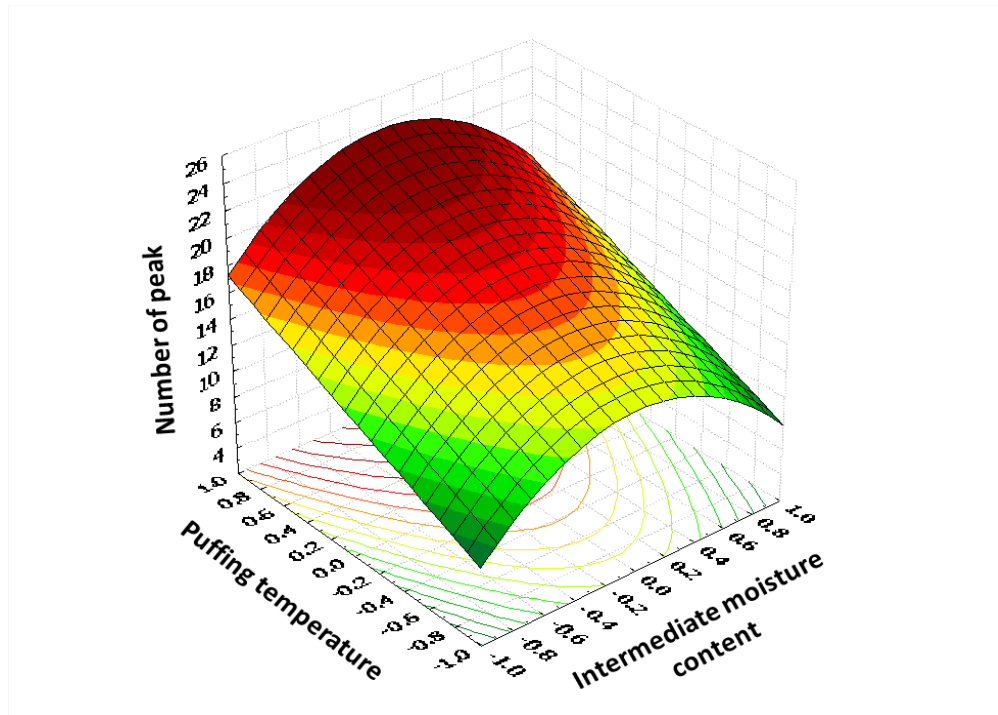


a) เวลาพuff 2 นาที

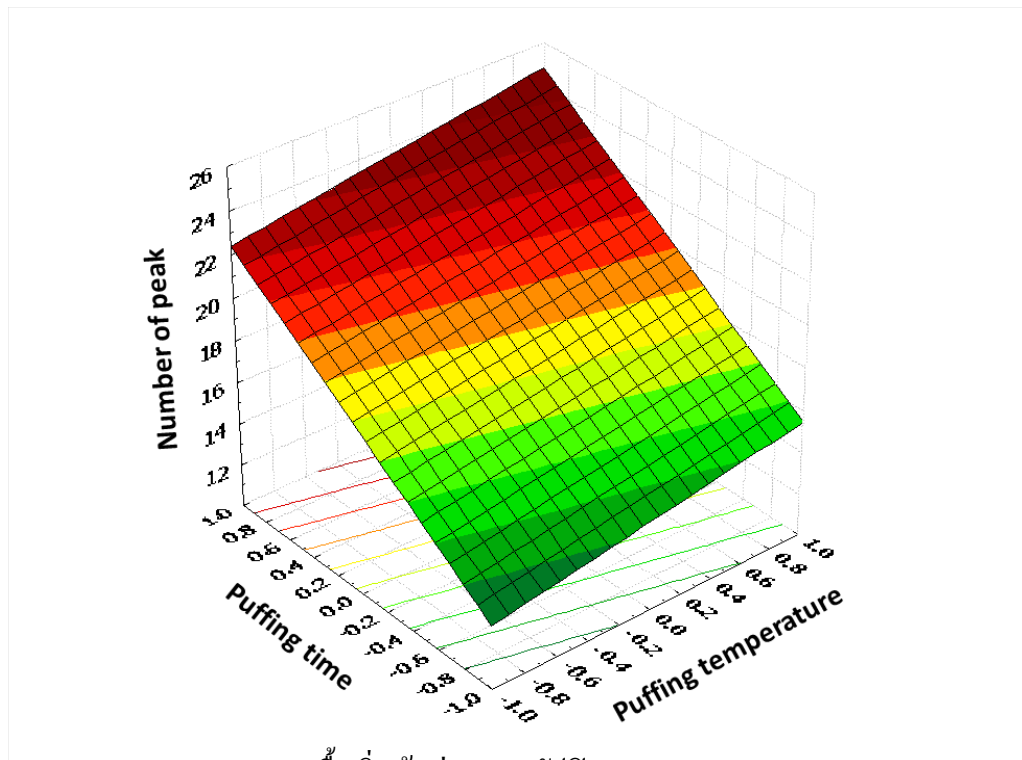


b) ความชื้นเริ่มต้นก่อนการพuff 25% d.b

รูปที่ 3.5 ผลของความชื้นของกล้วยก่อนการพuffing อุณหภูมิและเวลาพuffing ที่มีต่อความชื้นเริ่มต้นของกล้วยแผ่น (รหัสอ้างอิงจากตารางที่ 1)



a) เวลาพuffing 2 นาที



b) ความชื้นเริ่มต้นก่อนการพuffing 25 % d.b.

รูปที่ 3.6 (a-b) ผลของความชื้นของกล้วยก่อนการพффิง อุณหภูมิและเวลาพффฟที่มีต่อจำนวนยอดของกล้วยแผ่น (รหัสอ้างอิงจากตารางที่ 1)

3.3.5 คุณภาพด้านสี

ค่า L -value แสดงถึงความสว่างของผลิตภัณฑ์ และ hue angle เป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่น่าสนใจเพื่อแสดงคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์อาหาร