

คุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ กายภาพ และเคมีของสารเอนแคปซูเลซสารสกัดแอนโทไซยานิน

จากเศษข้าวหอมนิล

Physicochemical, physical and chemical properties of anthocyanin encapsulates from broken Homnil rice

กรณรัตน์ สกุลนามรัตน์^{1,*} นัญญา มีสังเกตุ¹ พัฒนา พละที¹ ยูวดี สมสุข¹ ธนานพ แก้วงาม¹ พิรพล แวนแก้ว¹
บุญรักษา บุรณ์เจริญ¹ และ นันตยา ยิ่งมีมา¹

¹คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์

Karunrat Sakulnarmrat^{1,*} Nattaya Mesungkat¹ Pattana Palatee¹ Yuwadee Somsuk¹ Thananop
Kaeongam¹ Peerapon Waenkaew¹ Bunraksa Boonjarean¹ and Nuntiya Yingmema¹

¹Faculty of Agriculture and Technology, Rajamangala University of Technology Isan, Surin Campus

บทคัดย่อ

สารเอนแคปซูเลซแอนโทไซยานินจากเศษข้าวหอมนิล (Homnil, HN) เตรียมด้วยสารห่อหุ้มแบบผสมระหว่าง มอลโตเด็คซ์ตริน เด็กซ์โตรสอิกวิวาเลนซ์ 20 (maltodextrin dextrose equivalent 20, MD20) กับ อินนูลิน (inulin, IN) (MD20:IN) หรือเพคติน (pectin, PEC) (MD20:PEC) อัตราส่วนสารสกัดต่อสารห่อหุ้มเท่ากับ 1:3 ทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ (double drum drying technique, DD) พบว่าสารเอนแคปซูเลซ MD20:IN มีประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชัน ปริมาณแอนโทไซยานิน และความสามารถในการละลาย (95.36 ± 2.55 g/100 g) มากกว่าสารเอนแคปซูเลซ MD20:PEC และการทำให้เปียกใช้ระยะเวลาสั้นกว่า ลักษณะของอนุภาควิเคราะห์ด้วย X-ray diffractometer ได้กราฟเป็นระฆังคว่ำ ฐานกว้าง จุดพีคของกราฟมีค่า 2θ เท่ากับ $18.47-19.96^\circ$ ซึ่งเป็นอนุภาคแบบอสัณฐาน (amorphous) เมื่อส่องกล้อง Scanning electron microscope กำลังขยาย 200 เท่า พบว่ารูปร่างของอนุภาคไม่สมมาตร (irregular shape) ขนาดไม่สม่ำเสมอและมีพื้นผิวเรียบ การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (FT-IR) เพื่อศึกษาชนิดของหมู่ฟังก์ชันในสารประกอบ ซึ่งใช้วิเคราะห์การเกาะจับตัวกันระหว่างสารออกฤทธิ์สำคัญ (core) และสารห่อหุ้ม (carrier agents) พบว่าสารสกัดแอนโทไซยานินจากข้าวหอมนิล (non-encapsulated powder) มีการเกาะกันระหว่างหมู่ของสารสกัดกับสารห่อหุ้ม สารเอนแคปซูเลซทั้ง 2 ชนิด มีความคงตัวต่อความร้อนที่อุณหภูมิ 80 90 และ 100 องศาเซลเซียส ไม่แตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่าการเอนแคปซูเลชันช่วยห่อหุ้มสารสำคัญได้

คำสำคัญ: ข้าวหอมนิล (*Oryza sativa* L.) สารสกัดแอนโทไซยานิน เอนแคปซูเลชัน การทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ สมบัติทางกายภาพและทางเคมี

* ผู้ประสานงาน (Corresponding Author)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กรณรัตน์ สกุลนามรัตน์

E-mail: karunrat.sa@rmuti.ac.th



Abstract

Encapsulation of anthocyanin extract from broken homnil (HN) colored rice by maltodextrin dextrose equivalent 20 (MD20) with inulin (IN called “MD20:IN”) or with pectin (PEC called “MD20:PEC”) with the ratio of 1:3 the double drum drying techniques was used for investigation. Encapsules MD20:IN showed higher encapsulation efficiency, anthocyanin content, solubility (95.36 ± 2.55 g/100 g) and provide the shorter time for wettability than MD20:PEC. Morphology of particle measured by X-ray diffractometer (XRD) had the broad peak with 2θ of $18.4 - 19.96^\circ$, representing an amorphous and irregular shape as confirmed by 200x scanning electron microscope (SEM). Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR spectra) showed the conjugated between core (bioactive compounds) and carrier agents. Both capsules had comparable thermal stability as determined at 80°C , 90°C and 100°C . The results confirmed that encapsulation could protect biofunctional compounds in the extract.

Keywords: Homnil rice (*Oryza sativa* L.), anthocyanin extracts, encapsulation, double drum drying, physical and chemical properties



บทนำ

ข้าว (*Oryza sativa* L.) เป็นอาหารหลักของคนไทยมานานนับแต่โบราณจนถึงปัจจุบัน บริโภคภายในประเทศและเป็นสินค้าหลักในการส่งออกสู่ตลาดโลก (Elert, 2014) ข้าวมีองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน โยอาหาร วิตามิน (Ito and Lacerda, 2019; Mickus and Luh, 1991) และแร่ธาตุ (Jaksomsak, Rerkasem, and Prom-U-Thai, 2021) ข้าวสี เช่น ข้าวหอมมะลิแดง ข้าวหอมนิล และข้าวไรซ์เบอร์รี่ เป็นข้าวที่มีรงควัตถุสีแดง ม่วง ดำ ที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพหลายอย่าง ฤทธิ์ด้านการแข็งตัวของเลือด (Tan et al., 2020; Reena et al., 2010) ต้านเนื้องอก (Choi et al., 2013) ต้านเบาหวาน (Wahyuni, Munawaroh, Da'i, 2016) ฤทธิ์ลดอาการคัน (Han, Hong, and Kim, 2007) ต้านอักเสบ (Wongwichai et al., 2019; Min, Ryu, and Kim, 2010; Wang et al., 2007) และต้านมะเร็ง (Thepthanee et al., 2021) สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่สำคัญ เช่น ไซยานิดินส์-3 กลูโคไซด์ และเพโกนินดินส์-3 กลูโคไซด์ มีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (Norkaew et al., 2019; Samyor, Das, and Deka, 2017; Chen et al., 2012; Oidtmann et al., 2012) ในระหว่างกระบวนการสีข้าวซึ่งทำให้เมล็ดข้าวแตกหักคิดเป็นร้อยละ 8 เป็นเศษข้าวขนาดเล็ก ทำให้สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพเหล่านี้เกิดการสูญเสียไปกับเศษข้าว ทำให้เกิดต้นทุนค่าเสียโอกาสในการจำหน่ายข้าวจากเดิมร้อยละ 100 ข้าวหักไม่เป็นที่นิยมรับประทานและมีราคาถูก นิยมนำไปใช้เลี้ยงสัตว์ การนำผลผลิตพลอยได้จากกระบวนการสีข้าวมาให้เป็นประโยชน์ ข้าวเจ้าหอมนิลเป็นข้าวที่ได้รับการคัดเลือกและพัฒนาจนได้ข้าวที่มีเมล็ดข้าวกล้องเรียวยาวสีม่วงเข้ม ข้าวกล้องเมื่อหุงสุกจะนุ่ม เหนียว หอม ข้าวสารหุงสุกมีสีม่วงอ่อนนุ่ม และมีกลิ่นหอมเช่นกัน คุณสมบัติที่สำคัญของข้าวเจ้าหอมนิล คือ ข้าวกล้องมีโปรตีนสูงถึง ร้อยละ 12.5 ปริมาณคาร์โบไฮเดรต ร้อยละ 70 ปริมาณอมิโลส ร้อยละ 16 และแร่ธาตุ ได้แก่ เหล็ก สังกะสี ทองแดง แคลเซียม และโพแทสเซียม สูงกว่าข้าวขาวดอกมะลิ (กองพัฒนาผลิตภัณฑ์ข้าว, 2561)

สารแอนโทไซยานิน เป็นรงควัตถุที่พบในพืชและข้าว (Asem et al., 2015) ที่ให้สีแดง น้ำเงิน หรือม่วง โครงสร้างของแอนโทไซยานินประกอบด้วยสารประกอบแอนโทไซยานิดิน น้ำตาล และกรด โดยโครงสร้างพื้นฐานคือฟลาวิลเลียมไอออน (2-phenyl-1-benzopyrylium) ซึ่งเชื่อมอยู่กับกลุ่มไฮดรอกซิล (-OH) และ/หรือเมทอกซิล (-OCH₃) และน้ำตาล 1 ชนิดหรือมากกว่า โมเลกุลที่ไม่มีน้ำตาลเกาะอยู่เรียกว่าแอนโทไซยานิดินหรืออะไกลโคน (aglycone) มีโครงสร้างพื้นฐานประกอบด้วยคาร์บอนเชื่อมต่อในรูป C₆-C₃-C₆ น้ำตาลเกิดพันธะกับคาร์บอนตำแหน่งที่ 3 หรือ 3 และ 5 เช่น กลูโคส กาแล็กโตส รูติโนส และแรมโนส สำหรับโครงสร้างที่เป็นกรด อาจจะมีหรือไม่มีก็ได้ โดยกรดสามารถเกิดเอสเทอร์ฟิเคชันกับน้ำตาล (Khoo et al., 2017)

สารแอนโทไซยานินในข้าวมีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (Yamuangmorn and Prom-U-Thai, 2021; Pitija et al., 2013) และคุณสมบัติส่งเสริมด้านสุขภาพที่หลากหลาย (Mbanjo et al., 2020; Konczak and Zhang, 2004) แอนโทไซยานินละลายตัวได้ง่ายในสภาวะอุณหภูมิสูง แสง และความเป็นกรด-ด่าง ดังนั้นเพื่อช่วยเพิ่มคุณสมบัติด้านความคงตัวให้แอนโทไซยานินในสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ ได้ดีขึ้นจึงมีการนำเทคโนโลยีเอนแคปซูเลชันมาประยุกต์ใช้ (Mar et al., 2020; Labuschagne, 2018) การเอนแคปซูเลชัน (Encapsulation) เป็นกระบวนการห่อหุ้มสารที่มีสถานะเป็นของแข็ง ของเหลว หรือแก๊สด้วยพอลิเมอร์ให้อยู่ในรูปของแคปซูลขนาดเล็ก เรียกว่า ไมโครแคปซูล ซึ่งมีขนาดตั้งแต่ 1 จนถึง 800 ไมโครเมตร เป็นกระบวนการห่อหุ้มสารที่มีประสิทธิภาพในการป้องกันการระเหย การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และการถูกทำลายโดยความร้อน แสง ความชื้น และอากาศ จึงช่วยยืดระยะเวลาในการเก็บรักษา อีกทั้งช่วยเปลี่ยนสถานะสารจากของเหลวเป็นของแข็งจึงช่วยเพิ่มความเสถียรในกระบวนการขนส่งและเก็บรักษา นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ยังมีคุณสมบัติในการควบคุมการปลดปล่อย เพิ่มประสิทธิภาพและความปลอดภัยในการ

