



<https://li01.tci-thaijo.org/index.php/pajrmu/index>

บทความวิจัย

ผลของระดับเต้าหู้ต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากพืช

จิรนนท์ รัตสีวอ¹ จิรายุ มุสิก² สหสา พลนิล³ และ อนุวัฒน์ ศรีสุวรรณ^{4*}

¹สาขาเทคโนโลยีและนวัตกรรมอาหาร คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏศรีสะเกษ อำเภอเมือง จังหวัดศรีสะเกษ 33000 ประเทศไทย

²สาขาอุตสาหกรรมเกษตร คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อำเภวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี 34190 ประเทศไทย

³สาขาคอมพิวเตอร์ธุรกิจดิจิทัล มหาวิทยาลัยราชภัฏศรีสะเกษ อำเภอเมือง จังหวัดศรีสะเกษ 33000 ประเทศไทย

⁴สาขาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมและสิ่งแวดล้อม คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏศรีสะเกษ อำเภอเมือง จังหวัดศรีสะเกษ 33000 ประเทศไทย

ข้อมูลบทความ

Article history

รับ: 22 สิงหาคม 2568

แก้ไข: 10 กุมภาพันธ์ 2569

ตอบรับการตีพิมพ์: 30 มีนาคม 2569

ตีพิมพ์ออนไลน์: 27 เมษายน 2569

คำสำคัญ

เต้าหู้

เนื้อเทียมจากพืช

สมบัติทางเคมีกายภาพ

สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด

เนื้อสัมผัส

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของระดับการเติมเต้าหู้ต่อสมบัติทางเคมีกายภาพ และการประเมินคุณสมบัติทางประสาทสัมผัสในการพัฒนาเนื้อเทียมจากพืช โดยใช้เต้าหู้ในปริมาณที่แตกต่างกันต่อสูตร (90 95 100 และ 105 กรัม) จากนั้นตรวจสอบสมบัติทางเคมีกายภาพ ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส ผลการศึกษาพบว่าสูตรที่มีเต้าหู้ 105 กรัมมีปริมาณความชื้นและค่าออกซิเดชันต่ำสุด แต่มีค่าความแข็งต่ำสุด นอกจากนี้มีปริมาณโปรตีนและสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดสูงสุด (ร้อยละ 46.46 และ 66.90 mg GAE/g db ตามลำดับ) สูตรที่มีเต้าหู้ 105 กรัม มีคะแนนประเมินทางประสาทสัมผัสจากผู้บริโภคสูงสุดในด้านรสชาติและเนื้อสัมผัส ผลการศึกษาชี้ว่าสูตร 105 กรัม มีความเหมาะสมต่อการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ต้นแบบมากที่สุด เนื่องจากมีปริมาณโปรตีน สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดสูงสุด และมีคะแนนการยอมรับของผู้บริโภคสูงสุด องค์ความรู้จากการวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการประยุกต์ใช้เต้าหู้ที่เหมาะสมในการสร้างผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมที่มีคุณค่าทางโปรตีนและสารประกอบฟีนอลิกสูง ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อสุขภาพและมีศักยภาพในการประยุกต์ใช้ทั้งในระดับครัวเรือนและอุตสาหกรรมขนาดเล็ก เพื่อเพิ่มมูลค่าแก่พืชตระกูลถั่วและสนับสนุนการพัฒนาผลิตภัณฑ์โปรตีนทางเลือกอย่างยั่งยืน

บทนำ

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา แนวโน้มการบริโภคผลิตภัณฑ์จากพืชแทนเนื้อสัตว์ (Plant-Based Meat; PBM) เพิ่มขึ้นทั้งในประเทศไทยและทั่วโลก อันเนื่องมาจากการตระหนักถึงผลกระทบต่อด้านสุขภาพจากการบริโภคเนื้อสัตว์มากเกินไป ตลอดจนปัจจัยด้านจริยธรรม สิ่งแวดล้อม และแนวคิดความยั่งยืน (Kyriakopoulou et al., 2021) ผลิตภัณฑ์เนื้อจากพืชมักได้รับความนิยมในกลุ่มผู้บริโภคที่ใส่ใจสุขภาพ เนื่องจากมีองค์ประกอบทางโภชนาการที่พึงประสงค์ เช่น โปรตีนและใยอาหารสูง ไขมันอิ่มตัวต่ำ และปราศจากคอเลสเตอรอล ซึ่งเชื่อมโยงกับการลดความเสี่ยงของโรคไม่ติดต่อเรื้อรัง (NCDs) (Friedman & Brandon, 2001) ขณะเดียวกัน PBM ได้เลียนแบบลักษณะของเนื้อสัตว์ในด้านสี กลิ่น เนื้อสัมผัส และรสชาติ โดยมีการใช้โปรตีนจากพืชหลากหลายชนิด เช่น ถั่วเหลือง ข้าวสาลี ถั่วลันเตา และธัญพืชอื่น ๆ (Kyriakopoulou et al., 2021) โดยเฉพาะถั่วเหลือง ซึ่งจัดเป็นแหล่งโปรตีนคุณภาพที่มีกรดอะมิโนจำเป็นค่อนข้างครบถ้วน มีองค์ประกอบทางโภชนาการสำคัญ เช่น ไอโซฟลาโวน ซาโปนิน เลซิทีน และกรดไขมันไม่อิ่มตัว ซึ่งสัมพันธ์กับฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและผลต่อเมแทบอลิซึมไขมัน (Friedman & Brandon, 2001, Messina et al., 2016; Tangkhawanit et al., 2022)

ในการพัฒนาสูตร PBM ปัจจัยเชิงเทคโนโลยีที่กำหนดคุณภาพสำคัญได้แก่ ชนิดและสัดส่วนโปรตีน ชนิดไขมัน วัสดุยึดประสาน สารเพิ่มความหนืด ตลอดจนกระบวนการจัดโครงสร้างการอัดรีดความชื้นสูง เพื่อสร้างโครงสร้างเนื้อเทียมที่เสถียรและเนื้อสัมผัสใกล้เคียงเนื้อสัตว์ (Jang & Lee, 2024; Kyriakopoulou et al., 2021) ในเชิงสูตร วัสดุยึดประสานมีบทบาทต่อความคงรูป ความฉ่ำ และสมบัติเชิงกล เช่น ความแข็ง และความยืดหยุ่น โดยเมทิลเซลลูโลสเป็นตัวอยางสารที่ใช้แพร่หลายเพราะเกิดเจลเมื่อให้ความร้อน อย่างไรก็ตามการแสวงหาทางเลือกจากวัตถุดิบธรรมชาติยังมีความจำเป็น (Jang & Lee, 2024; Kyriakopoulou et al., 2021) ซึ่งสามารถใช้งานได้ตั้งแต่ระดับครัวเรือนจนถึงอุตสาหกรรม เช่น การใช้ผงกลูเตน การใช้หมัก ซึ่งหมักกลูเตนเป็นองค์ประกอบหลักเป็นวัสดุยึดประสานช่วยให้เกิดการยึดเกาะของโครงสร้างเป็นเนื้อเทียมโปรตีนจากพืชได้

เต้าหู้คือผลิตภัณฑ์จากถั่วเหลือง (tofu) เป็นวัตถุดิบดั้งเดิมในกลุ่มโปรตีนพืชซึ่งมีโครงสร้างเป็นเจลโปรตีนที่มีความชื้นสูงและศักยภาพในการอุ้มน้ำ สามารถหาหน้ำที่เป็นตัวเพิ่มเนื้อสัมผัสได้โดยคุณภาพของเจลเต้าหู้ขึ้นกับองค์ประกอบโปรตีนของถั่วเหลืองและชนิดสารตกตะกอน ซึ่งสัมพันธ์กับความแน่นของโครงข่ายและความแข็งของเจล (Guan et al., 2021; Dang et al., 2023; Jang & Lee,