โดยการเปลี่ยนแปลงสีของกล้วยแผ่นอบกรอบมีความสัมพันธ์กับปฏิกิริยาน้ำตาลที่ไม่อาศัยเอนไซม์ โดยการลดลงของค่า L -value และ b -value และ hue angle และการเพิ่มขึ้นของค่า a -value แสดงถึงผลิตภัณฑ์มีการเปลี่ยนแปลงเป็นสีน้ำตาลมากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์ถดถอยสำหรับสมการของ L -value และ hue angle แสดงดังตารางที่ 3.4 โดยความชื้นเริ่มต้นก่อนการพффฟ อุณหภูมิ และเวลาพффฟมีผลต่อค่า L -value และ hue angle อย่างมีนัยสำคัญในเทอมของ linear ส่วนความชื้นเริ่มต้นก่อนการพффฟ และอุณหภูมิพффฟมีผลอย่างมีนัยสำคัญในเทอมของ interaction ขณะที่เทอมของ interaction ระหว่างความชื้นเริ่มต้นก่อนการพффฟ และอุณหภูมิพффฟ และความชื้นเริ่มต้นก่อนการพффฟและเวลาพффฟมีผลต่อ hue angle โดยสมการของ L -value และ hue angle แสดงดังสมการที่ (3.14) และ (3.15) ตามลำดับ

