Research Article

Received: February 24, 2020; Accepted: June 2, 20xx20

การหาสูตรที่เหมาะสมสำหรับการผลิตขนมขบเคี้ยวชนิดพองกรอบใยอาหารสูงจากแป้งข้าวสินเหล็ก แป้งข้าวฟ่างดำ และอินูลิน

Formula Optimization for Producing High Fiber Puffed Snack Made from Sinlek Rice Flour, Black Sorghum Flour and Inulin

นิภาพร กุลณา, ปาริสุทธิ์ เฉลิมชัยวัฒน์* และน้องนุช ศิริวงศ์

สาขาอาหารและโภชนาการ ภาควิชาคหกรรมศาสตร์ คณะเกษตร

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900

วศะพร จันทร์พุฒ

ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900

Nipapond Kunna, Parisut Chalermchaiwat* and Nongnuch Siriwong

Department of Home Economics, Faculty of Agriculture,

Kasetsart University, Bangkhen Campus, Ladyao, Chatuchak, Bangkok 10900

Wasaporn Chanput

Department of Food Science and Technology Faculty of Agro-Industry,

Kasetsart University, Bangkhen Campus, Ladyao, Chatuchak, Bangkok 10900

บทคัดย่อ

วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (response surface methodology, RSM) ถูกนำมาประยุกต์ใช้หาสูตรที่เหมาะสมสำหรับการพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวชนิดพองกรอบใยอาหารสูงและเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค โดยศึกษาส่วนผสม 3 ชนิด ได้แก่ แป้งข้าวสินเหล็ก (ร้อยละ 40-60) แป้งข้าวฟ่างดำ (ร้อยละ 40-60) และอินูลิน (ร้อยละ 5-15) ด้วยการจัดสิ่งทดลองแบบผสม (mixture design) พบว่าการเพิ่มปริมาณแป้งข้าวฟ่างดำ ส่งผลให้ค่าความแข็งและปริมาณโปรตีนในขนมขบเคี้ยวชนิดพองกรอบสูงขึ้น ปริมาณอินูลินที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าคะแนนความชอบโดยรวมสูงขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณของส่วนผสมทั้ง 3 ชนิด ส่งผลให้ปริมาณเส้นใยอาหารเพิ่มขึ้นด้วย สูตรที่เหมาะสม คือ แป้งข้าวสินเหล็กร้อยละ 40 แป้งข้าวฟ่างดำร้อยละ 45 และอินูลินร้อยละ 15 ซึ่งทำให้ขนมขบเคี้ยวชนิดพองกรอบที่ผลิตได้มีปริมาณเส้นใยอาหารสูง (17.72 กรัม) และยังเป็นแหล่งของโปรตีน (8.13 กรัม) มีค่าคะแนน

***ผู้รับผิดชอบบทความ** : fagrpsch@ku.ac.th **doi:** 10.14456/tstj.2021.29

ความชอบด้านความแข็ง (6.72) รสชาติ (6.38) และความชอบโดยรวมสูงสุด (7.23) ดังนั้นจึงสามารถใช้ประโยชน์จากข้าวสินเหล็กและข้าวฟ่างดำเป็นวัตถุดิบหลักในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวเพื่อสุขภาพ

คำสำคัญ : วิธีการพื้นผิวตอบสนอง; ขนมขบเคี้ยว; แป้งข้าวสินเหล็ก; แป้งข้าวฟ่างดำ; อินูลิน

Abstract

Response surface methodology (RSM) was applied to the optimized formula for development of a high fiber and acceptable puffed snack for consumers. The three components, Sinlek rice flour (40-60 %), black sorghum flour (40-60 %) and inulin (5-15 %) were investigated by mixture design. The increase in the black sorghum flour increased the hardness and protein content of the puffed snack. Increasing inulin content caused an increased overall liking scores. Furthermore, increasing of three components could enhance fiber content. The optimum formulation was 40 % Sinlek rice flour, 45 % black sorghum and 15 % inulin. This formula produced puffed snack, with high fiber (17.72 g) and good source of protein (8.13 g). This formulation had the highest liking score of hardness (6.72), taste (6.38) and overall liking (7.23). Therefore, Sinlek rice and black sorghum could be a useful main ingredient for developing healthy snack products.

Keywords: response surface methodology; snack; Sinlek rice flour; black sorghum flour; inulin

1. บทนำ

ปัจจุบันการบริโภคอาหารเกิดการเปลี่ยนแปลงไป ผู้บริโภคหันมาให้ความสำคัญเกี่ยวกับอาหารที่สามารถตอบสนองต่อความต้องการในชีวิตประจำวัน โดยเฉพาะอาหารที่สามารถให้พลังงาน มีคุณค่าทางโภชนาการ สะดวกต่อการนำมารับประทาน และมีส่วนประกอบของธัญพืช ผลไม้ และถั่ว เป็นต้น ซึ่งการบริโภคอาหารว่างหรือขนมขบเคี้ยว (snackification) ทดแทนอาหารมื้อหลัก ถือเป็นเทรนด์ที่ผู้บริโภคทั่วโลกกำลังให้ความสนใจอย่างยิ่ง โดยจะเห็นได้ชัดจากการสำรวจของ Global Ingredient Group ในประเทศสหรัฐอเมริกา ที่พบว่าผู้บริโภคชาวอเมริกันที่มีช่วงอายุระหว่าง 18-35 ปี นิยมบริโภคขนมขบเคี้ยวทดแทนอาหารมื้อหลักมากถึงร้อยละ 45 ปัจจัยสำคัญในการเลือกบริโภคอาหารว่างของชาวอเมริกัน คือ รสชาติและเป็นอาหารที่รับประทานได้ทุกที่ [1] ส่งผลให้อุตสาหกรรมอาหาร โดยเฉพาะกลุ่มผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยว มีการพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ที่สามารถช่วยเพิ่มพลังงานและสามารถรับประทานทดแทนมื้ออาหารหลัก [2] ประกอบกับการบริโภคอาหารเพื่อสุขภาพและอาหารที่มาจากธรรมชาติมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการสำรวจพฤติกรรมการบริโภคอาหารของประชากรในปี พ.ศ. 2560 แสดงให้เห็นว่าสถานการณ์การบริโภคผักและผลไม้ของคนไทยเพิ่มขึ้นถึง 2.32 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับการสำรวจในปี พ.ศ. 2551-2552 [3] ดังนั้นการปรับปรุงคุณภาพของขนมขบเคี้ยวให้มีคุณค่าทางโภชนาการสูง และใช้วัตถุดิบที่มาจากธรรมชาติจะสามารถตอบสนองต่อความต้องการของผู้บริโภคในปัจจุบัน สำหรับประเทศไทยข้าวเป็นวัตถุดิบที่ถูกนำมาใช้ผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยว

มากขึ้น เนื่องจากปราศจากกลูเตนและมีกลิ่นรสอ่อน [4] นอกจากข้าวแล้วยังมีข้าวฟ่างเป็นวัตถุดิบทางเลือกสำหรับนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ แต่ความนิยมไม่แพร่หลายในเชิงการค้ามากนัก ซึ่งผลผลิตมากกว่าร้อยละ 90 ของข้าวฟ่าง นิยมนำมาใช้ผลิตเป็นอาหารเลี้ยงสัตว์มากกว่าการนำมาผลิตเป็นอาหารเพื่อใช้ในการบริโภคของมนุษย์ [5,6] อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันมีการปรับปรุงพันธุ์ข้าวและข้าวฟ่างให้มีคุณค่าทางโภชนาการสูงขึ้น

