วารสารเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.อีสาน | Agriculture & Technology RMUTI Journal
ปีที่ 7 ฉบับที่ 2 พฤษภาคม – สิงหาคม 2569 | Vol.7 No.2 May – August 2026

Received: June 17, 2025; Revised: September 19, 2025; Accepted: March 17, 2026

การผลิตสารสีจากเชื้อรา *Monascus* sp. ด้วยกระบวนการหมักแบบอาหารแข็ง โดยใช้วัสดุเหลือทิ้งจากทุเรียน

Production of pigments from *Monascus* sp. through solid-state fermentation using durian waste materials

พิริยาภรณ์ อันอาตม์งาม[1] พัชรา นิธิโรจน์ภักดี[1] ปฐมาภรณ์ ทิลารักษ์[1] พรพนิต ศศิวัฒน์ชุติกุล[1] อโนชา กิริยากิจ[1] รัตนพล มงคลรัตนาสิทธิ์[2] และอมรรัตน์ สุวรรณโพธิ์ศรี[1*]

Piriyaporn Anartngam[1], Patchara Nithirojpakdee[1], Patamaporn Tilarux[1], Pronpanit Sasivatchutikool[1], Anocha Kiriyakit[1], Rattanaphol Mongkholrattanasit[2] and Amornrat Suwanposri[1*]

[1]คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี จังหวัดจันทบุรี

[1]Faculty of Agro-industrial Technology, Rajamangala University of Technology Tawan-ok, Chanthaburi campus, Chanthaburi Province

[2]คณะอุตสาหกรรมสิ่งทอและออกแบบแฟชั่น มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร กรุงเทพมหานคร

[2]Faculty of Industrial Textiles and Fashion Design, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Bangkok

[*]Corresponding Author E-mail Address : amornrat_su@rmutto.ac.th

บทคัดย่อ

เปลือกทุเรียนเป็นของเหลือทิ้งจากการแปรรูปและการบริโภคซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นทุกปี งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการนำเปลือกทุเรียนเหลือทิ้งมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตสารสีด้วยกระบวนการหมักของเชื้อรา *Monascus* sp. โดยในขั้นตอนแรกศึกษาสายพันธุ์ของเชื้อรา *M. purpureus* และสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตสารสีโดยใช้เปลือกทุเรียนสายพันธุ์หมอนทองเป็นวัตถุดิบ พบว่า สายพันธุ์ที่เหมาะสมคือ *M. purpureus* TISTR 3615 จากสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตสารสี คือ การใช้กลูโคส เป็นแหล่งคาร์บอน และมีความเข้มข้นของแหล่งคาร์บอน คือ ร้อยละ 2.0 จากนั้นเปรียบเทียบการผลิตสารสีในสภาวะที่เหมาะสมโดยใช้เปลือกทุเรียนจำนวน 4 สายพันธุ์ ได้แก่ สายพันธุ์ก้านยาว กระดุม หมอนทอง และนกหยิบ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าสารสีที่ใช้เปลือกทุเรียนสายพันธุ์หมอนทองเป็นวัตถุดิบนั้นให้ปริมาณสารสีเหลือง (7.54±0.02 AU/g) และสีแดง (1.91±0.03 AU/g) สูงสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยสีที่ปรากฏนั้นมีลักษณะเป็นสีน้ำตาลอมชมพู รวมถึงละลายได้ดีในน้ำ มีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด (2,129.63 μg GAE/g) และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH (ร้อยละ 76.32±0.70) สูงสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) นอกจากนี้ยังมีฤทธิ์ยับยั้งจุลินทรีย์ก่อโรค ได้แก่ *Bacillus cereus*, *Staphylococcus aureus*, *Micrococcus* sp. และ *Escherichia coli*

คำสำคัญ: โมแนสคัส เปลือกทุเรียน สารสี ของเหลือทิ้ง

Abstract

Durian peels are a waste product from processing and consumption, which tends to increase every year. The aim of this research was to study the utilization of waste durian peels as raw materials for pigment production by the fermentation of *Monascus* sp. Initially, the optimal fungal strain of *M. purpureus* and conditions of pigment production using peels of Monthong cultivar were examined. It was found that the optimal fungal strain was *M. purpureus* TISTR 3615 from the optimal condition for pigment production was the used of glucose as carbon source, and the concentration of carbon source was 2.0%. Then, pigment production under optimal conditions using peels from four durian cultivars including Kanyao, Kradum, Monthong, and Nokyip were compared. The results showed that pigment using peels of Monthong cultivar gave the highest statistically significant ($p \leq 0.05$) amount of yellow (7.54 ± 0.02 AU/g) and red pigments (1.91 ± 0.03 AU/g). The color appearance of pigment exhibited a pinkish-brown color, was highly water-soluble, and showed the highest statistically significant ($p \leq 0.05$) total phenolic content (2,129.63 μg GAE/g) and antioxidant DPPH scavenging activity (76.32 ± 0.70%). It also had an antimicrobial activity against pathogenic microorganisms, including *Bacillus cereus*, *Staphylococcus aureus*, *Micrococcus* sp. and *Escherichia coli*.

Keywords: *Monascus*, Durian peel, Pigment, Waste

บทนำ

แหล่งของสารสีที่ใช้ในปัจจุบันมาจาก 2 แหล่ง ได้แก่ สีสังเคราะห์และสีจากธรรมชาติ โดยสีสังเคราะห์จะได้รับความนิยมมากกว่า เนื่องจากมีเฉดสีที่หลากหลาย ให้สีที่มีความสม่ำเสมอในทุกรอบการผลิต มีความคงทน สะดวก ใช้งานง่ายและราคาถูก แต่อย่างไรก็ตามการใช้สีสังเคราะห์นั้นมีข้อจำกัดในเรื่องของความปลอดภัย ซึ่งสีสังเคราะห์บางชนิดเป็นสารเคมีอันตรายที่อาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพของผู้ใช้ เช่น อาจก่อให้เกิดอาการแพ้ เป็นสาเหตุก่อให้เกิดโรคมะเร็ง ก่อให้เกิดความผิดปกติและเกิดพิษแก่ทารกในครรภ์ (Abdel-Raheam et al., 2021) นอกจากนี้ในกระบวนการผลิตสารสีสังเคราะห์ เกิดผลพลอยได้ที่ไม่พึงประสงค์และของเสียอันตรายซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Bakthavachalu et al., 2020) และจากที่ประชาชนมีการใช้สารสีมากขึ้นรวมถึงมีการรณรงค์ให้ช่วยกันรักษ์โลกและสิ่งแวดล้อม ทำให้มีการส่งเสริมสีที่มาจากธรรมชาติมากขึ้นเนื่องจากมีความปลอดภัยทั้งต่อผู้ผลิตและผู้บริโภค รวมถึงเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม แหล่งของสารสีจากธรรมชาติจะพบในพืช สัตว์ และจุลินทรีย์ โดยสารสีจากพืชสามารถสกัดได้จาก ใบ หรือลำต้น สำหรับสารสีจากสัตว์จะได้มาจากสารที่สัตว์ขับออกมาหรือจากตัวของสัตว์เอง อย่างไรก็ตามกระบวนการผลิตสารสีจากพืชและสัตว์นั้นมีต้นทุนสูง ให้ผลผลิตต่ำมากและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Meléndez-Martínez et al., 2022) ดังนั้นสารสีจากจุลินทรีย์จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ เนื่องจากเจริญเติบโตได้เร็วและสร้างสารสีในเวลาอันสั้น ง่ายต่อการขยายกระบวนการผลิตและเก็บเกี่ยว รวมถึงไม่ขึ้นอยู่กับความแปรปรวนของธรรมชาติและพบว่าสารสีจากเชื้อราได้รับความสนใจมากกว่าสารสีจากสาหร่ายและแบคทีเรีย เนื่องจากผลิตสารสีได้ดีกว่า มีอัตราการเจริญเติบโตของเส้นใยสูง สามารถควบคุมสภาวะในการเจริญเติบโตเพื่อให้ได้สีที่ต้องการและใช้ในการผลิตสารสีในปริมาณมากในกระบวนการผลิตขนาดใหญ่ (Rapoport et al., 2021)

Monascus purpureus เป็นหนึ่งในเชื้อราที่ผลิตสารสีในกลุ่มสีส้มแดงซึ่งประกอบด้วย 3 สีหลัก ได้แก่ สีเหลือง (Monascine และ Ankaflavine) สีส้ม (Rubropunctatine และ Monascorubrine) และสีแดง (Rubropunctamine และ Monascorubramine) (Gong et al., 2023) สารสีที่ผลิตจากเชื้อราชนิดนี้ มีความคงตัวที่อุณหภูมิสูง ค่าความเป็นกรด-ด่างปานกลาง (2-10) และมีสีเข้ม นอกจากนี้ยังมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ฤทธิ์ยับยั้งจุลินทรีย์ ลดไขมัน ต้านโรคอ้วนและต้านการอักเสบ (Kim & Ku, 2018) จากคุณสมบัติข้างต้นส่งผลให้มีการนำสารสีที่ผลิตโดยเชื้อรา *M. purpureus* ใช้เป็นวัตถุเจือปนในอาหาร สีผสมอาหาร สารเพิ่มความข้นหรือสารทดแทนไนไตรต์ในอาหารหลายชนิด ได้แก่ เต้าหู้ยี้ ไส้กรอก ชูริมิ ไวน์แดง และซอส (Cui et al., 2025) รวมถึงนำไปใช้ในอุตสาหกรรมนม เครื่องสำอางและสิ่งทอ (Wu et al., 2024) โดยทั่วไป