* Corresponding author

E-mail address: anuwat.s@sskru.ac.th (A. Srisuwan)

Online print: 27 April 2026 Copyright © 2026. This is an open access article, production, and hosting by Faculty of Agricultural Technology, Rajabhat Maha Sarakham University. <https://doi.org/10.14456/paj.2026.2>

2024) ยิ่งไปกว่านั้น ผลิตภัณฑ์จากถั่วเหลืองรวมถึงเต้าหู้ยังเป็นแหล่งของสารประกอบฟีนอลิก (เช่น ไอโซฟลาโวนและกรดฟีนอลิก) ซึ่งมีบทบาทด้านออกซิเดชัน สารประกอบฟีนอลิกเป็นกลุ่มสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่พบอย่างแพร่หลายในพืช โดยมีโครงสร้างพื้นฐานเป็นวงแหวนอะโรมาติกที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) หนึ่งหมู่หรือมากกว่า สารกลุ่มนี้ทำหน้าที่สำคัญในการปกป้องพืชจากปัจจัยคุกคาม เช่น รังสียูวี จุลินทรีย์ก่อโรค และแมลง (Balasundram et al., 2006) ในด้านโภชนาการและสุขภาพ สารประกอบฟีนอลิกมีบทบาทเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่สามารถยับยั้งหรือชะลอการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ลดความเสียหายของเซลล์จากอนุมูลอิสระ จึงช่วยลดความเสี่ยงต่อโรคไม่ติดต่อเรื้อรัง เช่น โรคหัวใจและหลอดเลือด เบาหวานชนิดที่ 2 และมะเร็งบางชนิด (Pandey & Rizvi, 2009; Scalbert et al., 2005; Tangkhawanit et al, 2022) นอกจากนี้ยังมีฤทธิ์ด้านการอักเสบ และปรับสมดุลจุลินทรีย์ในลำไส้ ซึ่งช่วยเสริมระบบภูมิคุ้มกัน (Dominguez-López et al., 2024) มีงานวิจัยที่ศึกษาการพัฒนาผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากพืชในด้านกระบวนการผลิต การเลือกวัตถุดิบ และคุณภาพของผลิตภัณฑ์โดยรวม งานวิจัยส่วนใหญ่ศึกษาการใช้โปรตีนสกัด เช่น โปรตีนถั่วเหลืองไอโซเลต (Soy protein isolate) โปรตีนถั่วเหลืองเข้มข้น หรือตัวกลางการสร้างเนื้อสัมผัส หรือการผสมโปรตีนจากพืชชนิดต่าง ๆ เพื่อเพิ่มโครงสร้างเส้นใยในเนื้อเทียมและพัฒนาคุณสมบัติทางกลและเคมีของผลิตภัณฑ์ (Ishaq et al., 2022; Zahari et al., 2022) นอกจากนี้การเลือกแหล่งโปรตีนและเทคนิคกระบวนการผลิตมีผลสำคัญต่อการเลียนแบบโครงสร้างและคุณภาพของเนื้อเทียม อย่างไรก็ตามยังขาดข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับการใช้วัตถุดิบโปรตีนที่ไม่ผ่านการสกัดขั้นสูงโดยตรง เช่น เต้าหู้ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากถั่วเหลืองที่ผลิตได้ง่ายในระดับครัวเรือนหรืออุตสาหกรรมขนาดเล็ก คงโครงสร้างธรรมชาติ มีองค์ประกอบโปรตีนพร้อมใยอาหารสูง มีผลต่อเนื้อสัมผัสและโภชนาการตามธรรมชาติ (Samad, 2025) มีงานวิจัยศึกษาการใช้เต้าหู้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมแบบนักเก็ต ซึ่งพบว่าเต้าหู้

สามารถใช้เป็นฐานในการทดแทนเนื้อสัตว์เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณค่าทางโภชนาการและคุณภาพการรับประทานใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ที่ทำจากเนื้อสัตว์ (Manzanillo & Jr, 2025) อย่างไรก็ตาม ผลการศึกษาดังกล่าวมักมุ่งเน้นเฉพาะผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป (Ready to eat) เช่น นักเก็ตเท่านั้น และไม่ครอบคลุมการ ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ และโภชนาการของเนื้อเทียมที่พัฒนาด้วยกระบวนการอบแบบง่ายที่สามารถนำไปอุ่นรับประทาน (Ready to heat) ที่ใช้เต้าหู้เป็นฐาน มีโภชนาการที่เหมาะสมสำหรับอาหารพร้อมอุ่นรับประทาน ก่อนหน้าของ Lohasupthawee et al. (2021) ซึ่งใช้สัดส่วนของแหล่งโปรตีนจากพืชร่วมกับวัตถุดิบปรับโครงสร้าง (Structural modifiers) เพื่อเสริมคุณลักษณะทางเนื้อสัมผัสและความสามารถในการกักเก็บน้ำของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียม แต่ยังไม่มีการใช้ปริมาณเต้าหู้เป็นฐาน อย่างไรก็ตามการศึกษาเกี่ยวกับระดับการเติมเต้าหู้ที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพ และเคมีของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากพืชยังมีจำกัด มีงานวิจัยโดยในงานวิจัยนี้ มุ่งเน้นให้ได้ค่าพารามิเตอร์ทางกายภาพ เคมี และประสาทสัมผัสที่เหมาะสมที่สุดที่สามารถเพิ่มความชุ่มชื้นและลดค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์ได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยไม่ทำให้โครงสร้างของผลิตภัณฑ์เสียสมดุล เพื่อสนับสนุนการพัฒนาเป็นสูตรต้นแบบที่มีศักยภาพในระดับอุตสาหกรรมขนาดย่อมและระดับครัวเรือน ในการวิจัยครั้งนี้ จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการผลของระดับการเติมเต้าหู้ (90–105 กรัม) ในการทำเนื้อเทียมจากพืช จากนั้นประเมินสมบัติทางกายภาพ ปริมาณโปรตีนและสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด รวมทั้งการประเมินทางประสาทสัมผัสของผู้บริโภค เพื่อให้ได้ข้อมูลสำหรับการประยุกต์ใช้เต้าหู้ และต่อยอดการพัฒนาสูตร PBM เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการพัฒนาผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากพืชที่สามารถผลิตระดับครัวเรือนได้ต่อไป

Table 1 Plant-based meat formulations with different levels of tofu

Formulation	Tofu (g)	Black Pepper Sauce (g)	Steamed Soybean Residue (g)	Shiitake Seasoning Powder (g)	Water (ml)	Wheat Gluten (g)	Wheat Flour (g)
Plant-based with tofu 90 g.	90	10.5	10.5	3	6	45	45
Plant-based with tofu 95 g.	95	10.5	10.5	3	6	40	45
Plant-based with tofu 100 g.	100	10.5	10.5	3	6	35	45
Plant-based with tofu 105 g.	105	10.5	10.5	3	6	30	45

การเตรียมสูตรผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากพืช

ผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากพืชมีสูตรที่ดัดแปลงจาก Lohasupthawee et al. (2021) ดังนี้ แบ่งการผสมเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 คือ ส่วนผสมเปียก ส่วนผสมได้แก่ เต้าหู้ (โดยผั่นแปรปริมาณเต้าหู้จำนวน 4 ระดับ คือ 90 95 100 และ 105 กรัมต่อสูตร) ซอสพริกไทยดำ กากถั่วเหลืองนึ่ง ผงปรุงรสเห็ดหอม และ น้ำสะอาด ผสมให้เข้าด้วยกันด้วยเครื่องปั่นโดยใช้ความแรงระดับต่ำ ส่วนที่ 2 นำแป้งหมักกึ่งใส่ขามผสม และผสมกับส่วนผสมที่ปั่นลงไป แล้วนวดจนเป็นเนื้อเดียวกัน หลังจากเข้ากันแล้วค่อย ๆ ใส่แป้งสาลีแล้วนวดต่อจนเป็นเนื้อเดียวกัน (รายละเอียดส่วนผสมแสดงดัง Table 1) ซึ่งเนื้อเทียม 150 กรัมต่อชิ้น ปั่นเนื้อเทียมเป็นก้อน อัดใส่บล็อกทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า แล้วกดให้แน่นเป็นแผ่นขนาดความหนา 1 เซนติเมตร จากนั้นนำไปวางบน

แผ่นซิลิโคนสำหรับอบเบเกอรี่ที่ทาน้ำมันพืชบาง ๆ นำไปอบด้วยเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นกลับด้านของเนื้อแล้วอบต่อเป็นเวลา 15 นาที เมื่อครบเวลาวางไว้ให้เย็นลงและบรรจุแบบสุญญากาศเก็บในตู้เย็นหรืออุณหภูมิต่ำกว่า 10 องศาเซลเซียส แล้วนำไปวิเคราะห์คุณภาพ

การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมี

วิเคราะห์ปริมาณความชื้นตามวิธี Association of Official Analytical Chemists (AOAC) (2000) และ หาค่าวอเตอร์แอกทิวิตี (a_w) โดยใช้เครื่อง water activity วิเคราะห์ตัวอย่าง 3 ซ้ำต่อสูตร รายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน การวัดความแข็ง (hardness) ของผลิตภัณฑ์โดยใช้เครื่อง Texture Analyzer (XTplus, Stable Micro Systems, UK) (Lohasupthawee et al., 2021) วัด

ค่าแรงกดโดยใช้หัวกดทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 เซนติเมตร load cell 1 กิโลนิวตัน กดสองครั้ง ที่ความเร็ว 40 มิลลิเมตร/นาที ด้วยระยะการกดร้อยละ 70 ของความสูงตัวอย่าง วิเคราะห์ 8 ซ้ำ/สูตร รายงานเป็นค่าความแข็ง (Hardness)

วิเคราะห์ปริมาณโปรตีนโดยเทคนิคเจลดาทาลวิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐานของ Association of Official Analytical Chemists (AOAC) (2000) และรายงานเป็นร้อยละ (wb)

การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด

การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (Total Phenolic Content; TPC)

ทำการวิเคราะห์ ด้วยวิธี Folin–Ciocalteu โดยดัดแปลงจาก Ratseewo et al. (2025) ดังนี้ ชั่งตัวอย่างเนื้อเทียมจากพืช เดิมเอทานอลร้อยละ 80 (v/v) ในอัตราส่วนตัวอย่างต่อสารทำลาย 1:10 (w/v) เขย่าที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นกรองเอาส่วนใสและปั่นเหวี่ยงที่ $1,400 \times g$ นาน 20 นาที เก็บชิ้นสารสกัดส่วนบนไว้ที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส จนกว่าจะวิเคราะห์ ทำซ้ำ 3 ชุด สำหรับปฏิกิริยา Folin–Ciocalteu เตรียมกราฟมาตรฐานจากสารละลายกรดแกลลิก จากนั้นผสมสารละลายตัวอย่าง 300 ไมโครลิตร กับสารละลาย Folin–Ciocalteu reagent 2.25 ไมโครลิตร เขย่าและพักในที่มืดที่อุณหภูมิห้อง 5 นาที เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.35 โมลาร์ ปริมาตร 2.25 ไมโครลิตร เขย่าอีกครั้งและพักในที่มืด 90 นาที วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 725 นาโนเมตร ด้วยสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ หักค่าจาก blank แล้วคำนวณหา TPC จากสมการเส้นมาตรฐานของกรดแกลลิก ทำการทดลอง 3 ซ้ำ ต่อสูตร รายงานผลเป็นมิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิกต่อกรัมของตัวอย่างแห้ง (mg GAE/g DW)

การทดสอบความชอบทางประสาทสัมผัส

การทดสอบความชอบทางประสาทสัมผัสโดยมี ลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ประเมินด้วย 9-point hedonic scale (1 = ไม่ชอบอย่างยิ่ง ถึง 9 = ชอบอย่างยิ่ง) ในกลุ่มผู้บริโภคทั่วไป จำนวน 50 คน ประเมิน จัดลำดับการเสิร์ฟแบบสุ่มสมบูรณ์ ลอคคิตจากลำดับตัวอย่าง และเว้นน้ำล้างปากระหว่างตัวอย่าง ตามแนวปฏิบัติมาตรฐานด้านประสาทสัมผัส

การวิเคราะห์เชิงสถิติ

สำหรับสมบัติทางกายภาพและเคมี ใช้แผนการทดลองสุ่มสมบูรณ์ (CRD) และสำหรับการทดสอบทางประสาทสัมผัส ใช้แผนการทดลองสุ่มบล็อกสมบูรณ์ (RCBD) โดยบล็อกเป็นผู้ทดสอบและรอบการ

เสิร์ฟ วิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วย Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ รายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และกำกับตัวอักษรแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

ผลและวิจารณ์ผลการวิจัย

ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมี

ผลิตภัณฑ์ PBM จาก เต้าหู้ หรือ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการพัฒนาเนื้อเทียมจากพืชซึ่งใช้เต้าหู้และกากถั่วเหลือง มีลักษณะปรากฏด้านนอกเหมือนขนมปังแห้ง ลักษณะภายในมีความชุ่มชื้น สีสน้ำตาลอ่อน ถึงน้ำตาลเข้ม เนื้อสัมผัสสม่ำเสมอและมีความแน่นในระดับปานกลางการบรรจุในบรรจุภัณฑ์สุญญากาศเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาและป้องกันการปนเปื้อนจากสิ่งแวดล้อม ลักษณะภายนอกเรียบค่อนข้างเนียน มีร่องรอยการกดอัดเล็กน้อยบนผิวผลิตภัณฑ์ซึ่งเกิดจากกระบวนการขึ้นรูปและการซิลบรรจุ แสดงดัง Figure 1



Figure 1 Plant-based protein meat substitute (soy-based tofu)

การเพิ่มระดับการเติมเต้าหู้มีผลต่อสมบัติทางกายภาพและเคมีของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากพืช แสดงดัง Table 2 โดยความชื้นมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) พบว่า สูตรผสมเต้าหู้ 105 กรัม มีปริมาณความชื้นสูงสุด (ร้อยละ 46.63) รองลงมาคือสูตรผสมเต้าหู้ 100 กรัม (ร้อยละ 43.40) สูตรผสมเต้าหู้ 95 กรัม (ร้อยละ 41.08) และต่ำสุดที่สูตรผสมเต้าหู้ 90 กรัม (ร้อยละ 38.12) ความชื้นที่เพิ่มขึ้นสอดคล้องกับสมบัติการอุ้มน้ำของเต้าหู้ เนื่องจากโครงสร้างเจลโปรตีนของเต้าหู้สามารถกักเก็บน้ำในช่องว่างของเมทริกซ์โปรตีนได้ดี (Guan et al., 2021) ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีปริมาณน้ำรวมเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนการเติมเต้าหู้ สอดคล้องกับรายงานของ Kyriakopoulou et al. (2021) ที่รายงานว่าโปรตีนพืชในรูปเจลและสารยึดประสานจากธรรมชาติสามารถเพิ่มความชุ่มฉ่ำของเนื้อเทียมจากพืชได้เช่นกัน