นำส่งสารสำคัญไปยังบริเวณเป้าหมาย ช่วยปกป้องสารสำคัญจากการถูกทำลายโดยเอนไซม์ และสภาวะความเป็นกรดในระบบทางเดินอาหาร (Rousta et al., 2021; Wu et al., 2021; Labuschagne, 2018)

เทคนิคการทำแห้งที่นิยมใช้ในกระบวนการเอนแคปซูเลชัน ได้แก่ การทำแห้งแบบพ่นฝอย และแช่เยือกแข็ง โดยคิดเป็นร้อยละ 51 และ 33 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคชนิดอื่น เช่น อิเล็กโตรสปินนิง ไอออนิกเจลเลชัน และการทำแห้งแบบลูกกลิ้ง (Labuschagne, 2018) อย่างไรก็ตามการทำแห้งแบบพ่นฝอยและแช่เยือกแข็งเป็นเทคนิคที่มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง สำหรับการทำให้แห้งแบบลูกกลิ้งคู่เป็นเทคนิคการทำแห้งที่มีค่าใช้จ่ายไม่สูงมากและใช้งานได้สะดวก เหมาะสำหรับกลุ่มวิสาหกิจชุมชน อีกทั้งการทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่สามารถเตรียมสารเอนแคปซูเลชันที่มีคุณสมบัติด้านกายภาพ เคมี และความคงตัวได้ดี (Sakulnarmrat et al., 2021) นอกจากนี้การเลือกใช้สารห่อหุ้มสำหรับกระบวนการเอนแคปซูเลชันเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติของสารเอนแคปซูเลชัน มอลโตเด็คซ์ตริน เด็กโตรสอิกวีวาเลนซ์ 20 (maltodextrin dextrose equivalent 20, MD20; $C_{6n}H_{(10n+2)}O_{(5n+1)}$) เป็นสารกลุ่มโพลีแซ็กคาไรด์ที่มีราคาค่อนข้างถูก มีคุณสมบัติการเป็นแผ่นฟิล์มได้ดี อีกทั้งมีความหนืดต่ำ (Labuschagne, 2018; Tonon et al., 2009) สำหรับอินนูลิน ($C_{6n}H_{10n+2}O_{5n+1}$) และเพคติน ($C_6H_{10}O_7$) เป็นสารกลุ่มเส้นใยอาหาร (dietary fiber) ที่มีคุณสมบัติเป็นพรีไบโอติก ช่วยให้เกิดสมดุลในระบบทางเดินอาหาร (Gonzalez et al., 2020; Sharif et al., 2020) การเลือกใช้สารห่อหุ้มแบบผสมสำหรับการเอนแคปซูเลชัน ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเอนแคปซูเลชันและความคงตัวให้กับสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพได้ (Sakulnarmrat et al., 2021; Mahdavi et al., 2016)

ดังนั้นจึงทำให้เทคโนโลยีด้านเอนแคปซูเลชันเป็นเทคโนโลยีที่มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องและถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมอาหาร เพื่อช่วยรักษาสภาพของอาหาร ทำให้มีรสชาติได้ยาวนาน รักษาวิตามินและสารออกฤทธิ์สำคัญที่มีความไวต่อออกซิเจนและแสงสว่างมิให้สูญเสียไปในระหว่างกระบวนการแปรรูปอาหาร (Sakulnarmrat and Konczak, 2022; Sakulnarmrat, Sittiwong, and Konczak, 2022; Marcillo-Parra et al., 2021; Sakulnarmrat et al., 2021) เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการสีข้าว ด้วยการนำมาสกัดสารออกฤทธิ์สำคัญ และผลิตเป็นสารสีธรรมชาติเพื่อนำไปพัฒนาต่อยอดในผลิตภัณฑ์อาหาร จะช่วยให้อาหารมีส่วนประกอบที่มีคุณค่าทางโภชนาการเพิ่มมากขึ้น และปลอดภัยจากการใช้สีผสมอาหารสังเคราะห์ที่มีโทษหนักของแคดเมียม โคเบียม ปรอท สารหนู และตะกั่ว ซึ่งเป็นอันตรายต่อร่างกาย ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการศึกษาการเตรียมสารเอนแคปซูเลชันแอนโทไซยานินจากเศษข้าวหอมมะลิด้วยการใช้ชนิดของสารห่อหุ้มผสมระหว่างมอลโตเด็คซ์ตรินกับอินนูลิน หรือเพคติน และศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของสารเอนแคปซูเลชัน เป็นงานวิจัยที่มีการศึกษาวิจัยเป็นครั้งแรกในการนำเศษข้าวหักมาทำให้เกิดประโยชน์ เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการพัฒนางานต่อไปในอนาคต

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาชนิดของสารห่อหุ้มที่เหมาะสมในการเอนแคปซูเลชันสารสกัดแอนโทไซยานินจากเศษข้าวหอมมะลิด้วยเทคนิคการทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่
2. เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ กายภาพ และเคมีของสารเอนแคปซูเลชัน

วิธีการวิจัย

1. สารเคมี

มอลโตเด็คซ์ตริน เด็กโตรส อิกวีวาเลนซ์ 20 (MD20) ซื้อจากบริษัท Cargill Inc. (Brazil) อินนูลิน และ



เพคตินซื้อจากบริษัท KC Co., Ltd. (Bangkok, Thailand) และสารเคมีทุกชนิดที่ใช้ในการศึกษาทั้งหมดเป็นเกรดสำหรับการวิเคราะห์ โดยจัดซื้อจากบริษัท Sigma Aldrich (St. Louis, MO, USA)

2. การเตรียมตัวอย่าง

นำเศษข้าวหอมนิลมาบดเพื่อลดขนาดให้ได้ขนาดละเอียด จากนั้นนำไปเข้าเครื่องคัดขนาด (Sieve shaker) เบอร์ 80 เมช จะได้ข้าวหอมนิลบดละเอียด (HN)

3. การสกัดแอนโทไซยานิน

นำตัวอย่างข้าวหอมนิลบดละเอียดจากข้อ 2 มาสกัดสารแอนโทไซยานินตามวิธีการของ Jung et al. (2020) โดยชั่งตัวอย่างมา 250 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 5,000 มิลลิลิตร ทำการสกัดด้วยตัวทำละลายอะซิโตน (ethanol (95%)/1% HCl acid /distilled water อัตราส่วน 60:1:39 v/v/v) ปริมาตร 2,500 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ (25,000 rpm, 10 min; IKA Ultra Turrax, GmbH & Co. KG, Breisgau, Germany) จากนั้นทำการสกัดด้วยเทคนิคอัลตราซาวด์ (ultrasound-assisted extraction) ด้วยเครื่องโซนิเคเตอร์ (Sonica 5300 EP, Soltex, Milano, Italy) ช่วยสกัดที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส นาน 90 นาที นำสารสกัดที่ได้ไปปั่นเหวี่ยงแยกกากที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 3,500 รอบต่อนาที นาน 15 นาที จากนั้นทำการแยกของเหลวใสออกจากกาก กากที่ได้จากการแยกนำไปทำการสกัดซ้ำอีก 2 ครั้ง นำของเหลวใสที่สกัดได้ทั้งหมดไประเหยตัวทำละลายออกด้วยเครื่องระเหยสุญญากาศแบบหมุน (CCA-1112A cooling bath; OSB-2200 water bath; N-1300; A1000S aspirator, Shanghai Eyela, Tokyo Rikankikai Co., Ltd., Shanghai, China) จะได้สารสกัดแอนโทไซยานินเข้มข้น เพื่อนำไปผ่านกระบวนการเอนแคปซูเลชันต่อไป

4. การเตรียมสารห่อหุ้มแบบผสม

ทำการเตรียมสารห่อหุ้มโดยนำสารห่อหุ้มมอลโตเด็คซ์ตริน ดีอี 20 (MD20) ผสมกับสารห่อหุ้มอินนูลิน (Inulin, IN) หรือเพคติน (Pectin, PEC) ในอัตราส่วน 74:6 กรัม จะได้ MD20:IN และ MD20:PEC จากนั้นนำไปผสมน้ำกลั่นปริมาณ 200 มิลลิลิตร ผสมด้วยเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ ความดัน 12,500 rpm เมื่อละลายเป็นเนื้อเดียวกันแล้วให้นำสารห่อหุ้มมาผสมกับสารสกัดแอนโทไซยานินในอัตราส่วน 3:1 จากนั้นนำสารละลายที่ได้มาทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ (ทัสสุ เทค, กรุงเทพฯ) อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส นำตัวอย่างที่ได้บดด้วยโกร่ง บรรจุในถุงอลูมิเนียมฟอยล์แบบซิปล็อค และเก็บไว้ในโถดูดความชื้น (Desiccator DN300, Duran, Germany)

5. การวิเคราะห์คุณสมบัติของสารเอนแคปซูล

5.1 ปริมาณน้ำอิสระและความชื้น (water activity and moisture content)

นำสารเอนแคปซูลมาวิเคราะห์ปริมาณน้ำอิสระและความชื้น ด้วยเครื่องวัดปริมาณน้ำอิสระ (CX-2, Aqua Lab, Apeldoorn, Netherlands) และเครื่องวัดความชื้นแบบอินฟราเรด (MB25, OHAUS Corporation, New Jersey, USA) ตามลำดับ

5.2 ความหนาแน่นรวม (bulk density)

นำตัวอย่างจากข้อ 5.1 มาเทใส่กระบอกตวง จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนัก บันทึกค่าน้ำหนักที่ได้ และนำไปคำนวณหาค่าความหนาแน่นรวม โดยรายงานค่าในรูปของ g/cm^3