การผลิตสารสีจากเชื้อรา *Monascus* sp. นิยมเพาะเลี้ยงเชื้อราบนข้าวหรือธัญพืช แต่ในปัจจุบันได้มีการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรหลายชนิด เช่น เมล็ดทุเรียน รำข้าวสาลี ชานอ้อย ซังข้าวโพด และเปลือกข้าว (El-Sayed et al., 2022) มาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตสารสีจากเชื้อราเพื่อลดต้นทุนในการผลิตและช่วยลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

ทุเรียน (*Durio zibethinus* Murray) เป็นหนึ่งในไม้ผลเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทยและเป็นราชาแห่งผลไม้ (King of fruit) มีปริมาณการบริโภคสูงทั้งในรูปของผลสดและแปรรูป โดยส่วนของเนื้อทุเรียนที่สามารถรับประทานได้คิดเป็นร้อยละ 10-30 และมีส่วนเหลือทิ้งสูงถึงร้อยละ 65-80 เช่น เปลือกร้อยละ 50-60 และเมล็ดร้อยละ 10-20 (Purnomo et al., 2016) จากแนวโน้มความต้องการบริโภคทุเรียนที่เพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ ทำให้มีส่วนของเปลือกทุเรียนเหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในโรงงานอุตสาหกรรมที่ผลิตทุเรียนแปรรูปจะมีปริมาณของเหลือทิ้งจากทุเรียนสูงถึง 1,000 ตันต่อปี วิธีการในการกำจัดส่วนใหญ่จะนำไปถมที่หรือเผาซึ่งก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม ในเรื่องของกลิ่น ควัน และแมลงรบกวน มีส่วนน้อยที่นำไปใช้ในการผลิตปุ๋ยหรืออาหารสัตว์ ในเปลือกทุเรียนประกอบด้วย เถ้าร้อยละ 4.84 เฮมิเซลลูโลสร้อยละ 13.09 และลิกนินร้อยละ 15.45 (Brown, 1997) มีรายงานว่าเปลือกทุเรียนที่นำไปย่อยด้วยกรดซัลฟิวริกสามารถนำไปเพาะเลี้ยงแบคทีเรียเพื่อผลิตแบคทีเรียลเซลลูโลสและเพาะเลี้ยงเชื้อยีสต์เพื่อผลิตไบโอดีเซลได้ (Luo et al., 2017; Siwina & Leesing, 2021) แสดงให้เห็นว่าเปลือกทุเรียนนั้นสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการเพาะเลี้ยงจุลินทรีย์เพื่อผลิตสารสีได้ ซึ่งงานวิจัยที่นำเปลือกทุเรียนมาใช้ในกระบวนการหมักของเชื้อรา *Monascus* sp. เพื่อผลิตสารสีนั้นมีน้อย

ดังนั้นผู้วิจัยจึงสนใจนำเปลือกทุเรียนสายพันธุ์ต่าง ๆ จำนวน 4 สายพันธุ์ ได้แก่ หมอนทอง ก้านยาว กระดุม และนกหยิบ ซึ่งเป็นของเหลือทิ้งจากการแปรรูปในโรงงานอุตสาหกรรมและผู้ขายปลีกทุเรียนรายย่อยมาใช้เป็นวัตถุดิบในการเพาะเลี้ยงเชื้อรา *Monascus* sp. เพื่อผลิตสารสีและศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ ของสารสีที่ผลิตได้ ดังนี้ วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ค่าสี ความสามารถในการละลาย ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด และฤทธิ์ยับยั้งจุลินทรีย์ก่อโรค เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในอนาคตและเป็นแนวทางในการลดการใช้สารสีสังเคราะห์ รวมถึงเป็นการช่วยลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมและเพิ่มแนวทางในการนำเปลือกทุเรียนซึ่งเป็นของเหลือทิ้งไปใช้ประโยชน์อย่างสูงสุด

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

1. เชื้อจุลินทรีย์และการเตรียมวัตถุดิบ

การศึกษาในครั้งนี้ใช้เชื้อรา *Monascus purpureus* TISTR 3615 และ TISTR 3630 จากสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย เพาะเลี้ยงบนอาหารแข็ง Potato dextrose agar (PDA) (Himedia, India) บ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส นาน 10 วัน จากนั้นตัดส่วนปลายของเส้นใยนำไปใส่ในอาหารวุ้นเอียง PDA บ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 วัน เพื่อใช้เป็นกล้าเชื้อ

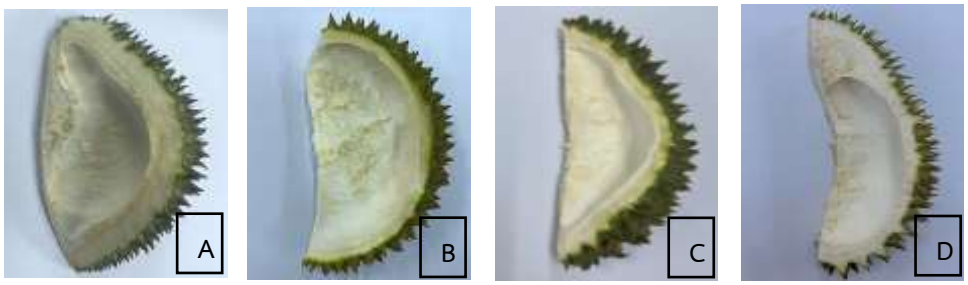


Figure 1 Peels of different durian cultivars (A) Kanyao (B) Kradum (C) Monthong and (D) Nokyip

นำเปลือกทุเรียนสายพันธุ์หมอนทอง ก้านยาว กระดุม และนกหยิบ (Figure 1) ซึ่งเป็นของเหลือทิ้งจากการแปรรูปที่ได้จากบริษัทจันทบุรี โกลบอล ฟู้ดส์ จำกัด จังหวัดจันทบุรี และผู้ขายปลีกทุเรียนรายย่อยในจังหวัดจันทบุรี ที่เก็บรวบรวมได้ในช่วงเดือนมีนาคม-มิถุนายน พ.ศ. 2567 มาล้างให้สะอาด จากนั้นหั่นเปลือกทุเรียนให้มีขนาด 0.5×2.0 เซนติเมตร นำไปอบที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส นาน 1 คืน เก็บรักษาในถุงซิปล็อคที่ภายในบรรจุซิลิกาเจลเพื่อดูดความชื้น แล้วนำไปวิเคราะห์

องค์ประกอบทางเคมี (Proximate analysis) (AOAC International, 2000) ส่วนกากน้ำตาล ยี่ห้อเอ็ม โมลาส ของบริษัท น้ำตาลมิตรผล จำกัด และน้ำอามิ อามิหรือกากผงชูรส ซื้อมาจากร้านค้าปลีกในจังหวัดฉะเชิงเทรา

2. ศึกษาสายพันธุ์เชื้อราที่เหมาะสมต่อการผลิตสารสีด้วยกระบวนการหมักบนเปลือกทุเรียนเหลือทิ้งจากการแปรรูปเป็นวัตถุดิบ

ศึกษาสายพันธุ์เชื้อรา ได้แก่ *M. purpureus* (สายพันธุ์ TISTR 3615 และ TISTR 3630) และสภาวะที่เหมาะสมในผลิตสารสีของเชื้อรา *Monascus* sp. บนเปลือกทุเรียนสายพันธุ์หมอนทอง โดยศึกษา 2 ปัจจัย ได้แก่ ชนิดของแหล่งคาร์บอน (กลูโคส กากน้ำตาลและน้ำอามิ อามิ) และปริมาณของแหล่งคาร์บอน (ร้อยละ 0, 2, 4 และ 6) โดยศึกษาแบบทีละปัจจัย (One factor at a time) ทำการผลิตสารสีโดยชั่งเปลือกทุเรียนปริมาณ 100 กรัม ใส่ในขวดเพาะเลี้ยงขนาด 16 ออนซ์ จากนั้นแปรผันปัจจัยต่าง ๆ นำไปฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที เติมกล้าเชื้อสารแขวนลอยสปอร์เชื้อรา *M. purpureus* TISTR 3615 หรือ 3630 ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 1×10^6 สปอร์ต่อมิลลิลิตร และนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส นาน 12 วัน นำสารสีที่ได้ไปฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที แล้วอบที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส นาน 1 คืน บดให้เป็นผงละเอียดร่อนผ่านตะแกรงขนาด 80 เมช จากนั้นนำไปวิเคราะห์ปริมาณสารสี

3. ศึกษาการผลิตสารสีจากกระบวนการหมักของเชื้อราโดยใช้เปลือกทุเรียนสายพันธุ์ต่าง ๆ เป็นวัตถุดิบ