งานวิจัยนี้เลือกใช้ข้าวสินเหล็ก (*Oryza sativa* L. cv. Sinlek) และข้าวฟ่างดำ (*Setaria italica* L. Beauvois) ที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง โดยเฉพาะมีปริมาณเส้นใยอาหารและโปรตีน นอกจากนี้วัตถุดิบทั้ง 2 ชนิด พบว่ายังมีสารต้านอนุมูลอิสระและธาตุเหล็กสูงอีกด้วย [7,8] อินูลินเป็นวัตถุดิบที่น่าสนใจเนื่องจากมีสมบัติเป็นใยอาหาร ละลายน้ำได้ดี ไม่สามารถย่อยในระบบทางเดินอาหาร และไม่ให้พลังงาน แต่ถูกย่อยด้วยแบคทีเรียในลำไส้ใหญ่ จึงมีสมบัติเป็นพรีไบโอติกที่มีประโยชน์ต่อสุขภาพ นอกจากนี้ยังมีสมบัติช่วยปรับปรุงเนื้อสัมผัสของอาหาร โดยเฉพาะด้านการพองตัว และถูกนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยว ดังรายงานวิจัยของ Brennan และคณะ ที่ศึกษาการใช้อินูลินทดแทนแป้งสาลีในขนมขบเคี้ยวชนิดพองกรอบ ซึ่งพบว่าขนมขบเคี้ยวมีการขยายตัวเพิ่มมากขึ้น [2] สอดคล้องกับการศึกษาของ Wojtowicz และคณะ ที่รายงานว่าการเพิ่มปริมาณอินูลินส่งผลให้การพองตัวของขนมขบเคี้ยวที่ผลิตจากกระบวนการเอกซ์ทรูชันมีค่าเพิ่มขึ้น ขณะที่ค่าความแข็งลดลง [9] ด้วยเหตุนี้อินูลินจึงได้รับความนิยมนำมาใช้เพื่อปรับปรุงคุณภาพทางประสาทสัมผัส โดยอินูลินที่จำหน่ายในทางการค้ามี 2 ชนิด คือ อินูลินสายสั้นและอินูลินสายยาว ซึ่งอินูลินสายสั้นไม่เพียงแต่จะช่วยปรับปรุงเนื้อสัมผัสของอาหารให้ดีขึ้นเท่านั้น แต่ยังสามารถให้รสหวานที่เป็นธรรมชาติแก่ผลิตภัณฑ์อาหารอีกด้วย [10]

การพัฒนาสูตรขนมขบเคี้ยวเพื่อให้มีคุณค่าทางโภชนาการสูงและเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคนั้น ปัจจุบันนิยมใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (response surface methodology, RSM) ซึ่งเป็นเทคนิคทางสถิติมาใช้ในการสร้างแบบจำลอง วิเคราะห์ผลที่เกิดจากปฏิกิริยาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ และทำนายสภาวะที่เหมาะสม แล้วนำค่าที่ได้ไปสร้างเป็นสมการและแผนภาพคอนทัวร์ ทำให้สามารถทำนายความสัมพันธ์ของตัวแปรต้นหลายตัวแปรในเวลาเดียวกัน โดยข้อดีของ RSM คือ ช่วยลดความผิดพลาด ลดจำนวนการทดลองจากการศึกษาทีละตัวแปรของวิธีการดั้งเดิม ทำให้ได้สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการศึกษา โดยวิธี RSM สามารถนำมาใช้ในงานด้านต่าง ๆ อย่างกว้างขวาง ได้แก่ อาหาร สิ่งแวดล้อม วิศวกรรมเคมี วิศวกรรมเครื่องกล เป็นต้น [11-13] ตัวอย่าง เช่น การศึกษาของ Kokkaew และคณะ [14] ที่นำวิธี RSM ไปใช้เพื่อหาสภาวะการผลิตเค้กข้าวโพดข้าวเหนียวสีม่วง เพื่อให้มีปริมาณสารแอนโทไซยานิน สารประกอบฟีนอลิก และความสามารถในการต้านออกซิเดชันสูงสุด การศึกษาของ Na Sakon Nakhon และคณะ ที่ได้นำวิธี RSM มาใช้ในการหาปริมาณแป้งฟักทองและความชื้นในตัวอย่างป้อนที่เหมาะสมในการผลิตขนมขบเคี้ยวจากแป้งข้าวกล้องงอกและแป้งฟักทองด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน เพื่อให้มีคุณค่าทางโภชนาการที่เหมาะสมและเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสูตรที่เหมาะสมสำหรับการผลิตขนมขบเคี้ยวชนิดพองกรอบที่มีปริมาณเส้นใยอาหารสูงจากการใช้แป้งข้าวสินเหล็ก แป้งข้าวฟ่างดำ และอินูลินด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง เพื่อเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการให้กับขนมขบเคี้ยวและมีคุณภาพเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 การเตรียมวัตถุดิบในการผลิตขนมขบเคี้ยวชนิดพองกรอบ

ข้าวกล้องพันธุ์สินเหล็กจากอำเภอหนองฉาง จังหวัดอุทัยธานี คัดเลือกเฉพาะเมล็ดที่สมบูรณ์และข้าวฟ่างดำพันธุ์กินรี 2 จากศูนย์วิจัยข้าวโพดและข้าวฟ่างแห่งชาติ จังหวัดนครราชสีมา นำไปบดให้ละเอียดด้วยเครื่องบด Fitz mill (Fitzpatrick รุ่น E-187, India) นำไปร่อนผ่านตะแกรงขนาด 80 เมช แล้วบรรจุในถุงอะลูมิเนียมฟอยล์แบบสุญญากาศเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส และอินูลินทางการค้า (Orafti®GR) จัดจำหน่ายโดยบริษัท DPO Thailand, Ltd. ผลิตในประเทศเบลเยียม โดยมีค่า degree of polymerization (DP) มากกว่าหรือเท่ากับ 10

2.2 การพัฒนาสูตรที่เหมาะสมในการผลิตขนมขบเคี้ยวชนิดพองกรอบใยอาหารสูง

ศึกษาอิทธิพลของส่วนผสมต่อคุณภาพของขนมขบเคี้ยวด้วยการจัดสิ่งทดลองแบบผสม (mixture design) ศึกษาระหว่างปริมาณแป้งข้าวสินเหล็กร้อยละ 40-60 ปริมาณแป้งข้าวฟ่างดำร้อยละ 40-60 และปริมาณอินูลินร้อยละ 5-15 เนื่องจากปริมาณแป้งข้าวสินเหล็กและแป้งข้าวฟ่างดำหากเกินกว่าร้อยละ 60 จะส่งผลให้ไม่เป็นที่ยอมรับของผู้ทดสอบชิม (preliminary test) และเกณฑ์การคัดเลือกปริมาณอินูลินที่ใช้ในการทดลองนี้คำนึงถึงปริมาณอินูลินที่สามารถบริโภคใน 1 วัน เนื่องจากหากร่างกายได้รับอินูลินมากเกิน 15-40 กรัมต่อวัน อาจทำให้เกิดอาการท้องเสียได้ [16] โดยผลจากการทำ mixture design ทำให้ได้อัตราส่วนทั้งหมด 5 สิ่งทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 1

Table 1 The amount of Sinlek rice flour, black sorghum flour and inulin from mixture design.

