



รายงานการวิจัย

การเพิ่มปริมาณแป้งต้านทานการย่อยในข้าวพันธุ์พื้นเมืองที่ปลูกในจังหวัด
เพชรบูรณ์

**Increasing Resistant Starch in Local Rice Varieties Grown
in Phetchabun Province**

ศศิธร แท่นทอง และคณะ
สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์

ประจำปีงบประมาณ 2562

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การเพิ่มปริมาณแป้งต้านทานการย่อยในข้าวพันธุ์พื้นเมืองที่ปลูกในจังหวัด เพชรบูรณ์

Increasing Resistant Starch in Local Rice Varieties Grown in Phetchabun Province

ศศิธร แท่นทอง

สาขาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

อัครกะบัณฑาน ปาทาน

สาขาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน พิจารณาผ่านความเห็นชอบจากสำนักงาน
คณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประเภทโครงการวิจัย และนวัตกรรมเพื่อสร้างองค์ความรู้พื้นฐาน
ของประเทศ มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์
ประจำปีงบประมาณ 2562

(ก)

ชื่องานวิจัย	การเพิ่มปริมาณแป้งด้านทานการย่อยในข้าวพันธุ์พื้นเมืองที่ปลูกใน จังหวัดเพชรบูรณ์
ผู้วิจัย	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศศิธร แทนทอง
ผู้ร่วมวิจัย	อาจารย์อัครกะบัทคาน ปาทาน
สาขาวิชา	เคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ ปีที่เสร็จวิจัย 2562

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มปริมาณแป้งทนย่อยในข้าวพันธุ์ต่างๆ โดยใช้ข้าวหอมมะลิ ข้าว กข 43 ข้าวลิ้มผัว ข้าวหอมนิล ข้าวขาวม้ง ข้าวพญาลิ้มแครง และข้าวร่องถนนมาทดลองหุงด้วยวิธีต่างๆ แล้วตรวจวิเคราะห์หาปริมาณแป้งทนย่อย พบว่าข้าวหุงมีแป้งทนย่อย 7.15 – 16.3% ต่างกันขึ้นกับการขัดสีและพันธุ์ของข้าว ข้าวกล้องมีค่าแป้งทนย่อยสูงกว่าข้าวขาว พบวิธีการเพิ่มแป้งด้านทานการย่อยในข้าวแต่ละพันธุ์ดังนี้ 1) ข้าวหอมมะลิหุงด้วยวิธีต่างๆมีแป้งทนย่อย 6.52-7.56% พบว่าแป้งทนย่อยในข้าวดิบมีค่าใกล้เคียงกับข้าวหุง 2) ข้าว กข 43 เมื่อหุงด้วยวิธีต่างๆมีแป้งทนย่อย 6.57-8.81% พบว่าวิธีอัลตราโซนิกสแล้วใช้หมอนึ่งอัดไอน้ำแล้วแช่ตู้เย็นทำให้แป้งทนย่อยเพิ่มขึ้น 18.09% เพิ่มมากที่สุด 3) การหุงข้าวกล้องลิ้มผัวด้วยวิธีไมโครเวฟแล้วแช่แข็งจะเพิ่มแป้งทนย่อย 26.05% 4) ข้าวขาวม้งหุงด้วยวิธีต่างๆมีแป้งทนย่อย 7.61-10.42% พบว่าวิธีหุงด้วยหม้อหุงข้าวทำให้มีแป้งทนย่อยมากที่สุด คือเพิ่มขึ้น 37.69% 5) ข้าวพญาลิ้มแครงหุงด้วยวิธีต่างๆ พบแป้งทนย่อย 8.61-9.46% การหุงแล้วแช่แข็ง 60 ชม.ทำให้มีแป้งทนย่อยเพิ่มสูงสุดคือเพิ่ม 28.9% 6) ข้าวร่องถนนที่หุงด้วยวิธีต่างๆ พบปริมาณแป้งทนย่อย 8.86-11.10 % การหุงด้วยหม้อหุงข้าวจะมีแป้งทนย่อยมากที่สุด เมื่อนำข้าวไปวัดสเปกตรัมโดย FTIR พบว่าสามารถบอกความเป็นข้าวกล้องและข้าวขัดขาวได้

