บทที่ 4
สรุปผลการวิจัย

โครงการวิจัยนี้ศึกษาสมบัติการต้านทานการย่อยของแป้งเมล็ดขนุน ปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการเตรียมแป้งเมล็ดขนุนต้านทานการย่อย พัฒนากระบวนการหรือวิธีการทางกายภาพและ/หรือทางเคมีในการเตรียมหรือเพิ่มปริมาณแป้งเมล็ดขนุนต้านทานการย่อย สมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งเมล็ดขนุนต้านทานการย่อยที่ได้เปรียบเทียบกับแป้งดิบ สมบัติเชิงหน้าที่และศักยภาพการใช้แป้งเมล็ดขนุนต้านทานการย่อยเป็นสารช่วยทางเภสัชกรรม เตรียมผลิตภัณฑ์จากแป้งเมล็ดขนุนต้านทานการย่อยในรูปแบบยาเม็ดและทดสอบความคงสภาพของเม็ดยาผลิตภัณฑ์เพื่อเป็นข้อมูลในการพัฒนาเพื่อใช้เป็นผลิตภัณฑ์เสริมอาหารต่อไป

การศึกษาเริ่มจากการสกัดแยกแป้งจากเมล็ดขนุน พบว่า แป้งดิบเมล็ดขนุนจากขนุนพันธุ์ที่ใช้ในการศึกษานี้ (ทองประเสริฐ) มีปริมาณอะมิโลส 26.4% ซึ่งใกล้เคียงกับที่มีรายงานไว้โดยคณะวิจัยอื่น และโดยคณะผู้วิจัยเองในงานวิจัยก่อนหน้านี้ ขณะที่ปริมาณแป้งต้านทานการย่อย (RS) ในแป้งดิบมีค่าเท่ากับ 29.7% ซึ่งสูงกว่าแป้งเชิงพาณิชย์หลายชนิด การดัดแปรทางกายภาพเพื่อเพิ่มปริมาณแป้งต้านทานการย่อยเลือกใช้วิธีการให้ความร้อนชื้น (heat moisture treatment, HMT) ภายใต้สภาวะความชื้น 5 ระดับ อุณหภูมิทดสอบ 5 ระดับ และระยะเวลาการให้ความร้อน 3 ระดับ รวม 75 ตัวอย่าง พบว่าแป้งดัดแปรด้วยความร้อนชื้นมีค่ามีปริมาณอะมิโลส อยู่ในช่วง 24.7-28.4% และปริมาณแป้งต้านทานการย่อยในช่วง 7-52.2% โดยความชื้นและอุณหภูมิเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณแป้งต้านทานการย่อยในแป้งเมล็ดขนุน ขณะที่ระยะเวลาการให้ความร้อนมีผลน้อยกว่า แป้งดัดแปร JF-25-80-16 ให้ค่าปริมาณแป้งต้านทานการย่อยสูงสุด (52.2%) ขณะที่แป้งดัดแปร JF-35-120-16 ให้ค่าแป้งต้านทานการย่อยต่ำสุด (7.0%) การเพิ่มขึ้นของปริมาณแป้งต้านทานการย่อยน่าจะเป็นผลมาจากการเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ที่เป็นระเบียบมากขึ้น (more-ordered) ภายในโมเลกุลแป้งอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงความชื้นและความร้อน ขณะที่การลดลงของปริมาณแป้งต้านทานการย่อยในตัวอย่างที่ดัดแปรที่ความชื้นและอุณหภูมิสูง สัญนิษฐานว่าเป็นผลจากการที่ปัจจัยทั้งสองเอื้อให้เอนไซม์เข้าสู่แกรนูลได้มากขึ้น หรืออาจเกิดจากการกลายเป็นเจลบางส่วน (partial gelatinization)