Raw materials	Treatments				
	1	2	3	4	5
Sinlek rice flour (%)	55	45	40	40	45
Black sorghum flour (%)	40	40	45	55	45
Inulin (%)	5	15	15	5	10

กระบวนการผลิตเริ่มจากนำแป้งข้าวสินเหล็ก แป้งข้าวฟ่างดำ และอินูลินผสมในเครื่องผสมอาหารความเร็วเบอร์ 2 ผสมนาน 10 นาที นำส่วนผสมที่ได้ไปแปรรูปเป็นขนมขบเคี้ยวด้วยเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ชนิดสกรูคู่ (Hermann Berstorff Laboratory รุ่น ZE25 x 33D, Germany) ที่สภาวะความชื้นร้อยละ 11 ความเร็วรอบของสกรู 380 รอบต่อนาที อุณหภูมิบาร์เรล 140 องศาเซลเซียส [17] แล้วนำไปอบด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นาน 10 นาที จากนั้นนำขนมขบเคี้ยวที่ได้ไปบรรจุในถุงพอลิเอทีลีนและเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง (27±2 องศาเซลเซียส) ก่อนนำไปตรวจสอบคุณภาพดังนี้

2.2.1 คุณภาพทางกายภาพ ได้แก่ วัดค่าสีด้วยเครื่อง Spectrophotometer (Hunter-Lab รุ่น Colourflex, U.S.A) ได้แก่ ค่า L* (ค่าความสว่าง ซึ่งมีค่า 0 ถึง 100 โดย 0 หมายถึงวัตถุที่มีความสว่างสีดำ 100 หมายถึงวัตถุที่มีความสว่างสีขาว) a* (+ หมายถึงวัตถุที่มีสีแดง - หมายถึงวัตถุที่มีสีเขียว) และ b* (+

หมายถึงวัตถุที่มีสีเหลือง - หมายถึงวัตถุที่มีสีน้ำเงิน) จำนวน 3 ซ้ำ วัดค่าปริมาณน้ำอิสระ (a_w) ด้วยเครื่อง Water activity (Aqualab รุ่น 4TE, U.S.A) โดยนำตัวอย่างขนมขบเคี้ยวมาบดให้ละเอียด บรรจุลงในช่องใส่ตัวอย่างของเครื่องวัด ปริมาณ 1 กรัม วัดค่าจำนวน 3 ซ้ำ วัดค่าความแข็ง (hardness) ด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส Texture TA.XT plus analyzer หัววัดที่ใช้ในการทดลอง คือ หัววัด P50 สภาวะที่ใช้ในการตั้งค่าการวัดมีรายละเอียด คือ ความเร็วก่อนทดสอบ (pre-test speed) 5 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วขณะทดสอบ (test speed) 1 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วหลังทดสอบ (post-test speed) 5 มิลลิเมตรต่อวินาที โดยกดหัววัดลงบนตัวอย่างเป็นระยะทางร้อยละ 50 ของความสูงตัวอย่าง รายงานหน่วยเป็นนิวตัน (N) [18] วัดค่า 15 ซ้ำ อัตราส่วนการพองตัว (expansion ratio) นำเวอร์เนียคาลิปเปอร์มาวัดขนาดของเอกซ์ทรูเดตจากนั้นนำค่าที่ได้ไปคำนวณดังสูตร คือ อัตราส่วนการพองตัว = เส้นผ่านศูนย์กลางของขนมขบเคี้ยว ÷ เส้นผ่านศูนย์กลางหน้าแปลน (Die) รายงานหน่วยเป็นเท่า [19] จำนวน 10 ซ้ำ

2.2.2 คุณค่าทางโภชนาการ ได้แก่ วิเคราะห์ปริมาณความชื้น เถ้า โปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต และใยหยาบ [20] จำนวน 3 ซ้ำ วิเคราะห์ปริมาณเส้นใยอาหาร (เส้นใยอาหารไม่ละลายน้ำและเส้นใยอาหารละลายน้ำ) [21] จำนวน 3 ซ้ำ วิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดด้วยวิธี Folin reagent method วัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 760 นาโนเมตร ใช้ gallic acid เป็นสารมาตรฐาน รายงานผลเป็น mg GAE/100 g sample dry weight จำนวน 3 ซ้ำ วิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ 2 วิธี คือ ความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระ (2,2 Diphenyl-1-picryhydrazyl scavenging activity, DPPH) วัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร ใช้ Trolox เป็นสารมาตรฐาน รายงานผลเป็นหน่วย mg TE/100 g sample dry weight จำนวน 3 ซ้ำ และความสามารถในการรีดิวซ์เฟอร์ริกของสารต้านอนุมูลอิสระ (ferric reducing antioxi-dant power assay, FRAP) วัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 595 นาโนเมตร ใช้ $FeSO_4$ เป็นสารมาตรฐาน รายงานผลเป็นหน่วย mg $FeSO_4$/100 g sample [22] จำนวน 3 ซ้ำ

2.2.3 ประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสด้วยวิธีการให้คะแนนความชอบ (9-point hedonic scale) กับผู้ทดสอบกลุ่มเป้าหมายที่มีอายุ 18-30 ปี จำนวน 50 คน ทดสอบในคุณลักษณะด้านสี ความพอง กลิ่นรส ความแข็ง รสชาติ และความชอบโดยรวม โดยโครงการวิจัยได้ผ่านการพิจารณาจริยธรรมการวิจัยจากคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ตามเอกสารเลขที่ COE62/044

2.2.4 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ นำข้อมูลค่าคุณภาพทางกายภาพ คุณค่าทางโภชนาการ และประสาทสัมผัสที่ได้จากการศึกษาสูตรระหว่างแป้งข้าวสินเหล็ก แป้งข้าวฟ่างดำ และอินูลินต่อคุณภาพของขนมขบเคี้ยวนั้น มาจากการจัดสิ่งทดลองแบบผสม (mixture design) วิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance, ANOVA) และทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยข้อมูลระหว่างสิ่งทดลองด้วยวิธี Duncan's new multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ จากนั้นนำข้อมูลแต่ละชุดที่ผ่านการวิเคราะห์คุณภาพมาวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง (RSM) ด้วยสมการถดถอยเชิงเส้นตรง (linear regression model) $Y_i = \beta X_1 + \beta X_2 \beta X_3$ จากนั้นนำข้อมูลพร้อมทั้งสมการสมการถดถอยเชิงเส้นตรงที่น่าเชื่อถือ โดยพิจารณาด้วยคุณภาพทางกายภาพ คุณค่าทางโภชนาการ และคุณภาพทางประสาทสัมผัสที่ได้มาสร้างแผนภาพคอน

ทัวร์ (contour plot) ด้วยโปรแกรม STATISTICA version 10 (trial version)