คำสำคัญ : ข้าวกล้อง, FTIR

Research Title Increasing Resistant Starch in Local Rice Varieties Grown in
Phetchabun Province

Name Assistant Professor Dr. Sasithon Thaenthong
Mr. Akgabutkhan Pathan

Program Chemistry, Faculty of Science and Technology,
Phetchabun Rajabhat University *****Year***** 2019

Abstract

Increasing the amount of resistant starch in various rice varieties was the purpose of this research. Rice varieties used in the experiment were Jasmine rice, RD 43, Luem Pua, Black Jasmine Rice, White Hmong, Paya Luem Kaeng, and Rong Thanon. First, rices will be cooked in five methods and then analyzed for the amount of resistant starch. It was found that cooked rice had 7.15 - 16.3% of resistant starch depend on polishing and varieties. Brown rice had higher resistant starch than polished rice. Methods of increasing the amount of resistant starch in rice varieties were found that 1) Resistant starch in jasmine rice were 6.52-7.56% while raw rice had resistant starch similar to cooked rice 2) RD 43 had 6.57-8.81% of resistant starch, while the best method for increasing resistant starch in this rice to 18.09% was ultrasonic, autoclaving, and chilling, respectively 3) Luem Pua, cooked brown rice by microwave and chilling was increased resistant starch to 26.05% 4) White Hmong had 7.61-10.42% of resistant starch and cooking by rice cooker was increased resistant starch to 37.69% 5) Paya Luem Kaeng had 8.61-9.46% of resistant starch, while cooking by rice cooker and chilling for 60 hours was the best method for increasing resistant starch to 28.9% 6) Resistant starch in Rong Thanon was 8.86-11.10% and the best method was cooking by rice cooker. Finally, FTIR spectroscopy indicated the difference between polished rice and brown rice.

Keywords : Brown rice, FTIR

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยการวิจัย เรื่องการเพิ่มปริมาณแป้งด้านทานการย่อยในข้าวพันธุ์พื้นเมืองที่ปลูกใน
จังหวัดเพชรบูรณ์ นี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความสะดวกในการใช้เครื่องมือและ
อุปกรณ์ต่าง ๆ ได้รับความร่วมมือจากเกษตรกร ข้าพเจ้าขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนา และ
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ ตลอดจนอาจารย์และเจ้าหน้าที่
ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในด้านต่าง ๆ

ศศิธร แทนทอง และคณะ

สิงหาคม 2562

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ ภาษาไทย	ก
บทคัดย่อ ภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
1.3 กรอบแนวคิดของโครงการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ข้าว	5
2.2 แป้ง	11
2.3 แป้งทนย่อย	15
2.4 การวิเคราะห์ปริมาณแป้งทนย่อย	15
2.5 สเปกตรัมแป้งทนย่อยจากFTIR	15
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	23
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	33
3.1 การตรวจปริมาณแป้งทนย่อย	33
3.2 วิธีเพิ่มปริมาณแป้งทนย่อยในข้าว	37
3.3 การตรวจสอบสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของข้าวที่ผ่านการทำให้เป็นข้าวทนย่อย	38
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	41
4.1 ผลการตรวจปริมาณแป้งทนย่อย	41
4.2 ผลการทดลองหาวิธีเพิ่มปริมาณแป้งทนย่อยในข้าว	48
บทที่ 5 สรุปผลและวิจารณ์ผลการทดลอง	64

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
5.1 ผลการตรวจปริมาณแป้งทนย่อยในข้าว 9 ชนิด	64
5.2 ผลการทดลองหาวิธีเพิ่มปริมาณแป้งทนย่อยในข้าว	65
บรรณานุกรม	69
ภาคผนวก	73
ภาคผนวก ก ประมวลภาพงานวิจัย	73
ภาคผนวก ข การจัดประชุมอบรม	76
ประวัติผู้ทำวิจัย	87