แป้งเมล็ดขนุนดัดแปรด้วยความร้อนชื้นมีการเปลี่ยนแปลงของการพองตัวที่ขึ้นกับอุณหภูมิ (temperature-dependent) เช่นเดียวกับแป้งดิบ โดยมีค่าการพองตัวต่ำที่อุณหภูมิต่ำกว่า 70°C การพองตัวเพิ่มสูงขึ้นที่อุณหภูมิ 80°C และเพิ่มขึ้นสูงสุดอยู่ในช่วง 6.1-7.7 g/g ที่อุณหภูมิ 90°C แป้ง

ดัดแปรส่วนใหญ่มีค่าการพองตัวสุดท้ายต่ำกว่าแป้งดิบ ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากการจัดเรียงตัวใหม่ (rearrangement) ภายในโครงสร้างแกรนูลแป้ง การลดลงของการรับน้ำ รวมถึงการเกิดอันตรกิริยาระหว่างอะมิโลส-อะมิโลส และอะมิโลส-อะมิโลเพคติน ที่ถูกชักนำให้เกิดจากการได้รับความร้อน ขณะที่การละลายของแป้งมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยหรือไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งดิบ โดยมีค่าการละลายสูงสุดในช่วง 6.7 ถึง 7.9% ซึ่งมีข้อสันนิษฐานว่าการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพต่างๆ ซึ่งรวมถึงลักษณะของแกรนูล รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ กำลังการพองตัวและการละลาย และสมบัติทางอุณหภูมิ มีความแตกต่างหลากหลายขึ้นกับชนิดและแหล่งที่มาของแป้งและสภาวะของการให้ความร้อนและความชื้น

เมื่อพิจารณาในระดับโครงสร้างและรูปผลึก พบว่าแป้งดัดแปรด้วยความร้อนชื้นส่วนใหญ่ไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างแกรนูลอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งดิบ ยกเว้นที่สภาวะการดัดแปรด้วยความชื้นและอุณหภูมิที่สูงขึ้นคือความชื้น 30-35% และอุณหภูมิ 110-120°C ที่แกรนูลมีลักษณะการพองมากขึ้น และมีการเปลี่ยนรูปร่างจากเดิมที่มีลักษณะกลมหรือคล้ายระฆังเป็นลักษณะรูปร่างไม่แน่นอนมากขึ้น พบว่ามีการหลอมรวมของแกรนูลและการกร่อนของบริเวณผิวหน้า ซึ่งน่าจะเกิดจากการเกิดการกลายเป็นเจลบางส่วนเนื่องมาจากผลร่วมกันของความชื้นและความร้อนสูงที่ใช้ในการดัดแปร รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) แสดงค่าพีคการสะท้อนหลักที่สอดคล้องกับรูปผลึกแบบ A-type สำหรับทั้งแป้งดิบและแป้งดัดแปร แต่มีความเข้มของแต่ละพีคการสะท้อนแตกต่างกัน โดยตัวอย่างที่ดัดแปรด้วยความชื้นและอุณหภูมิปานกลางมีการเพิ่มขึ้นของความเข้มพีคการสะท้อนที่แสดงถึงการเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ที่เป็นระเบียบมากขึ้น ขณะที่ตัวอย่างที่ดัดแปรด้วยความชื้นและอุณหภูมิสูงมีการลดลงของความเข้มพีคการสะท้อนเล็กน้อย (30% MC) ถึงปานกลาง (35%MC) ซึ่งสอดคล้องกับผล SEM และสนับสนุนคำอธิบายที่ว่าความชื้นและอุณหภูมิสูงที่ใช้ในการดัดแปรส่งเสริมการเกิด destabilization ของ lamellar array