Table 2 Physical chemical properties of plant-based meat analogues with different levels of tofu

Samples	Moisture content (%)	a_w	Hardness (g)
Plant-based with soy tofu 90 g	38.12 $\pm$ 1.12 ^d	0.983 $\pm$ 0.001 ^c	140.86 $\pm$ 2.57 ^a
Plant-based with soy tofu 95 g	41.08 $\pm$ 1.00 ^c	0.985 $\pm$ 0.002 ^{bc}	98.82 $\pm$ 2.64 ^b
Plant-based with soy tofu 100 g	43.40 $\pm$ 0.34 ^b	0.987 $\pm$ 0.001 ^{ab}	50.43 $\pm$ 3.47 ^c
Plant-based with soy tofu 105 g	46.63 $\pm$ 0.33 ^a	0.989 $\pm$ 0.001 ^a	21.65 $\pm$ 1.24 ^d

Means in the same column followed by different superscript letters (^{a, b, c, d}) are significantly different ($p < 0.05$).

การวิเคราะห์ค่า a_w ของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากพืชที่ใช้เต้าหู้ในปริมาณที่แตกต่างกัน (Table 1) พบว่ามีค่า a_w อยู่ในช่วง 0.983–0.989 โดยสูตรที่ใช้เต้าหู้ 90 กรัม และ 95 กรัม มีค่า a_w (0.983 และ 0.985 ตามลำดับ) ในขณะที่สูตรที่ใช้เต้าหู้ 100 กรัม มีค่า a_w สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (0.987) และสูตร 105 กรัม มีค่า a_w สูงที่สุด (0.989) ผลการวิเคราะห์

ทางสถิติแสดงให้เห็นว่าปริมาณเต้าหู้ที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อค่า a_w ของผลิตภัณฑ์อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ค่า a_w ที่ได้ทั้งหมด (มากกว่า 0.98) มีค่าสูงมากใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์โปรตีนสดหรือกึ่งแปรรูป ซึ่งมีศักยภาพในการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ได้ดี โดยเฉพาะจุลินทรีย์ก่อโรคและจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเสื่อมเสีย เช่น *Escherichia coli* *Salmonella*

spp. และ *Staphylococcus aureus* ที่สามารถเจริญได้ในอาหารที่มีค่า a_w มากกว่า 0.95 (Beuchat, 1981; Rahman, 2007) นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาพร้อมกับข้อมูลความชื้นของผลิตภัณฑ์ พบว่ามีค่าความชื้นอยู่ในช่วง 64.38–69.56% ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับการเติมเตาหัว เช่นเดียวกับค่า a_w ความชื้นในระดับสูงร่วมกับค่า a_w ที่มากกว่า 0.98 บ่งชี้ว่าผลิตภัณฑ์อยู่ในสภาพที่มีน้ำอิสระพร้อมสำหรับกระบวนการเสื่อมสภาพ ทั้งจากปฏิกิริยาเคมี เช่น การหืน และการเจริญของจุลินทรีย์ที่ก่อโรค (Beuchat, 1981; Rahman, 2007) ความชื้นที่สูงยังสัมพันธ์กับความนุ่ม ฉ่ำ และเนื้อสัมผัสที่ผู้บริโภคยอมรับได้ดี แต่ในเชิงความปลอดภัย จำเป็นต้องออกแบบระบบการเก็บรักษาที่เหมาะสม เช่น การแช่เย็น การพาสเจอร์ไรซ์ หรือการบรรจุแบบสุญญากาศ เพื่อยืดอายุผลิตภัณฑ์ให้ปลอดภัยและคงคุณภาพไว้ได้ในระยะยาว นอกจากนี้ การเพิ่มปริมาณเตาหัวในสูตรส่งผลให้ค่า a_w สูงขึ้น จากผลการศึกษา พบว่าการเติมเตาหัวในปริมาณสูงมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่า a_w ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างของเตาหัวมีลักษณะเป็นโปรตีนที่เกิดจากการตกตะกอนของน้ำนมถั่วเหลือง ซึ่งมีสมบัติในการกักเก็บน้ำสูง มีการเรียงตัวของโปรตีนที่หลวมและมีรูพรุน ทำให้น้ำที่กักเก็บไว้ในเมทริกซ์ของผลิตภัณฑ์อยู่ในรูปของน้ำอิสระ (*free water*) มากกว่าน้ำที่ถูกยึด (*bound water*) ซึ่งส่งผลให้ค่า a_w สูงกว่าผลิตภัณฑ์ที่ใช้ถั่วเหลืองในรูปแบบอื่น (Li et al., 2015; Dang et al., 2023) นอกจากนี้ ความสามารถของเตาหัวในการดูดซับน้ำยังส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีความชื้นรวมสูง แต่เนื่องจากน้ำส่วนใหญ่ยังอยู่ในรูปที่ไม่ถูกยึดด้วยพันธะไฮโดรเจนหรือแรงไฟฟ้าสถิตกับโปรตีนหรือคาร์โบไฮเดรต จึงส่งผลให้ค่า a_w ของผลิตภัณฑ์ยังคงอยู่ในระดับสูง แม้จะมีความชื้นสูงก็ตาม (Rahman, 2007)

ค่าความแข็ง (Hardness) ของผลิตภัณฑ์ PBM ที่ใช้เตาหัวในปริมาณแตกต่างกัน (Table 2) อยู่ระหว่าง 21.65–140.86 กรัม โดยพบว่า สูตรที่ใช้เตาหัวถั่วเหลือง 90 กรัม มีค่า hardness สูงที่สุด (140.86) ขณะที่ สูตรที่ใช้เตาหัวถั่วเหลือง 105 กรัม มีค่า hardness ต่ำที่สุด (21.65) โดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ผลการวิจัยพบว่าการเพิ่มปริมาณเตาหัว ส่งผลให้ค่า hardness ของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากเตาหัวมีโครงสร้างที่อู่น้ำได้ดีและประกอบด้วยโปรตีนถั่วเหลืองที่ผ่านการตกตะกอนด้วยน้ำส้มสายชูในรูปแบบเจลหยาบ โครงสร้างดังกล่าวมีคุณสมบัติช่วยกักเก็บความชื้นและเพิ่มการกระจายตัวของน้ำในเนื้อผลิตภัณฑ์ ส่งผลให้โครงสร้างโดยรวมมีลักษณะนุ่มและยืดหยุ่นมากขึ้น (Obatolu, 2008) การที่อนุภาคโปรตีนจากเตาหัวสามารถแทรกตัวในเมทริกซ์โปรตีนและคาร์โบไฮเดรตของผลิตภัณฑ์อาหารและส่งผลต่อ hardness ความยืดหยุ่นของเนื้อสัมผัส มีพื้นฐานจากคุณสมบัติเชิงโครงสร้างของโปรตีนในเตาหัวเอง โดยงานของ Dang et al. (2023) พบว่าโครงสร้างโปรตีนของเตาหัวมีความหลากหลายของ subunits และองค์ประกอบโครงสร้างที่แตกต่างกัน (เช่น β -sheet และ hydrophobicity) ซึ่งมีผลต่อสมบัติพื้นผิวและการอู่น้ำของโปรตีนในผลิตภัณฑ์เตาหัวผลการทดลองสอดคล้องกับรายงานที่ระบุว่า การเติมเตาหัวหรือโปรตีนถั่วเหลืองชนิดเจล สามารถปรับปรุงคุณสมบัติด้านเนื้อสัมผัสให้มีความนุ่มและยอมรับได้ดีขึ้นในผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมและเบเกอรี่ (Obatolu, 2008; Zhang et al., 2020) แม้ว่าการเติมเตาหัวในปริมาณสูง เช่น 105 กรัม จะช่วยเพิ่มความชุ่มฉ่ำ และความนุ่มของผลิตภัณฑ์ ส่งผลต่อค่า hardness