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1	ระยะเวลาและกิจกรรมที่ทำการวิจัย 4
2.1	ประเภทและแหล่งอาหารที่มีค่าดัชนีน้ำตาลต่างๆ 20
3.1	ตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย 33
3.2	สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง 34
3.3	เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง 35
4.1	ผลการทดสอบความเที่ยงในการหาปริมาณแป้งทนย่อยในข้าวภข 43 41
4.2	ผลการทดสอบความเที่ยงในการหาปริมาณแป้งทนย่อยในข้าวหอมมะลิ 41
4.3	ค่า %RS ของ ข้าวภข 43 หุงใส่น้ำมันแช่แข็ง 12 ชม. 42
4.4	ผลการตรวจปริมาณแป้งทนย่อยในข้าวพันธุ์ต่างๆ 42
4.5	แสดงผลการหุงข้าว ภข43 ด้วยแบบที่ 1-5 49
4.6	แสดงผลการหุงข้าว ภข43 ด้วยวิธีด้วยวิธีที่ 1-2 เก็บแช่ 6 องศาเซลเซียส 50
4.7	แสดงผลMolecular order and Chemical shifts ของข้าวภข 43 ที่ทดลองหุงด้วยวิธีต่างๆ 53
4.8	แสดงผลการหาปริมาณแป้งทนย่อยข้าวหอมมะลิที่หุงด้วยวิธีต่างๆ 55
4.9	Molecular orde and Chemical shifts ของข้าวหอมมะลิที่หุงด้วยวิธีต่างๆ 56
4.10	แสดงผลการหุงข้าวρόงถนนด้วยวิธีต่างๆ 58
4.11	Molecular order and Chemical shifts ของข้าวρόงถนนที่หุงด้วยวิธีต่างๆ 59
4.12	แสดงผลการหุงข้าวพญาลีมแกลงด้วยวิธีต่างๆ 59
4.13	Molecular order and Chemical shifts ข้าวพญาลีมแกลงที่หุงด้วยวิธีต่างๆ 61
4.14	แสดงผลการหุงข้าวขาม้งด้วยวิธีต่างๆ 61
4.14	Molecular order and Chemical shifts ข้าวพญาลีมแกลงที่หุงด้วยวิธีต่างๆ 63
4.15	แสดงผลการหุงข้าวกล้องลิ้มผิวด้วยวิธีต่างๆ 63
4.16	Molecular order and Chemical shifts ของข้าวกล้องลิ้มผิวไป ทดลองหุงด้วยวิธีต่างๆ 64

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ส่วนประกอบในเมล็ดข้าว	10
2.2	โครงสร้างของอะไมโลส	13
2.3	โครงสร้างของอะไมโลเปคติน	13
2.4	ประเภทของแป้งทนย่อยประเภทที่ 1	16
2.5	ประเภทของแป้งทนย่อยประเภทที่ 2	17
2.6	ประเภทของแป้งทนย่อยประเภทที่ 3	17
2.7	ประเภทของแป้งทนย่อยประเภทที่ 4	18
4.1	กราฟแสดงค่าแป้งทนย่อยในข้าว 9 ชนิด	43
4.2	แสดงสเปกตรัมของข้าวหอมมะลิเมื่อวัดด้วย IR	43
4.3	แสดงสเปกตรัมของข้าวกล้องหอมมะลิเมื่อวัดด้วย IR	44
4.4	แสดงสเปกตรัมของข้าว กข 43 เมื่อวัดด้วย IR	44
4.5	แสดงสเปกตรัมของข้าวกล้องกข43 เมื่อวัดด้วย IR	45
4.6	แสดงสเปกตรัมของข้าวกล้องลิ้มฟัวเมื่อวัดด้วย IR	45
4.7	แสดงสเปกตรัมของข้าวกล้องหอมนิล เมื่อวัดด้วย IR	46
4.8	แสดงสเปกตรัมของข้าวขาวม้งเมื่อวัดด้วย IR	46
4.9	แสดงสเปกตรัมของข้าวรองถนนเมื่อวัดด้วย IR	47
4.10	แสดงสเปกตรัมของข้าวพญาลิ้มแวง เมื่อวัดด้วย IR	47
4.11	กราฟแสดงผลการหุงข้าว กข43 ด้วยวิธีธรรมดา และวิธีหุงใส่น้ำมัน แล้วแช่ตู้เย็นอุณหภูมิ 6 องศาเซลเซียส	50
4.11	แสดงสเปกตรัมของข้าว กข 43 ที่หุงแบบต่างๆ เมื่อวัดด้วย IR	52
4.12	แสดงภาพจากกล้องจุลทรรศน์ของข้าว กข43 ที่หุงแบบต่างๆ	54
4.13	แสดงสเปกตรัมของข้าวหอมมะลิเมื่อวัดด้วยเครื่อง FTIR	56
4.14	แสดงการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ของข้าวหอมมะลิที่หุงแบบต่างๆ	57
4.15	สเปกตรัมรวมของข้าวรองถนนที่หุงด้วยวิธีต่างๆ วัดด้วยเครื่อง FTIR	58
4.16	สเปกตรัมรวมของข้าวพญาลิ้มแวงวัดด้วยเครื่อง FTIR	60
4.17	สเปกตรัม FTIR ข้าวขาวม้งที่หุงด้วยวิธีต่างๆ	62