ชั่งเปลือกทุเรียนสายพันธุ์ต่าง ๆ ปริมาณ 100 กรัม ใส่ในขวดเพาะเลี้ยงขนาด 16 ออนซ์ นำไปเพาะเลี้ยงในสภาวะที่เหมาะสมซึ่งได้จากการศึกษาในข้อที่ 2 จากนั้นนำไปฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที เติมกล้าเชื้อสารแขวนลอยสปอร์เชื้อราสายพันธุ์ที่เหมาะสมที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 1×10^6 สปอร์ต่อมิลลิลิตร และนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส นาน 12 วัน นำสารสีที่ได้ไปฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที แล้วอบที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส นาน 1 คืน บดให้เป็นผงละเอียดร่อนผ่านตะแกรงขนาด 80 เมช จากนั้นนำไปวิเคราะห์ปริมาณสารสี

4. การวิเคราะห์ปริมาณสารสีที่ผลิตได้

ทำการวิเคราะห์ปริมาณสารสีตามวิธีการของ Babitha et al. (2007) โดยการนำผงของสารสีที่ผลิตได้ปริมาณ 1 กรัม เติมเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 95 ปริมาตร 5 มิลลิลิตร นำไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที นาน 1 ชั่วโมง กรองด้วยกระดาษกรอง Whatman No.1 นำสารที่กรองได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 412 (สีเหลือง) และ 500 (สีแดง) นาโนเมตร ตามลำดับ ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Lambda 365, Perkin Elmer, USA) รายงานผลปริมาณสารสีที่เชื้อผลิตได้ในหน่วย ค่าการดูดกลืนแสง (AU) ต่อกรัมน้ำหนักแห้ง เปรียบเทียบปริมาณสารสีที่ผลิตได้ในแต่ละชุดการทดลองเพื่อคัดเลือกสภาวะที่เหมาะสมที่ให้ปริมาณสารสีสูงสุด สำหรับใช้ในการศึกษาขั้นต่อไป

5. การวิเคราะห์คุณสมบัติของสารสี

- วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ปริมาณความชื้น ไขมัน โปรตีน เส้นใย คาร์โบไฮเดรต และเถ้า (AOAC International, 2000)

- ตรวจวัดค่าสีของสารสีที่ผลิตได้ตามระบบ CIE (L*, a*, b*) วัดค่าความสว่าง (L*-value) ค่าเป็นสีแดง-เขียว (a*-value) ค่าเป็นสีเหลือง-น้ำเงิน (b*-value) ด้วยเครื่องวัดสี (รุ่น Chroma Meter CR-400, Konica Minolta, Japan)

- การวัดความสามารถในการละลาย ตามวิธีการที่ดัดแปลงจาก Boonrueang (2002) โดยชั่งสารสี 1 กรัม เติมตัวทำละลายชนิดต่าง ๆ ได้แก่ น้ำ เอทานอล และเมทานอล ปริมาตร 5 มิลลิลิตร นำไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที นาน 1 ชั่วโมง กรองตะกอนออกด้วยกระดาษกรอง จากนั้นวัดปริมาณตะกอนที่ได้ หากมีตะกอนเหลือน้อยแสดงว่าละลายได้ดี

- การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ด้วยวิธี 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) scavenging capacity ทดสอบตามวิธีการที่ดัดแปลงจาก Shimada et al. (1992) โดยดูดสารสกัดของสารสีจากเชื้อรา ปริมาตร 100 ไมโครลิตร จากนั้นเติมสารละลาย DPPH ความเข้มข้น 2.0 mM ปริมาตร 2.9 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ในที่มืดนาน 30 นาที และนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 515 นาโนเมตร จากนั้นคำนวณหาร้อยละในการต้านอนุมูล DPPH (%DPPH radical scavenging)

- การวิเคราะห์ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดด้วยวิธี Folin-Ciocalteu ตามวิธีการที่ดัดแปลงจาก Wong et al. (2006) ปิเปตสารสกัดของสารสีจากเชื้อรามาตัวอย่างละ 50 ไมโครลิตร เติมสารละลาย Folin-Ciocalteu reagent ปริมาตร 2.0 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน เติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้นร้อยละ 7 ปริมาตร 2.0 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำกลั่นปริมาตร 2.0 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันเก็บในที่มืดนาน 1 ชั่วโมง แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 765 นาโนเมตร นำค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ไปเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานกรดแกลลิคและรายงานผลปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดในรูปของไมโครกรัมสมมูลกับกรดแกลลิคต่อกรัมของสารสกัด (μgGAE/g extract)

- การทดสอบฤทธิ์ยับยั้งจุลินทรีย์โดยใช้ Agar disc diffusion method ตามวิธีการของ Suwanposri et al. (2025a) แบคทีเรียที่ใช้ในการทดสอบ ได้แก่ แบคทีเรียแกรมบวก ประกอบด้วย *Bacillus subtilis, Micrococcus* sp. และ *Staphylococcus aureus* และแบคทีเรียแกรมลบ *Escherichia coli* โดยทำการเพาะเลี้ยงแบคทีเรียทั้งสี่สายพันธุ์ในอาหาร Nutrient agar (Himedia, India) บ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส นาน 48 ชั่วโมง นำเชื้อแบคทีเรียตัวอย่างมาเจือจางด้วยน้ำกลั่นปลอดเชื้อ ให้ได้ค่าการดูดกลืนแสงเท่ากับ 0.2 ที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร จากนั้นใส่เชื้อแบคทีเรียที่เจือจางแล้วลงบนอาหารทดสอบ โดยใช้เทคนิค spread plate นำแผ่น disc ที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้วมาวางบนผิวหน้าของอาหารเลี้ยงเชื้อและหยดสารสกัดของสารสีจากเชื้อราที่ผ่านการเจือจางด้วยตัวทำละลายปริมาตร 15 ไมโครลิตร ลงบนแผ่น disc นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ตรวจสอบฤทธิ์การยับยั้งแบคทีเรียของสารสกัดจากการเกิดวงใส (Inhibition zone)

6. การวิเคราะห์ค่าทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely randomized design; CRD) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ ผลการทดลองที่ได้แสดงในรูปของค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่มทดลองโดยใช้ สถิติ One-way ANOVA และวิเคราะห์ความแตกต่างของชุดข้อมูลด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่าง 2 กลุ่มที่เป็นอิสระกัน (Independent-Samples *t*-test) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ผลการวิจัย

1. ผลการศึกษาสายพันธุ์เชื้อราและสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตสารสีของเชื้อราเมื่อใช้เปลือกทุเรียนเหลือทิ้งจากการแปรรูปเป็นวัตถุดิบ

เมื่อทำการเพาะเลี้ยงเชื้อรา *M. purpureus* สายพันธุ์ TISTR 3615 และ 3630 บนอาหารเปลือกทุเรียน หลังหมักนาน 12 วัน พบว่าสายพันธุ์ TISTR 3615 สามารถผลิตสารสีเหลืองและสีแดงได้ในปริมาณที่สูงกว่าสายพันธุ์ TISTR 3630 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (Figure 2A) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้สายพันธุ์ TISTR 3615 ในการศึกษาขั้นต่อไป แหล่งคาร์บอนที่ให้ปริมาณสารสีเหลืองสูง คือ กลูโคส ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$) กับชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมแหล่งคาร์บอน รองลงมาคือ กากน้ำตาล และน้ำอามิ อามิ ตามลำดับ โดยแหล่งคาร์บอนที่ให้ปริมาณสารสีแดงสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) คือ กลูโคส รองลงมาคือ ชุดควบคุม กากน้ำตาล และน้ำอามิ อามิ ตามลำดับ (Figure 2B) แสดงให้เห็นว่ากลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอนที่เหมาะสมในการผลิตสารสี ดังนั้นจึงเลือกกลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอนในการทดลองขั้นต่อไป ปริมาณแหล่งคาร์บอนที่ให้สีเหลืองสูงสุดคือ กลูโคสความเข้มข้นร้อยละ 6 ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$) กับปริมาณสารสีที่ได้จากการใช้กลูโคสความเข้มข้นร้อยละ 2 และ 4 ตามลำดับ ส่วนในชุดควบคุมจะให้ปริมาณสารสีเหลืองน้อยที่สุด ในขณะที่การใช้กลูโคสความเข้มข้นร้อยละ 2 ให้ปริมาณสารสีแดงสูงสุด ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$) กับการใช้กลูโคสความเข้มข้นร้อยละ 4 และ 6 ตามลำดับ ส่วนในชุดควบคุมจะให้ปริมาณสารสีแดงน้อยที่สุด (Figure 2C) เมื่อพิจารณาจากต้นทุนการผลิต ดังนั้นจึงเลือกใช้กลูโคสความเข้มข้นร้อยละ 2 ในการผลิตสารสี