ค่าอุณหภูมิการเกิดเป็นเจล (T_g) ของแป้งที่ผ่านการดัดแปรด้วยความร้อนชื้น มีค่าเพิ่มขึ้นจากของแป้งดิบ แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของการจัดเรียงตัวภายในแกรนูลแป้งเมล็ดขนุนมีความเป็นระเบียบมากขึ้น และไปจำกัดการเคลื่อนที่ของสายพอลิเมอร์แป้งภายในส่วนอสัณฐาน โดยการเพิ่มขึ้นนี้พบได้ในตัวอย่างที่ดัดแปรที่ทั้งสามช่วงระยะเวลา แต่ยังไม่พบความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิการเกิดเป็นเจล กับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแป้งต้านทานการย่อยในตัวอย่าง และพบการลดลงของค่า ΔT อย่างเล็กน้อยถึงปานกลาง ในตัวอย่างแป้งดัดแปรที่ได้รับความร้อนในช่วง 80-100°C ขณะที่ตัวอย่างที่ดัดแปรด้วยอุณหภูมิที่สูงขึ้นแสดงการเพิ่มขึ้นของค่า ΔT ค่าเอนทาลปีของการเกิดเป็นเจล (ΔH) มีค่าลดลงเล็กน้อยถึงปานกลางในตัวอย่างที่ดัดแปรที่ความชื้น 20-25%

MC และอุณหภูมิ 80-100°C ขณะที่การดัดแปรที่ความชื้นและอุณหภูมิที่สูงขึ้น พบว่าแป้งดัดแปรที่ได้มีค่า ΔH ลดลงอย่างชัดเจน (5.5-9.5 J/g) ซึ่งการลดลงหรือไม่เปลี่ยนแปลงของค่า ΔH ของแป้งหลังจากการดัดแปรด้วยความร้อนชื้น เป็นผลมาจากการเกิดการขัดขวางพันธะไฮโดรเจน ในเกลียวคู่ของบริเวณที่เป็นผลึกและไม่เป็นผลึกในแกรนูลแป้ง เนื่องจากการเคลื่อนไหวที่เพิ่มขึ้นจากการถูกชักนำด้วยความร้อน

ในส่วนของแป้งดัดแปรทางเคมีด้วยปฏิกิริยาคาร์บอกซีเมทิล พบว่าแป้งดัดแปรมีค่าระดับการแทนที่ (DS) อยู่ระหว่าง 0.25-0.31 ขณะที่ค่าปริมาณอะมิโลสที่อยู่ระหว่าง 2.8-4.3% และปริมาณแป้งต้านทานการย่อยอยู่ในช่วง 3.7-10.4% ซึ่งลดลงจากแป้งดิบอย่างมีนัยสำคัญ การลดลงของปริมาณแป้งต้านทานการย่อยในกรณีนี้ส่วนหนึ่งน่าจะมาจากความสามารถในการละลายน้ำของแป้งดัดแปร ทำให้เอนไซม์สามารถเข้าถึงภายในของแกรนูลแป้งและเกิดการย่อยได้อย่างรวดเร็ว ขณะที่แป้งดัดแปรด้วยการเชื่อมขวาง มีปริมาณอะมิโลสลดลงจากแป้งดิบเล็กน้อย และปริมาณแป้งต้านทานการย่อยในแป้งเมล็ดขนุนเชื่อมขวาง มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณสารเชื่อมขวางที่ใช้ และระยะเวลาของการทำปฏิกิริยา

