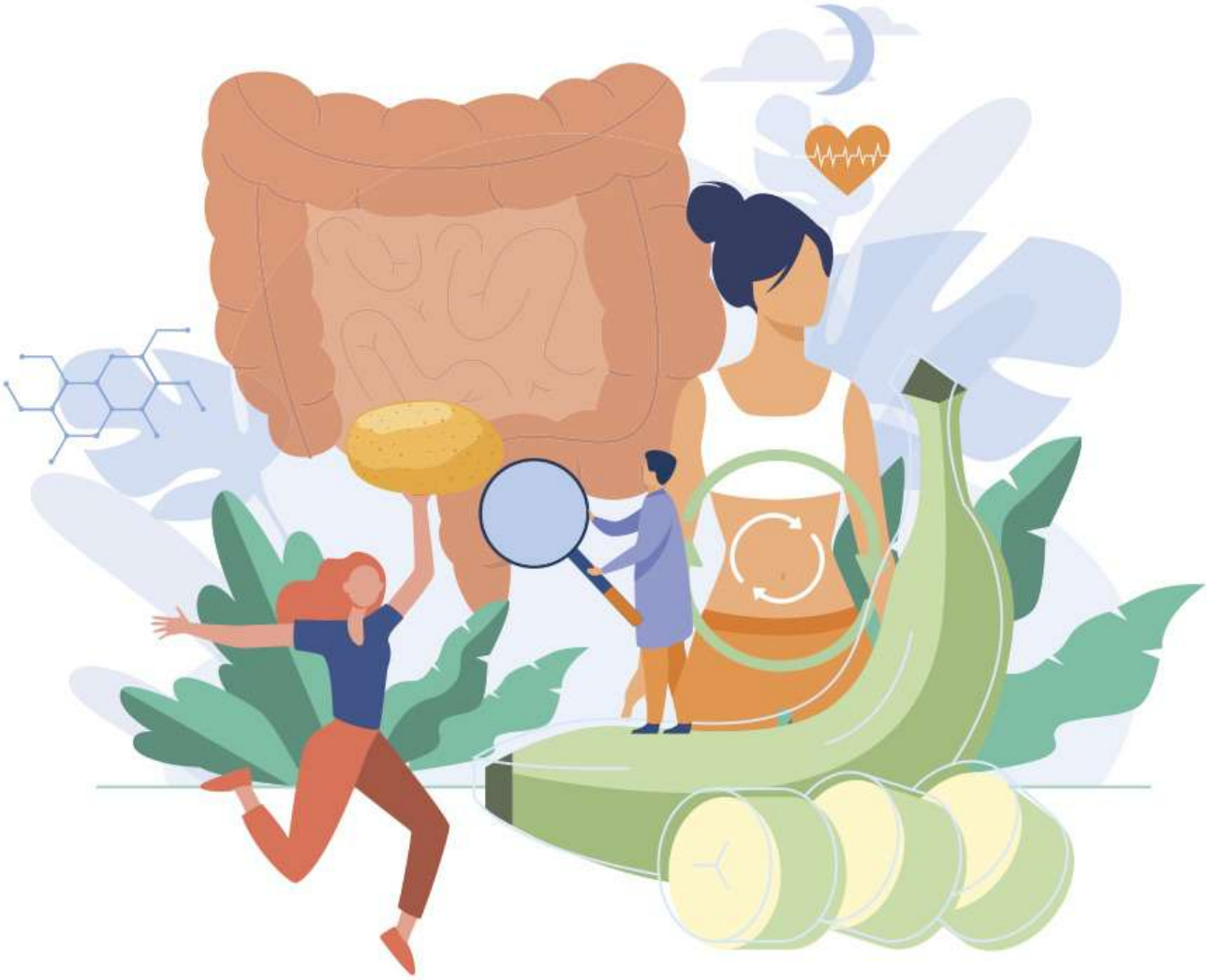
สตาร์ชต้านทานต่อการย่อย เพื่อสุขภาพ

Resistant Starches for Health



จักรพันธ์ ศิริธัญญาลักษณ์

คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

สารบัญ

คำนิยม I

คำนำ II

สารบัญ III

สารบัญภาพ VII

บทที่ 1 สตาร์ช 1

1.1 บทนำ 2
1.2 ความเป็นผลึก 6
1.3 แอมิโลส 7
1.4 แอมิโลเพกทิน 9
1.5 ส่วนประกอบอื่น 12
1.6 เจลาติไนเซชัน 14
1.7 สารประกอบเชิงซ้อน 18
1.8 บทสรุป 18