5.3 ความเป็นกรด-ด่าง และปริมาณกรด

นำสารเอนแคปซูลปริมาณ 1 กรัม ละลายน้ำ 50 มิลลิลิตร มาวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter, Mettler Toledo, New Jersey, USA) และวิเคราะห์ปริมาณกรดทั้งหมด (titratable acidity) (AOAC, 2000)

5.4 ปริมาณของแข็ง

นำสารเอนแคปซูลปริมาณ 1 กรัม ละลายน้ำ 50 มิลลิลิตร มาวัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้ด้วยเครื่องดิจิตอลรีแฟรกโตมิเตอร์ (Refractometer PAL-1, Japan)

5.5 ความสามารถในการละลาย

วิเคราะห์ความสามารถในการละลายของสารเอนแคปซูลตามวิธีการของ Sakulnamrat et al. (2021) โดยนำสารเอนแคปซูลมาชั่งน้ำหนัก 1 กรัม ที่แน่นอน ละลายในน้ำที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ปริมาตร 50 มิลลิลิตร คนให้สารเอนแคปซูลละลายด้วยแท่งแก้ว หลังจากนั้นเทลงบนกระดาษกรองที่ชั่งน้ำหนักแล้ว ทั้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 1 คืน จากนั้นชั่งน้ำหนักและคำนวณอัตราการละลายด้วยสมการ

$$\text{ร้อยละการละลาย} = (\text{น้ำหนักกระดาษกรองหลังน้ำผ่านที่ทิ้งไว้ 1 คืน} - \text{น้ำหนักกระดาษกรองเริ่มต้น}) \times 100$$

5.6 อัตราการดูดซับน้ำ

วิเคราะห์อัตราการดูดซึมน้ำกลับ (Hygroscopicity) ของสารเอนแคปซูลตามวิธีการของ Sakulnamrat et al. (2021) โดยชั่งตัวอย่าง 1 กรัม แล้วนำมาห่อด้วยอลูมิเนียมฟอยล์ นำไปใส่ในโถดูดความชื้น (Desiccator DN300, Duran, Germany) ที่มีสารละลายโซเดียมคลอไรด์อิ่มตัวที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส วางอยู่หลังจาก 1 สัปดาห์ นำตัวอย่างออกมาชั่งน้ำหนัก และคำนวณปริมาณร้อยละของน้ำที่ดูดซับไว้

5.7 ประสิทธิภาพการเอนแคปซูเลชัน

คำนวณประสิทธิภาพเอนแคปซูเลชัน (%Encapsulation efficiency, %EE) ตามวิธีการของ Idham et al. (2010) โดยคำนวณหาปริมาณแอนโทไซยานินรวม (Total anthocyanin content, TAC) และปริมาณแอนโทไซยานินที่ผิว (Surface anthocyanin content, SAC) ของสารสี ด้วยวิธี pH differential method (AOAC, 2005) จากนั้นคำนวณหาประสิทธิภาพเอนแคปซูเลชันด้วยสมการ: % EE = (TAC-SAC)/TAC × 100

5.8 ปริมาณแอนโทไซยานิน

นำตัวอย่างมาวิเคราะห์ปริมาณแอนโทไซยานินตามวิธีการ pH differential method (AOAC, 2005) โดยปิเปตสารละลายตัวอย่างมา 1 มิลลิลิตร ใส่บัฟเฟอร์ที่มีค่า pH เท่ากับ 1 และ pH เท่ากับ 4.5 ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ในอัตราส่วน 1:1 จากนั้นเขย่าให้เข้ากัน แล้วนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง Microplate Reader (Multiskan Go, Thermo Fisher Scientific, Finland) ที่ความยาวคลื่น 520 นาโนเมตร ซึ่งเป็นค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของแอนโทไซยานิน และ 700 นาโนเมตร เพื่อหักลบค่าความขุ่นที่อาจเกิดขึ้นและได้ผลที่ถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น จากนั้นคำนวณปริมาณแอนโทไซยานินดังสมการ

$$\text{ปริมาณแอนโทไซยานิน (mg/L)} = (A \times MW \times 1000 \times DF) / (\epsilon \times L)$$

เมื่อ A คือ ค่าดูดกลืนแสง $[A = (A_{520} - A_{700})_{pH1.0} - (A_{520} - A_{700})_{pH4.5}]$, MW คือ น้ำหนักโมเลกุลของไซนิน 3-กลูโคไซด์ (cyanidin 3-glucoside: 449.2 g/mol), DF คือ dilution factor, ϵ คือ molar absorptivity มีค่า 26,000 g/mol·cm และ L คือ ระยะทางที่แสงส่องผ่าน และรายงานค่าในหน่วยมิลลิกรัมไซนิน 3-กลูโคไซด์เทียบเท่ากับ กรัม (mg C3G E/g)



5.9 การทำให้เปียก

นำสารเอนแคปซูลปริมาณ 1 กรัม มาโรยลงในบีกเกอร์พื้นที่หน้าตัด 44.16 ตารางเซนติเมตร บรรจุ น้ำกลั่นปริมาตร 100 มิลลิลิตร ทำการจับเวลาที่ระยะเวลา การจมหายจากผิวน้ำ (disperse) การจมตัว (submerge) และการตกตะกอน (sediment) ในหน่วยวินาที ทำการทดลอง 2 ซ้ำ โดยดัดแปลงจากวิธีการของ Edris et al. (2016)

5.10 ค่าสี

นำตัวอย่างสารเอนแคปซูลมาวิเคราะห์ค่าสีโดยใช้เครื่อง WR SERIES Colorimeter (FRU, WR-10, China) โดยใช้พื้นหลังสีขาวในการวิเคราะห์ การวิเคราะห์ค่าสีจะใช้ระบบ CIE L* a* b* โดยค่า L* หมายถึง ค่าความสว่าง ค่า a* หมายถึง ค่าของสีแดง (+) และสีเขียว (-) และค่า b* หมายถึง ค่าของสีเหลือง (+) และสีน้ำเงิน (-) แล้วนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาค่า Chroma (C^*) = $[(a^*)^2 + (b^*)^2]^{1/2}$; Hue angle (H°) = $\tan^{-1} (b^*/a^*)$

5.11 ความคงตัว

นำตัวอย่างที่ได้มาศึกษาความคงตัว (Thermal stability) ตามวิธีการของ Sakulnarmrat et al. (2021) โดยทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 80 90 และ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 180 นาที ทำการทดลองโดยนำสารเอนแคปซูลที่ผลิตได้ ปริมาตร 2 กรัม ละลายน้ำที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปิดเตาแล้วปล่อยให้เย็นลงจนอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 180 นาที สุ่มหยิบหลอดทดลองทุก 30 นาที แล้วจุ่มในอ่างน้ำเย็นทันที จากนั้นนำไปวิเคราะห์ปริมาณแอนโทไซยานินโดยวิธี pH-differential method (AOAC, 2005) จากนั้นนำค่าปริมาณแอนโทไซยานินที่ได้ ณ เวลาต่าง ๆ มาพล็อตกราฟ

6. การวิเคราะห์ลักษณะของอนุภาคเอนแคปซูล

6.1 การหาค่าดูดกลืนแสงสูงสุด (Maximum absorbance)

ชั่งสารเอนแคปซูลปริมาณ 0.100 กรัม มาละลายน้ำกลั่นปริมาตร 2 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปวัดค่าความยาวคลื่นสูงสุดในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 450–800 นาโนเมตร

6.2 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

นำสารเอนแคปซูลวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค X-ray diffraction ซึ่งเป็นการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD-6100, Shimadzu Corporation, Tokyo, Japan) ที่สภาวะ 35 kV และ 20 mA ทำการวิเคราะห์ช่วงมุม (angular range) ระหว่าง $2^\circ - 50^\circ (2\theta)$ ด้วยอัตราการสแกน $2^\circ/\text{นาที}$ ตามที่รายงานโดย Sakulnarmrat et al. (2021)

6.3 การวิเคราะห์รูปร่างสารเอนแคปซูล

นำสารเอนแคปซูลมาวิเคราะห์รูปร่างของอนุภาคด้วยเครื่อง scanning electron microscopy (SEM, SU3900, Hitachi High-Technologies Europe GmbH, Germany)

6.4 Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR)

นำสารเอนแคปซูลวิเคราะห์เพื่อระบุหมู่ฟังก์ชันและการเกาะตัวของพันธะเคมีขององค์ประกอบด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) (Spotlight 200i, Perkin-Elmer Inc., California, USA) ตามวิธีการของ Sakulnarmrat et al. (2021)

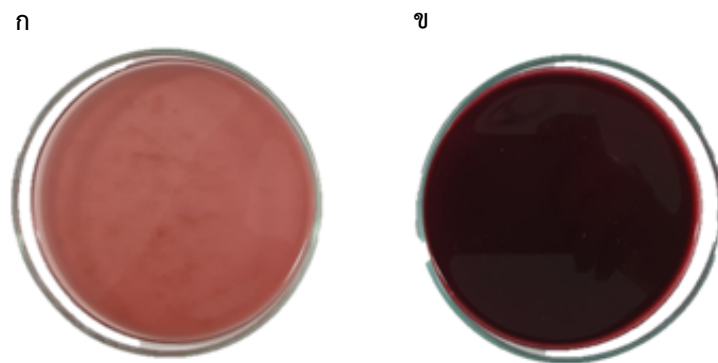
7. การวิเคราะห์ทางสถิติ

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองรายงานในรูปของค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mean±s.d.) จากผลการ

ทดลองจำนวน 3 ซ้ำ วิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (Analysis of Variance, ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) (Sakulnarmrat et al., 2022) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$)

ผลการวิจัย

การสกัดสารแอนโทไซยานินสกัดจากเศษข้าวหอมนิลได้สารสกัดหยาบและสารสกัดเข้มข้นดังภาพที่ 1ก และ 1ข ตามลำดับ เมื่อนำไปผ่านกระบวนการเอนแคปซูเลชันด้วยการทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่และใช้สารห่อหุ้มแบบผสมระหว่างมอลโตเดกซ์ตริน เดกซ์โตรสอิกวาลีนซ์ 20 (MD20) กับอินนูลิน (inulin, IN) หรือเพคติน (pectin, PEC) ได้สารเอนแคปซูลดังแสดงในภาพที่ 2