ที่ต่ำลงและการยอมรับทางประสาทสัมผัสที่ดีขึ้น แต่ในบางกรณีอาจส่งผลต่อความสามารถในการรักษารูปร่างของผลิตภัณฑ์ โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ประเภทเนื้อเทียมที่ไม่ผ่านการขึ้นรูปด้วยแรงดันหรือแม่พิมพ์แข็ง การมีปริมาณน้ำและไขมันจากเตาหัวสูงเกินไปอาจทำให้โครงสร้างโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตในเมทริกซ์ไม่สามารถประสานตัวได้แน่นพอ จึงมีแนวโน้มที่ผลิตภัณฑ์จะเสียรูปร่างได้ง่ายเมื่อผ่านการเก็บรักษาหรือการให้ความร้อนซ้ำ อย่างไรก็ตาม ผลในงานวิจัยนี้แสดงว่าสูตรที่ใช้เตาหัว 105 กรัมยังสามารถรักษารูปร่างได้ดีในระดับที่เหมาะสม เนื่องจากมีการใช้แป้งและกลูเตนร่วมเป็นโครงสร้างเสริม ซึ่งช่วยให้สามารถรักษารูปร่างได้ แม้จะมีความชุ่มชื้นสูง การออกแบบสูตรเนื้อเทียมที่สมดุลระหว่างความนุ่ม และความสามารถในการคงรูปจึงเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการพัฒนาผลิตภัณฑ์พร้อมบริโภคที่ตอบโจทย์ทั้งในด้านการรับประทานและการจัดเก็บในเชิงพาณิชย์

จาก Figure 2 แสดงค่าปริมาณโปรตีน (ร้อยละ) ของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากเตาหัว พบว่าสูตรที่ใช้เตาหัว 105 กรัม มีปริมาณโปรตีนสูงที่สุด (ร้อยละ 46.46) และแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) จากสูตรอื่น รองลงมาคือสูตรที่ใช้เตาหัว 100 กรัม (ร้อยละ 44.93) และ 95 กรัม (ร้อยละ 44.08) ซึ่งไม่แตกต่างกันทางสถิติ ส่วนสูตรที่ใช้เตาหัว 90 กรัม มีปริมาณโปรตีนต่ำที่สุด (ร้อยละ 38.53) ผลการศึกษาพบว่าสูตรที่ใช้เตาหัว 105 กรัม ให้ปริมาณโปรตีนสูงที่สุด อธิบายได้จากการที่เตาหัวเป็นผลิตภัณฑ์โปรตีนจากถั่วเหลืองซึ่งมีองค์ประกอบโปรตีนสูง การเพิ่มปริมาณเตาหัวจึงทำให้สัดส่วนโปรตีนในสูตรเพิ่มขึ้นโดยตรง การที่สูตร 90 กรัม มีปริมาณโปรตีนต่ำสุดสอดคล้องกับปริมาณวัตถุดิบโปรตีนที่น้อยกว่า ซึ่งชี้ให้เห็นถึงความสัมพันธ์เชิงบวกระหว่างปริมาณเตาหัวที่เติมกับค่าปริมาณโปรตีนโดยรวมในผลิตภัณฑ์ ข้อมูลนี้สอดคล้องกับรายงานของ Messina (2016) ที่ระบุว่าผลิตภัณฑ์จากถั่วเหลือง เช่น เตาหัวและโปรตีนถั่วเหลืองแปรรูป เป็นแหล่งโปรตีนคุณภาพสูง และการเสริมในสูตรอาหารสามารถเพิ่มค่าปริมาณโปรตีนและคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์ได้อย่างมีนัยสำคัญ ในแง่ของคุณสมบัติทางฟังก์ชันของโปรตีน การที่ผลิตภัณฑ์มีปริมาณโปรตีนสูงขึ้นไม่เพียงแต่เพิ่มคุณค่าทางโภชนาการ แต่ยังส่งผลต่อสมบัติด้านโครงสร้างและการกักเก็บน้ำของผลิตภัณฑ์ ซึ่งมีผลต่อความแข็ง เนื้อสัมผัส และการยอมรับทางประสาทสัมผัสของผู้บริโภค (Kyriakopoulou et al., 2021)

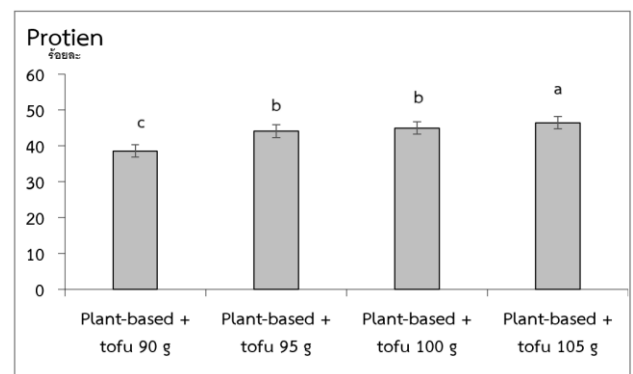


Figure 2 Protein content of plant-based meat analogues with different levels of tofu

โปรตีนจากถั่วเหลืองเป็นแหล่งโปรตีนคุณภาพสูง มีรายงานการค้นพบกรดอะมิโนจำเป็นในปริมาณที่เพียงพอตามมาตรฐาน WHO (Friedman & Brandon, 2001) และยังมีสารพฤกษเคมี เช่น ไอโซฟ

ลาโวน ซึ่งมีบทบาทในการต้านอนุมูลอิสระ ลดความเสี่ยงโรคหัวใจ และปรับสมดุลฮอร์โมน (Messina et al., 2016) การมีปริมาณโปรตีนสูงในผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากพืชจึงมีความสำคัญทั้งในแง่การตอบสนองต่อความต้องการทางโภชนาการของผู้บริโภค และการส่งเสริมคุณค่าทางสุขภาพของผลิตภัณฑ์

ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวม

จากการวิเคราะห์ปริมาณ TPC ของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากพืชที่ใช้เต้าหู้ในปริมาณต่างกันแสดงดัง Table 3 จากผลการศึกษา

พบว่า ปริมาณ TPC ของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมเต้าหู้ในระดับต่าง ๆ มีค่าอยู่ระหว่าง 61.89–66.90 mg GAE/g db ตัวอย่างที่ใช้เต้าหู้ถั่วเหลือง 90 95 และ 100 กรัม มีค่า TPC ใกล้เคียงกัน ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ขณะที่ตัวอย่างที่ใช้เต้าหู้ถั่วเหลือง 105 กรัม มีค่า TPC สูงสุดที่ 66.90 mg GAE/g db ซึ่งสูงกว่ากลุ่มอื่นอย่างมีนัยสำคัญ