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์

3.1 อัตราส่วนระหว่างวัตถุดิบต่อคุณภาพทางกายภาพ

ผลการศึกษาอัตราส่วนระหว่างวัตถุดิบต่อคุณภาพของขนมขบเคี้ยวแสดงดังตารางที่ 2 พบว่าเมื่อปริมาณแป้งข้าวสินเหล็กเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 40 เป็น 45 และ 55 ตามลำดับ ส่งผลให้ค่าความสว่าง (L*) ค่าความเป็นสีเหลือง (b*) และอัตราการพองตัวของขนมขบเคี้ยวเพิ่มขึ้น ขณะที่เมื่อปริมาณของแป้งข้าวฟ่างดำที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าความสว่าง (L*) ค่าความเป็นสีเหลือง (b*) ลดลง เพราะข้าวฟ่างที่นำมาใช้มีลักษณะเด่น คือ มีเปลือกอ่อนสีดำหุ้มเมล็ดอยู่ซึ่งเปลือกอ่อนนั้นบริโภคได้ [23] จึงไม่ผ่านกระบวนการสีเอาเปลือกอ่อนที่หุ้มเมล็ดออกเมื่อนำไปบดเป็นแป้ง ลักษณะของแป้งที่ได้จึงมีสีดำเทา ส่งผลให้เมื่อนำไปเป็นส่วนผสมในขนมขบเคี้ยวที่มีปริมาณของแป้งข้าวสินเหล็กต่ำกว่าจึงทำให้ผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวที่ได้มีสีดำเทาตามลักษณะของวัตถุดิบที่ใช้ ซึ่งการเพิ่มปริมาณของแป้งข้างฟ่างดำยังส่งผลให้อัตราการพองตัวของขนมขบเคี้ยวลดลงด้วย เนื่องจากในแป้งข้าวฟ่างดำมีปริมาณของเส้นใยอาหารไม่ละลายน้ำสูง โดยจากการศึกษาคุณค่าทางโภชนาการเปรียบเทียบระหว่างแป้งข้าวสินเหล็กและแป้งข้าวฟ่างดำของ นิภาพร และคณะ แสดงให้เห็นว่าแป้งข้าวฟ่างดำมีปริมาณเส้นใยอาหารไม่ละลายน้ำสูงกว่าแป้งข้าวสินเหล็กถึง 5 เท่า ซึ่งเส้นใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำนี้จะไปขัดขวางการพองตัวของขนมขบเคี้ยว โดยจะปลดการดูดซับน้ำในระหว่างกระบวนการผลิต ทำให้ส่งผลต่อการขยายตัวของแป้งโด ลักษณะของขนมขบเคี้ยวที่ได้จึงมีค่าการพองตัวต่ำ [24,25] ส่วนค่าความเป็นสีแดง (a*) ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$) และเมื่อพิจารณาจากค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวจะเห็นได้ชัดเจนว่าเมื่อปริมาณของอินูลินเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 5 เป็น 10 และ 15 ตามลำดับ ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีค่าความแข็งลดลง ซึ่งมีความสัมพันธ์กันกับค่าความสว่าง (L*) ค่าความเป็นสีเหลือง (b*) และอัตราการพองตัวของขนมขบเคี้ยวที่เพิ่มขึ้น เนื่องมาจากอินูลินมีสีขาวจึงทำให้ผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวมีค่าความสว่าง (L*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b*) เพิ่มขึ้น ประกอบกับอินูลินมีสมบัติเป็นเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้ดี จึงสามารถไปแทรกตัวอยู่ในโครงสร้างเจลสตาร์ช ซึ่งการเติมเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้นี้ส่งผลให้ลักษณะของโด (Dough) มีความเหนียวลดลง โดยอินูลินจะไปสร้างพันธะไฮโดรเจนกับน้ำ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุลของอะไมโลเพคติน ความเหนียว และแรงเฉือนของโดมีค่าลดลงตามปริมาณของอินูลินที่เพิ่มขึ้น ขนมขบเคี้ยวที่ได้จึงมีลักษณะพองตัวมากและมีค่าความแข็งที่ต่ำ [26] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kaewjun [27] ที่พบว่าการเติมอินูลินและฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์ (ตั้งแต่ร้อยละ 8 ขึ้นไป) ในผลิตภัณฑ์ข้าวแผ่นกรอบ มีผลทำให้เนื้อสัมผัส (ค่าความแข็ง) ของข้าวแผ่นกรอบลดลง และการวัดคาปริมาณน้ำอิสระ (a_w) ของขนมขบเคี้ยวทั้ง 5 สูตร พบว่ามีค่า 0.17-0.32 โดยพบว่าขนมขบเคี้ยวสูตรที่มีปริมาณของแป้งข้าวสินเหล็กสูง มีผลทำให้ปริมาณน้ำอิสระเพิ่มขึ้น เนื่องจากผลการศึกษาคุณค่าทางโภชนาการของวัตถุดิบระหว่างแป้งข้าวสินเหล็กและแป้งข้าวฟ่างดำ พบว่าแป้งข้าวสินเหล็กมีปริมาณความชื้นสูงกว่าข้าวฟ่างดำ คิดเป็น 1.04 เท่า [24] อย่างไรก็ตาม ผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวที่ได้มีค่าปริมาณน้ำอิสระ (a_w) ต่ำกว่าร้อยละ 0.60 แสดงให้เห็นว่าขนมขบเคี้ยวชนิดพองกรอบทั้ง 5 สูตร อยู่ในช่วงที่ปลอดภัยจากจุลินทรีย์ [28]

Table 2 Physical properties of puffed snack from Sinlek riec flour, black sorghum flour, and inulin by extrusion process

Properties	Sinlek rice flour : Black sorghum flour : Inulin				
	55:40:5	45:40:15	40:45:15	40:55:5	45:45:10
Color values					
L*	57.01±0.50^{a}	56.90±0.61^{a}	54.16±0.22^{b}	51.13±1.22^{c}	54.32±0.18^{b}
a*	2.53±0.07^{a}	2.66±0.11^{a}	2.57±0.50^{a}	2.29±0.66^{a}	2.53±0.52^{a}
b*	13.05±0.20^{b}	13.34±0.11^{a}	13.31±0.08^{a}	12.64±0.22^{c}	13.28±0.16^{a}
Water activity (a_w)	0.32±0.00^{a}	0.32±0.01^{a}	0.17±0.02^{c}	0.17±0.01^{c}	0.25±0.00^{b}
Expansion ratio (fold)	1.59±0.02^{a}	1.57±0.07^{ab}	1.55±0.03^{ab}	1.54±0.36^{b}	1.56±0.02^{ab}
Hardness (N)	61.50±9.11^{a}	52.36±6.17^{ab}	52.47±8.22^{b}	61.97±9.56^{a}	55.82±8.16^{ab}

$^{a-c}$ Means in the same row with different superscripts are significant difference ($p \leq 0.05$).