บทที่ 2 สตาร์ชต้านทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ 27

2.1 บทนำ 28
2.2 สตาร์ชต้านทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ RS1 34
2.3 สตาร์ชต้านทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ RS2 35
2.4 สตาร์ชต้านทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ RS3 39
2.5 สตาร์ชต้านทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ RS4 50
2.6 สตาร์ชต้านทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ RS3/4 54
2.7 สตาร์ชต้านทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ RS5 55
2.8 สตาร์ชต้านทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ RS ชนิดอื่น ๆ 58
2.9 บทสรุป 59

SAMPLE

01

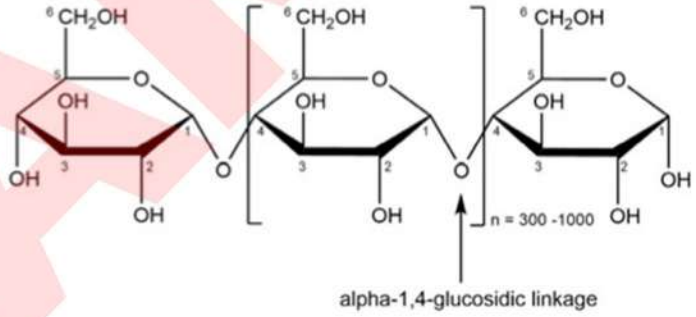
สตาร์ช

1.1 บทนำ
1.2 ความเป็นผลึก
1.3 แอมิโลส
1.4 แอมิโลเพกทิน
1.5 ส่วนประกอบอื่น
1.6 เจลาติไนเซชัน
1.7 สารประกอบเชิงซ้อน
1.8 บทสรุป

SAMPLE

อยู่ตรงศูนย์กลางของผลึก[17] โมเลกุลอัดตัวกันในลักษณะ pseudo-hexagonal pattern ส่งผลต่อการต้านทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Williamson และคณะ[20] ที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับการต้านทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ของสตาร์ชที่พบว่าสตาร์ชรูปแบบผลึก B ถูกย่อยโดยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส (α-amylase) ได้ช้ามากและไม่สมบูรณ์เมื่อเปรียบเทียบกับสตาร์ชรูปแบบผลึก A ส่วนที่เป็นอสัณฐานในเม็ดสตาร์ชถูกย่อยได้ง่ายมากที่สุดและเม็ดสตาร์ชเกิดการกร่อนเม็ดสตาร์ชส่วนใหญ่ในตอนแรกถูกไฮโดรไลซ์ (hydrolyze) ที่บริเวณผิว ส่วนเม็ดสตาร์ชที่ต้านทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ได้มาก เช่น สตาร์ชข้าวโพดแอมิโลสสูง (amylomaize) ถูกไฮโดรไลซ์จากภายในแกรนูลหลังจากที่เอนไซม์แทรกเข้าภายในเม็ดสตาร์ชโดยผ่านทางรูที่อยู่ที่ผิวของเม็ดสตาร์ช งานวิจัยที่ศึกษาโครงสร้างของแอมิโลสและแอมิโลเพกทินมีเป็นจำนวนมาก[13] โดยโครงสร้างเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการถูกย่อย (digestibility) สตาร์ชส่วนที่ไม่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ในทางเดินอาหาร[21] เรียกกันว่าเป็นสตาร์ชต้านทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อร่างกายโดยมีรายละเอียดในบทต่อไป