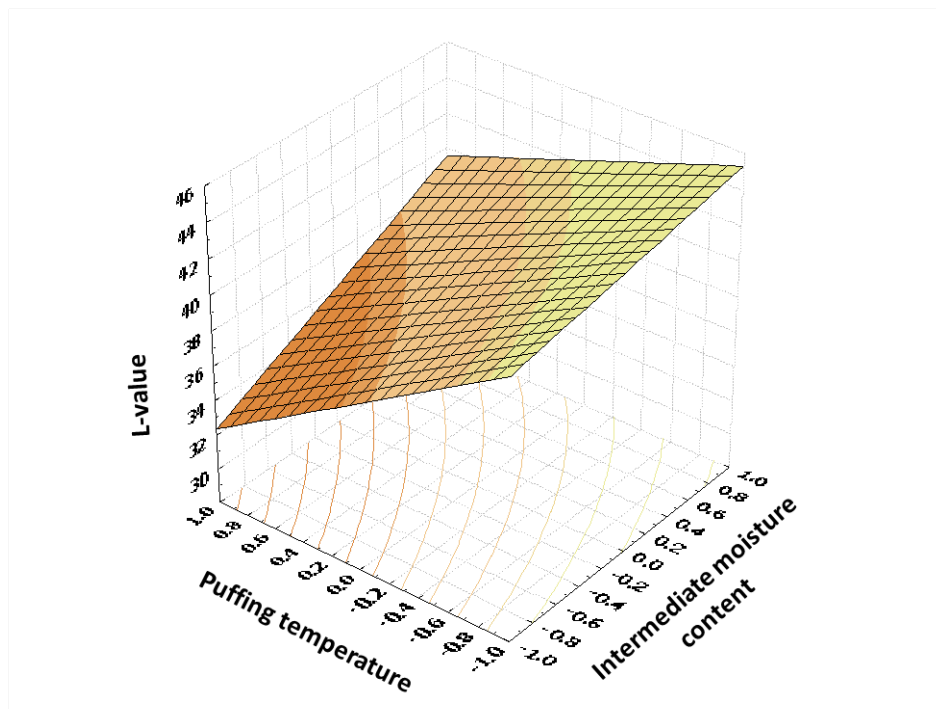
$$L\text{-value: } Y_5 = 39.98 + 2.43X_1 - 4.05X_2 - 1.05X_3 + 1.15X_1X_2 \quad (R^2 = 0.80) \quad (3.14)$$

$$\text{Hue-angle: } Y_6 = 60.23 + 2.00X_1 - 3.14X_2 - 3.60X_3 + 5.27X_1X_2 - 2.10X_1X_3 \quad (R^2 = 0.58) \quad (3.15)$$

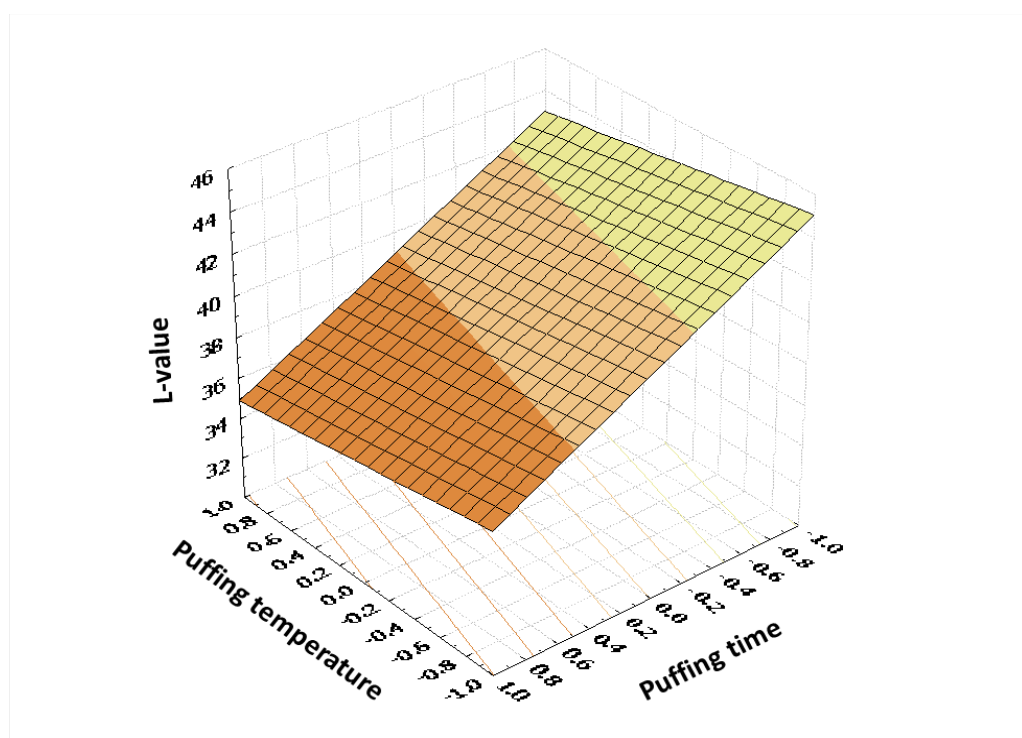
จากรูปที่ 3.7 และ 3.8 แสดงผลของความชื้นเริ่มต้นก่อนการพффฟ อุณหภูมิ และเวลาพффฟที่มีผลต่อ L -value และ hue angle ตามลำดับ ความชื้นเริ่มต้นก่อนการพффฟน้อยและพффฟด้วยอุณหภูมิสูงเป็นเวลานานขึ้นมีผลต่อสีของผลิตภัณฑ์ โดยความสว่างและ hue angle ของผลิตภัณฑ์ลดลงเนื่องจากพффฟด้วยเงื่อนไขดังกล่าวมีผลต่อการกระตุ้นของปฏิกิริยาน้ำตาลที่ไม่อาศัยเอนไซม์ (Nath et al., 2008 และ Krokida et al., 2000) กล้วยแผ่นมีสีเหลืองสว่าง เมื่อพффฟกล้วยภายใต้เงื่อนไขของอุณหภูมิพффฟต่ำ 140°C ที่ความชื้นเริ่มต้นก่อนการพффฟ 35% d.b. เป็นเวลา 1 นาที ขณะที่สีเริ่มเปลี่ยนเป็นสีคล้ำหรือน้ำตาลอ่อนเพิ่มขึ้นที่เงื่อนไขอุณหภูมิพффฟ 180°C ที่ความชื้นเริ่มต้นก่อนการพффฟ 15% d.b. เป็นเวลา 2 นาที