Table 3 Total Phenolic Content (TPC) of Plant-based meat analogues with different levels of tofu

Sample	TPC (mg GAE/g db)
Plant-based with soy tofu 90 g	62.38 ± 2.45 ^b
Plant-based with soy tofu 95 g	61.89 ± 2.98 ^b
Plant-based with soy tofu 100 g	62.37 ± 2.34 ^b
Plant-based with soy tofu 105 g	66.90 ± 1.85 ^a

Means in the same column followed by different superscript letters (a, b) are significantly different ($p < 0.05$)

ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มสัดส่วนของเต้าหู้สามารถส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณสาร TPC ซึ่งอาจมาจากการที่ถั่วเหลืองมีสารประกอบฟีนอลิกและไอโซฟลาโวนอยู่ในปริมาณสูง (Tangkawanit et al., 2022) โดยสารเหล่านี้มีบทบาทสำคัญในฐานะสารต้านอนุมูลอิสระ แนวโน้มที่ TPC เพิ่มขึ้นตามปริมาณเต้าหู้ที่สูงขึ้นสอดคล้องกับงานวิจัยของ Malav et al. (2015) ที่รายงานว่า การเสริมวัตถุดิบจากพืชตระกูลถั่วสามารถเพิ่มศักยภาพในการต้านอนุมูลอิสระของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมได้ การเพิ่มปริมาณเต้าหู้ถั่วเหลืองในสูตรเนื้อเทียมจากพืชมีศักยภาพในการเพิ่มปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการยกระดับคุณค่าทางโภชนาการและคุณสมบัติด้านการต้านอนุมูลอิสระของผลิตภัณฑ์ อย่างไรก็ตามจากผลการศึกษาที่สูตร 105 กรัมให้ค่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (TPC) สูงกว่าสูตร 100 กรัมอย่างมีนัยสำคัญ แม้ความแตกต่างของปริมาณเต้าหู้จะเพียง 5 กรัม อาจอธิบายได้จาก ค่าการสะสมของสารฟีนอลิกที่ไม่เป็นเชิงเส้นตรง (Non-linear accumulation) โดยเฉพาะในกรณีที่ปริมาณของวัตถุดิบถึงระดับหนึ่งจะกระตุ้นให้เกิดการกักเก็บน้ำในระบบมากขึ้น ส่งผลให้โครงสร้างของผลิตภัณฑ์มีสภาพแวดล้อมที่เอื้อต่อการสกัดสารฟีนอลิกได้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับข้อเสนองานของ Dang et al. (2023) ที่พบว่า โครงสร้างของเต้าหู้ที่หยาบและมีรูพรุนสามารถเก็บสารประกอบชีวภาพในรูปอิสระได้สูงกว่า เมื่อปริมาณเต้าหู้เพิ่มขึ้นถึงระดับ 105 กรัม อาจทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสและความสามารถในการเก็บกักสารฟีนอลิกมีนัยสำคัญมากกว่า 100 กรัม ขณะที่กลุ่ม 90–100 กรัมให้ค่า TPC ใกล้เคียงกัน และไม่แตกต่างทางสถิติ เนื่องจากยังไม่ถึงจุดเปลี่ยนเชิงปริมาณที่มีผลต่อโครงสร้างหรือความสามารถในการสกัดสารฟีนอลิกอย่างมีนัยสำคัญ

ผลการทดสอบความชอบทางประสาทสัมผัส

ผลจากการเติมเต้าหู้ที่ระดับต่างกันต่อการทดสอบความชอบทางประสาทสัมผัสของเนื้อเทียมแสดงดัง Table 4 การเปลี่ยนระดับการเติมเต้าหู้ถั่วเหลืองในสูตรเนื้อเทียมจากพืชส่งผลต่อคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยสูตรที่ใช้เต้าหู้ถั่วเหลืองในปริมาณ 105 กรัม ให้คะแนนเฉลี่ยสูงสุดทั้งด้านรสชาติ (7.67 ± 1.64) และความชอบโดยรวม (7.63 ± 1.29) ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญจากสูตรที่ใช้เต้าหู้ในปริมาณต่ำกว่า (90–100 กรัม) ที่มีคะแนน

เฉลี่ยอยู่ในช่วง 6.13–6.57 ผลดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณเต้าหู้ถั่วเหลืองมีผลในเชิงบวกต่อการยอมรับของผู้บริโภค เมื่อพิจารณาคุณภาพทางประสาทสัมผัสในมิติอื่นร่วมด้วย พบว่าระดับการเติมเต้าหู้มีแนวโน้มส่งผลต่อการรับรู้ผ่านประสาทสัมผัสหลายด้าน ในด้านการมองเห็น ผลิตภัณฑ์ที่เติมเต้าหู้ในระดับสูงมีลักษณะปรากฏที่สม่ำเสมอ สีของผลิตภัณฑ์มีความเรียบเนียนและดูชุ่มฉ่ำมากขึ้น ซึ่งสัมพันธ์กับโครงสร้างเนื้อผลิตภัณฑ์ที่มีความละเอียดและแน่นสม่ำเสมอ ทั้งนี้ Zhang et al. (2020) รายงานว่าเต้าหู้สามารถช่วยเสริมสร้างโครงสร้างโปรตีนของผลิตภัณฑ์จากพืชให้มีลักษณะใกล้เคียงเนื้อสัตว์ และช่วยเพิ่มความสม่ำเสมอของพื้นผิวภายนอกผลิตภัณฑ์ ในด้านกลิ่น การเพิ่มปริมาณเต้าหู้ถั่วเหลืองมีแนวโน้มช่วยลดกลิ่นถั่วที่ไม่พึงประสงค์ของโปรตีนถั่วเหลือง ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการยอมรับของผู้บริโภค โดยกระบวนการผลิตเต้าหู้ซึ่งประกอบด้วยการให้ความร้อนและการตกตะกอนของโปรตีนสามารถช่วยลดสารประกอบที่ก่อให้เกิดกลิ่นเหม็นเขียว เช่น hexanal และ aldehydes ได้ (Feng et al., 2021; Solina et al., 2005) สำหรับการรับรู้ด้านการสัมผัสและเนื้อสัมผัส พบว่าผลิตภัณฑ์ที่เติมเต้าหู้ถั่วเหลือง 105 กรัม ให้ความรู้สึกในปากที่นุ่ม ชุ่มฉ่ำ และไม่แห้ง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบทางกายภาพที่พบว่าสูตรดังกล่าวมีค่า hardness ต่ำที่สุด (Table 2) แสดงถึงโครงสร้างเนื้อสัมผัสที่มีความยืดหยุ่นและความเหมาะสมต่อการเคี้ยวและการกลืน อันเป็นลักษณะที่ผู้บริโภคให้ความสำคัญต่อผลิตภัณฑ์โปรตีนทางเลือก (Ho et al., 2022) ในด้านรสชาติ การเพิ่มเต้าหู้ในระดับที่เหมาะสมช่วยให้รสชาติของผลิตภัณฑ์มีความกลมกล่อมมากขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากคุณสมบัติของเต้าหู้ในการกักเก็บน้ำและไขมัน ทำให้การรับรู้รสชาติรวมมีความสมดุลและนุ่มนวลยิ่งขึ้น (Feng et al., 2021) ดังนั้นผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสชี้ให้เห็นว่าการใช้เต้าหู้ถั่วเหลืองในสัดส่วนที่เหมาะสม โดยเฉพาะในระดับ 105 กรัม สามารถช่วยยกระดับคุณภาพของเนื้อเทียมจากพืชในหลายมิติ ทั้งลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ซึ่งล้วนเป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการยอมรับของผู้บริโภคและศักยภาพในการพัฒนาผลิตภัณฑ์เชิงพาณิชย์