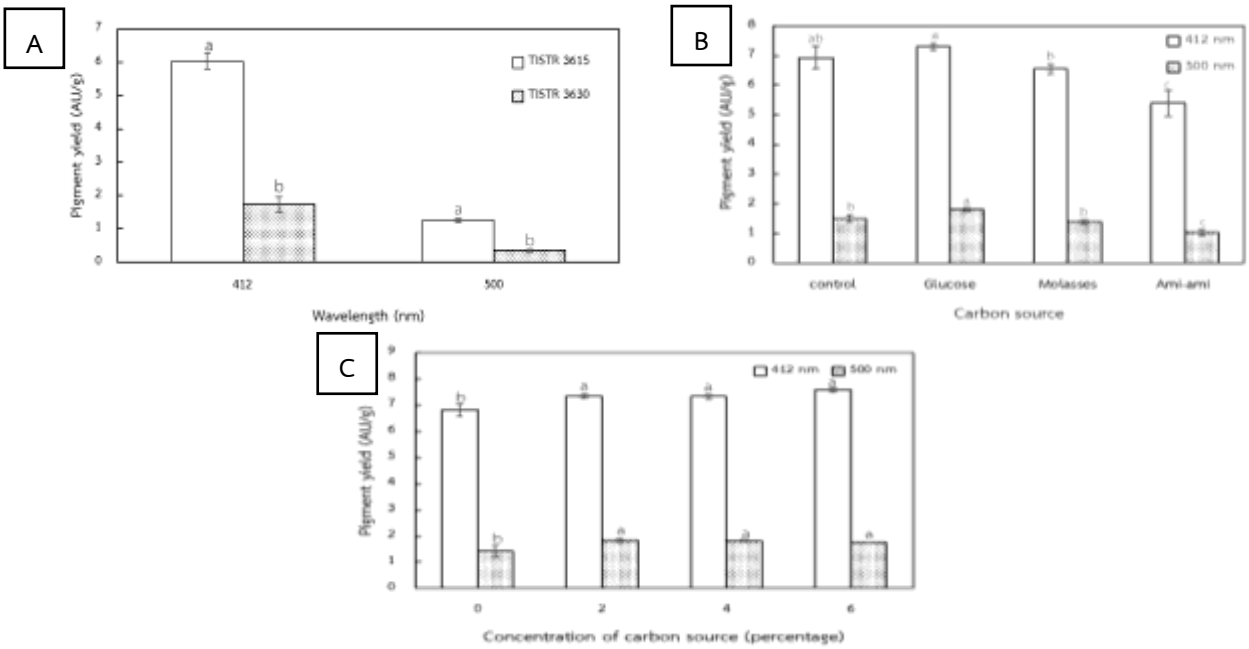


Figure 2 Pigment yield by using difference (A) strains (B) type of carbon sources and (C) concentration of carbon sources. Means with different letters are significantly different ($p \leq 0.05$)

โดยสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตสารสีโดยใช้เปลือกทุเรียนสายพันธุ์หมอนทอง คือ การใช้เชื้อรา *M. purpureus* TISTR 3615 และใช้กลูโคสความเข้มข้นร้อยละ 2 เป็นแหล่งคาร์บอน โดยจะให้ปริมาณสารสีเหลืองและสีแดงเท่ากับ 7.34 ±0.09 และ 1.84±0.07 AU/กรัม ตามลำดับ

2. ผลการศึกษาการผลิตสารสีจากกระบวนการหมักของเชื้อราโดยใช้เปลือกทุเรียนสายพันธุ์ต่าง ๆ เป็นวัตถุดิบ

- ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

โดยเปลือกทุเรียนน้ำหนักสด 1 กิโลกรัม ได้แก่ สายพันธุ์ก้านยาว กระดุม หมอนทอง และนกหยิบจะให้เปลือกทุเรียนที่มีน้ำหนักแห้งแตกต่างกันเท่ากับ 189.85, 141.29, 500.00 และ 173.91 กรัม ตามลำดับ เมื่อนำไปผลิตสารสี พบว่า ทุกสายพันธุ์ให้ผลได้ของสารสีร้อยละ 99.0 องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกทุเรียนและสารสีที่ผลิตได้จากเปลือกทุเรียนสายพันธุ์ก้านยาว (PK) กระดุม (PKR) หมอนทอง (PM) และนกหยิบ (PN) แสดงใน Table 1 พบว่า สารสีที่ผลิตได้จากเปลือกทุเรียนทุกสายพันธุ์มีปริมาณโปรตีนและไขมันเพิ่มขึ้น โดยสารสี PM มีปริมาณโปรตีนสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) และสารสี PKR มีปริมาณไขมันสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) รองลงมาคือ สารสี PM, PN และ PK ตามลำดับ เมื่อนำเปลือกทุเรียนทั้ง 4 สายพันธุ์ มาใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการหมักของเชื้อรา *M. purpureus* TISTR 3615 ในสภาวะที่เหมาะสม ผลการศึกษามีดังนี้

Table 1 Chemical composition of different dried durian peels and pigments by the fermentation of *M. purpureus* TISTR 3615

Component (%)	Kanyao (PK)		Kradum (PKR)		Monthong (PM)		Nokyip (PN)	
	Peel	Pigment	Peel	Pigment	Peel	Pigment	Peel	Pigment
Carbohydrate	87.24±0.14^{c}	75.68±0.19^{c}	88.94±0.17^{a}	73.32±0.03^{d}	81.35±0.01^{d}	77.56±0.02^{b}	88.15±0.11^{b}	80.66±0.08^{a}
Protein	1.10±0.09^{b}	1.12±0.04^{c}	0.78±0.05^{c}	1.39±0.03^{b}	6.62±0.02^{a}	9.30±0.15^{a}	0.80±0.09^{c}	0.97±0.05^{c}
Lipid	0.32±0.02^{b}	0.73±0.02^{c}	0.32±0.01^{b}	1.46±0.02^{a}	0.68±0.02^{a}	0.96±0.03^{b}	0.65±0.04^{a}	0.73±0.02^{c}
Moisture	4.67±0.02^{c}	10.52±0.11^{b}	6.62±0.02^{a}	12.08±0.04^{a}	6.32±0.04^{b}	6.12±0.02^{d}	4.82±0.21^{c}	10.30±0.05^{c}
Crude fiber	26.04±0.35^{a}	23.04±0.30^{b}	17.46±0.04^{d}	22.40±0.17^{c}	22.75±0.03^{b}	27.73±0.08^{a}	18.42±0.48^{c}	23.34±0.25^{b}
Ash	6.67±0.07^{a}	11.95±0.14^{a}	3.33±0.10^{d}	11.74±0.02^{b}	5.03±0.03	6.06±0.25^{d}	5.57±0.20^{b}	7.34±0.03^{c}

Notes: $^{a-d}$ values with different superscript letters within the same row are significantly different ($p \leq 0.05$). Each value in the table is presented as mean±SD

- ผลของค่าสี

ผงสารสีที่ได้จากการหมักของสายพันธุ์ TISTR 3615 บนเปลือกทุเรียนสายพันธุ์ต่าง ๆ (Figure 3) พบว่า สารสีที่ผลิตได้นั้นมีแนวโน้มค่อนไปทางสีแดงออกน้ำตาล ผงสารสี PKR จะมีสีค่อนไปทางสีน้ำตาลเข้มมากที่สุด รองลงมาคือ PN และ PK ส่วนสารสี PM นั้น จะมีสีน้ำตาลอมชมพู (Table 2)

Table 2 L*, a* and b* values of pigment powder by the fermentation of *M. purpureus* TISTR 3615 on different durian peel cultivars

Pigment powder	L*	a*	b*
PK	23.85±0.27^{a}	13.90±0.09^{c}	36.73±0.63^{b}
PKR	17.80±0.18^{c}	13.94±0.09^{c}	29.26±0.17^{c}
PM	23.73±0.11^{a}	14.43±0.31^{b}	31.43±0.15^{c}
PN	20.97±0.62^{b}	15.38±0.51^{a}	39.41±2.32^{a}

Notes: $^{a-c}$ values with different superscript letters within the same column are significantly different ($p \leq 0.05$). Each value in the table is presented as mean±SD

- ผลของปริมาณสารสี

เปลือกทุเรียนสายพันธุ์หมอนทองให้ปริมาณสารสีเหลือง (7.26±0.15 AU/g) และสารสีแดง (1.60±0.067 AU/g) สูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) รองลงมา ได้แก่ สายพันธุ์นกหยิบ กระดุมและก้านยาว ตามลำดับ (Figure 4)

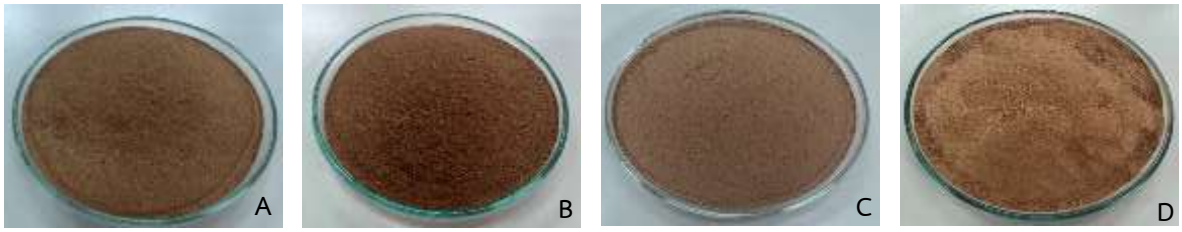


Figure 3 Pigment powder by the fermentation of *M. purpureus* TISTR 3615 on different durian peel cultivars including (A) Kanyao; (B) Kradum; (C) Monthong; and (D) Nokyip

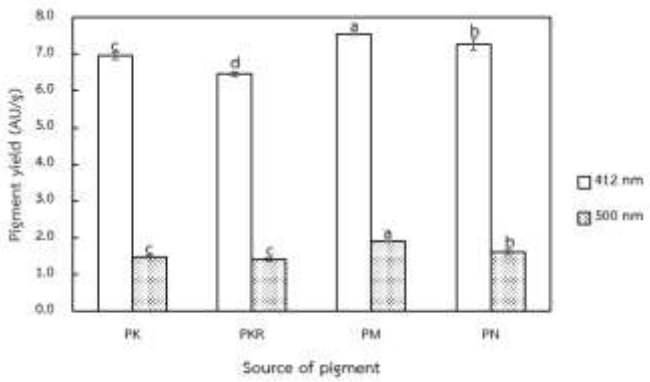


Figure 4 Pigment yield by the fermentation of *M. purpureus* TISTR 3615 on different durian peel cultivars. Different letters within the same wavelength of pigment indicate significant differences among sources of pigment ($p \leq 0.05$).