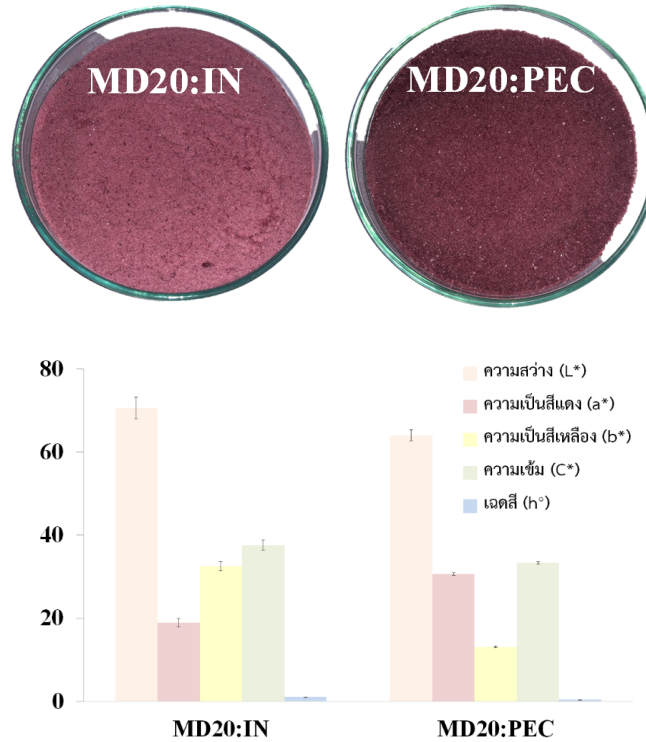


ภาพที่ 1 สารสกัดหยาบ (ก) และสารสกัดเข้มข้น (ข) แอนโทไซยานินจากเศษข้าวหอมนิล

ค่าสีของสารเอนแคปซูล MD20:IN มีค่าความสว่าง (L^*) และค่าความเป็นสีแดง (a^*) สูงกว่า MD20:PEC โดยมีค่าความสว่าง (L^*) เท่ากับ 70.61 ± 2.60 , 63.98 ± 1.36 และค่าความเป็นสีแดง (a^*) เท่ากับ 18.89 ± 0.99 , 30.66 ± 0.38 ตามลำดับ ($p < 0.05$) ในขณะที่ค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) ความเข้ม (C^*) ของสารเอนแคปซูล MD20:IN มีค่าสูงกว่า MD20:PEC และเอนดี (H^0) มีค่าใกล้เคียงกัน ($p \geq 0.05$) จากภาพที่ 2 จะเห็นได้ว่าสารเอนแคปซูล MD20:IN มีสีแดงอมชมพู ในขณะที่สารเอนแคปซูล MD20:PEC มีสีแดงเข้มมากกว่า

สารเอนแคปซูล MD20:IN มีปริมาณน้ำอิสระและความชื้นต่ำกว่าสารเอนแคปซูล MD20:PEC ($p < 0.05$) (ตารางที่ 1) เมื่อพิจารณาความสามารถในการละลายพบว่าสารเอนแคปซูล MD20:IN มีค่ามากกว่าสารเอนแคปซูล MD20:PEC และสอดคล้องกับปริมาณน้ำอิสระและความชื้นของสารเอนแคปซูลที่มีค่าต่ำ ซึ่งทำให้สารเอนแคปซูลที่แห้งกว่าสามารถละลายน้ำได้ดีกว่า สำหรับคุณสมบัติด้านความหนาแน่น ปริมาณของแข็ง ความเป็นกรด-ด่าง และอัตราการดูดซับน้ำของสารเอนแคปซูล MD20:IN และ MD20:PEC ไม่มีความแตกต่างกัน ($p \geq 0.05$) (ตารางที่ 1) ประสิทธิภาพการเอนแคปซูเลชันของสารเอนแคปซูล MD20:IN มีค่าสูงกว่าและแตกต่างจาก MD20:PEC อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 95.74 ± 6.02 และ 71.13 ± 3.41 ตามลำดับ และประสิทธิภาพการเอนแคปซูเลชันมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับปริมาณแอนโทไซยานินที่พบในสารเอนแคปซูล MD20:IN (5.34 ± 0.18 mg

C3G E/100 g DW) และ MD20:PEC (4.11±0.25 mg C3G E/100 g DW) แสดงให้เห็นถึงสารเอนแคปซูลที่มีประสิทธิภาพการเอนแคปซูลชั้นสูงก็จะมีปริมาณแอนโทไซยานินสูงด้วย



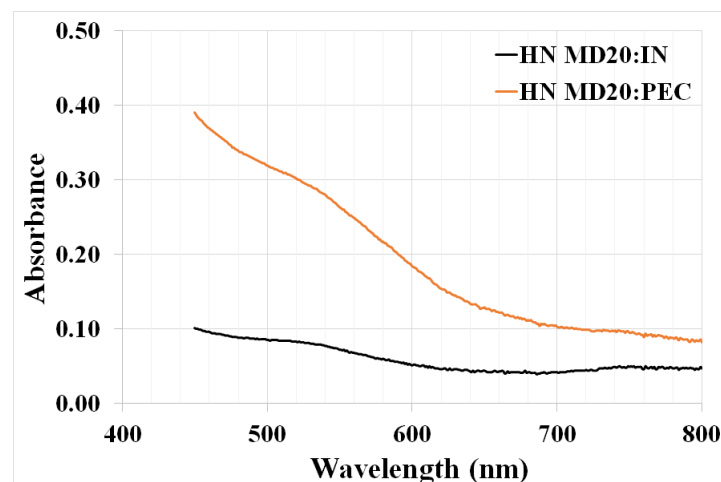
ภาพที่ 2 ค่าสีของสารเอนแคปซูลแอนโทไซยานินข้าวหอมชนิดเตรียมด้วยสารหล่อหุ้มผสมระหว่างมอลโตเด็กซ์ตริน ดีอี 20 กับอินนูลิน (MD20:IN) และ มอลโตเด็กซ์ตริน ดีอี 20 กับเพคติน (MD20:PEC) ทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่

การทำให้เปียก (wettability) เป็นคุณสมบัติทางกายภาพอีกด้านหนึ่งของสารเอนแคปซูลที่ใช้พิจารณา ร่วมกับความสามารถในการละลาย การทำให้เปียกเป็นความสามารถดูดซึมน้ำให้เปียกทั่วผิว (Di Battista et al., 2015) โดยทั่วไปอนุภาคเอนแคปซูลใช้ระยะเวลาในการทำให้เปียกได้เร็ว ซึ่งเป็นคุณลักษณะที่ต้องการของสารเอนแคปซูลที่จะนำไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์อาหารสำเร็จรูป (Ghosal et al., 2010; Tonon et al., 2010) ผลการศึกษาพบว่าสารเอนแคปซูล MD20:IN มีความสามารถในการทำให้เปียกทั้ง 3 ขั้นตอน น้อยกว่า MD20:PEC ($p < 0.05$) โดย การทำให้เปียกทั้ง 3 ระยะ ได้แก่ การหายจากผิวหน้า การจมน้ำ และการตกตะกอน ใช้เวลาดำเนินการ MD20:PEC แสดงให้เห็นถึงความสามารถของสารเอนแคปซูล MD20:IN ที่ใช้ระยะเวลาน้อยกว่าในการละลาย การวัดค่าความยาวคลื่นสูงสุด (maximum absorbance) ของสารเอนแคปซูลเป็นการช่วยยืนยันว่าสารหล่อหุ้มทั้ง MD20:IN และ MD20:PEC สามารถห่อหุ้มสารแอนโทไซยานินได้ โดยในภาพที่ 3 สังเกตเห็นความยาวคลื่นสูงสุดที่ประมาณ 524 นาโนเมตร

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ ภายนอก และเคมี ของสารเอนแคปซูลแอนโทไซยานินข้าวหอมนิล

คุณสมบัติ	HNDD	
	MD20:IN	MD20:PEC
ปริมาณน้ำอิสระ	0.44 ^b ± 0.01	0.50 ^a ± 0.01
ความชื้น (g/100 g)	3.77 ^a ± 0.04	3.14 ^b ± 0.01
ความหนาแน่น (g/cm ³) ^{ns}	0.80 ± 0.05	0.74 ± 0.03
ความเป็นกรด-ด่าง ^{ns}	3.90 ± 0.03	3.90 ± 0.05
ปริมาณกรด (g/100 g)	0.02 ^b ± 0.00	0.05 ^a ± 0.00
ปริมาณของแข็ง (°B) ^{ns}	2.17 ± 0.06	2.23 ± 0.06
ความสามารถในการละลาย (g/100 g)	95.36 ^a ± 2.55	92.60 ^b ± 0.40
อัตราการดูดซับน้ำ (g water/100 g) ^{ns}	11.82 ± 0.05	11.54 ± 0.07
ประสิทธิภาพการเอนแคปซูล (%)	95.74 ^a ± 6.02	71.13 ^b ± 3.41
แอนโทไซยานิน (mg C3G E/100 g DW)	5.34 ^a ± 0.18	4.11 ^b ± 0.25
การทำให้เปียก (sec)		
- การหายจากผิวหน้า (disappear)	209.00 ^b ± 1.41	227.50 ^a ± 3.54
- การจมน้ำ (submerge)	201.50 ^b ± 2.12	221.00 ^a ± 1.41
- การตกตะกอน (sediment)	180.50 ^b ± 0.71	194.00 ^a ± 1.41

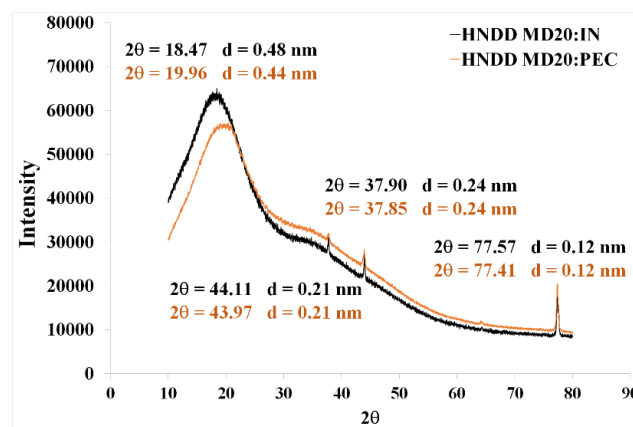
หมายเหตุ: HN: ข้าวหอมนิล (Hornnil), DD: การทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ (double drum dryer), MD20: มอลต์ดีกรีซตริง เด็กโตรอสคิวิวาเลนซ์ 20, IN: อินนูลิน (inulin), PEC: เพคติน (pectin); อักษร a, b ที่แตกต่างกันในแนวนอน แสดงถึง มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$) ns แสดงถึง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$)