Table 3 Nutritional values of snack from different amounts of Sinlek rice flour, black sorghum flour and inulin by extrusion process

Nutritional values	Sinlek rice flour : Black sorghum flour : Inulin				
	55:40:5	45:40:15	40:45:15	40:55:5	45:45:10
Moisture (%)	4.32±0.10^{a}	4.35±0.27^{a}	4.02±0.11^{b}	3.68±0.25^{c}	4.02±0.11^{b}
Ash (%)	1.87±0.09^{b}	1.72±0.08^{c}	2.01±0.33^{b}	2.21±0.01^{a}	1.91±0.04^{b}
Protein (%)	8.84±0.02^{a}	8.06±0.72^{b}	8.13±0.26^{b}	9.11±0.06^{a}	8.57±0.05^{ab}
Fat (%)	0.90±0.02^{b}	0.92±0.03^{b}	1.04±0.01^{ab}	1.08±0.15^{a}	1.03±0.07^{ab}
Crude fiber (%)	3.32±0.03^{c}	3.77±0.23^{bc}	4.18±0.22^{b}	4.95±0.56^{a}	3.91±0.30^{bc}
Carbohydrate (%)	85.07±0.10^{a}	82.64±1.32^{b}	84.74±0.29^{a}	82.91±0.66^{b}	84.47±0.29^{a}
Total dietary fiber^{ns} (%)	8.61±0.31	8.04±0.08	8.86±0.38	8.23±1.10	9.08±0.38
Insoluble dietary fiber (%)	7.04±0.42^{b}	6.99±0.25^{b}	7.52±0.20^{ab}	6.97±0.61^{b}	8.15±0.32^{a}
Soluble dietary fiber^{ns} (%)	1.56±0.49	1.05±0.32	1.34±0.55	1.27±1.07	0.93±0.13
TPC (mg GAE/100 g sample)	70.77±3.95^{b}	66.75±2.96^{b}	91.35±4.69^{a}	87.93±2.29^{a}	85.63±4.92^{a}
Antioxidant activity					
DPPH (mg TE/100 g sample)	35.91±0.33^{b}	33.67±1.24^{c}	37.95±0.05^{a}	36.98±1.21^{ab}	37.30±0.22^{ab}
FRAP (mg $FeSO_4$/100 g sample)	345.42±7.28^{b}	368.03±6.22^{ab}	348.47±8.13^{b}	376.77±1.98^{a}	378.21±7.74^{a}

$^{a-c}$ Means in the same row with different superscripts are significant difference ($p \leq 0.05$); ^{ns} Means in the same row are not significant difference ($p > 0.05$); TPC = total phenolic content; GAE = gallic acid equivalent; TE = trolox equivalent; $FeSO_4$ = ferrous sulfate.

3.2 อัตราส่วนระหว่างวัตถุดิบต่อคุณค่าทางโภชนาการ

ตารางที่ 3 แสดงคุณค่าทางโภชนาการของขนมขบเคี้ยวจากปริมาณส่วนของแป้งข้าวสินเหล็กต่อแป้งข้าวฟ่างดำต่ออินูลินที่ต่างกันด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน พบว่าเมื่อปริมาณแป้งข้าวฟ่างดำเพิ่มขึ้นในผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวชนิดพองกรอบจากร้อยละ 40 เป็น 45 และ 55 ตามลำดับ ส่งผลให้ขนมขบเคี้ยวมีคุณค่าทางโภชนาการในด้านโปรตีน ไขมัน เส้นใยหยาบ สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH และ FRAP สูงขึ้นด้วย ดังนั้นเมื่อผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวมีส่วนผสมของข้าวฟ่างดำในอัตราส่วนที่มากกว่าข้าวสินเหล็ก จึงส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวมีคุณค่าทางโภชนาการสูง ทั้งนี้เป็นเพราะว่าเมล็ดข้าวฟ่างดำที่ใช้ยังไม่ผ่านกระบวนการสีเอาเปลือกอ่อนสีดำที่หุ้มอยู่ออก จึงทำให้มีคุณค่าทางโภชนาการและสารประกอบอื่น ๆ สูงกว่าข้าวสินเหล็ก [23] การศึกษาของ Dykes และคณะ และ Awika และคณะ [29,30] ยังแสดงให้เห็นว่าข้าวฟ่างมีปริมาณสารประกอบฟีนอล โดยเฉพาะแอนโทไซยานิน 4.00-9.80 mg luteolinidin equivalents/g ซึ่งสูงกว่ามะเขือเทศถึง 4 เท่า การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระพบว่าข้าวฟ่างดำและรำข้าวมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูง (52-400 μmol TE/g) เมื่อเปรียบทียบกับธัญพืชอื่น ๆ (<0.1-34 mg TE/g) และเมื่อปริมาณอินูลินเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 5 เป็น 10 และ15 ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าปริมาณของเส้นใยอาหารไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากการวิเคราะห์เส้นใยอาหารตามวิธีของ Megazyme [21] ไม่ได้ออกแบบมาเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณของฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์ (FOS) จึงทำให้การวิเคราะห์ผลของปริมาณเส้นใยอาหารตามวิธีดังกล่าวในผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวที่มีส่วนผสมของอินูลินที่ระดับต่างกันได้ผลที่ไม่ต่างกัน [2]

3.3 อัตราส่วนระหว่างวัตถุดิบต่อการยอมรับทางประสาทสัมผัส

ผลการทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสพบว่าคะแนนความชอบด้าน สี การพองตัว กลิ่นรส ความแข็ง รสชาติ และความชอบโดยรวมของขนมขบเคี้ยวที่อัตราส่วนต่างกัน แสดงดังตารางที่ 4 พบว่าผู้ทดสอบให้คะแนนความชอบด้านสีและกลิ่นรสไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) ขณะที่คะแนน

Table 4 Sensory acceptance of puffed snack from Sinlek rice flour, black sorghum flour and inulin by extrusion process

Properties	Sinlek rice flour : Black sorghum flour : Inulin				
	55:40:5	45:40:15	40:45:15	40:55:5	45:45:10
Color^{ns}	6.32±1.50	6.50±1.51	6.54±1.76	6.38±1.56	6.64±1.29
Flavor^{ns}	6.06±1.62	6.16±1.51	6.38±1.55	6.24±1.26	6.46±1.43
Hardness	6.08±1.41^{c}	6.62±1.67^{ab}	6.72±1.33^{a}	6.30±1.32^{ab}	6.84±1.32^{a}
Taste	5.90±1.33^{c}	6.58±1.74^{ab}	6.74±1.68^{a}	6.06±1.26^{bc}	6.50±1.04^{ab}
Overall liking	6.38±0.96^{c}	6.54±1.32^{bc}	7.23±1.68^{a}	6.29±1.00^{c}	6.76±1.01^{b}

$^{a-c}$ Means in the same row with different superscripts are significant difference ($p \leq 0.05$); ^{ns} Means in the same row are not significant difference ($p > 0.05$).