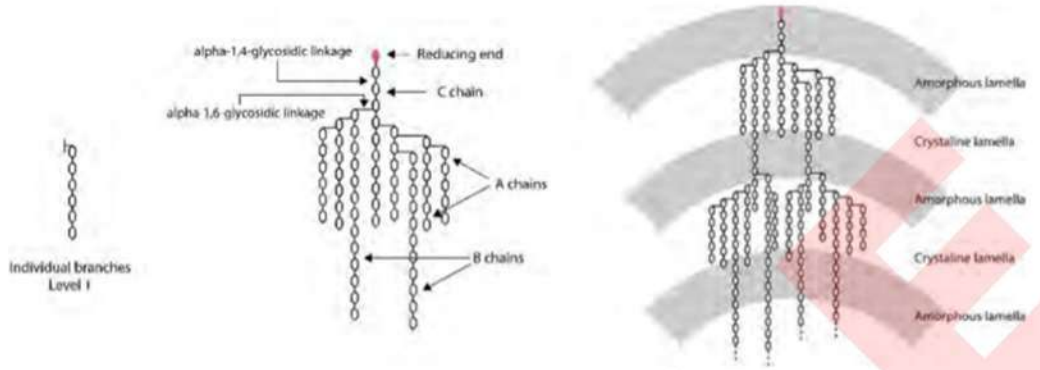
1.3 แอมิโลส



ภาพที่ 1.1 โครงสร้างแอมิโลส (ภาพวาดโดยผู้เขียน)

แอมิโลสเป็นพอลิเมอร์เส้นตรงสายยาวที่มีสะพานเชื่อม α-D-(1-4) ระหว่างหน่วยกลูโคส ประกอบด้วยหน่วยกลูโคสประมาณ 1,000 หน่วย มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยประมาณ 10^6 ดาลตัน (Dalton) ดังแสดงในภาพที่ 1.1 อาจพบสะพานเชื่อม α-D-(1-6) ได้บ้างเล็กน้อยซึ่งทำให้เป็นสายกิ่ง 2-3 กิ่งได้ แอมิโลสส่วนใหญ่พบในบริเวณอสัณฐานของเม็ดสตาร์ช แอมิโลสเส้นตรงสายยาวที่มีสะพาน

SAMPLE



ภาพที่ 1.3 ลักษณะโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชที่เป็นผลึกและกึ่งผลึก (ภาพวาดโดยผู้เขียน)

แอมิโลเพกทินประกอบด้วยทั้งส่วนที่เป็นผลึก (double helix) และส่วนที่เป็นอสัณฐาน เมื่อให้ความร้อนกับสตาร์ชจนได้อุณหภูมิระดับหนึ่ง แอมิโลเพกทินส่วนที่เป็นผลึกเกิดการหลอมตัวและเปลี่ยนเป็นรูปอสัณฐาน สถานะทางกายภาพของแอมิโลเพกทินสามารถส่งผลต่อการถูกย่อยด้วยเอนไซม์ เพราะว่าแอมิโลเพกทินเป็นผลึกมีความคงตัวทางเคมีและกายภาพมากกว่าอยู่ในรูปอสัณฐาน

สตาร์ชส่วนใหญ่ประกอบด้วยแอมิโลเพกทินร้อยละ 70 และส่วนที่เหลือเป็นแอมิโลสที่อยู่ภายในเมทริกซ์ของแอมิโลเพกทิน ยิ่งมีปริมาณแอมิโลสสูงยิ่งทำให้ยากต่อการเกิดเจลาติไนเซชัน แต่ทำให้เกิดรีโทรเกรเดชันได้เร็วขึ้น[45]

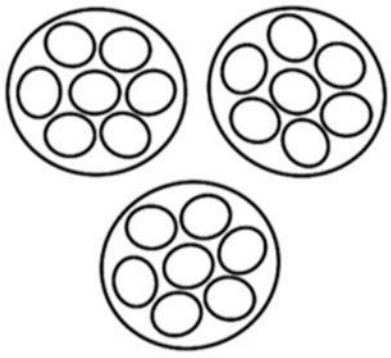
ความแตกต่างของการจัดเรียงตัวของแอมิโลสและแอมิโลเพกทินส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสตาร์ชที่แขวนตะกอนในน้ำเมื่อได้รับความร้อน โดยแอมิโลสมีแนวโน้มสูงในการเกิดรีโทรเกรเดชัน ขณะที่แอมิโลเพกทินที่มีสายกิ่งเกิดเจลที่ช้าและได้เป็นสารละลายทึบแสงและมีความหนืดสูง