รูปที่	หน้า
4.18	สเปกตรัม FTIR ข้าวกล้องลิ้มฟัวที่ผ่านการหุงด้วยวิธีต่างๆ 64
ผน.1	เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible spectrophotometer) 74
ผน.2.	เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (water bath) 74
ผน.3.	เครื่องพีเอชมิเตอร์ 74
ผน.4.	เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง 75
ผน.5.	การระเหยตัวทำละลายออกจากไขมันที่สกัดได้ 75
ผน.6.	การอบรมเชิงปฏิบัติการการเพิ่มปริมาณแป้งทนย่อย ในข้าวให้เกษตรกรตำบลนาขม 77
ผน.7.	นิทรรศการการเพิ่มปริมาณแป้งทนย่อยในข้าวให้เกษตรกร อำเภอเมืองเพชรบูรณ์ 78

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ข้าวเป็นอาหารหลักของคนไทย ในอดีตมีการปลูกเพื่อไว้บริโภค ชาวบ้านเกือบทุกบ้านจะปลูกข้าว มีพันธุ์ข้าวหลากหลายเก็บไว้ต่อกันมาจากรุ่นสู่รุ่น ในอดีตมีการทำข้าวซ้อมมือเองไว้บริโภค ปัจจุบันกระแสความเจริญได้เข้ามามีเครื่องสีข้าว ทำให้ชาวบ้านหันไปนิยมบริโภคข้าวขัดสีจนขาว ทำให้คุณค่าอาหารที่สำคัญ วิตามิน และใยอาหารที่มีอยู่ในข้าวกลืนหายไป เมื่อบริโภคข้าวขัดขาวจะมีค่าดัชนีน้ำตาล (Glycemic Index, GI) สูง คือมีค่ามากกว่า 70 (จิรนาถ บุญคง, 2554) แป้งที่อยู่ในข้าวจะกลายสภาพเป็นน้ำตาลในกระแสเลือดอย่างรวดเร็ว ทำให้อินซูลินจากตับหลังมาอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้มีความเสี่ยงต่อการเป็นเบาหวาน โรคอ้วน การรับประทานอาหารที่มีค่า GI ต่ำจะส่งผลทำให้ลดความเสี่ยงต่อโรคดังกล่าวได้ อาหารที่มีค่า GI ต่ำ อย่างเช่น ธัญพืชและผัก สามารถช่วยควบคุมให้ระดับน้ำตาลเข้าสู่กระแสเลือดอย่างช้าๆ และสม่ำเสมอ ทำให้ระดับน้ำตาลในเลือดอยู่ในระดับปกติได้ ช่วยเพิ่มความรู้สึกอิ่มและลดความอยากอาหาร ระดับอินซูลินลดลง ส่งผลต่อการลดระดับไขมัน ควบคุมระดับคอเลสเตอรอล ลดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคหัวใจและโรคเบาหวาน เช่นเดียวกับอาหารที่มีแป้งทนย่อย (Resistant starch, RS) ที่จะถูกย่อยประมาณ 5-7 ชั่วโมงหลังการรับประทาน ทำให้ระดับน้ำตาลในเลือดและระดับอินซูลินลดลง ส่วนอาหารที่มีแป้งที่ถูกทำให้ร้อนและเกิดการสุกจะถูกย่อยทันทีหลังรับประทาน ทำให้ระดับน้ำตาลในเลือดและระดับอินซูลินเพิ่มขึ้นหลังการรับประทาน (สุนันทา ทองทา, 2553)