Table 5 The predictive regression model for hardness, protein, dietary fiber and overall liking

Properties	Predictive Regression models	R^2
Hardness	$Y_1 = 0.646(X_1) + 0.677(X_2) - 0.271(X_3)$	1.00
Protein	$Y_2 = 0.085(X_1) + 0.103(X_2) + 0.006(X_3)$	1.00
Total dietary fiber	$Y_3 = 0.089(X_1) + 0.082(X_2) + 0.088(X_3)$	0.99
Overall liking	$Y_4 = 0.057(X_1) + 0.065(X_2) + 0.116(X_3)$	0.99

*X_1 = % Sinlek rice flour; X_2 = % Black sorghum flour; X_3 = % Inulin

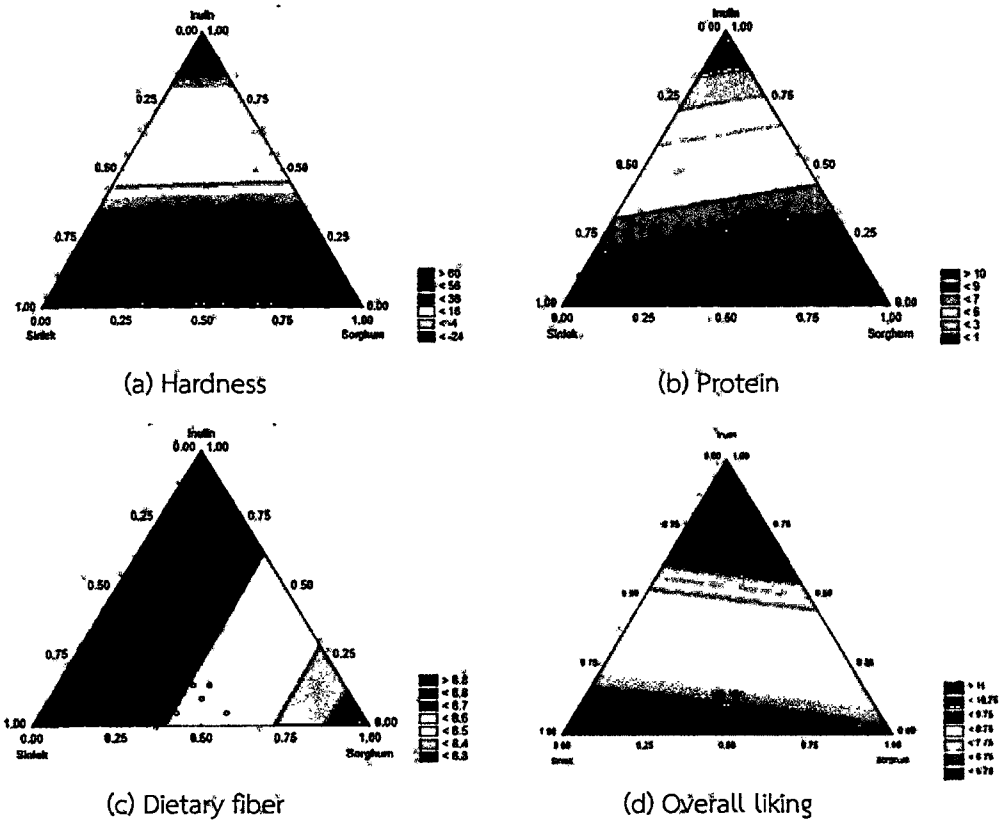
ความชอบด้านเนื้อสัมผัส (ความแข็ง) รสชาติ และความชอบโดยรวมมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยการเพิ่มปริมาณอินูลินจากร้อยละ 5 เป็น 10 และ15 ตามลำดับ ส่งผลให้ได้คะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัส (ความแข็ง) ด้านรสชาติและความชอบโดยรวมสูงขึ้น เนื่องจากอินูลินเป็นเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำจึงสามารถช่วยลดความเหนียวของโครงสร้างของแป้งโด (Dough) [26] โดยสูตรขนมขบเคี้ยวชนิดพองกรอบที่ใช้ปริมาณแป้งข้าวสินเหล็กร้อยละ 40 แป้งข้าวฟ่างดำร้อยละ 45 และอินูลินร้อยละ15 ได้รับคะแนนความชอบโดยรวมสูงที่สุดอยู่ในระดับชอบปานกลาง (7.23) เนื่องจากการใช้อินูลินไม่เพียงแต่ส่งผลให้การขยายตัวของขนมขบเคี้ยวชนิดพองกรอบเพิ่มมากขึ้นยังให้รสหวานแก่ผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยว [2,10] นอกจากนี้ส่วนผสมของผลิตภัณฑ์ของขนมขบเคี้ยวที่มาจากข้าวฟ่างดำที่มีส่วนประกอบของไขมันสูงถึงร้อยละ 8.46 [24] ซึ่งปริมาณไขมันที่พบสูงในข้าวฟ่างดำส่วนใหญ่จะเป็นลิโนเลอิก (linoleic) ร้อยละ 42.33-49.94 ลิโนเลนิก (linolenic) ร้อยละ 1.53-1.72 [31] ซึ่งไขมันมีส่วนช่วยทำให้เนื้อสัมผัสไม่แข็งกระด้าง และช่วยทำให้สามารถรับรสชาติในปากดีขึ้น [32] จึงทำให้ได้รับคะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัส (ความแข็ง) ด้านรสชาติ และความชอบโดยรวมสูงจากผู้บริโภค

3.4 การคัดเลือกสูตรที่เหมาะสมด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง

นำข้อมูลคุณภาพทางกายภาพ คุณค่าทางโภชนาการ และคุณภาพทางประสาทสัมผัสของขนมขบเคี้ยวที่มีอัตราส่วนของแป้งข้าวสินเหล็ก แป้งข้าวฟ่างดำ และอินูลินที่ต่างกัน 5 สิ่งทดลอง มาวิเคราะห์ผลทางสถิติด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (RSM) สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้สมการถดถอยเชิงเส้นตรง เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวแปรตอบสนอง ได้แก่ ค่าความแข็ง โปรตีน เส้นใยอาหาร และคะแนนความชอบโดยรวมกับอัตราส่วนของวัตถุดิบหลักแต่ละชนิด ดังสมการ $Y_i = \beta X_1 + \beta X_2 + \beta X_3$ โดย Y_i คือ ค่าตัวแปรตอบสนอง; X_1 คือ ปริมาณข้าวสินเหล็ก; X_2 คือ ปริมาณข้าวฟ่างดำ; X_3 คือ ปริมาณอินูลิน โดยปริมาณร้อยละของอัตราส่วนของวัตถุดิบหลักแต่ละชนิด สามารถอธิบายความแปรปรวนที่เกิดขึ้น 0.99-1.00 ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 5

เมื่อพิจารณาสมการถดถอยเชิงเส้นตรงคุณภาพทางกายภาพด้านความแข็ง พบว่าค่าความแข็งของแป้งข้าวฟ่างดำ (X_2) มีค่าสัมประสิทธิ์สูงที่สุด รองลงมา คือ แป้งข้าวสินเหล็ก (X_1) และอินูลิน (X_3) แสดงให้เห็นว่าปริมาณของแป้งข้าวฟ่างดำมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวมากที่สุด และเมื่อพิจารณาจากเครื่องหมายบวก (+) และลบ (-)