ในขั้นตอนการเลือกแป้งต้านทานการย่อยเพื่อใช้ศึกษาต่อ แป้งดัดแปรด้วยความร้อนชื้นรหัส JF-25-80-16 เป็นตัวที่มีศักยภาพสูงสุด โดยมีลักษณะปรากฏและสมบัติทั่วไปไม่แตกต่างจากแป้งดิบ แต่มีปริมาณอะมิโลสสูงกว่าเกือบ 2 เท่า เมื่อนำไปทดสอบสมบัติเชิงหน้าที่พบว่า แป้งดัดแปรมีการไหลที่ดีขึ้นกว่าแป้งดิบเล็กน้อย มีค่าความจุการพองตัวอิสระและความสามารถในการดูดน้ำไม่ดีไปกว่าแป้งดิบ การมีการพองตัวต่ำกว่า ขณะที่การละลายในน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ ไม่แตกต่างกัน เมื่อนำไปทดสอบเตรียมเป็นผลิตภัณฑ์ในรูปแบบยาเม็ด พบว่า ยาเม็ดแป้งเมล็ดขนุนต้านทานการย่อยที่เตรียมโดยวิธีการทำแกรนูลเปียก มีลักษณะปรากฏทั่วไปดี การวิเคราะห์ควบคุมคุณภาพพื้นฐานผ่านเกณฑ์มาตรฐานตามเภสัชตำรับ การทดสอบความคงสภาพพบว่าเม็ดยามีความคงตัวดีเมื่อเก็บรักษาภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้อง และสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 40-50%RH อุณหภูมิ 30°C เป็นระยะเวลา 1, 3 และ 6 เดือน แต่ที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 75-90%RH พบว่าเม็ดยาที่เก็บไว้เป็นเวลา 3 และ 6 เดือน มีค่าเฉลี่ยน้ำหนักและความหนาของเม็ดยาเพิ่มขึ้นจากกลุ่มที่เก็บรักษาไว้ 1 เดือนอย่างชัดเจน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความคงสภาพของเม็ดยาได้รับผลกระทบจากความชื้นของสภาวะการเก็บรักษาที่ความชื้นสูง การพัฒนาผลิตภัณฑ์จากแป้งเมล็ดขนุนต้านทานการย่อย จึงต้องคำนึงถึงจุดนี้ด้วย

โดยสรุปแล้ว การศึกษานี้แสดงให้เห็นความสำคัญและศักยภาพของแป้งจากเมล็ดขนุนในการเป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพ โดยแป้งดิบเมล็ดขนุนที่มีปริมาณแป้งต้านทานการย่อย

เริ่มต้นสูงกว่าแป้งเชิงพาณิชย์ทั่วไป สามารถทำให้เพิ่มขึ้นได้อีกโดยการใช้การดัดแปรด้วยความร้อนชื้น ผลผลิตที่ได้สามารถนำมาพัฒนาใช้เป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์สุขภาพ ซึ่งจะช่วยส่งเสริมการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือทิ้งทางชีวภาพ เพิ่มมูลค่าให้กับผลิตผลทางการเกษตรของประเทศ รวมถึงช่วยลดการนำเข้าวัตถุดิบทางเภสัชกรรมจากต่างประเทศและเป็นพื้นฐานในการต่อยอดความรู้การพัฒนาสารช่วยทางเภสัชกรรมกลุ่มต่างๆ จากแป้งดัดแปรต่อไป

แนวทางการวิจัยต่อยอดหรือเพิ่มเติม

1. การศึกษาผลของการใช้เอนไซม์ดัดกิ่งต่อปริมาณแป้งต้านทานการย่อยในแป้งเมล็ดขนุน
2. การศึกษาผลของกระบวนการรีโทรเกรดต่อปริมาณแป้งต้านทานการย่อยในแป้งเมล็ดขนุน
3. การศึกษาผลของอายุของผล(และเมล็ด)ขนุน รวมถึงสายพันธุ์ขนุนต่อปริมาณแป้งต้านทานการย่อยที่ได้
4. การทดสอบการผลิตแป้งต้านทานการย่อยจากเมล็ดขนุนในระดับมหภาค เพื่อศึกษาปัจจัยในรอบด้านที่มีผลต่อการเตรียมและคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้ รวมทั้งการวิเคราะห์เชิงอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง เช่น เทคโนโลยีและเครื่องมือในการผลิต สารตกค้าง กากหรือของเสียเหลือทิ้ง และต้นทุนการผลิต
5. การใช้แป้งต้านทานการย่อยจากเมล็ดขนุนเป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์เสริมอาหารที่มีส่วนประกอบออกฤทธิ์สำคัญอย่างอื่นร่วมด้วย เช่น สารสกัดสมุนไพร
6. การทดลองนำแป้งต้านทานการย่อยจากเมล็ดขนุนไปใช้เป็นส่วนประกอบของเภสัชภัณฑ์ในรูปแบบต่างๆ เช่น การพัฒนาระบบนำส่งยาเฉพาะที่