การที่เม็ดสตาร์ชของพอลิเมอร์จัดเรียงตัวกันแน่นในแนวรัศมีและอยู่ในสภาพที่ค่อนข้างแห้ง โครงสร้างของโมเลกุลที่อัดตัวกันแน่นจำกัดการเข้าถึงของเอนไซม์ เช่น เอนไซม์แอลฟาอะไมเลสที่เข้าไปย่อยสตาร์ช เม็ดสตาร์ชบางชนิดในธรรมชาติมีลักษณะเช่นนี้จึงทำให้มีสมบัติที่ต้านทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ในทางเดินอาหาร เช่น เม็ดสตาร์ชจากผลกล้วยดิบที่ได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากมีประโยชน์ต่อสุขภาพ[46, 47] โดยเรียกสตาร์ชชนิดนี้ว่า “สตาร์ชต้านทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์” (enzyme resistant starch, RS) หรือ “สตาร์ชสุขภาพ”เนื่องมาจากมีผลดีต่อสุขภาพ สตาร์ชอีกส่วนหนึ่งเป็นสตาร์ชที่ถูกย่อยได้ง่ายด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส

SAMPLE

2.2 สตาร์ชต้านทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ RS1

สตาร์ชต้านทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ RS1 (ภาพที่ 2.1) เป็นสตาร์ชจากธรรมชาติที่ห่อหุ้มด้วยโครงสร้างของพืชและสามารถขัดขวางการทำงานของเอนไซม์ที่เข้าไปย่อยสตาร์ช (physically inaccessible starch) โดยสตาร์ชอยู่ในโครงสร้างของเซลล์พืช เช่น ผนังเซลล์ (cell wall) หรือสตาร์ชที่อยู่ในรูปเมทริกซ์ของโปรตีน (protein matrix)[42] ทางเดินอาหารไม่มีเอนไซม์ใดทำลายโครงสร้างที่เป็นเซลลูโลส (celluloses), เฮมิเซลลูโลส (hemicelluloses), ลิกนิน (lignins) หรือส่วนประกอบอื่นของผนังเซลล์พืชได้ นอกจากนั้นสตาร์ชต้านทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ RS1 อาจอยู่ในเมล็ดธัญชาติที่ถูกสี ขัด บดหยาบเป็นบางส่วน หรืออยู่ในสภาพที่ไม่ถูกสี รวมทั้งในพืชตระกูลถั่วและผัก เป็นต้น ซึ่งเป็นแหล่งที่อุดมไปด้วยคาร์โบไฮเดรตที่ถูกหมักได้ (fermentable carbohydrates) ได้แก่ เส้นใยอาหาร สตาร์ชต้านทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ และกลุ่มโอลิโกแซ็กคาไรด์[43] ดังนั้น สตาร์ชต้านทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ RS1 พร้อมกับส่วนของเนื้อเยื่อพืชที่ผ่านลำไส้เล็กไปโดยยังคงรูปเดิม ส่วนใหญ่แล้วสตาร์ชต้านทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ RS1 คงตัวต่อความร้อนในกระบวนการปรุงอาหารตามปกติ จึงสามารถใช้ประโยชน์เป็นส่วนประกอบสำหรับประกอบอาหารได้หลากหลาย[42] อย่างไรก็ตาม สตาร์ชต้านทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ RS1 มีสมบัติต้านทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ได้น้อยลงหากนำไปบด (milling) หรือเคี้ยว รวมถึงผ่านกระบวนการเตรียมและการปรุงอาหารที่ส่งผลให้ผนังเซลล์แตกออก เช่น เมล็ดข้าวสาลีที่เป็นเมล็ด (whole-grain wheat) มีสตาร์ชต้านทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ประมาณร้อยละ 14 แต่ถ้าแปรรูปเป็นฟลาว์ทำให้ปริมาณของสตาร์ชต้านทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ลดลงเหลือร้อยละ 2 เท่านั้น[29]

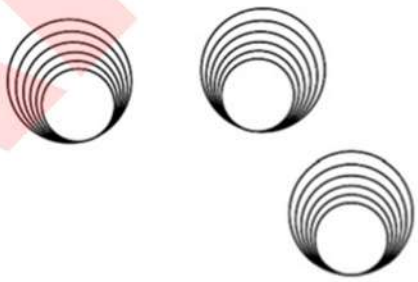


ภาพที่ 2.1 สตาร์ชต้านทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ RS1 (ภาพวาดโดยผู้เขียน)