- ผลของความสามารถในการละลาย

การละลายน้ำ พบว่า สารสี PM สามารถละลายในน้ำได้ดีที่สุด ส่วนสารสี PK, PKR และ PN มีความสามารถในการละลายในน้ำไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$) โดยมีปริมาณตะกอนที่เหลืออยู่เท่ากับ 0.75±0.01, 0.95±0.03, 0.98±0.03 และ 0.98±0.03 กรัม ตามลำดับ การละลายในเอทานอล พบว่า สารสี PM สามารถละลายในเอทานอลได้ดีที่สุด รองลงมา ได้แก่ สารสี PN, PK และ PKR ตามลำดับ โดยมีปริมาณตะกอนที่เหลืออยู่เท่ากับ 0.89±0.01, 0.90±0.00, 0.92±0.02 และ 0.91±0.01 กรัม ตามลำดับ ส่วนการละลายในเมทานอลนั้น พบว่า สารสี PM สามารถละลายในเมทานอลได้ดีที่สุด รองลงมา ได้แก่ สารสี PKR, PN และ PK ตามลำดับ โดยมีปริมาณตะกอนที่เหลืออยู่เท่ากับ 0.94±0.01, 1.06±0.01, 1.08±0.01 และ 1.10±0.01 กรัม ตามลำดับ (Figure 5)

- ผลของปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH

สารสีที่ผลิตได้จากการหมักของเปลือกทุเรียนทุกสายพันธุ์ที่นำมาทดสอบ ตรวจพบสารประกอบฟีนอลิกและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH พบว่า สารสี PM มีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) รองลงมา ได้แก่ สารสี PN, PK และ PKR ตามลำดับ (Figure 6) โดยมีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดเท่ากับ 2,129.63±33.95, 1,422.22±19.25, 1,407.41±23.13 และ 722.22±11.11 μg GAE/g ตามลำดับ นอกจากนี้ยัง พบว่า สารสี PM มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH สูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) รองลงมาได้แก่ สารสี PN, PK และ PKR ตามลำดับ โดยมีร้อยละของการยับยั้งอนุมูลอิสระ DPPH เท่ากับ 76.32±0.70, 73.72±0.79, 70.17±0.84 และ 57.42±1.74 ตามลำดับ ซึ่งเทียบเท่ากับ 93.47±0.85, 90.28±0.97, 85.93±1.02 และ 70.32±2.13 μg ascorbic acid/g ตามลำดับ

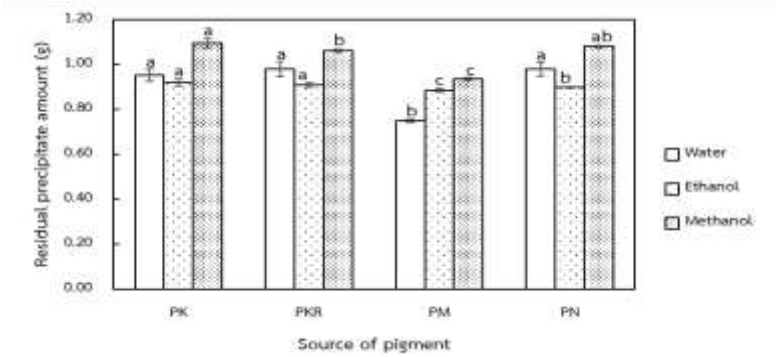


Figure 5 The solubility of pigments produced by the fermentation of *M. purpureus* TISTR 3615 on different cultivars durian peels in various solvents. Different letters within the same solvent indicate significant differences among sources of pigment (p≤0.05).

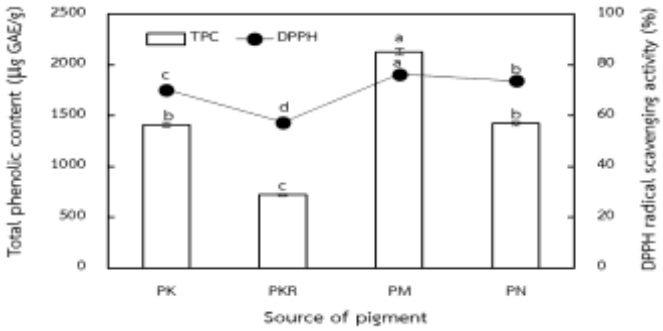


Figure 6 Total phenolic content and antioxidant activity detected in the pigments produced by the fermentation of *M. purpureus* TISTR 3615 on different cultivars durian peels. Different letters between sources of pigment indicate significant differences among treatments (p≤0.05).

- ฤทธิ์ยับยั้งจุลินทรีย์

ทำการคัดเลือกสารสีที่มีคุณสมบัติที่ดีที่สุด เพื่อนำไปวิเคราะห์ฤทธิ์ในการยับยั้งจุลินทรีย์ก่อโรค โดยจากผลการศึกษาพบว่า สารสี PM นั้นมีคุณสมบัติที่ดีกว่าสารสีตัวอื่น ๆ ได้แก่ มีโทนสีที่ออกน้ำตาลชมพู มีปริมาณสารสีเหลืองและแดงสูงที่สุด ละลายในน้ำได้ดีที่สุด นอกจากนี้ยังมีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์ยับยั้งอนุมูลอิสระสูงสุด ผลการทดสอบฤทธิ์ยับยั้งจุลินทรีย์ก่อโรคของสารสกัดจากสารสี PM พบว่า สารสีมีฤทธิ์ในการยับยั้ง *B. cereus*, *S. aureus, Micrococcus* sp. และ *E. coli* โดยสามารถยับยั้ง *B. cereus* ได้สูงสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p≤0.05) รองลงมา ได้แก่ *S. aureus*, *Micrococcus* sp. และ *E. coli* ตามลำดับ (Table 3)

Table 3 Antimicrobial activity of PM pigment

Pigment source	Inhibitory zone (mm) (Mean±SD)			
	B. cereus	*S. aureus*	*Micrococcus* sp.	*E. coli*
PM	3.83±0.29^{a}	2.33±0.58^{b}	2.00±0.50^{b}	1.83±0.29^{b}

Notes: Values with different superscript letters within the same row are significantly different (p≤0.05). Each value in the table is presented as mean±SD.

การอภิปรายผล

Monascus sp. เป็นเชื้อราที่เมื่อเจริญในช่วงแรกจะสร้างเส้นใยสีขาวจากนั้นเมื่ออายุมากขึ้นเส้นใยจะเปลี่ยนจากสีขาวเป็นสีแดง เนื่องจากเชื้อราชนิดนี้มีความสามารถในการผลิตสารสีในกลุ่มสีส้มแดงได้ โดยวัตถุดิบที่นิยมใช้ในการเพาะเลี้ยงเชื้อรา *Monascus* sp. คือข้าวหรือธัญพืช แต่ในปัจจุบันเพื่อให้ต้นทุนในการผลิตสารสีลดลงจึงได้มีการนำวัตถุเหลือทิ้งหรือของเสียมาใช้ทดแทน โดยการศึกษาในครั้งนี้ได้นำเปลือกทุเรียนซึ่งเป็นของเหลือทิ้งที่เกิดหลังจากการบริโภคหรือการแปรรูปทุเรียนมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตสารสีของเชื้อรา พบว่า การใช้เปลือกทุเรียนเพียงอย่างเดียวโดยที่ยังไม่เติมแหล่งคาร์บอนใด ๆ *M. purpureus* TISTR 3615 และ 3630 ก็สามารถเจริญและผลิตสารสีได้ โดยผลิตสารสีเหลือง 6.02±0.24 และ 1.74±0.23 AU/กรัม ตามลำดับ และผลิตสารสีแดง 1.25±0.06 และ 0.35±0.04 AU/กรัม ตามลำดับ อาจเป็นผลเนื่องมาจากเชื้อรา *Monascus* sp. นั้นสามารถผลิตเอนไซม์อะไมเลส เซลลูเลส ไซลาเนส และเบต้ากลูโคซิเดส (Chen et al., 2020; Louhasakul et al., 2023) ซึ่งทำหน้าที่ในการย่อยคาร์โบไฮเดรตในเปลือกทุเรียนให้กลายเป็นโอลิโกแซ็กคาไรด์หรือโมโนแซ็กคาไรด์ที่เชื้อราสามารถนำไปใช้ในการเจริญและผลิตสารสีได้ สอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้านี้ที่มีการนำของเหลือทิ้งจากการเกษตรมาใช้เป็นวัตถุดิบ ของ El-Sayed et al. (2022) ใช้เปลือกมันฝรั่ง รำข้าวสาลี ซังข้าวโพด เปลือกข้าวสาลี และเปลือกข้าว และเติมน้ำกลั่นเพื่อปรับความชื้น เติมเชื้อรา *M. ruber* SRZ112 จากนั้นหมักนาน 6 วัน พบว่า เชื้อราสามารถใช้วัตถุเหลือทิ้งทางการเกษตรเหล่านี้เป็นวัตถุดิบในการผลิตสารสีได้ โดยให้ปริมาณสารสีแดงเท่ากับ 10.65±0.02, 6.89±0.76, 2.45±0.52, 6.89±0.76 และ 3.98±0.21 AU/กรัม ตามลำดับ

ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญและการผลิตสารสีของเชื้อรา *M. purpureus* ได้แก่ อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-ด่างของอาหารเลี้ยงเชื้อ ระยะเวลาในการหมัก แหล่งคาร์บอน แหล่งไนโตรเจน สายพันธุ์ของเชื้อรา และสารอาหารต่าง ๆ (He et al., 2021) โดยการศึกษาในครั้งนี้ได้ทำการศึกษา สายพันธุ์ของเชื้อรา ชนิดของแหล่งคาร์บอน และปริมาณของแหล่งคาร์บอน โดยพบว่า *M. purpureus* TISTR 3615 นั้นให้ปริมาณสารสีเหลืองและสีแดงสูงกว่าสายพันธุ์ TISTR 3630 อาจเป็นผลเนื่องมาจากความสามารถในการใช้วัตถุดิบที่แตกต่างกัน และสภาวะที่ใช้อาจเหมาะสมกับสายพันธุ์ TISTR 3615 มากกว่า ส่งผลให้สามารถผลิตสารสีได้ดีกว่า สำหรับชนิดของแหล่งคาร์บอนที่เหมาะสมนั้น คือ กลูโคส เนื่องจากกลูโคสเป็นโมโนแซ็กคาร์ไรด์ที่เชื้อราสามารถนำไปใช้ได้โดยที่ไม่ต้องมีการย่อยก่อน De Carvalho et al. (2014) รายงานว่าการเติมแหล่งคาร์บอนบางชนิดได้แก่ กลูโคส ฟรักโทส มอลโทส แลคโตส และกาแลคโตส นอกจากจะช่วยเพิ่มผลผลิตของสารสีและชีวมวลแล้ว การเติมแหล่งคาร์บอนที่เหมาะสมยังช่วยให้เชื้อราสามารถผลิตสารเมแทบอไลต์ทุติยภูมิได้สูงอีกด้วย Abdel-Raheam et al. (2021) ใช้ของเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตมันฝรั่งทอดเป็นวัตถุดิบในการผลิตสารสีของเชื้อรา *M. ruber* Went AUMC 5705 พบว่าการเติมแหล่งคาร์บอนปริมาณ 50 กรัมต่อลิตร สามารถช่วยเพิ่มอัตราการเจริญของเชื้อรา การผลิตสารสี การผลิตชีวมวล และเอทานอล โดยปริมาณของแหล่งคาร์บอนที่เหมาะสม คือ ร้อยละ 2 หากมีปริมาณกลูโคสสูงขึ้นอาจส่งผลในเชิงลบต่อการเจริญและการผลิตสารสีของเชื้อราได้ ซึ่ง Wong et al. (1981) รายงานว่าการใช้ปริมาณกลูโคสสูงจะช่วยให้เชื้อรามีการสร้างเส้นใยได้ดี แต่จะมีผลเสียต่อกระบวนการหมัก โดยจะส่งผลให้อาหารที่ใช้ในการหมักมีความเป็นกรดสูงทำให้ได้ผลผลิตของสารสีลดลง นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของปริมาณกลูโคสยังส่งผลให้อัตราการเจริญจำเพาะลดลงเนื่องจากการเกิดออสโมติก (Kim et al., 1997) โดยความดันออสโมติกเพิ่มขึ้นเนื่องจากความเข้มข้นของกลูโคสสูงขึ้นและลดปริมาณของน้ำที่ใช้ในการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ลง ผลผลิตของสารสีแดงที่ผลิตได้ในสภาวะที่เหมาะสมมีปริมาณ 1.84±0.07 AU/กรัม ซึ่งมีค่าสูงกว่า Nimnoi and Lumyong (2011) รายงานว่าการใช้กากเนื้อมะพร้าวเหลือทิ้งเป็นอาหารเลี้ยงเชื้อของ *M. purpureus* นั้นผลิตสารสีแดงได้ในระดับต่ำมีค่าเท่ากับ 0.59 AU/กรัม แต่มีค่าต่ำกว่ารายงานของ Abdel-Raheam et al. (2022) ที่ผลิตสารสีด้วยกระบวนการหมักของ *M. purpureus* (Went NRRL 1992) บนผงเศษมันฝรั่งทอดผลิตสารสีได้ 19.86 AU/มิลลิลิตร เช่นเดียวกับ Khacharat et al. (2022) ผลิตสารสีจาก *M. purpureus* TISTR 3003 ที่หมักบนเปลือกกล้วยหอมทองดิบที่แก่จัด นาน 24 วัน ผลิตสารสีแดงได้ 348.20±9.21 Unit/กรัม และของ Asghari et al. (2021) ที่ใช้น้ำเชื่อมจากอินทผาลัมลูกร่วงความเข้มข้นร้อยละ 55 ในการผลิตสารสีของ *M. purpureus* พบว่า ผลิตสารสีแดงได้สูงสุดเท่ากับ 5.10 AU/กรัม การที่ผลของปริมาณสารสีที่ผลิตได้มีความแตกต่างกัน อาจเนื่องมาจากความแตกต่างของสายพันธุ์ของเชื้อรา วัตถุดิบที่ใช้ รวมถึงสภาวะที่ใช้ในการหมัก โดยปริมาณสารสีที่ผลิตได้จากการหมักของเชื้อราบนเปลือกทุเรียนในครั้งนี้มีค่าค่อนข้างต่ำ ดังนั้นหากต้องการให้มีปริมาณผลผลิตของสารสีเพิ่มขึ้น อาจต้องศึกษาปัจจัยอื่น ๆ เพิ่มเติม ได้แก่ ความเข้มข้นของหัวเชื้อ ชนิดของแหล่งไนโตรเจน อุณหภูมิที่ใช้หมัก ค่าความเป็นกรด-ด่าง ของอาหารเลี้ยงเชื้อ ระยะเวลาในการหมัก และการเติมสารเสริม

เมื่อพิจารณาจากปริมาณสารสีที่ผลิตได้ การผลิตสารสีโดยใช้เปลือกทุเรียนสายพันธุ์หมอนทองนั้นมีความเหมาะสมมากที่สุด เนื่องจากสามารถผลิตสารสีเหลืองและสีแดงได้ในปริมาณสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) รวมถึงสารสีที่ผลิตได้ยังมีปริมาณโปรตีนและไขมันสูง เมื่อทำการศึกษาคุณสมบัติของสารสีที่ผลิตได้จากเปลือกทุเรียนทุกสายพันธุ์ พบว่า สามารถละลายได้ในตัวทำละลายทุกชนิดที่นำมาทดสอบ โดยสารสี PM นั้นสามารถละลายในตัวทำละลายทุกชนิดได้ดีที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับสารสี PK, PKR และ PN ซึ่งการที่สารสีทุกชนิดที่ผลิตได้ละลายได้ในน้ำนั้นเป็นคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้เป็นสีผสมอาหารหรือสีย้อมผ้าทดแทนการใช้สารสีสังเคราะห์

ส่วนปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH ของสารสีที่ผลิตได้อยู่ในช่วง 722.22±11.11 ถึง 2,129.63±33.95 μg GAE/g และร้อยละ 57.42±1.74 ถึง 76.32±0.70 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าแตกต่างจากงานวิจัยของ Suwanposri et al. (2025b) ผลิตสารสีจากการหมักของ *M. purpureus* TISTR 3090 บนข้าวแม่พญาทองดำ หมักนาน 10 วัน ตรวจพบปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH เท่ากับ 29.14±9.74 μg GAE/g และร้อยละ 42.77±4.46 ตามลำดับ เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Chen et al. (2021) นำกระดูกปลาไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตสารสีของเชื้อรา *M. purpureus* BCRC 31499 หมักนาน 3 และ 6 วัน พบว่า มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH เท่ากับร้อยละ 26-81 และ 23-75 ตามลำดับ และแตกต่างจาก Lin et al. (2019) ผลิตสารสีโดยเชื้อรา *M. purpureus* Went (BCRC 31615) บนข้าว พบว่า เมื่อสกัดสารสีด้วยน้ำและเอทานอลตรวจพบปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดเท่ากับ 10.91±0.16 และ 11.42±0.24 μg GAE/g รวมถึงมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH เท่ากับร้อยละ 9.09±0.12 และ 4.65±0.26 ตามลำดับ ผลของปริมาณสารฟีนอลิกและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่แตกต่างกัน เนื่องจากความเข้มข้นของตัวอย่างที่ใช้ วิธีการในการสกัด ชนิดของตัวอย่าง ชนิดของตัวทำละลาย และระยะเวลาในการสกัด