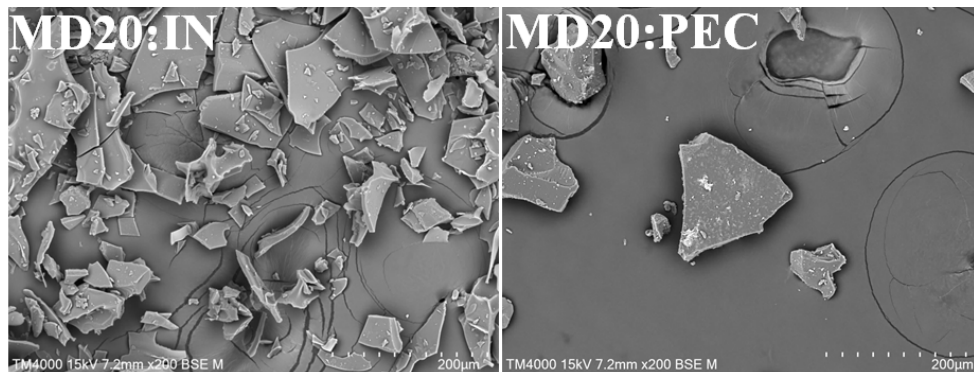
ภาพที่ 3 ค่าความยาวคลื่นสูงสุดของสารเอนแคปซูลแอนโทไซยานินข้าวหอมนิล

การศึกษาลักษณะพื้นฐานของสารเอนแคปซูลด้วยเทคนิค X-ray diffractometer (XRD) เป็นการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารเอนแคปซูลในเชิงคุณภาพ และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) ด้วยกำลังขยาย 200 เท่า แสดงดังภาพที่ 4 โดยภาพที่ 4ก แสดงเส้นกราฟลักษณะพื้นฐานของสารเอนแคปซูลมีลักษณะเป็นระฆังคว่ำ ฐานกว้าง จุดพีคของกราฟมีค่า 2θ เท่ากับ $18.47-19.96^\circ$ ซึ่งเป็นลักษณะของอสัณฐาน (amorphous) คือ มีการเรียงตัวไม่เป็นระบบในโครงสร้างของสาร ทำให้มีรูปร่างไม่แน่นอน ร่วมกับมีพีคแหลมเล็กอีก 3 ตำแหน่ง โดยมีค่า 2θ เท่ากับ $37.90-37.85^\circ$, $44.11-43.97^\circ$ และ $77.57-77.41^\circ$ ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับ Kumar et al. (2014) ที่รายงานค่า 2θ เท่ากับ 19.18° เป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่มีโครงสร้างอสัณฐาน

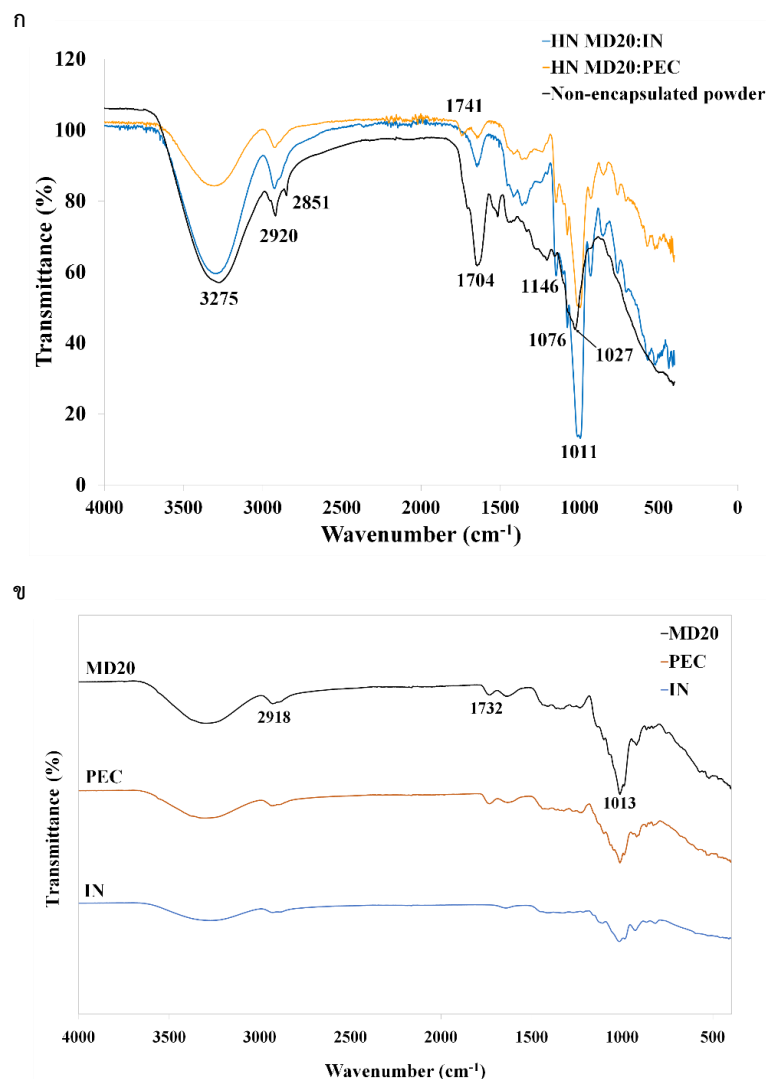
ก



ข



ภาพที่ 4 ลักษณะพื้นฐานของสารเอนแคปซูลแอนโทไซยานินข้าวหอมนิลด้วยเทคนิค X-ray diffractometer (ก) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กำลังขยาย 200 เท่า (ข)

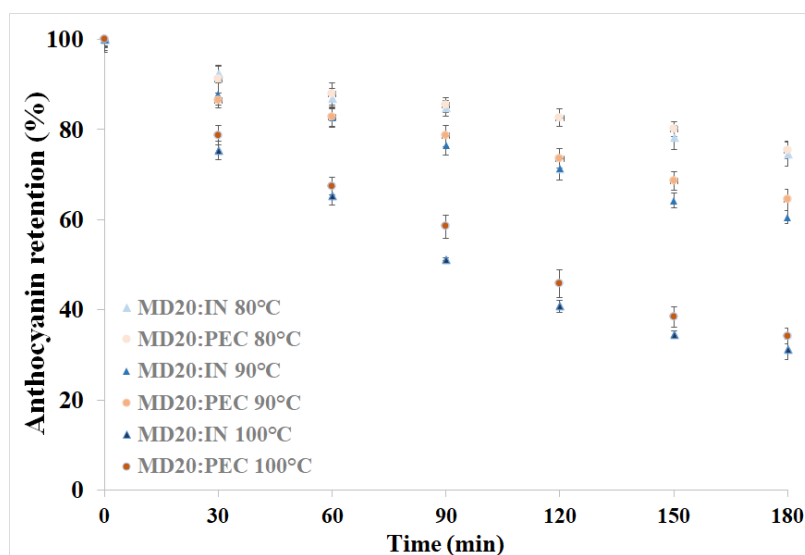


ภาพที่ 5 ฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปีของสารเอนแคปซูลแอนโทไซยานินข้าวหอมนิล เปรียบเทียบกับสารสกัดผงแอนโทไซยานินข้าวหอมนิล (non-encapsulated powder) (ก) และสารห่อหุ้ม (ข)

ลักษณะพื้นฐานของสารเอนแคปซูลที่ได้จากเทคนิค XRD สอดคล้องกับภาพที่ 4ข ที่เป็นการวิเคราะห์ลักษณะอนุภาคของสารเอนแคปซูลด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) กำลังขยาย 200 เท่า สารเอนแคปซูล MD20:IN และ MD20:PEC มีลักษณะอนุภาคไม่สมมาตร (irregular shape) ขนาดไม่สม่ำเสมอ และมีพื้นผิวเรียบ (ภาพที่ 4) สำหรับเทคนิคฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี หรือที่เรียกว่า FT-IR เป็นเทคนิคการวิเคราะห์เชิงคุณภาพเพื่อศึกษาชนิดของหมู่ฟังก์ชันในสารประกอบ ซึ่งใช้วิเคราะห์การเกาะจับตัวกันระหว่างสารออกฤทธิ์สำคัญ (core) และสารห่อหุ้ม (carrier agents) จากภาพที่ 5 พบว่าสารสกัดแอนโทไซยานินข้าวหอมนิล (non-encapsulated powder) มีหมู่ฟังก์ชันใกล้เคียงกับข้าวสาลีโดยพบพีคที่ตำแหน่ง 3275 cm⁻¹ (O-H stretch), 2920 cm⁻¹ (=C-H stretch), 1011 cm⁻¹ (C-O stretch) และ 1704 cm⁻¹ (C=O stretch)

from fructose) (Bulatao et al., 2017) ที่เลขคลื่น 1011 cm^{-1} เป็นเลขคลื่นของอนุภาคออสซิลอน ช่วงเลขคลื่น 2920 cm^{-1} เป็นเลขคลื่นสเปกตรัมที่แสดงถึงการสั่น (stretching vibration) ของหมู่ฟังก์ชันของสารในส่วนของพันธะ C-H เลขคลื่น 3275 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นของกลุ่มไฮดรอกซิล (OH) สำหรับสารสกัดแอนโทไซยานินผง (non-encapsulated powder) มีช่วงเลขคลื่นที่ 1027 cm^{-1} ซึ่งเป็นเลขคลื่นสเปกตรัมการสลายตัวของวงแหวนอะโรมาติก C-H สอดคล้องกับการศึกษาของ Pereira et al. (2015) และ Vichit et al. (2012) สำหรับสารห่อหุ้มทั้ง 3 ชนิด พบตำแหน่งของพีคที่เลขคลื่น $3275, 2918, 1731$ และ 1013 cm^{-1} และเมื่อนำสารห่อหุ้มผสมกับสารแอนโทไซยานินพบว่าสารแคปซูลที่ได้ไม่ปรากฏตำแหน่งของพีค 2851 cm^{-1} ที่จากเดิมแสดงให้เห็นในสารสกัดแอนโทไซยานินผงที่ไม่ผ่านการเอนแคปซูลชัน นอกจากนี้ตำแหน่งเลขคลื่น $1741, 1146, 1076$ และ 1011 cm^{-1} ที่พบในสารเอนแคปซูล แสดงให้เห็นถึงการสลายตัวของวงแหวนอะโรมาติก C-H ของสารแอนโทไซยานินและเกิดพันธะ C-H stretch และ C-O stretch ระหว่างแอนโทไซยานินกับสารห่อหุ้ม