ข้าวทนย่อยจะมีแป้งทนย่อย ทำให้มีค่า GI ต่ำ ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะนำข้าวไปผ่านกระบวนการที่ทำให้ข้าวมีแป้งทนย่อยเพิ่มขึ้น การเพิ่มปริมาณแป้งทนย่อยในข้าวมีประโยชน์มากต่อผู้บริโภค มีอาหารที่ดีต่อสุขภาพ อีกทั้งเป็นการป้องกันการเกิดโรค เป็นวิธีที่จะทำให้ประชาชนสามารถกินอาหารที่เปรียบเสมือนยา ดังนั้น ผู้วิจัยจึงหาวิธีการเพิ่มปริมาณแป้งทนย่อยในข้าวพันธุ์ต่างๆ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

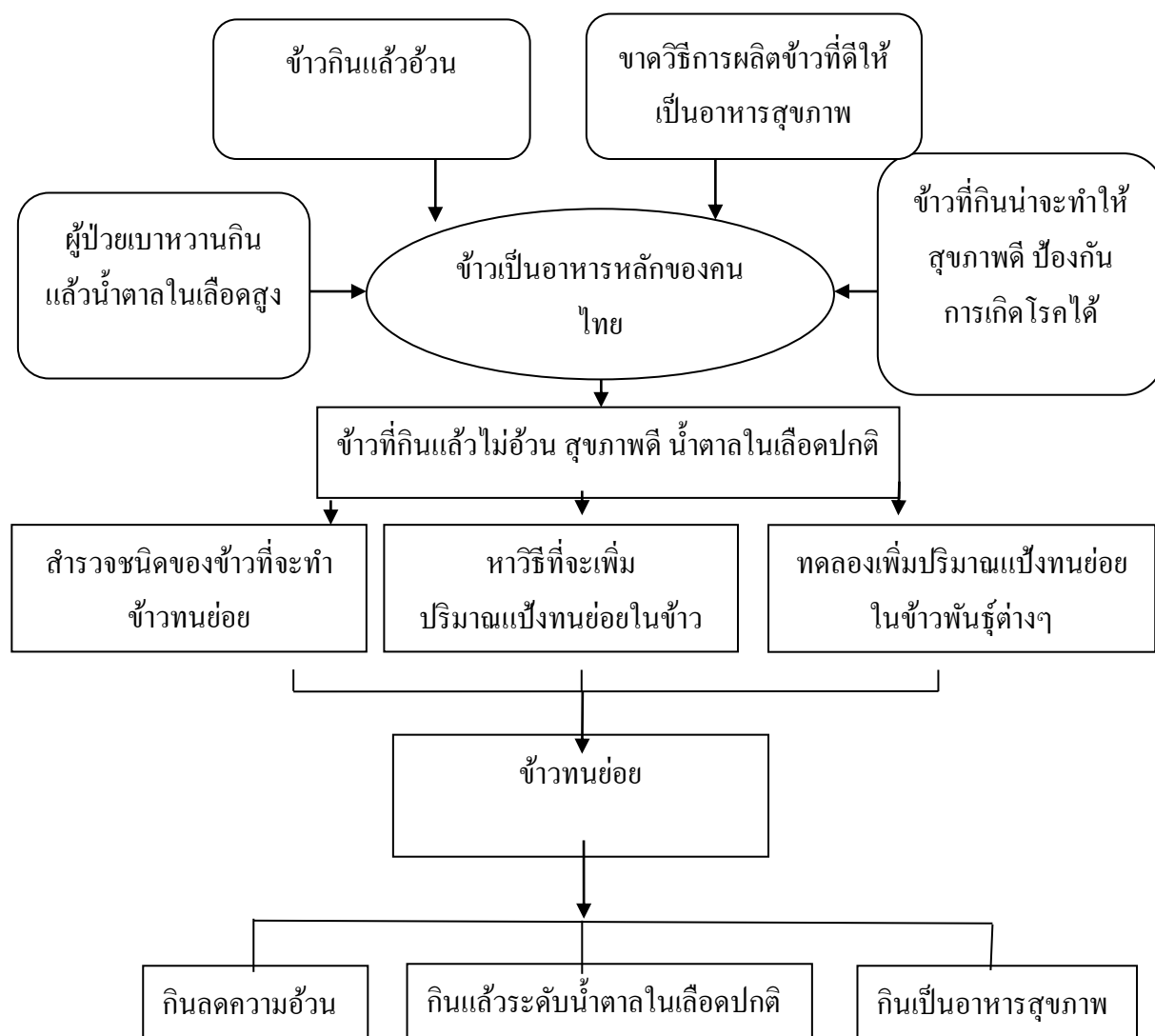
เพื่อเพิ่มปริมาณแป้งทนย่อยในข้าวพันธุ์ต่างๆ