จากผลของเนื้อสัมผัส และสีจะเห็นได้ว่าการพффฟด้วยอุณหภูมิที่สูงเป็นเวลานาน ทำให้เนื้อสัมผัสของกล้วยดีขึ้น แต่มีผลต่อสีที่คล้ำเพิ่มขึ้น ดังนั้นเพื่อพัฒนาคุณภาพดังกล่าวจึงมีความยากที่จะค้นหา

เงื่อนไขที่เหมาะสม จึงต้องนำเทคนิคของการหาสถานะที่เหมาะสมมาช่วยในการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมต่อไป

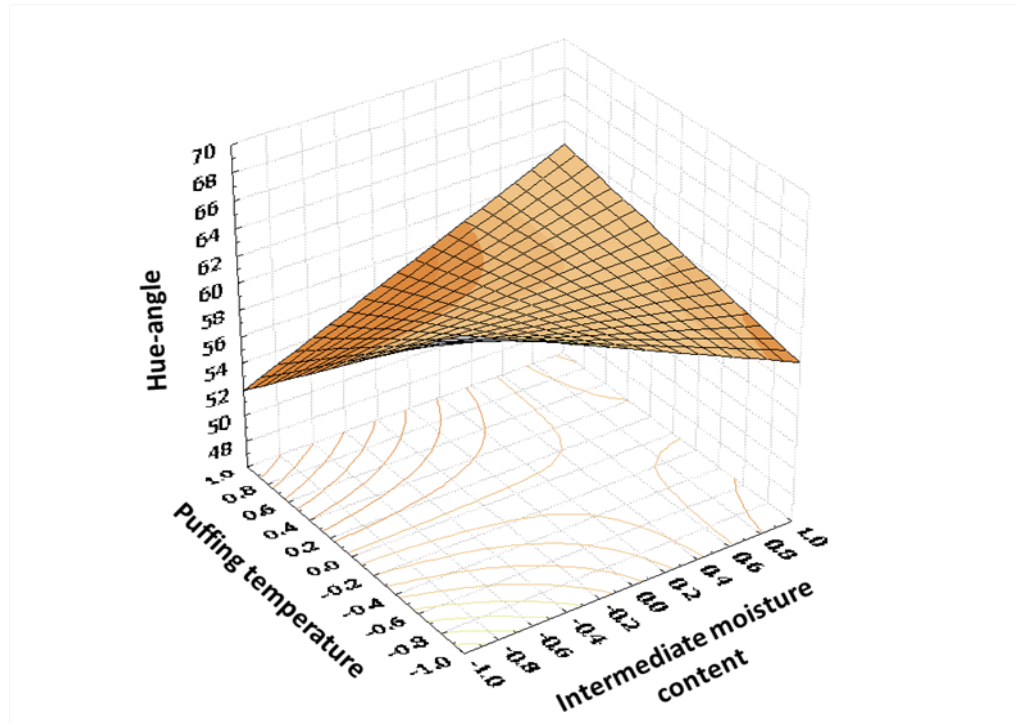


a) เวลาพuff 2 นาที

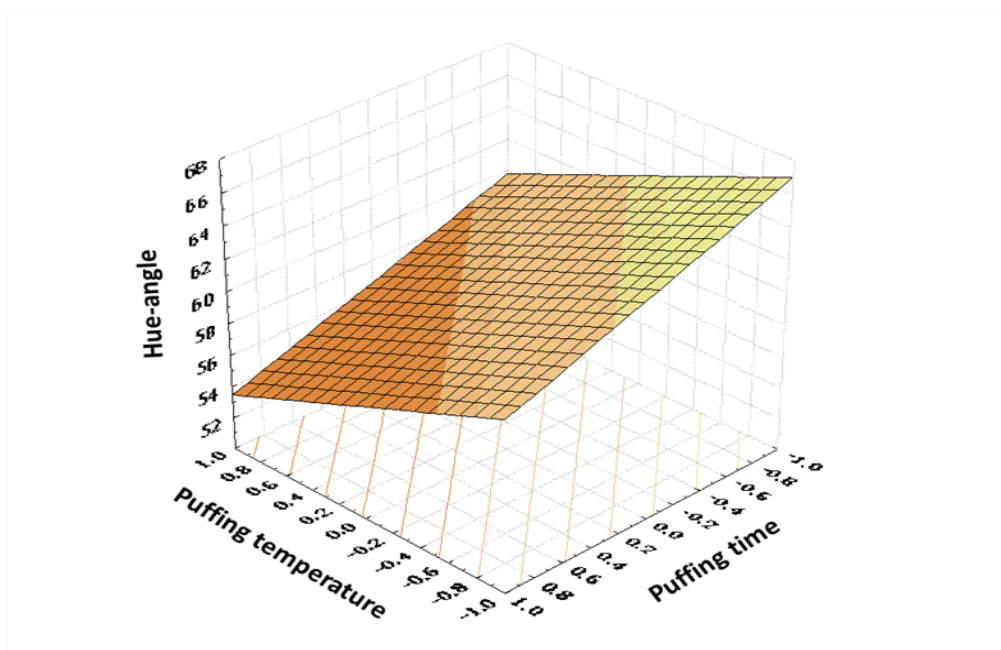


b) ความชื้นเริ่มต้นก่อนการพuff 25% d.b.

รูปที่ 3.7 (a-b) ผลของความชื้นของกล้วยก่อนการพuff อุณหภูมิ และเวลาพuff ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงค่า L -value ของกล้วยแผ่น (รหัสอ้างอิงจากตารางที่ 1)



a) เวลาพuff 2 นาที



b) ความชื้นเริ่มต้นก่อนการพффิง 25 % d.b.

รูปที่ 3.8 (a-b) ผลของความชื้นของกล้วยก่อนการพффิง อุณหภูมิและเวลาพффิงที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงค่า Hue angle ของกล้วยแผ่น (รหัสอ้างอิงจากตารางที่ 1)