Table 4 Sensory Evaluation of Soy protein-based meat analogues with different levels of tofu Means in the same column followed by different superscript letters (a, b) are significantly different ($p < 0.05$)

Sample	Appearance	Color	Aroma	Taste	Texture	Overall Liking
Plant-based with soy tofu 90 g	6.72 ± 1.45 ^b	6.68 ± 1.40 ^b	6.55 ± 1.38 ^b	6.13 ± 1.62 ^b	6.20 ± 1.50 ^b	6.19 ± 1.46 ^b
Plant-based with soy tofu 95 g	6.80 ± 1.32 ^b	6.75 ± 1.35 ^b	6.62 ± 1.33 ^b	6.28 ± 1.59 ^b	6.35 ± 1.44 ^b	6.26 ± 1.52 ^b
Plant-based with soy tofu 100 g	6.60 ± 1.37 ^b	6.58 ± 1.34 ^b	6.70 ± 1.29 ^b	6.49 ± 1.26 ^b	6.55 ± 1.41 ^b	6.57 ± 1.48 ^b
Plant-based with soy tofu 105 g	6.85 ± 1.28 ^a	6.88 ± 1.30 ^a	7.02 ± 1.25 ^a	7.67 ± 1.64 ^a	7.45 ± 1.33 ^a	7.63 ± 1.29 ^a

Means in the same column followed by different superscript letters (a, b) are significantly different ($p < 0.05$)

สรุปผลการวิจัย

การศึกษานี้มุ่งเน้นการพัฒนาเนื้อเทียมจากพืชโดยใช้เต้าหู้ถั่วเหลืองเป็นส่วนประกอบหลักในสัดส่วนที่แตกต่างกัน (90 95 100 และ 105 กรัมต่อสูตร) เพื่อตรวจสอบผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพเคมี ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และการยอมรับทางประสาทสัมผัสของผู้บริโภค ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มปริมาณเต้าหู้ถั่วเหลืองส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีคุณลักษณะทางกายภาพดีขึ้นอย่างชัดเจน โดยเฉพาะสูตรที่มีเต้าหู้ 105 กรัม มีค่าความชื้นและค่า water activity สูงที่สุด แต่มีค่า hardness ต่ำที่สุด แสดงถึงโครงสร้างที่นุ่ม และสามารถกักเก็บน้ำได้ดี ซึ่งเป็นคุณลักษณะสำคัญของผลิตภัณฑ์เนื้อสัมผัสใกล้เคียงกับเนื้อสัตว์ ในด้านคุณค่าทางโภชนาการ พบว่าสูตรที่ใช้เต้าหู้ 105 กรัมมีปริมาณโปรตีนสูงที่สุด (44.93%) และมีค่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดสูงสุดเช่นกัน (66.90 mg GAE/g db) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับสูตรอื่น แสดงถึงศักยภาพในการเป็นอาหารที่มีประโยชน์ต่อสุขภาพ สำหรับผลการประเมินทางประสาทสัมผัส ซึ่งครอบคลุมองค์ประกอบทั้ง 5 ได้แก่ ลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม พบว่าสูตรที่มีปริมาณเต้าหู้ 105 กรัม ได้รับคะแนนสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญในด้านรสชาติ (7.67 ± 1.64) และความชอบโดยรวม (7.63 ± 1.29) โดยผู้บริโภคให้คะแนนลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติสูงกว่าสูตรอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ดังนั้น งานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่า สูตรที่ใช้เต้าหู้ถั่วเหลืองในระดับ 105 กรัมเป็นสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการพัฒนาเนื้อเทียมจากพืชต้นแบบ ที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีทั้งในด้านคุณค่าทางโภชนาการ สมบัติทางกายภาพ และการยอมรับจากผู้บริโภค งานวิจัยนี้จึงสามารถเป็นพื้นฐานสำคัญในการต่อยอดเชิงพาณิชย์หรือผลิตภัณฑ์อาหารสุขภาพจากพืช ทั้งในระดับครัวเรือน กลุ่มวิสาหกิจชุมชน และอุตสาหกรรมขนาดเล็ก นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์มีความชื้นสูง จึงควรใช้ระบบบรรจุแบบสุญญากาศ เก็บรักษาในอุณหภูมิต่ำกว่า 4 °C (เช่นในตู้เย็น) และบริโภคภายใน 7 วัน งานวิจัยนี้ยังมีข้อจำกัดของการศึกษาอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ (Shelf-life testing) ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อการวางแผนผลิตและการตลาด ดังนั้นจึงสามารถต่อยอดจากผลการศึกษาในด้านการศึกษาผลของการแปรรูปอื่นร่วม เช่น การอบแห้ง การพาสเจอร์ไรซ์ หรือการบรรจุแบบควบคุมบรรยากาศต่อคุณภาพของเนื้อเทียมที่พัฒนาขึ้น รวมถึงวิเคราะห์อายุการเก็บรักษาภายใต้สภาวะการเก็บรักษาที่แตกต่างกัน เช่น การแช่เย็น การแช่แข็ง หรืออุณหภูมิห้องเพื่อต่อยอดการผลิตเนื้อเทียมในเชิงพาณิชย์ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับจัดสรรงบประมาณจากหน่วยบริหารและจัดการทุนด้านการพัฒนาระดับพื้นที่ (บพท.) ประจำปีงบประมาณ

2565 และขอขอบคุณสาขาเทคโนโลยีและนวัตกรรมอาหาร คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏศรีสะเกษ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในด้านเครื่องมือและอุปกรณ์ในการปฏิบัติการวิจัยครั้งนี้

References

- Association of Official Analytical Chemists (AOAC). (2000). *Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists* (17th ed., Vol. 11). Maryland: AOAC International.
- Balasundram, N., Sundram, K., & Samman, S. (2006). Phenolic compounds in plants and agri-industrial by-products: Antioxidant activity, occurrence, and potential uses. *Food Chemistry*, 99(1), 191-203. doi: 10.1016/j.foodchem.2005.07.042.
- Beuchat, L. R. (1981). Microbial stability as affected by water activity. *Cereal Foods World*, 26(7), 345-349.
- Dang, Y., Ren, J., Guo, Y., Yang, Q., Liang, J., Li, R., Zhang, R., Yang, P., Gao, X., & Du, S.-K. (2023). Structural, functional properties of protein and characteristics of tofu from small-seeded soybeans grown in the Loess Plateau of China. *Food Chemistry: X*, 18, 100689. doi: 10.1016/j.fochx.2023.100689.
- Dominguez-López, I., Pérez, M., & Lamuela-Raventós, R. M. (2024). Total (poly)phenol analysis by the Folin-Ciocalteu assay as an anti-inflammatory biomarker in biological samples. *Critical reviews in food science and nutrition*, 64(27), 10048–10054. doi: 10.1080/10408398.2023.2220031.
- Feng, Y., Lee, Y., & Chen, T. (2021). Strategies to reduce beany flavor in soy protein-based foods. *Food Reviews International*, 37(5), 495–512. doi: 10.1080/87559129.2019.1652763.
- Friedman, M., & Brandon, D. L. (2001). Nutritional and health benefits of soy proteins. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49(3), 1069–1086. doi: 10.1021/jf0009246.
- Guan, X., Zhong, X., Lu, Y., Du, X., Jia, R., Li, H., & Zhang, M. (2021). Changes of soybean protein during tofu processing. *Foods*, 10(7), 1594. doi: 10.3390/foods10071594.