การศึกษาคงตัวของสารเอนแคปซูลที่อุณหภูมิ 80 90 และ 100 องศาเซลเซียส พบว่าสารเอนแคปซูลเตรียมด้วย MD20:IN มีความคงตัวต่ออุณหภูมิใกล้เคียงกับสารเอนแคปซูล MD20:PEC โดยสารเอนแคปซูล MD20:IN มีความคงตัวน้อยกว่าสารเอนแคปซูล MD20:PEC เล็กน้อยตลอดระยะเวลา 180 นาที เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นพบว่าสารเอนแคปซูลมีอัตราการสลายตัวเพิ่มขึ้น ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส สารเอนแคปซูล MD20:IN มีปริมาณแอนโทไซยานินคงเหลือเท่ากับร้อยละ 74.56 และสารเอนแคปซูล MD20:PEC เท่ากับร้อยละ 75.42 ที่เวลา 180 นาที ในขณะที่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มเป็น 100 องศาเซลเซียส สารเอนแคปซูล MD20:IN และ MD20:PEC มีปริมาณแอนโทไซยานินคงเหลือเท่ากับร้อยละ 31.27 และ 34.22 ตามลำดับ (ภาพที่ 6)



ภาพที่ 6 ความคงตัวของสารเอนแคปซูลที่อุณหภูมิ 80 90 และ 100 องศาเซลเซียส

การอภิปรายผล

สารเอนแคปซูลที่เตรียมด้วยสารห่อหุ้มผสม MD20:IN และ MD20:PEC ให้สีแตกต่างกัน โดยสารเอนแคปซูล MD20:PEC มีสีแดงเข้มกว่าสารเอนแคปซูล MD20:IN อาจเนื่องมาจากคุณสมบัติด้านสีของสารห่อหุ้มที่ใช้ เพคตินมีสีเหลืองอ่อนในขณะที่อินูลินมีสีขาว เมื่อนำมาผสมกับสารสกัดแอนโทไซยานินเข้มข้นก่อนนำไปทำแห้งจึงทำให้ได้สารเอนแคปซูลที่ได้จากเพคตินมีเฉดสีที่เข้มกว่า

สารเอนแคปซูล MD20:IN มีปริมาณน้ำอิสระและความชื้นต่ำกว่าสารเอนแคปซูล MD20:PEC ($p < 0.05$) (ตารางที่ 1) เมื่อพิจารณาความสามารถในการละลาย พบว่า สารเอนแคปซูล MD20:IN มีค่ามากกว่าสารเอนแคปซูล MD20:PEC และสอดคล้องกับปริมาณน้ำอิสระและความชื้นของสารเอนแคปซูลที่มีค่าต่ำ ซึ่งจะส่งผลให้สารเอนแคปซูลที่แห้งกว่าสามารถละลายน้ำได้ดีกว่า ผลการศึกษาในครั้งนี้สอดคล้องกับการศึกษาของ Sakulnarmrat et al. (2021) สำหรับคุณสมบัติด้านความหนาแน่น ปริมาณของแข็ง ความเป็นกรด-ด่าง และอัตราการดูดซับน้ำของสารเอนแคปซูล MD20:IN และ MD20:PEC ไม่มีความแตกต่างกัน ($p \geq 0.05$)

ความหนาแน่นของสารเอนแคปซูล MD20:IN มีค่าไม่แตกต่างกับสารเอนแคปซูล MD20:PEC แต่อย่างไรก็ตาม ความหนาแน่นของสารเอนแคปซูล MD20:IN ($0.80 \pm 0.05 \text{ g/cm}^3$) สูงกว่าสารเอนแคปซูล MD20:PEC ($0.74 \pm 0.03 \text{ g/cm}^3$) เนื่องจากอินูลินมีอนุภาคที่ละเอียดกว่าเพคตินทำให้เกิดการอัดเรียงตัวของอนุภาคในขณะที่ยังบรรจุอยู่ในกระบอกตวงได้ดีกว่า อีกทั้งเมื่อทำการวิเคราะห์การทำให้เปียก พบว่าสารเอนแคปซูล MD20:PEC จับเรียงตัวกันเป็นแผ่นบนผิวหน้าของน้ำ ในขณะที่ MD20:IN จมหายจากผิวน้ำได้โดยไม่มีอนุภาคจับตัวกันเป็นแผ่น

อัตราการดูดซับน้ำของสารเอนแคปซูล MD20:IN และ MD20:PEC มีค่าระหว่าง 11.54 ± 0.07 - $11.82 \pm 0.05 \text{ g water/100 g}$ ซึ่งถือว่าสารเอนแคปซูลจากการศึกษานี้มีค่าอัตราการดูดซับน้ำต่ำ การที่สารเอนแคปซูลมีอัตราการดูดซับน้ำที่ไม่เหมาะสมจะช่วยป้องกันการละลายและการอ่อนนุ่มของสารห่อหุ้มและส่งผลให้สารที่ถูกห่อหุ้มสัมผัสกับอากาศและเกิดการสลายตัวได้เร็ว เมื่อเปรียบเทียบกับสารเอนแคปซูลจากผลไม้ jussara และสารเอนแคปซูลกะหล่ำปลีสีม่วง (เตรียมด้วยสารห่อหุ้มแบบผสมมอลโตเด็คซ์ทริน/อะราบิกกัม) พบว่ามีอัตราการดูดซับน้ำอยู่ในช่วงเดียวกัน (Sakulanarmrat et al., 2021; Lacerda et al., 2016; Beirão-da-Costa et al., 2013) นอกจากนี้ สารเอนแคปซูลทั้ง 2 ชนิด ยังมีอัตราการดูดซับน้ำต่ำกว่าสารเอนแคปซูลจากผลไม้ açai ด้วยมอลโตเด็คซ์ทริน โดยมีอัตราการดูดซับน้ำเท่ากับร้อยละ 19.7 (Tonon et al., 2009)

สารเอนแคปซูลที่เตรียมด้วยเทคนิคการทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่มีลักษณะอนุภาคไม่สมมาตร คล้ายคลึงกับสารเอนแคปซูลที่เตรียมจากเทคนิคการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งและสุญญากาศ ในขณะที่อนุภาคเอนแคปซูลที่ได้จากการทำแห้งแบบพ่นฝอยจะมีลักษณะกลม ขนาดอนุภาคเล็ก ซึ่งมีอัตราการละลายน้ำและประสิทธิภาพการเอนแคปซูลเล็กลง โดยลักษณะของอนุภาคที่ค่อนข้างกลมจะช่วยให้สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพได้รับการปกป้องจากสภาวะแวดล้อมที่เป็นอันตรายต่าง ๆ ได้ดีกว่าอนุภาคที่ไม่สมมาตร ซึ่งสอดคล้องกับงานของ Rezende et al. (2018) และ Wu et al. (2021)

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี ช่วยสนับสนุนการยึดเกาะระหว่างสารห่อหุ้มและแอนโทไซยานิน โดยเลขคลื่นสเปกตรัมเกิดการเคลื่อนตัวจากเลขคลื่น 1027 cm^{-1} เป็น 1011 cm^{-1} (สารที่ผ่านการเอนแคปซูลเลชัน) และ 1013 cm^{-1} (สารห่อหุ้ม) ซึ่งเป็นเลขคลื่นที่แสดงถึงการสลายตัว (angular deformation) ของพันธะ -CH และ -CH₂ สำหรับสารกลุ่มโพลีแซ็กคาไรด์มีช่วงเลขคลื่นระหว่าง 1200 cm^{-1} และ 1000 cm^{-1} แสดงให้เห็นว่าเกิดการยึดเกาะกันระหว่างสารห่อหุ้มและแอนโทไซยานินขึ้น เลขคลื่นที่ปรากฏให้เห็น ($1076, 1146, 1741 \text{ cm}^{-1}$) และเลขคลื่นที่หายไป (2851 cm^{-1}) ภายหลังการเอนแคปซูลเลชันปรากฏเลขคลื่นที่



ตำแหน่ง 2920 cm^{-1} โดยมีการเคลื่อนตัวจากเลขคลื่นของสารหอมจากตำแหน่งเดิมที่ 2918 cm^{-1} เล็กน้อย โดยคาดว่า เป็นผลมาจากการสลายตัวของพันธะและการเกาะรวมตัวกันระหว่างสารหอมกับสารแอนโทไซยานิน (Vichit et al., 2012; Das et al., 2019) เลขคลื่นระหว่าง 1760 cm^{-1} และ 1690 cm^{-1} เป็นเลขคลื่นของกรดคาร์บอกซิลซึ่งเป็น องค์ประกอบของเพคติน ทำให้เลขคลื่นของแอนโทไซยานินที่ไม่ผ่านการเอนแคปซูเลชันที่ 1704 cm^{-1} เคลื่อนตัวไปที่ ตำแหน่ง 1741 cm^{-1}

เมื่อทำการเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Norkaew et al. (2019) ที่ศึกษาการเตรียมสารเอนแคปซูลแอนโทไซยานินจากข้าวสีทางภาคเหนือ ได้แก่ ข้าวลิ้มผัว ข้าวไร้เบอร์รี่ ข้าวเจ้าหอมนิล ข้าวก่ำดอยสะเก็ด และข้าวก่ำ มช. โดยใช้สารหอมทั้งแบบเดี่ยวและแบบผสมระหว่างมอลโตเทากับ 1,500 ไมโครกรัมต่อกรัม และเพไอนินดีนส์-3-โอ-กลูโคไซด์ เท่ากับ 120 ไมโครกรัมต่อกรัม ชนิดของสารหอมมีผลต่อประสิทธิภาพการเอนแคปซูเลชันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยเวย์โปรตีนมีประสิทธิภาพการเอนแคปซูเลชันต่ำที่สุดเท่ากับร้อยละ 83 ในขณะที่การใช้สารหอมชนิดอื่นทั้งแบบเดี่ยวและแบบผสมมีประสิทธิภาพการเอนแคปซูเลชันร้อยละ 100% ($p \geq 0.05$) สารเอนแคปซูลเตรียมด้วยมอลโตเด็กซ์ตริน มีความคงตัวมากที่สุดโดยมีปริมาณแอนโทไซยานินคงเหลือเท่ากับร้อยละ 90 ตามด้วยมอลโตเด็กซ์ตรินผสมเวย์โปรตีน (1:1 และ 3:7) (> ร้อยละ 70) เด็กซ์ตริน กัมอะราบิก และเวย์โปรตีน ผู้วิจัยรายงานว่า ข้าวลิ้มผัวมีปริมาณไซยานินดีนส์-3-กลูโคไซด์มากที่สุด