สารสี PM ที่ผลิตได้มีฤทธิ์ในการยับยั้งแบคทีเรียก่อโรคทั้งแกรมบวกและแกรมลบ แต่สามารถยับยั้งแบคทีเรียแกรมบวกได้ดีกว่า เนื่องจากความแตกต่างของโครงสร้างผนังเซลล์ ในแบคทีเรียแกรมลบมีเยื่อหุ้มชั้นนอก (Outer membrane) ที่ประกอบด้วยสารลิโพพอลิแซ็กคาร์ไรด์ซึ่งทำหน้าที่ในการเป็นตัวกั้นการซึมผ่านของสารได้ดี โดยโครงสร้างนี้ไม่พบในแบคทีเรียแกรมบวก สารต่าง ๆ จึงซึมผ่านเข้าสู่เยื่อหุ้มเซลล์ของแบคทีเรียแกรมบวกได้ง่ายกว่าแบคทีเรียแกรมลบ (Shan et al., 2007) ส่งผลให้แบคทีเรียแกรมบวกมีความไวสารสี PM มากกว่าแบคทีเรียแกรมลบ มีการศึกษาในบางงานวิจัยที่เสนอว่ากลไกการออกฤทธิ์อาจเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาระหว่างสารสีของ *Monascus* กับเอนไซม์ในสปอร์ที่งอกแล้วและเซลล์ปกติ ซึ่งส่งผลให้การใช้ธาตุเหล็กลดลงและมีผลต่อความสามารถในการซึมผ่านของเยื่อหุ้มเซลล์ ซึ่งอาจทำให้การลำเลียงสารอาหาร ออกซิเจน และสารเมแทบอไลต์ลดลง (Kim et al., 2006; Xu, 2011) ซึ่งสอดคล้องกับ Teiba et al. (2025) พบว่า สารสกัดจากสารสีของเชื้อรา *M. purpureus* ATCC 16436 สามารถยับยั้ง *E. coli* ได้ โดยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีฤทธิ์ต้านจุลินทรีย์ที่ตรวจพบ ได้แก่ Aspidospermidin- 17-ol, 1-acetyl-16-methoxy, Octanoic acid และ Hexadecanoic acid methyl ester และรายงานของ Moradi & Mortazavi (2024) พบว่า สารสกัดสารสีของ *M. purpureus* PTCC 5303 ที่เพาะเลี้ยงบนกากตะกอนเหลือทิ้งจากการผลิตนมมีฤทธิ์ในการยับยั้ง *S. aureus* และ *E. coli* รวมถึงรายงานของ Srianta et al. (2024) พบว่า สารสกัดจากสารสีของเชื้อรา *M. purpureus* M9 ที่เพาะเลี้ยงบนหญ้าหวานมีฤทธิ์ในการยับยั้ง *S. aureus* และ *E. coli* โดย Abd Razak et al. (2015) รายงานว่ากรดฟีนอลิกที่พบในสารสกัดของสารสีจากเชื้อรา *Monascus* ที่เพาะเลี้ยงบนรำข้าว คือ ρ-coumaric, Ferulic, Sinapic, Vanillic, Caffeic และ Syringic acid ซึ่งสารเหล่านี้มีคุณสมบัติในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ (Liu et al., 2020) นอกจากนี้ยังมีหลายงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับฤทธิ์ในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของสารสีแดง ส้ม และเหลืองของสารสีจากเชื้อรา *Monascus* ได้แก่ Gökmen et al. (2021) พบว่า สารสีแดงของเชื้อรา *Monascus* มีค่า MIC 128 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร และ >128 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร ที่สามารถยับยั้ง *S. aureus* และ *E. coli* ตามลำดับ มีค่าที่ต่ำกว่าการใช้สารสีแดงทางการค้าซึ่งมีค่า MIC 256 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร และ >256 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร ในการยับยั้ง *S. aureus* และ *E. coli* ตามลำดับ Feng et al. (2019) พบว่า สารสีส้มความเข้มข้น 1-10 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร มีฤทธิ์ในการยับยั้งแบคทีเรีย *S. aureus* โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของบริเวณยับยั้งอยู่ในช่วง 5-34 มิลลิเมตร โดยสารสีส้มจะทำให้เซลล์ของ *S. aureus* หดตัวและเกิดความเสียหายที่เยื่อหุ้มเซลล์ ส่งผลให้เกิดการรั่วไหลของโปรตีนจากเซลล์แบคทีเรีย ขณะเดียวกัน อนุพันธ์กรดอะมิโนของสารสีจาก *Monascus* จะสามารถแสดงออกได้นั้นขึ้นอยู่กับความไม่ชอบน้ำของสารสีและปริมาณของสารสีที่ยึดเกาะบนผิวเซลล์ โดยยิ่งสารสีมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำมาก การยึดเกาะก็จะมากขึ้น ซึ่งนำไปสู่การจำกัดการดูดซับออกซิเจน (Kim et al., 2006)

บทสรุป

เปลือกทุเรียนสายพันธุ์ก้านยาว กระดุม หมอนทอง และนกหยิบ สามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตสารสีด้วยกระบวนการหมักของเชื้อรา *M. purpureus* TISTR 3615 และในสภาวะที่เหมาะสม มีกลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอน และปริมาณความเข้มข้นของแหล่งคาร์บอนร้อยละ 2 ได้ ซึ่งสารสีที่ได้จากการหมักของเชื้อราบนเปลือกทุเรียนสายพันธุ์ต่าง ๆ นั้นมีปริมาณของโปรตีนและไขมันเพิ่มสูงขึ้น โดยพบว่า เปลือกทุเรียนสายพันธุ์หมอนทองเป็นวัตถุดิบที่ให้สารสีที่มีคุณสมบัติดีที่สุด สารสี PM ที่ผลิตได้มีสีน้ำตาลอมชมพู มีความสามารถในการละลายน้ำ เอทานอล และเมทานอลได้ดีที่สุด มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เปลือกทุเรียนสายพันธุ์อื่น ๆ เป็นวัตถุดิบ รวมถึงสารสี PM ที่ผลิตได้ยังมีฤทธิ์ในการยับยั้งจุลินทรีย์ก่อโรค จากคุณสมบัติของสารสีที่ได้สามารถใช้เป็นข้อมูลในการพัฒนากระบวนการผลิตสารสีธรรมชาติจากของเหลือทิ้งสำหรับใช้เป็นสารให้สีในอาหาร สีย้อมผ้า หรือสารเร่งสีในอาหารสัตว์ เช่น กุ้ง สัตว์สวยงาม และไก่ไข่ เพื่อทดแทนการใช้สีสังเคราะห์ได้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) สำหรับงบประมาณสนับสนุนงานมูลฐาน (Fundamental Fund) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2567 ผ่านทางมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตพืชและภูมิทัศน์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี จังหวัดจันทบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ในด้านเครื่องมือ อุปกรณ์ และสถานที่ในการปฏิบัติการวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

Abd Razak, D. L., Abd Rashid, N. Y., Jamaluddin, A., Sharifudin, S. A., & Long, K. (2015). Enhancement of phenolic acid content and antioxidant activity of rice bran fermented with *Rhizopus oligosporus* and *Monascus purpureus*. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, *4*(1), 33-38.

Abdel-Raheam, H. E. F., Hassan, S. H. A., & Ali, M. M. A. (2021). Production and application of natural food pigments by *Monascus ruber* using potato chips manufacturing wastes. *Bulletin of Pharmaceutical Sciences Assiut University*, *44*(2), 551-563.

Abdel-Raheam, H. E., Alrumman, S. A., Gadow, S. I., El-Sayed, M. H., Hikal, D. M., Hesham, A. E. L., & Ali, M. M. (2022). Optimization of *Monascus purpureus* for natural food pigments production on potato wastes and their application in ice lolly. *Frontiers in Microbiology*, *13*, 862080.

AOAC International. (2000). *Official methods of analysis (17th ed.).* AOAC International.

Asghari, M., Jahadi, M., Hesam, F., & Ghasemi-Sepro, N. (2021). Optimization of Monascus pigment production on date waste substrates using solid state fermentation. *Applied Food Biotechnology*, *8*(3), 247-254.

Babitha, S., Soccol, C. R., & Pandey, A. (2007). Solid state fermentation for the production of *Monascus* pigments from jackfruit seed. *Bioresource Technology, 98*, 1554-1560.

Bakthavachalu, P., Kannan, S. M., & Qoronfleh, M. W. (2020). Food color and autism: a meta-analysis. In M. M. Essa & M. W. Qoronfleh (Eds.), *Personalized Food Intervention and Therapy for Autism Spectrum Disorder Management* (pp. 481-504). Springer International Publishing.