SAMPLE

2.3 สตาร์ชต้านทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ RS2

สตาร์ชต้านทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ RS2 (ภาพที่ 2.2) เป็นเม็ดสตาร์ช (intact/raw starch granules) จากพืชบางชนิดที่ทนทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ อันเป็นผลจากโครงสร้างตามธรรมชาติของเม็ดสตาร์ชที่เป็นผลึกบางส่วน และอัดตัวกันแน่นจนไม่มีรูหรือช่องเปิดให้เอนไซม์แอลฟาอะไมเลสเข้าไปในเม็ดสตาร์ช เป็นผลทำให้เอนไซม์ในทางเดินอาหารเข้าในเม็ดสตาร์ชได้ยาก[44, 45] การต้านทานมากหรือน้อยต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ ขึ้นอยู่กับแหล่งของพืชที่ได้สตาร์ชมา[46] โดยทั่วไปสตาร์ชจากธัญชาติที่มีผลึกรูปแบบ A ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ได้อย่างรวดเร็วกว่าสตาร์ชมันฝรั่งที่มีผลึกรูปแบบ B ซึ่งอาจเนื่องมาจากขนาดเม็ดสตาร์ชและความแตกต่างกันของอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวและปริมาตร (surface/volume ratio)[47, 48] Williamson และคณะ[49] ได้เปรียบเทียบการต้านทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ของผลึกขนาดเล็กของแอมิโลสที่มี DP เฉลี่ยเท่ากับ 20 พบว่าผลึกรูปแบบ B ถูกไฮโดรไลซ์ได้ช้ากว่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับผลึกรูปแบบ A โดยทั่วไปสตาร์ชต้านทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ RS2 เป็นเม็ดสตาร์ชที่มีความเป็นผลึกรูปแบบ B ซึ่งทนทานต่อเอนไซม์ได้นาน สตาร์ชกลุ่มนี้มีปริมาณของแอมิโลสสูงและมีจำนวนของสายแอมิโลเพกทินจำนวนน้อย นอกจากนั้น อุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันของสตาร์ชต้านทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ RS2 มีค่าที่สูง[50]



ภาพที่ 2.2 สตาร์ชต้านทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ RS2 (ภาพวาดโดยผู้เขียน)

ตัวอย่างของสตาร์ชต้านทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ RS2 ได้แก่ เม็ดสตาร์ชมันฝรั่งและเม็ดสตาร์ชกล้วยดิบที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการปรุงด้วยความร้อน เม็ดสตาร์ชเหล่านี้ต้านทานต่อการถูกย่อยได้สูง[2] ผลกล้วยดิบเป็นแหล่งที่อุดมไปด้วยสตาร์ชต้านทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ RS2 ซึ่ง

SAMPLE

2.4 สตาร์ชต้านทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ RS3

สตาร์ชต้านทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ RS3 เป็นสตาร์ชคืนตัว สตาร์ชตกผลึก หรือสตาร์ชรีโทรเกรด (retrograded starch) ที่เกิดจากกระบวนการรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชที่ถูกเจลาติไนส์ด้วยกระบวนการทางความร้อนและตามด้วยการคืนตัวโดยเฉพาะในส่วนของแอมิโลสที่เกิดเป็นผลึกรีโทรเกรด (retrograded crystallites)[63] การรีโทรเกรเดชันทำให้แอมิโลสมาเรียงตัวกันเป็นโครงสร้างกึ่งผลึกที่ทนต่อความร้อนและไม่ละลายน้ำ สตาร์ชต้านทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ RS3 ไม่อยู่ในรูปเม็ดสตาร์ชเพราะถูกทำลายจากกระบวนการเจลาติไนเซชัน ตัวอย่างสตาร์ชต้านทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ RS3 ได้แก่ สตาร์ชในอาหารที่ผ่านการให้ความร้อนจนสตาร์ชเกิดเจลาติไนส์แล้วเย็นตัวลงและเกิดการคืนตัว

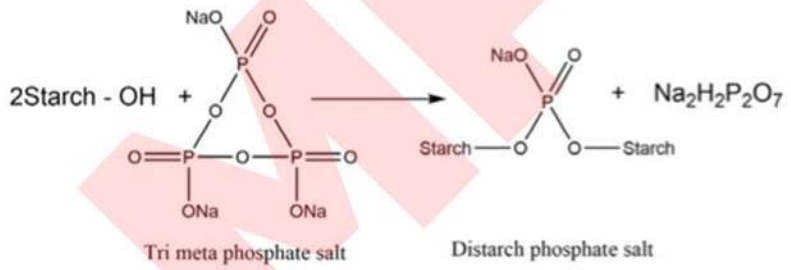
ภาพที่ 2.3 สตาร์ชต้านทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ RS3 (ภาพวาดโดยผู้เขียน)