สำหรับการศึกษาในครั้งนี้พบว่าสารเอนแคปซูลข้าวหอมนิลเตรียมด้วยสารหอมผสมระหว่างมอลโตเด็กซ์ตรินกับอินูลิน มีประสิทธิภาพการเอนแคปซูเลชันใกล้เคียงกันกับงานของ Norkaew et al. (2019) นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกับงานของ Das et al. (2019) ที่ศึกษาการเตรียมสารเอนแคปซูลสารแอนโทไซยานินจากข้าวดำด้วยการทำแห้งแบบพ่นฝอยและใช้โมดิฟายด์สตาร์ชเป็นสารหอม มีประสิทธิภาพการเอนแคปซูเลชันเท่ากับร้อยละ 94 และการศึกษาของ Milea et al. (2020) ที่เตรียมสารเอนแคปซูลแอนโทไซยานินข้าวดำและนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์บิสกิต ได้ผลการศึกษานับว่าคุณสมบัติเชิงหน้าที่ของสารเอนแคปซูลโดยมีปริมาณแอนโทไซยานินเท่ากับ 2.55 mg/g DW มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระเท่ากับ 65.14 mmol/g DW และฤทธิ์ยับยั้งการทำงานของเอนไซม์แอลฟาไกลูโคซิเดสร้อยละ 49 และแอลฟาอะไมเลสร้อยละ 39 ซึ่งผู้วิจัยได้สรุปว่าการเอนแคปซูเลชันช่วยกักเก็บสารสำคัญไว้ได้และการเสริมสารเอนแคปซูลลงในบิสกิตได้รับความนิยมสูงจากผู้ทดสอบชิมโดยเฉพาะด้านสีและกลิ่น (aroma)

สรุปผลวิจัย

การเอนแคปซูเลชันด้วยการใช้สารหอมแบบผสมระหว่างมอลโตเด็กซ์ตรินและอินูลินร่วมกับการทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่สามารถช่วยกักเก็บสารออกฤทธิ์สำคัญจากสารสกัดแอนโทไซยานินข้าวหอมนิล โดยมีประสิทธิภาพการกักเก็บ การละลาย และปริมาณสารแอนโทไซยานินสูงกว่าสารหอมผสมระหว่างมอลโตเด็กซ์ตรินกับเพคติน อีกทั้งการทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ซึ่งเป็นวิธีการทำแห้งที่สะดวก ใช้งานง่าย ทำให้ได้สารเอนแคปซูลที่ยังคงคุณสมบัติที่ดี อินูลินเป็นสารในกลุ่มเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำมีคุณสมบัติเป็นพรีไบโอติก ซึ่งมีบทบาทสำคัญช่วยทำให้สารเอนแคปซูลมีคุณสมบัติเป็น functional ingredients สำหรับใช้ในการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพต่อไป

ข้อเสนอแนะ

ควรมีการขยายการศึกษาด้านเทคนิคการทำแห้งและเทคนิคการเอนแคปซูเลชันแบบอื่น การใช้สารหอมประเภทอื่น และการศึกษาคูสมบัติด้านการปลดปล่อยและอัตราการปลดปล่อยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ



เอกสารอ้างอิง

- กองพัฒนาผลิตภัณฑ์ข้าว. (2561). *ข้าวหอมนิล*. [ออนไลน์]. สืบค้นเมื่อ 1 พฤษภาคม, 2564, จาก https://www.gonkham.com/2018/pages/rice_homeNil.php.
- AOAC. (2000). *Official Methods 920.149*, 17th Ed., Vol. II. Association of Official Analytical Chemist. Washington, DC.
- AOAC. (2005). *Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists*, 14th Ed., Vol. II. Association of Official Analytical Chemist. Washington, DC.
- Asem I. D., Imotomba R. K., Mazumder P. B., and Laishram J. M. (2015). Anthocyanin content in the black scented rice (Chakhao): its impact on human health and plant defense. *Symbiosis*, 66, 47–54. <https://doi.org/10.1007/s13199-015-0329-z>.
- Beirão-da-Costa S., Duarte C., Bourbon A. I., Pinheiro A. C., Januário M. I. N., Vicente A. A., Beirão-da-Costa M. L., and Delgadillo I. (2013). Inulin potential for encapsulation and controlled delivery of *Oregano* essential oil. *Food Hydrocolloids*, 33(2), 199–206.
- Bulatao R. M., Samin J. P. A., Salazar J. R., and Monserate J. J. (2017). Encapsulation of anthocyanins from black rice (*Oryza Sativa* L.) bran extract using chitosan-alginate nanoparticles. *Journal of Food Research*, 6(3), 40–47.
- Chen X. Q., Nagao, N., Itani T., and Irifune K. (2012). Anti-oxidative analysis, and identification and quantification of anthocyanin pigments in different coloured rice. *Food Chemistry*, 135(4), 2783–2788. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.06.098>.
- Choi S. P., Kim S. P., Nam, S. H., and Friedman M. (2013). Antitumor effects of dietary black and brown rice brans in tumor-bearing mice: Relationship to composition. *Molecular Nutrition and Food Research*, 57(3), 390–400. <https://doi.org/10.1002/mnfr.201200515>.
- Das A. B., Goud V. V., and Das C. (2019). Microencapsulation of anthocyanin extract from purple rice bran using modified rice starch and its effect on rice dough rheology. *International Journal of Biological Macromolecules*, 124, 573–581. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.11.247>.
- Di Battista C. A., Constenla D., Ramírez-Rigo M. V. and Piña J. (2015). The use of arabic gum, maltodextrin and surfactants in the microencapsulation of phytosterols by spray drying. *Powder Technology*, 286, 193–201.
- Edris, A. E., Kalembe, D., Adamiec, J. and Piatkowski, M. (2016). Microencapsulation of *Nigella sativa* oleoresin by spray drying for food and nutraceutical applications. *Food Chemistry*, 204, 326–333.
- Elert, E. (2014). Rice by the numbers: A good grain. *Nature*, 514, S50–S51. <https://doi.org/10.1038/514S50a>.
- Ghosal S., Indira T. N., and Bhattacharya S. (2010). Agglomeration of a model food powder: effect of maltodextrin and gum Arabic dispersions on flow behavior and compacted mass. *Journal of Food Engineering*, 96, 222–228.



- Gonzalez-Paramas A. M., Brighenti V., Bertoni L., Marcelloni L., Ayuda-Duran B., Gonzalez-Manzano S., Pellati F., and Santos-Buelga C. (2020). Assessment of the *in vivo* antioxidant activity of an anthocyanin-rich bilberry extract using the *Caenorhabditis elegans* model. *Antioxidants*, 9(6), 509. <https://doi.org/10.3390/antiox9060509>.
- Han S. J., Hong S. S., and Kim D. H. (2007). Antipruritic effect of black colored rice. *Natural Product Sciences*, 13(4), 373–377.
- Idham Z., Muhamad I. I., and Sarmidi M. R. (2010). Degradation kinetics and colour stability of spray-dried encapsulated anthocyanins from *Hibiscus sabdariffa* L. *Journal of Food Process Engineering*, 35, 522–542.
- Ito V. C., and Lacerda G. (2019). Black rice (*Oryza sativa* L.): A review of its historical aspects, chemical composition, nutritional and functional properties, and applications and processing technologies., *Food Chemistry*, 301, 125304. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125304>.
- Jaksomsak P., Rerkasem B., and Prom-U-Thai C. (2021). Variation in nutritional quality of pigmented rice varieties under different water regimes, *Plant Production Science*, 24:2, 244–255, <https://doi.org/10.1080/1343943X.2020.1819164>.
- Jung Y. K., Jo K. S., Rho S. J., and Kim Y. R. (2020). pH-dependent antioxidant stability of black rice anthocyanin complexed with cycloamylose. *LWT - Food Science and Technology*, 129, 109474. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109474>.
- Khoo H. E., Azlan A., Tang S. T., and Lim S. M., (2017). Anthocyanidins and anthocyanins: colored pigments as food, pharmaceutical ingredients, and the potential health benefits. *Food and nutrition research*, 61(1), 1361779. <https://doi.org/10.1080/16546628.2017.1361779>.
- Konczak I., and Zhang W. (2004). Anthocyanins-more than nature's colours. *BioMed Research International*, 5, 239–240.
- Kumar P., Senthamilselvi S., and Govindaraju M. (2014). Phloroglucinol-encapsulated starch biopolymer: preparation, antioxidant and cytotoxic effects on HepG2 liver cancer cell lines. *RSC Advances*, 4, 26787–26795.
- Labuschagne P. (2018). Impact of wall material physicochemical characteristics on the stability of encapsulated phytochemicals: A review. *Food Research International*, 107, 227–247.
- Lacerda E. C. Q., de Araujo Calado V. M., Monteiro M., Finotelli P. V., Torres A. G., and Perrone D. (2016). Starch, inulin and maltodextrin as encapsulating agents affect the quality and stability of jussara pulp microparticles. *Carbohydrate Polymers*, 151, 500–510.
- Mar J. M., da Silva L. S., Lira A. C., Kinupp V. F., Yoshida M. R., Moreira W. P., Bruginski E., Campos F. R., Machado M. B., de Souza T. P., Campelo P. H., de Araujo Bezerra J., and Sanches E. A. (2020). Bioactive compounds-rich powders: Influence of different carriers and drying