1.3 ทฤษฎี สมมุติฐาน (ถ้ามี) กรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

1.3.1 สมมุติฐาน

สามารถเพิ่มเพิ่มปริมาณแป้งทนย่อยในข้าวพันธุ์ต่างๆ

1.3.2 กรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย



1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ด้านวิชาการ ได้วิธีการเพิ่มปริมาณแป้งทนย่อยในข้าวพันธุ์ต่างๆ

1.4.2 ด้านนโยบาย เป็นการวิจัยและพัฒนา และนวัตกรรมข้าวตามนโยบายที่ 8. การ

พัฒนา

และส่งเสริมการใช้ประโยชน์จากวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี การวิจัยและ พัฒนา และนวัตกรรม

1.4.3 เชิงพาณิชย์ ได้ข้าวที่มีแป้งน้อยทำให้เพิ่มมูลค่าข้าว

1.4.4 ด้านสังคมและชุมชน ทำให้ประชาชนรับประทานข้าวที่มีแป้งน้อยซึ่งอาหารที่มีค่า GI ต่ำ สามารถช่วยควบคุมให้ระดับน้ำตาลเข้าสู่กระแสเลือดอย่างช้าๆ และสม่ำเสมอ ทำให้ระดับน้ำตาลในเลือดอยู่ในระดับปกติได้ ช่วยเพิ่มความรู้สึกล้ม และลดความอยากอาหาร ระดับอินซูลิน ลดลง ส่งผลต่อการลดระดับไขมัน ควบคุมระดับคอเลสเตอรอล ลดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคหัวใจ และโรคเบาหวาน

1.5 ระยะเวลา และสถานที่ทำการวิจัย

สถานที่ทำการวิจัยที่มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ และกลุ่มวิสาหกิจชุมชนผลิตข้าวปลอดสารพิษขอนแก่น ระยะเวลาและกิจกรรมที่ทำการวิจัยดังตารางที่ 1.1

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การวิจัยครั้งนี้ได้ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำข้าวทนย่อยดังนี้ ดังต่อไปนี้