สตาร์ชต้านทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ RS3 เตรียมได้จากสองขั้นตอน ขั้นตอนแรกคือการทำให้สตาร์ชเกิดเจลาติไนเซชันด้วยการให้ความร้อนแก่เม็ดสตาร์ชที่แขวนตัวในน้ำที่มากพอจนได้อุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิเจลาติไนเซชันซึ่งทำให้เม็ดสตาร์ชแตกออกและละลายอย่างสมบูรณ์[64, 65] แอมิโลสจากเม็ดสตาร์ชละลายอยู่ในสารละลายในรูปของพอลิเมอร์เกลียว (random coil polymer) และในขั้นตอนที่สองแอมิโลสเกิดการตกผลึกอย่างช้า ๆ เมื่อทำให้เย็นลงหรือกำจัดน้ำจากสารละลาย[66] สายพอลิเมอร์แอมิโลสเกิดเรียงตัวเป็นสายเกลียวคู่ที่คงตัวด้วยพันธะไฮโดรเจนจนได้เป็นผลึกที่แข็งแรงและทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์[67-69] ดังแสดงในภาพที่ 2.3 การเตรียมสตาร์ชต้านทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ RS3 อาจเตรียมจากการทำให้สตาร์ชเกิดการหลอมที่อุณหภูมิที่สูงมากกว่า 100 องศาเซลเซียส และทำให้เย็นลงเพื่อให้เกิดการตกตะกอน[70] บางกรณีใช้ตัวทำละลายอินทรีย์เพื่อ

SAMPLE

ใช้ปฏิกิริยาคลอสลิงค์หรือการเชื่อมขวาง (cross-linking) ที่ทำให้สตาร์ชถูกย่อยด้วยเอนไซม์ได้น้อยลง โดยเป็นการเติมกลุ่มฟังก์ชันที่แตกต่างกันเข้าไปในสายโมเลกุลสตาร์ช นอกเหนือจากการดัดแปรทางเคมีอาจดัดแปรด้วยความร้อนที่ทำให้เกิดรีพอลิเมอไรซ์สตาร์ช (repolymerised starch)[42, 63] ได้ด้วย

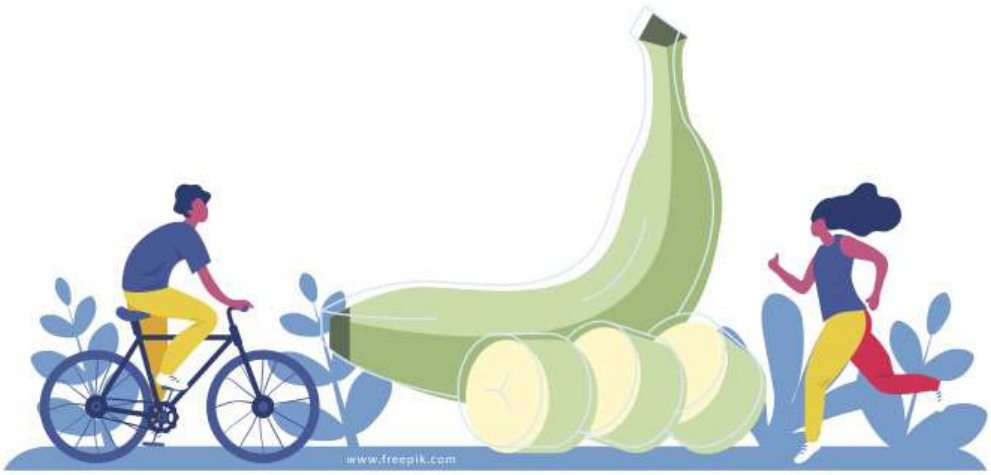
ตัวอย่างของการคลอสลิงค์หรือการเชื่อมขวาง (ภาพที่ 2.4) ทำให้ได้ distarch phosphate ester และเกิดพันธะใหม่ การเพิ่มดีกรีของการเชื่อมขวางทำให้เกิดการยับยั้งโมเลกุลของเอนไซม์ที่เข้าไปในเม็ดสตาร์ช การเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลสตาร์ชยังไปยับยั้งการเคลื่อนที่ของโมเลกุลสตาร์ชที่เข้าไปจับกับโมเลกุลของเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส[108-112] การครอสลิงค์ทำให้ได้อนุพันธ์ที่มีโครงสร้างใหญ่ (bulky) และทำให้เกิดการขัดขวางต่อการจับเป็นโครงสร้างเชิงซ้อนกับเอนไซม์ที่ทำหน้าที่ตามปกติได้ สตาร์ชต้านทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ RS4 แบ่งเป็นกลุ่มย่อยตามค่าการละลายน้ำและตามวิธีการวิเคราะห์หาปริมาณ[9] สตาร์ชที่ครอสลิงค์ด้วยอิพิคลอโรไฮดริน (epichlorohydrin) แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการยับยั้งเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสได้ด้วย[113]