- Ishaq, A., Irfan, S., Sameen, A., & Khalid, N. (2022). Plant-based meat analogs: A review with reference to formulation and gastrointestinal fate. *Current Research in Food Science*, 5, 973-983.
- Jang, J., & Lee, D.-W. (2024). Advancements in plant-based meat analogs enhancing sensory and nutritional attributes. *npj Science of Food*, 8, 50. doi: 10.1038/s41538-024-00292-9.
- Kyriakopoulou, K., Keppler, J. K., & van der Goot, A. J. (2021). Functionality of ingredients and additives in plant-based meat analogues. *Foods*, 10(3), 600. doi: 10.3390/foods10030600.
- Li, T., Rui, X., Wang, K., Jiang, M., Chen, X., Li, W., & Dong, M. (2015). Study of the dynamic states of water and effects of high-pressure homogenization on water distribution in tofu by using low-field nuclear magnetic resonance. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 30, 61-68. doi: 10.1016/j.ifset.2015.03.008.
- Lohasupthawee, P., Damrongmongcolkul, N., Boonpongsa, T., Jewyeon, E., & Suklampoo, L. (2021). Effects of wheat flour and royal oyster mushrooms on texture characteristics of meat analogue. *Journal of Science Ladkrabang*, 30(2), 1-11.
- Malav, O. P., Talukder, S., Gokulakrishnan, P., & Chand, S. (2015). Meat analog: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 55(9), 1241-1245. doi: 10.1080/10408398.2012.689381.
- Manzanillo, R. M., & Jr, R. B. I. (2025). Utilization of Tofu in Nutritional and Sensory Improvement of Plant-Based Nuggets. *International Journal for Multidisciplinary Research*, 7(2). 2582-2160.
- Manzanillo, R., & Isidro, R. (2025). Utilization of tofu in nutritional and sensory improvement of plant-based nuggets. *International Journal for Multidisciplinary Research*, 7(2). 1-12.
- Messina, M. (2016). Soy and health update: Evaluation of the clinical and epidemiologic literature. *Nutrients*, 8(12), 754. doi: 10.3390/nu8120754.
- Obatolu, V. A. (2008). Effect of different coagulants on yield and quality of tofu from soymilk. *European Food Research and Technology*, 226, 467-472. doi: 10.1007/s00217-006-0558-8.
- Pandey, K. B., & Rizvi, S. I. (2009). Plant polyphenols as dietary antioxidants in human health and disease. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2(5), 270-278. doi: 10.4161/oxim.2.5.9498.
- Rahman, M. S. (2007). *Handbook of food preservation* (2nd ed.). New York: CRC Press.
- Ratseewo, J., Chumroenphat, T., Li, H., & Siriamornpun, S. (2025). Changes in chemical composition, volatile compound, and bioactive compounds retention in shallots (*Allium ascalonicum* L.) under different drying methods. *Food Chemistry: X*, 27, 102419. doi: 10.1016/j.fochx.2025.102419.
- Samad, A., Kim, S.-H., Kim, C.-J., Lee, E.-Y., Kumari, S., Hossain, M. J., Alam, A. N., Muazzam, A., Hwang, Y.-H., & Joo, S.-T. (2025). From farms to labs: The new trend of sustainable meat alternatives. *Food Science of Animal Resources*, 45(1), 13-30. doi: 10.5851/kosfa.2024.e105.
- Scalbert, A., Manach, C., Morand, C., Rémésy, C., & Jiménez, L. (2005). Dietary polyphenols and the prevention of diseases. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 45(4), 287-306. doi: 10.1080/1040869059096.
- Solina, M., Baumgartner, P., Johnson, R. L., & Whitfield, F. B. (2005). Volatile aroma components of soy protein isolate and acid-hydrolysed vegetable protein. *Food chemistry*, 90(4), 861-873. doi: 10.1016/j.foodchem.2004.06.005.
- Zhang, T., Xu, J., Huang, S., Tao, N., Wang, X., & Zhong, J. (2022). Anhydride structures affect the acylation modification and emulsion stabilization ability of mammalian and fish gelatins. *Food chemistry*, 375, 131882. doi: 10.1016/j.foodchem.2021.131882.
- Tangkawanit, E., Meeso, N., & Siriamornpun, S. (2022). Changes in bioactive components, biological activities and starch digestibility of soymilk residues as affected by far-infrared radiation combined with hot-air and hot-air drying. *Drying Technology*, 40(15), 3357-3370. doi: 10.1080/07373937.2022.2030351.
- Zahari, I., Östbring, K., Purhagen, J. K., & Rayner, M. (2022). Plant-based meat analogues from alternative protein: A systematic literature review. *Foods*, 11(18), 2870.
- Zhang, J., Li, M.-M., Zhang, R., Jin, N., Quan, R., Chen, D.-Y., Francis, F., Wang, F.-Z., Kong, Z.-Q., & Fan, B. (2020). Effect of processing on herbicide residues and metabolite formation during traditional Chinese tofu production. *LWT - Food Science and Technology*, 131, 109707. doi: 10.1016/j.lwt.2020.109707.

Research article

Effects of tofu inclusion level on the physicochemical properties of plant-based meat analogues

Jiranan Ratseewo¹, Jirayu Musika², Sahutsa Ponnil³ and Anuwat Srisuwan^{4*}

¹Division of Food Innovation and Technology, Faculty of Liberal Arts and Science, Sisaket Rajabhat University, Sisaket Province, Thailand 33000

²Department of Agro-Industry Faculty of Agriculture Ubon Ratchathani University, Warin Chamrap, Ubon Ratchathani Province, Thailand 34190

³Digital Business Computer, Sisaket Rajabhat University, Sisaket Province, Thailand 33000

⁴Industrial and Environmental Management Engineering, Faculty of Liberal Arts and Science, Sisaket Rajabhat University, Sisaket Province, Thailand 33000

ARTICLE INFO**Article history**

Received: 22 August 2025

Revised: 10 February 2026

Accepted: 30 March 2026

Online published: 27 April 2026

Keyword

Tofu

Plant-based meat analog

Physicochemical properties

Total phenolic content

Texture

ABSTRACT

This study aimed to investigate the effects of varying tofu inclusion levels on the physicochemical and sensory properties of plant-based meat analogs. Tofu was incorporated at different levels (90, 95, 100, and 105 g per formulation), and the resulting products were evaluated for their physicochemical properties, total phenolic content, and sensory quality. The results revealed that the formulation with 105 g of tofu exhibited the highest moisture content and water activity, yet the lowest hardness value. This formulation also had the highest protein and total phenolic contents (46.46% and 66.90 mg GAE/g dry basis, respectively). In terms of sensory attributes, the formulation with 105 g of tofu received the highest consumer scores for taste and texture. These findings suggest that the formulation with 105 g of tofu is the most suitable prototype for further product development due to its high protein and phenolic contents, desirable textural characteristics, and strong consumer acceptance. The knowledge gained from this study highlights the potential of optimizing tofu incorporation to create plant-based meat alternatives that are rich in protein and bioactive compounds. This could contribute to public health and offer opportunities for applications at both household and small-scale industrial levels, thereby enhancing the value of leguminous crops and promoting the sustainable development of alternative protein products.

*Corresponding author

E-mail address: anuwat.s@sskru.ac.th (A. Srisuwan)

Online print: 27 April 2026 Copyright © 2026. This is an open access article, production, and hosting by Faculty of Agricultural Technology, Rajabhat Maha Sarakham University. <https://doi.org/10.14456/paj.2026.2>