2.1 ข้าว

คนไทยส่วนใหญ่รับประทานข้าววันละสามมื้อ มีทั้งข้าวเจ้าและข้าวเหนียว ข้าวมีอยู่หลายสายพันธุ์ แต่ละสายพันธุ์มีขนาดเมล็ด สี กลิ่น ความนุ่ม ความเหนียว ความอร่อยที่แตกต่างกันไป ข้าวเกิดบนโลกมานานหลายร้อยล้านปีมาแล้ว เดิมข้าวไม่ได้ปลูกตามไร่นาเหมือนปัจจุบันที่เรียกว่า ข้าวปลูก (Cultivated rice) แต่เป็นข้าวป่า (Wild rice) ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ คนรู้จักปลูกข้าวมานานตั้งแต่ยุคหินใหม่ คนกว่าครึ่งโลกกินข้าวเป็นอาหารหลัก คนไทยรู้จักปลูกข้าวมานานตั้งแต่หลายพันปีก่อน พบชุมชนในอีสานที่บ้านเชียง จังหวัดอุดรธานีรู้จักปลูกข้าวเมื่อราว 5000 ปีก่อน แผ่นดินไทยมีความอุดมสมบูรณ์จึงเป็นแหล่งปลูกข้าวและส่งออกข้าวในอันดับต้นๆ ของโลก มีพันธุ์ข้าวหอมมะลิที่มีชื่อเสียงว่าเป็นข้าวอร่อยที่สุดในโลกด้วย ประเทศไทยเรามีพันธุ์ข้าวประมาณ 24,000 ตัวอย่างเชื้อพันธุ์ที่เก็บรวบรวมและอนุรักษ์ไว้ในธนาคารเชื้อพันธุ์ข้าว ข้าวเป็นพืชล้มลุกใบเลี้ยงเดี่ยวตระกูลหญ้า (Gramineae หรือ Poaceae) สกุลออไรซา (Oryza) มีความหลากหลายทางนิเวศสูง เจริญเติบโตได้ดีในเขตร้อนและอบอุ่น ข้าวมีการแพร่กระจายอย่างกว้างขวางไปทั่วโลก ตั้งแต่เส้นรุ้งที่ 53 องศาเหนือ ถึง 35 องศาใต้ และเจริญเติบโตได้ตั้งแต่ระดับน้ำทะเลจนถึงความสูง 2,500 เมตร หรือมากกว่า ข้าวยังเป็นพืชเดียวที่เจริญเติบโตได้ทั้งในบริเวณที่ไม่มีน้ำขังหรือมีน้ำขังลึกมากกว่า 4 เมตร ความหลากหลายทางชนิดพันธุ์ของข้าวก็มีสูง ปัจจุบันมีข้าวแพร่กระจายทั่วโลกอย่างน้อย 23 ชนิด ในจำนวนนี้เป็นข้าวป่า 21 ชนิด และข้าวปลูกเพื่อการบริโภคเพียง 2 ชนิด คือ

1. ข้าวปลูกเอเชีย (*Oryza sativa* L.) ซึ่งมีสามอยู่ชนิด ได้แก่ ข้าวอินดิกา ข้าวจาปอนิกา และข้าวจาวานิกา

2. ข้าวปลูกแอฟริกา (*O. glaberrima* Steud.)

พันธุ์ข้าวในปัจจุบันเป็นผลมาจากการคัดเลือกพันธุ์ตามความต้องการของมนุษย์ และการปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมของข้าว ทำให้ข้าวป่าเกิดวิวัฒนาการด้วยตัวเอง และมีการผสมข้ามพันธุ์ตามธรรมชาติระหว่างข้าวป่ากับข้าวป่า หรือข้าวป่ากับข้าวปลูก เช่น ทำให้ข้าวโตเร็ว เมล็ดไม่มีหาง มีรสอร่อย ส่งผลให้พันธุ์ข้าวมีความหลากหลายทางพันธุกรรมตามไปด้วย จึงมีการกำหนด GS. NO. หมายถึง Genetic stock number หรือ หมายเลขประจำตัวอย่างพันธุ์ชนิดข้าว นอกจากนี้ ข้าวยังจำแนกตามชนิดเนื้อแป้งในเมล็ดข้าว ได้แก่

1. ข้าวเหนียว (glutinous rice) เป็นข้าวที่มีองค์ประกอบของแป้งเป็นอะไมโลเปคติน (amylopectin) เป็นหลักและมีอะไมโลส (amylose) เพียงเล็กน้อยหรือไม่มีเลย
2. ข้าวเจ้า (non-glutinous rice) จะมีอะไมโลสประมาณ 7-34% ที่เหลือเป็นอะไมโลเปคติน