Boonrueang, S. (2002). Dye quality evaluation. *TTIS Textile Digest, 10*(104), 44-45.

Brown, M. J. (1997). *Durio - A Bibliographic Review*. MacGill University.

Chen, G., Liu, Y., Zeng, J., Tian, X., Bei, Q., & Wu, Z. (2020). Enhancing three phenolic fractions of oats (*Avena sativa* L.) and their antioxidant activities by solid-state fermentation with *Monascus anka* and *Bacillus subtilis*. *Journal of Cereal Science*, *93*, 102940.

Chen, Y. T., Hsieh, S. L., Gao, W. S., Yin, L. J., Dong, C. D., Chen, C. W., Singhania, R. R., Hsieh, S., & Chen, S. J., (2021). Evaluation of chemical compositions, antioxidant capacity and intracellular antioxidant action in fish bone fermented with *Monascus purpureus*. *Molecules*, *26*(17), 5288.

Cui, J., Bai, G., Fu, Y., Zhai, X., Jing, L., Liu, Y., Yuan, D., & Wang, C. (2025). Production of smoked sausage using *Monascus* pigments-calcium carbonate colorant lake with nisin as a nitrite substitute. *Foods*, *14*(3), 477.

De Carvalho, J. C., Cardoso, L. C., Ghiggi, V., Woiciechowski, A. L., de Souza Vandenberghe, L. P., & Soccol, C. R. (2014). Microbial pigments. In S. K. Brar, G. S. Dhillion & C. R. Soccol (Eds.), *Biotransformation of waste biomass into high value biochemicals* (pp. 73-97). Springer.

El-Sayed, E. S. R., Gach, J., Olejniczak, T., & Boratyński, F. (2022). A new endophyte *Monascus ruber* SRZ112 as an efficient production platform of natural pigments using agro-industrial wastes. *Scientific Reports*, *12*(1), 12611.

Feng, L. H., Li, Y. Q., Sun, G. J., & Zhao, X. Z. (2019). Antibacterial effect of orange *Monascus* pigment against *Staphylococcus aureus*. *Acta Alimentaria*, *48*(2), 169-176.

Gökmen, G. G., Şılbır, M. S., Göksungur, Y., & Kışla, D. (2021). Antimicrobial activity of red pigments derived from *Monascus purpureus*: a comparison to industrial red pigments. *JSFA reports*, *1*(1), 5-10.

Gong, P., Shi, R., Liu, Y., Luo, Q., Wang, C., & Chen, W. (2023). Recent advances in *monascus* pigments produced by *Monascus purpureus*: Biosynthesis, fermentation, function, and application. *Lwt*, *185*, 115162.

He, J., Jia, M., Li, W., Deng, J., Ren, J., Luo, F., Bai, J., & Liu, J. (2021). Toward improvements for enhancement the productivity and color value of *Monascus* pigments: a critical review with recent updates. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *62*(10), 1-15.

Khacharat, L., Mahakarnchanakul, W., Sukatta, U., Sae-tan, S., Rugthaworn, P., Klinsukhon, K., & Sakayaroj, S. (2022). Effect of banana peels and phenolic compounds on pigments and citrinin production by *Monascus purpureus*. *Agriculture and Natural Resources*, *56*(1), 203-214.

Kim, C., Jung, H., Kim, Y. O., & Shin, C. S. (2006). Antimicrobial activities of amino acid derivatives of monascus pigments. *FEMS Microbiology Letters*, *264*(1), 117-124.

Kim, D., & Ku, S. (2018). Beneficial effects of *Monascus* sp. KCCM 10093 pigments and derivatives: A mini review. *Molecules*, *23*(1), 98.

Kim, S. Y., Lee, K. H., Kim, J. H., & Oh, D. K. (1997). Erythritol production by controlling osmotic pressure in *Trigonopsis variabilis*. *Biotechnology Letters*, *19*, 727-729.

Lin, C. S., Hur, H. F., & Lin, C. C. (2019). Antioxidant properties and antibacterial activity of fermented *Monascus purpureus* extracts. *MOJ Food Processing & Technology*, *7*(2), 49-54.

Liu, J., Du, C., Beaman, H. T., & Monroe, M. B. B. (2020). Characterization of phenolic acid antimicrobial and antioxidant structure-property relationships. *Pharmaceutics*, *12*(5), 419.

Louhasakul, Y., Wado, H., Lateh, R., & Cheirsilp, B. (2023). Solid-state fermentation of Saba banana peel for pigment production by *Monascus purpureus*. *Brazilian Journal of Microbiology*, *54*(1), 93-102.

Luo, M. T., Zhao, C., Huang, C., Chen, X. F., Huang, Q. L., Qi, G. X., Tian, L. L., Xiong, L., Li, H. L., & Chen, X. D. (2017). Efficient using durian shell hydrolysate as low-cost substrate for bacterial cellulose production by *Gluconacetobacter xylinus*. *Indian Journal of Microbiology*, *57*, 393-399.

Meléndez-Martínez, A. J., Mandić, A. I., Bantis, F., Böhm, V., Borge, G. I. A., Brnčić, M., Bysted, A., Cano, M. P., Dias, M. G., Elgersma, A., & Fikselová, M. (2022). A comprehensive review on carotenoids in foods and feeds: Status quo, applications, patents, and research needs. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *62*(8), 1999-2049.

Moradi, S., & Mortazavi, S. A. (2024). Evaluation of *Monascus purpureus* fermentation in dairy sludge-based medium for enhanced production of vibrant red pigment with minimal citrinin content. *PloS one*, *19*(12), e0315006.

Nimnoi, P., & Lumyong, S. (2011). Improving solid-state fermentation of *Monascus purpureus* on agricultural products for pigment production. *Food and Bioprocess Technology*, *4*, 1384-1390.

Purnomo, A., Yudiantoro, Y. A. W., Putro, J. N., Nugraha, A. T., Irawaty, W., & Ismadji, S. (2016). Subcritical water hydrolysis of durian seeds waste for bioethanol production. *International Journal of Industrial Chemistry*, *7*, 29-37.

Rapoport, A., Guzhova, I., Bernetti, L., Buzzini, P., Kieliszek, M., & Kot, A. M. (2021). Carotenoids and some other pigments from fungi and yeasts. *Metabolites*, *11*(2), 92.

Shan, B., Cai, Y. Z., Brooks, J. D., & Corke, H. (2007). The in vitro antibacterial activity of dietary spice and medicinal herb extracts. *International Journal of Food Microbiology*, *117*(1), 112-119.

Shimada, K., Fujikawa, K., Yahara, K., & Nakamura, T. (1992). Antioxidative properties of xanthans on the autoxidation of soybean oil in cyclodextrin emulsion. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *40*, 945-948.

Siwina, S., & Leesing, R. (2021). Bioconversion of durian (*Durio zibethinus* Murr.) peel hydrolysate into biodiesel by newly isolated oleaginous yeast *Rhodotorula mucilaginosa* KKUSY14. *Renewable Energy*, *163*, 237-245.

Srianta, I., Sutedja, A. M., & Nugerahani, I. (2024). Antibacterial activity of *Monascus*-fermented sorghum extracts against *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli*. *Food Research*, *8*(4), 284-290.

Suwanposri, A., Khamphinit, W., Sonthichai, P., Maliyam, R., Charoensook, K., & Boonna, S. (2025a). Production of herbal kombucha with agarwood (*Aquilaria crassna* Pierre ex Lec.) leaves and its biological properties. *International Journal of Agricultural Technology*, *21*(3), 1177-1196.

Suwanposri, A., Charoensuk, K., Kongroi, K., Wetchagool, N., Wetchagool, W., & Thipsrirach, S. (2025b). Effect of supplementing red pigment from *Monascus* sp. fermented native black rice (Maepayathong Dum Rice) on production performance and egg quality in laying hens. *International Journal of Agricultural Technology*, *21*(3), 1197-1210.

Teiba, I. I., Mamdouh, I., Yousef, M. I., Hussein, A., & El-Bilawy, E. H. (2025). Antimicrobial activity of *Monascus purpureus*-derived red pigments against *Salmonella typhimurium*, *Escherichia coli*, and *Enterococcus faecalis*. *AMB Express*, *15*(1), 6.

Wong, H. C., Lin, Y. C., & Koehler, P. E. (1981). Regulation of growth and pigmentation of *Monascus purpureus* by carbon and nitrogen concentrations. *Mycologia*, *73*, 649-654.

Wong, S. P., Leong, L. P., & Koh, J. H. W. (2006). Antioxidant activities of aqueous extracts of selected plants. *Food chemistry*, *99*(4), 775-783.

Wu, L., Wang, Y., Zheng, Q., Wu, J., Zhang, H., Fu, R., & Ren, Y. (2024). Color and functionality construction of cellulose towels with biological *Monascus* pigment based on a nano-suspension system. *International Journal of Biological Macromolecules*, *282*, 137351.

Xu, W. J. (2011). Study on the liquid fermentation to produce *Monascus* pigment with corn starch and antibacterial. *Advanced Materials Research, 183*, 1336-1340.