พบว่าเป็นบวกซึ่งแสดงว่ามีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ หากแป้งข้าวฟ่างดำยิ่งมาก ค่าความแข็งก็จะยิ่งมากขึ้นด้วย โดยพิจารณาจากรูปที่ 1a พบว่าเมื่อปริมาณแป้งข้าวฟ่างดำเพิ่มขึ้นทำให้ผลิตภัณฑ์มีค่าความแข็งเพิ่มขึ้น เนื่องจากในข้าวฟ่างดำมีปริมาณของเส้นใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำมาก ซึ่งมีผลต่อการขยายตัวของขนมขบเคี้ยว เมื่อพิจารณาคุณภาพทางเคมีด้านโปรตีนพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของแป้งข้าวฟ่างดำ (X_2) มีค่าสูงที่สุด รองลงมา คือ แป้งข้าวสินเหล็ก (X_1) และอินูลิน (X_3) ส่วนด้านเส้นใยอาหารพบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์ใกล้เคียงกัน (0.082-0.089) โดยพบว่าปริมาณแป้งข้าวสินเหล็ก (X_1) มีค่าสัมประสิทธิ์สูงที่สุด รองลงมา คือ อินูลิน (X_3) และแป้งข้าวฟ่างดำ (X_2) ดังนั้นการเพิ่มปริมาณของส่วนผสมทั้ง 3 ชนิด นี้ล้วนส่งผลให้ปริมาณเส้นใยอาหารเพิ่มขึ้น และคุณภาพทางประสาทสัมผัสด้านความชอบโดยรวมพบว่าอินูลิน (X_3) มีค่าสัมประสิทธิ์สูงที่สุด รองลงมา คือ แป้งข้าวฟ่างดำ (X_2) และแป้งข้าวสินเหล็ก (X_1)



(a) Hardness (b) Protein

(c) Dietary fiber (d) Overall liking

Figure 1 Contour plot of hardness (a), protein (b), dietary fiber (c) and overall liking (d)

การนำแผนภาพคอนทัวร์มาซ้อนทับกันเพื่อหาพื้นที่ที่เหมาะสมในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยว โดยใช้เกณฑ์ในด้านคุณภาพทางกายภาพ คุณค่าทางโภชนาการ และคะแนนคุณภาพทางประสาทสัมผัสให้ตรงกับความต้องการของผู้บริโภคมากที่สุด และเพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีคุณค่าทางโภชนาการสูง โดยด้านเนื้อสัมผัส (ความแข็ง) ใช้เกณฑ์การตัดหาจุดเหมาะสมที่ค่าความแข็ง 55 นิวตัน เมื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์

ขนมขบเคี้ยวชนิดพองกรอบตามท้องตลาด มีค่าความแข็งประมาณ 49 นิวตัน ด้านปริมาณโปรตีนใช้เกณฑ์การตัดหาจุดที่เหมาะสมโดยใช้เกณฑ์ประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 182) ที่ระบุว่า "เป็นแหล่งของโปรตีน" จะต้องมีปริมาณโปรตีนไม่น้อยกว่า 5 กรัม/100 กรัม โดยน้ำหนักแห้ง ด้านปริมาณเส้นใยอาหาร ใช้เกณฑ์ประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 182) ที่ระบุว่า "เส้นใยอาหารสูง" จะต้องมีปริมาณเส้นใยอาหารไม่น้อยกว่า 6 กรัม/100กรัม โดยน้ำหนักแห้ง และคะแนนด้านความชอบโดยรวม ใช้เกณฑ์การตัดหาจุดที่เหมาะสมที่คะแนนความชอบตั้งแต่ 6.50 (ชอบเล็กน้อย) ขึ้นไป เมื่อนำแผนภาพคอนทัวร์มาซ้อนทับกันพบว่า มี 3 สิ่งทดลอง ที่อยู่ในบริเวณพื้นที่ทับซ้อน คือ สิ่งทดลองที่ 2, 3 และ 5 ที่มีปริมาณแป้งข้าวสินเหล็กต่อแป้งข้าวฟ่างดำต่ออินูลิน 45:40:15, 40:45:15 และ 45:45:10 ตามลำดับ (รูปที่ 2)

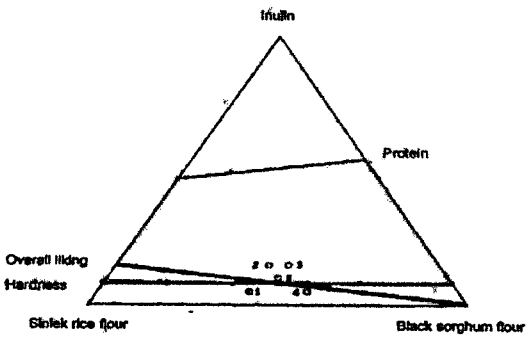


Figure 2 The superimposed contours of hardness, protein, dietary fiber and overall liking

ดังนั้นช่วงที่เหมาะสมในการผลิตขนมขบเคี้ยวชนิดพองกรอบจากแป้งข้าวสินเหล็กต่อแป้งข้าวฟ่างดำต่ออินูลิน คือ แป้งข้าวสินเหล็กร้อยละ 0-80 แป้งข้าวฟ่างดำร้อยละ 0-90 และอินูลินร้อยละ 10-50 อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาตามข้อกำหนดแล้วพบว่าปริมาณอินูลินที่สามารถบริโภคใน 1 วัน ไม่ควรเกิน 15-40 กรัม เนื่องจากอาจทำให้เกิดอาการท้องเสียได้ [16] ดังนั้นสูตรที่เหมาะสมกับการผลิตขนมขบเคี้ยวชนิดพองกรอบใยอาหารสูง คือ สิ่งทดลองที่ 3 ประกอบด้วยแป้งข้าวสินเหล็กร้อยละ 40 แป้งข้าวฟ่างดำร้อยละ 45 และอินูลินร้อยละ 15 เนื่องจากเป็นสูตรที่ได้รับคะแนนความชอบโดยรวมสูงที่สุดอยู่ในระดับชอบปานกลาง มีค่าเฉลี่ย 7.23

4. สรุป

การพัฒนาสูตรที่เหมาะสมในการผลิตขนมขบเคี้ยวชนิดพองกรอบใยอาหารสูง การใช้วิธีพื้นผิวตอบสนองแสดงให้เห็นว่าขอบเขตช่วงที่เหมาะสมในการผลิตขนมขบเคี้ยวชนิดพองกรอบจากแป้งข้าวสินเหล็กต่อแป้งข้าวฟ่างดำต่ออินูลิน คือ แป้งข้าวสินเหล็กร้อยละ 0-80 แป้งข้าวฟ่างดำร้อยละ 0-90 และอินูลินร้อยละ 10-50 ดังนั้นสูตรที่เหมาะสมในการนำมาผลิตเป็นขนมขบเคี้ยวชนิดพองกรอบใยอาหารสูง คือ แป้งข้าวสินเหล็ก แป้งข้าวฟ่างดำ และอินูลินร้อยละ 40, 45 และ15 ตามลำดับ เมื่อนำมาคำนวณคุณค่าทางโภชนาการปริมาณหนึ่งหน่วยบริโภค (30 กรัม) พบว่าผลิตภัณฑ์ที่พัฒนาได้มีเส้นใยอาหารสูง (17.72 กรัม) และเป็นแหล่งของโปรตีน (8.13) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวัตถุดิบการเกษตรของไทยที่ได้มาจากการปรับปรุงพันธุ์ทั้งข้าวสินเหล็กและข้าวฟ่างดำ มีศักยภาพในการนำมาผลิตเป็นขนมขบเคี้ยวชนิดพองกรอบใยอาหารสูงและเป็นแหล่งของโปรตีน เหมาะสำหรับการพัฒนาเป็นขนมขบเคี้ยวเพื่อสุขภาพ

5. References

[1] New Nutrition Business, Top 2016 Trends from New Nutrition Business, Available Source: http://www.fdbusiness.com/top-

2016-trends-from-new-nutrition-business, March 15, 2016.