ภาพที่ 2.4 สตาร์ชต้านทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ RS4 (ภาพวาดโดยผู้เขียน)

สตาร์ชดัดแปรทางเคมี acetylated starch ที่ดัดแปรสตาร์ชจากพืช papilionaceous plants ทำให้ได้สตาร์ชที่ต้านต่อเอนไซม์ที่มากขึ้น ซึ่งพบได้เช่นกันในสตาร์ชชนิดนี้ที่ดัดแปรโดยกระบวนการ hydroxypropylation การต้านทานต่อเอนไซม์ยิ่งสูงมากขึ้นเมื่อดีกรีของการแทนที่สูงขึ้น[114, 115] โดย hydroxypropyl distarch phosphate ที่ได้มีความไวน้อยลงต่อเอนไซม์ถึงสองเท่าเมื่อเปรียบเทียบกับสตาร์ชธรรมดา ส่วนสตาร์ช acetylated distarch phosphate ต้านต่อเอนไซม์ได้บ้าง[116] สมบัติของสตาร์ชต้านทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ RS4 พบได้ด้วยในมอโนสตาร์ชฟอสเฟต (monostarch phosphate) ในกรณีนี้ดีกรีของการต้านต่อเอนไซม์เพิ่มขึ้นตามดีกรีของการแทนที่ด้วยกรดฟอสฟอริก (phosphoric acid)[117] ผลิตภัณฑ์ของมอโนสตาร์ชฟอสเฟตที่ให้ความร้อนพร้อมกันกับไกลซีน (glycine) มีคุณลักษณะในการต้านทานต่อเอนไซม์ที่สูงกว่ามอโนสตาร์ชฟอสเฟตมาก

SAMPLE



สตาร์ชต้านทานต่อการย่อยเป็นอาหารเสริมสุขภาพที่มีประโยชน์ต่อร่างกาย เมื่อรับประทานจะไม่ถูกย่อยที่กระเพาะอาหารและลำไส้เล็ก เมื่อผ่านเข้าสู่ลำไส้ใหญ่จะเป็นอาหารให้แก่โพรไบโอติกซึ่งภายหลังการหมักจะก่อให้เกิดผลดีต่อสุขภาพ

ในพืชทั่วไปพบสตาร์ชต้านทานต่อการย่อยในรูปเม็ดสตาร์ชหรือเม็ดสตาร์ชที่ถูกห่อหุ้มจากธรรมชาติแต่พบปริมาณน้อยทำให้ต้องมีการดัดแปรทางกายภาพหรือทางเคมีเพื่อเพิ่มปริมาณ สำหรับผลกล้วยดิบพบสตาร์ชต้านทานการย่อยปริมาณมาก การพัฒนาวิธีวิเคราะห์หาปริมาณสตาร์ชต้านทานต่อการย่อยที่สะดวกและขั้นตอนน้อยจะทำให้เกิดมาตรฐานในผลิตภัณฑ์และสร้างความเชื่อมั่นสำหรับผู้บริโภคได้มากขึ้น

การพัฒนาผลิตภัณฑ์สตาร์ชที่ไม่มีสมบัติต้านทานต่อการย่อยซึ่งเป็นสตาร์ชปริมาณมากในผลผลิตทางการเกษตรด้วยการใช้ระบบการนำส่งที่ใช้หลักการเดียวกับการนำส่งตัวยาไปยังลำไส้ใหญ่นับว่ามีความสำคัญที่จะเพิ่มมูลค่าให้กับสตาร์ชในอนาคตต่อไปได้

CHIANG MAI
UNIVERSITY PRESS

ISBN (e-Book) : 978-616-398-596-5
9 786163 985965