- techniques on the chemical stability of the *Hibiscus acetosella* extract. *Powder Technology*, 360, 383–391. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.10.062>.
- Marcillo-Parra V., Tupuna-Yerovi D. S., González Z., and Ruales, J. (2021). Encapsulation of bioactive compounds from fruit and vegetable by-products for food application – A review. *Trends in Food Science and Technology*, 116, 11–23. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.07.009>.
- Mahdavi S. A., Jafari S. M., Assadpour E., and Ghorbani M. (2016). Storage stability of encapsulated barberry's anthocyanin and its application in jelly formulation. *Journal of Food Engineering*, 181, 59–66.
- Mbanjo E. G. N., Kretschmar T., Jones H., Ereful N., Blanchard C., Boyd L. A., and Sreenivasulu N. (2020). The Genetic Basis and Nutritional Benefits of Pigmented Rice Grain. *Frontiers in genetics*, 11, 229. <https://doi.org/10.3389/fgene.2020.00229>.
- Mickus R. R., and B. S. Luh (1991). Rice Enrichment with Vitamins and Amino Acids. Rice: Volume I. Production/Volume II. Utilization. B. S. Luh. Boston, MA, Springer US: 454–468.
- Milea S. A., Dima C. V., Enachi E., Dumitrascu L., Barbu V., Bahrim G. E., Alexe P., and Stanciu N. (2020). Combination of freeze drying and molecular inclusion techniques improves the bioaccessibility of microencapsulated anthocyanins from black rice (*Oryza sativa* L.) and lavender (*Lavandula angustifolia* L.) essential oils in a model food system. *International Journal of Food Science and Technology*, 55(12), 3585–3594. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14692>.
- Min S. W., Ryu S. N., and Kim D. H. (2010). Anti-inflammatory effects of black rice, cyanidin-3-O- β -D-glycoside, and its metabolites, cyanidin and protocatechuic acid. *International Immunopharmacology*, 10, 959–966.
- Norkaew O., Thitisut P., Mahatheeranont S., Pawin B., Sookwong P., Yodpitak S., and Lungkaphin A. (2019). Effect of wall materials on some physicochemical properties and release characteristics of encapsulated black rice anthocyanin microcapsules. *Food Chemistry*, 294, 493–502. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.05.086>.
- Oidtmann J., Schantz M., Mäder K., Baum M., Berg S., Betz M., Kulozik U., Leick S., Rehage H., Schwarz K., and Richling E. (2012). Preparation and comparative release characteristics of three anthocyanin encapsulation systems. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60(3), 844–851.
- Pereira Jr V. A., de Arruda I. N. Q., and Stefani R. (2015). Active chitosan/PVA films with anthocyanins from *Brassica oleraceae* (Red Cabbage) as Time–Temperature Indicators for application in intelligent food packaging. *Food Hydrocolloids*, 43, 180–188.
- Pitija K., Nakornriab M., Sriseadka T., Vanavichit A., and Wongpornchai S. (2013). Anthocyanin content and antioxidant capacity in bran extracts of some Thai black rice varieties. *International Journal of Food Science and Technology*, 48, 300–308.



- Reena M. B., Krishnakantha T. P., and Lokesh B. R. (2010). Lowering of platelet aggregation and serum eicosanoid levels in rats fed with a diet containing coconut oil blends with rice bran oil or sesame oil. *Prostaglandins Leukotrienes and Essential Fatty Acids*, 83, 151–160. <https://doi.org/10.1016/j.plefa.2010.06.004>.
- Rezende Y. R. R. S., Nogueira J. P., and Narain N. (2018). Microencapsulation of extracts of bioactive compounds obtained from acerola (*Malpighia emarginata* DC) pulp and residue by spray and freeze drying: Chemical, morphological and chemometric characterization. *Food Chemistry*, 254, 281–291.
- Rousta L. K., Bodbodak S., Nejatian M., Yazdi A. P. G., Rafiee Z., Xiao J., and Jafari S. M. (2021). Use of encapsulation technology to enrich and fortify bakery, pasta, and cereal-based products. *Trends in Food Science and Technology*. 118(A), 688–710. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.10.029>.
- Sakulnarmrat K., and Konczak I., (2022). Encapsulation of *Melodorum fruticosum* Lour. anthocyanin-rich extract and its incorporation into model food. *LWT - Food Science and Technology*, 153, 112546. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112546>.
- Sakulnarmrat K., Sittiwong W., and Konczak I. (2022), Encapsulation of mangosteen pericarp anthocyanin-rich extract by spray drying. *International Journal Food Science Technology*, 57(2), 1237–1247. <https://doi.org/10.1111/ijfs.15508>.
- Sakulnarmrat K., Wongsrikaew D., and Konczak I. (2021). Microencapsulation of red cabbage anthocyanin-rich extract by drum drying technique. *LWT - Food Science and Technology*, 137, 147110. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110473>.
- Samyori D., Das A. B., and Deka S. C. (2017). Pigmented rice a potential source of bioactive compounds: A review. *International Journal of Food Science and Technology*, 52, 1073–1081.
- Sharif N., Khoshnoudi-Nia S., and Jafari S. M. (2020). Nano-microencapsulation of anthocyanins; a systematic review and meta-analysis. *Food Research International*, 132, 109007. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109077>.
- Tan X. W., Kobayashi K., Shen L., Inagaki J., Ide M., Hwang S. S., and Matsuura E. (2020). Antioxidative attributes of rice bran extracts in ameliorative effects of atherosclerosis-associated risk factors. *Heliyon*. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05743>.
- Thephanee C., Liu C. C., Yu H. S., Huang H. S., Yen C. H., Li Y. H., Lee M. R., and Liaw E. T. (2021). Evaluation of phytochemical contents and *in vitro* antioxidant, anti-inflammatory, and anticancer activities of black rice leaf (*Oryza sativa* L.) extract and its fractions. *Foods*, 10(12), 2987. <https://doi.org/10.3390/foods10122987>.
- Tonon R. V., Brabet C., and Hubinger M. D. (2010). Anthocyanin stability and antioxidant activity of spray-dried açai (*Euterpe oleracea* Mart.) juice produced with different carrier agents. *Food Research International*, 43(3), 907–914.



- Tonon R. V., Brabet C., Pallet D., Brat P., and Hubinger M. D., (2009). Physicochemical and morphological characterization of açai (*Euterpe oleraceae* Mart.) powder produced with different carrier agents. *Journal of Food Science and Technology*, 44, 1950–1958.
- Vichit W., Saewan N., and Thitipromote N. (2012). Stability of freeze-dried encapsulated anthocyanins from black glutinous rice extract. *In Pure and Applied Chemistry International Conference 2012 (PACCON 2012)*, January 11st–13th, 2012, Chiang Mai, Thailand.
- Wahyuni A. S., Munawaroh R., and Da'I M. (2016). Antidiabetic mechanism of ethanol extract of black rice bran on diabetic rats. *National Journal of Physiology, Pharmacy and Pharmacology*, 6(2), 106–110.
- Wang Q., Han P. H., Zhang M. W., Xia M., Zhu H. L., Ma J., Hou M. J., Tang Z. H., and Ling W. H. (2007). Supplementation of black rice pigment fraction improves antioxidant and anti-inflammatory status in patients with coronary heart disease. *Asia Pacific Journal of Clinical Nutrition*, 16(1), 295–301.
- Wongwichai T., Teeyakasem P., Pruksakorn D., Kongtawelert P., and Pothacharoen P. (2019). Anthocyanins and metabolites from purple rice inhibit IL-1 β -induced matrix metalloproteinases expression in human articular chondrocytes through the NF- κ B and ERK/MAPK pathway. *Biomedicine and Pharmacotherapy*, 112, 108610. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2019.108610>.
- Wu G., Hui X., Wang R., Dilrukshi H. N. N., Zhang Y., Brennan M. A., and Brennan C. S. (2021). Sodium caseinate-blackcurrant concentrate powder obtained by spray-drying or freeze-drying for delivering structural and health benefits of cookies. *Journal of Food Engineering*, 299, 110466. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110466>.
- Yamuangmorn S., and Prom-U-Thai C. (2021). The potential of high-anthocyanin purple rice as a functional ingredient in human health. *Antioxidants*, 10(6), 833. <https://doi.org/10.3390/antiox10060833>.



คณะผู้เขียน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กรณรัตน์ สกุนามรัตน์

สาขาอุตสาหกรรมเกษตร คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
วิทยาเขตสุรินทร์
145 หมู่ 15 ตำบลนอกเมือง อำเภอเมืองสุรินทร์ จังหวัดสุรินทร์ 32000
e-mail: karunrat.sa@rmuti.ac.th

นักศึกษาปริญญาตรี นางสาวนาฏยา มีสังเกตุ

สาขาอุตสาหกรรมเกษตร คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
วิทยาเขตสุรินทร์
145 หมู่ 15 ตำบลนอกเมือง อำเภอเมืองสุรินทร์ จังหวัดสุรินทร์ 32000
e-mail: nattaya.me@rmuti.ac.th

นักศึกษาปริญญาตรี นางสาวพัฒนา พละที

สาขาอุตสาหกรรมเกษตร คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
วิทยาเขตสุรินทร์
145 หมู่ 15 ตำบลนอกเมือง อำเภอเมืองสุรินทร์ จังหวัดสุรินทร์ 32000
e-mail: phatthana.pa@rmuti.ac.th

นักศึกษาปริญญาตรี นางสาวยุวดี สมสุข

สาขาอุตสาหกรรมเกษตร คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
วิทยาเขตสุรินทร์
145 หมู่ 15 ตำบลนอกเมือง อำเภอเมืองสุรินทร์ จังหวัดสุรินทร์ 32000
e-mail: yuwadee.so@rmuti.ac.th

นักศึกษาปริญญาตรี นายธนานพ แก้วงาม

สาขาอุตสาหกรรมเกษตร คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
วิทยาเขตสุรินทร์
145 หมู่ 15 ตำบลนอกเมือง อำเภอเมืองสุรินทร์ จังหวัดสุรินทร์ 32000
e-mail: thananop.ke@rmuti.ac.th

นักศึกษาปริญญาตรี นายพีรพล แวนแก้ว

สาขาอุตสาหกรรมเกษตร คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
วิทยาเขตสุรินทร์
145 หมู่ 15 ตำบลนอกเมือง อำเภอเมืองสุรินทร์ จังหวัดสุรินทร์ 32000
e-mail: peerapon.wa@rmuti.ac.th

นักศึกษาปริญญาตรี นางสาวบุญรักษา บุรณ์เจริญ

สาขาอุตสาหกรรมเกษตร คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
วิทยาเขตสุรินทร์
145 หมู่ 15 ตำบลนอกเมือง อำเภอเมืองสุรินทร์ จังหวัดสุรินทร์ 32000
e-mail: bunraksa.bo@rmuti.ac.th



นักวิทยาศาสตร์ นางนันทิยา ยิ่งมีมา

สาขาอุตสาหกรรมเกษตร คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
วิทยาเขตสุรินทร์

145 หมู่ 15 ตำบลนอกเมือง อำเภอเมืองสุรินทร์ จังหวัดสุรินทร์ 32000

e-mail: dodee_naka@hotmail.co.th