[2] Brennan, M.A., Monro, J.A. and Brennan, C.S., 2008, Effect of inclusion of soluble and insoluble fibres into extruded breakfast cereal products made with reverse screw configuration, LWT J. Sci. Technol. 43: 2278-2288.

[3] National Statistical Office, 2018, The 2017 Food Consumption Behavior Survey, Bangkok. (in Thai)

[4] Naivikul, O., 2015, Rice: Science and technology, Kasetsart University, Bangkok. (in Thai)

[5] Soonsuwon, W., *Sorghum*, Available Source: http://www.natres.psu.ac.th/Department/PlantScience/510-211/lecture note/sorghum.doc, October 20, 2017.

[6] Komchadluek, Agriculture Held the 39th National Corn-Sorghum Academic Conference, Available Source: http://www.komchadluek.net/news/agricultural/377683, July 31, 2019. (in Thai)

[7] Sudkaew, N., 2007, Inhibition of anemia, balsam, cancer with Sinlek rice and Riceberry rice great value of rice in the treatment of diseases, Nat. Agric. J. 10: 15-21. (in Thai)

[8] Fans, A., The High- Fiber, Gluten- Free Ancient Grain: Sorghum Flour, Available Source: https://draxe.com/sorghum-flour, March 13, 2018.

[9] Wojtowicz, A., Moscicki, L., Oniszczuk, T., Combrzynski, M. and Mitrus, M., 2014, The effect of fiber addition on the extrusion-cooking stability and quality of enriched corn snacks, Teka Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa J. 14: 141-146.

[10] Daengprok, W., 2011, The use of inulin is a fat substitute in low fat sausage products, Food J. 40(1): 37-40. (in Thai)

[11] Sangsukaium, P. and Suihiran, R., 2015, The Optimization of Dyestuffs Extraction from Butterfly Pea Petal Using Response Surface Methodology, pp. 1-8, Research Report, The 7th NPRU National Academic Conference, Nakhon Pathom Rajabhat University, Nakhon Pathom. (in Thai)

[12] Sadhukhan, B., Mondal, N. K. and Chattorai, S., 2016, Optimisation using central composite design (CCD) and the desirability function for sorption of methylene blue from aqueous solution onto Lemna major, Karbala Int. J. Mod. Sci. 2: 145-155.

[13] Chanpiak, A., Dumnin, P. and Hongpuay, A., 2018, Optimization of oil extraction from spent coffee grounds (*Coffea Canephora* var. Robusta/Coffea Arabica) by hexane using response surface methodology, J. KMUTNB 28: 799-811.

[14] Kokkaew, H., Sukhreep, K. and Pitirit, T., 2015, Optimal conditions of anthocyanin phenolic and antioxidant content in purple waxy corn cake using response surface methodology, Khon Kaen Agric. J.

43(1): 790-798. (in Thai)

[15] Na Sakon Nakhon, P.P., Kamolwan, J., Anuvat, J. and Chulaluck, C., 2018, Optimization of pumpkin and feed moisture content to produce healthy pumpkin-germinated brown rice extruded snacks, Agric. Nat. Res. J. 52: 550-556.

[16] Tanjor, S., Judprasong, K., Chaito, C. and Jogloy, S., 2012, Inulin and Fructooligosa charides in Different Varieties of Jerusalem Artichoke (Helianthus tuberosus L.), KKU Res. J. 17(11): 25-34. (in Thai)

[17] Devi, N.L., Shobha, S., Tang, X., Shaur, S. A., Dogan, H. and Alavi, S., 2013, Development of protein- rich sorghum-based expanded snacks using extrusion technology, Food Prop. J. 16: 263-276.

[18] Pardhi, S.D., singh, B., Nayik, G.A. and Dar, B.N., 2017, Evaluation of functional properties of extruded snacks developed from brown rice grits by using response surface methodology, J. Saudi Soc. Aagric. Sci. 18: 1-11.

[19] Ding, Q.B., Ainsworth, P., Plunkett, A., Tucker, G. and Marson, H., 2006, The effect of extrusion conditions on the functional and physical properties of wheat-based expanded snacks, Food Eng. J. 3: 142-148.

[20] AOAC, 2012, Official Methods of Analysis of AOAC International, 19th Ed., AOAC International, Gaithersburg, MA.

[21] Megazyme, 2016, Total Dietary Fiber, International, Ireland.

[22] Chalermchaiwat, P., Jangchud, K., Jangchud, A., Charunuch, C. and Priyawiwatkul, W., 2015, Antioxidant activity, free gamma- aminobutyric acid content, selected physical properties and consumer acceptance of germinated brown rice extrudates as affected by extrusion process, Food Sci. Technol. J. 64: 490-496.

[23] Pookpakdee, A., Thongphanak, P., Aekatasanawan, C., Pothisoong, T., Chuvathiwat, P. and Aunwanich, W., 2011, Plant Varieties Developed by Kasetsart University, Kasetsart University Research and Development Institute, Kasetsart University, Bangkok. (in Thai)

[24] Kunna, N., Chalermchaiwat, P., Siriwong, N. and Chanput, W., 2020, Formula optimization for producing high fiber puffed snack made from sinlek rice flour black sorghum flour and inulin, Thai Sci. Technol. J. 28(3): 419-428. (in Thai)

[25] Selani, M.M., Canniattibrazaca, S.G., Dias, C.T., Ratnayake, W.S., Flores, R.A. and Bianchini, A., 2014, Characterisation and potential application of pineapple pomace in an extruded product for fibre enhancement, Food Chem. J. 163: 23-33.

[26] Peressini, D., Foschia, M., Tubaro, F. and Sensidoni, A., 2015, Impact of soluble dietary fibre on the characteristics of extruded snacks, Food Hydrocoll. J. 43:

73-81.

[27] Kaewjun, D., 2015, Supplementation of Prebiotic Dietary Fibers in Rice Cracker, Silpakorn University, Nakhon Pathom.

[28] Rattanapanon, N., 2008. Food Chemistry, 3rd Ed., OS Printing House, Bangkok. (in Thai)

[29] Dykes, L., Rooney, W.L. and Rooney, L.W., 2013, Evaluation of phenolics and antioxidant activity of black sorghum hybrids, Cereal Sci. J. 58: 278-283.

[30] Awika, M.J., Rooney, L.W. and Waniska, R.D., 2004, Anthocyanins from black sorghum and their antioxidant properties, Food Chem. J. 90: 293-301.

[31] Afify, M. R. A., El- Belltagi, H. S., Abd El-Salam, S.M. and Omran, A.A., 2012, Oil and fatty acid contents of white sorghum varieties under soaking, cooking, germination and fermentation processing for improving cereal quality, J. Not. Bot. Hort. Agrobo. 40: 86-92.

[32] Charoenkun, A., 2010, Introduction to Food Processing, Department of Science and food technology, Faculty of Science, University of the Thai Chamber of Commerce, Bangkok. (in Thai)