3.3.6 การหาสถานะที่เหมาะสมสำหรับกล้วยแผ่นอบกรอบ

สำหรับการคำนวณหาเงื่อนไขที่เหมาะสมของการพффิงกล้วย โดยสามารถหาได้จากการกำหนดค่าเป้าหมายและค่าน้ำหนักของแต่ละผลตอบแทน โดยค่าเป้าหมายสามารถกำหนดให้เป็นค่าสูงสุดหรือค่าต่ำสุดภายใต้ความเหมาะสมของแต่ละผลตอบแทนได้ สำหรับการศึกษานี้ได้กำหนดค่าเป้าหมายของผลตอบแทนให้มีค่าสูงสุด ได้แก่ ความชื้นเริ่มต้น จำนวนยอด L-value และ hue angle เนื่องจากต้องการลักษณะของตัวอย่างที่มีความกรอบมากและสีที่ได้มีความสว่าง และไม่คล้ำ ขณะที่ผลตอบแทนของค่าความแข็งได้กำหนดค่าเป้าหมายให้มีค่าต่ำสุด เนื่องจากต้องการลักษณะของตัวอย่างที่มีความแข็งน้อย ส่วนคุณภาพด้านการหดรัดไม่นำมาพิจารณาในการหาสถานะที่เหมาะสม เนื่องจากการหดรัดมีความสัมพันธ์กับคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัส การกำหนดค่าต่างๆของแต่ละผลตอบแทนแสดงดังตารางที่ 3.5 โดยกำหนดค่าความสำคัญของแต่ละผลตอบแทน (Importance) ได้แก่ คุณภาพด้านสีและเนื้อสัมผัส ซึ่งให้ความสำคัญเท่ากันคือ 50% โดยผลจากการทำนายหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการพффิงกล้วยคือ อุณหภูมิในการพффิง 163°C และพффิงเป็นเวลา 1 นาที ที่ความชื้นเริ่มต้นก่อนการพффิงประมาณ 26% d.b. ซึ่งเงื่อนไขที่เหมาะสมดังกล่าวให้ผลต่อระดับความพึงพอใจโดยรวมคือ 0.72 แสดงดังตารางที่ 3.6 เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของผลที่มาจากการทำนาย ดังนั้นจึงทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบลักษณะคุณภาพของกล้วยซึ่งค่าต่างๆ แสดงดังตารางที่ 3.6 โดยใช้วิธีวิเคราะห์สถิติ T-test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ในการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าที่มาจากการทำนาย และค่าจากการทดลอง

เมื่อเปรียบเทียบลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์กล้วยอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze-dried) ที่มีขายตามท้องตลาด พบว่าเนื้อสัมผัสของกล้วยที่ผ่านการพффิงด้วยเงื่อนไขที่เหมาะสมมีความกรอบมากกว่ากล้วยที่อบแห้งด้วยวิธีแบบแช่เยือกแข็ง แต่มีลักษณะความกรอบใกล้เคียงกับกล้วยที่ผ่านการทอด โดยลักษณะความแข็งของกล้วยที่ผ่านการพффิงให้ผลไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่มาจากท้องตลาดดังกล่าว แต่อย่างไรก็ตามการพัฒนาลักษณะกล้วยยังเป็นสิ่งที่จำเป็น ซึ่งวิธีการพรีทรีทเมนต์ และการลดระดับความสุกของกล้วยอาจช่วยลดอัตราการเกิดสีน้ำตาลได้ ซึ่งปัจจัยดังกล่าวจะศึกษาในส่วนตัวต่อไป

Quality	Objective	Lower	Upper	Importance
Hardness (N)	Minimum	17.4	33.4	4
Initial slope (N/mm)	Maximum	31.3	52.4	4
Number of peaks	Maximum	7	28	4
Hue angle	Maximum	35.8	69.1	6
L-value	Maximum	31.2	47.1	6

ตารางที่ 3.5 การกำหนดค่าความสำคัญของแต่ละผลตอบสนอง

Quality	Predicted value	Experimental value	Significant (2 tailed)	Desirability	Commercial product	
					Freeze drying	Vacuum frying
Hardness (N)	20.24	22.3±5.6	0.776	0.822	37.5±8.3	26.4±6.7

ตารางที่ 3.6 คุณภาพของกล้วยแผ่นอบกรอบที่ได้จากการทดลองที่เงื่อนไขที่เหมาะสมเปรียบเทียบกับค่าที่มาจากการทำนาย และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ตามท้องตลาด

Initial slope (N/mm)	44.88	43.5±4.8	0.832	0.644	16.7±7.5	34.6±8.8
Number of peaks	19.08	16±4.0	0.582	0.575	12±8	10±8
Hue angle	65.69	66.2±1.4	0.778	0.897	60.5±1.1	76.2±3.1
L-value	41.67	44.3±0.9	0.210	0.659	83.7±2.1	46.5±2.6
Overall composite desirability				0.72		