ข้าวยังสามารถจำแนกได้ตามนิเวศการปลูกข้าว (มูลนิธข้าวไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ , 2552 ; ศุมน อมรวิวัฒน์, 2553) มีอยู่ 4 ชนิดคือ

1. ข้าวไร่ คือข้าวที่ไม่ชอบน้ำขัง เติบโตได้อาศัยน้ำฝนเท่านั้น ข้าวที่ปลูกได้ในที่ดอน หรือที่ลุ่มตามไหล่เขา โดยไม่มีน้ำขัง ปลูกโดยขุดหลุมหยอดเมล็ด

2. ข้าวนาสวน คือข้าวที่ปลูกได้ดีในนาที่มีน้ำขัง ไม่เกิน 50 ซม. มีการสร้างคันนาขังน้ำฝน หรือน้ำจากลำธาร

3. ข้าวน้ำลึกคือ ข้าวที่ปลูกได้ในน้ำลึก 50 ซม. ถึง 100 ซม.

4. ข้าวขึ้นน้ำ คือ ข้าวที่ปลูกได้ในน้ำลึกมากกว่า 100 ซม. อยู่ได้ในน้ำลึกเมื่อน้ำหลาก ข้าวจะโตเร็วทันกับน้ำท่วมสูง

ข้าวพันธุ์พื้นเมืองของไทยมีอยู่มากมายหลายชนิด อาทิเช่น ข้าวเล็บนก ลูกแดง เหลืองควายดำ เหลืองประทิว ข้าวเรือนหัก ข้าวย้งหัก หอมนายพล หอมเดือนสาม ชาวบ้านนา แจ็กเซย ฯลฯ ประเทศไทยจึงมีพันธุ์ข้าวหลากหลายและเป็นศูนย์กลางของการแพร่กระจายพันธุ์ข้าวของโลกที่สำคัญแห่งหนึ่ง จากการศึกษาพบว่าทั่วโลกมีพันธุ์ข้าวกว่า 100,000 พันธุ์ ข้าวจึงเป็นพืชที่มีความหลากหลายมากที่สุดชนิดหนึ่ง ข้าวที่ขายกันในตลาดโลกเกือบทั้งหมดเป็นข้าวจากเอเชีย ข้าวพันธุ์พื้นเมืองของไทยมีความหลากหลายมาก พันธุกรรมของพันธุ์ข้าวแต่ละพันธุ์มีความแตกต่างกัน อนึ่ง ด้วยแต่ละภาคของประเทศไทยยังมีความแตกต่างกันทั้งสภาพทางภูมิประเทศและภูมิอากาศไทยจึงมีพื้นที่ๆ เหมาะสำหรับปลูกข้าวประเภทต่างๆ ทั้งข้าวไร่ ข้าวนาสวนและข้าวน้ำลึก พันธุ์ข้าวแต่ละชนิดมีความเฉพาะเจาะจงที่สามารถปรับตัวเข้ากับภูมิประเทศได้ดี ความหลากหลายของพันธุ์ข้าวนี้เกิดมาจากการคัดเลือกโดยวิวัฒนาการทางธรรมชาติ และการคัดเลือกของชาวนามาตั้งแต่อดีต เพื่อให้ได้พันธุ์ข้าวที่เหมาะสมและตรงกับความต้องการของคนในท้องถิ่นนั้นๆ ทำให้มีข้าวหลากหลายสายพันธุ์มาก แต่ปัจจุบันนี้ชาวนาไทยส่วนใหญ่ปลูกข้าวอยู่เพียงประมาณ 10 – 15 พันธุ์ ซึ่งล้วนเป็นพันธุ์ข้าวปรับปรุงที่ให้ผลผลิตสูง เช่น ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ชัยนาท 1 สุพรรณบุรี 1 ปทุมธานี 1 พิชญโลก 2 ถ้าเป็นข้าวเหนียวก็จะเป็นพันธุ์ กข 6 ข้าวพันธุ์ปรับปรุงจะเป็นข้าวไม่ไวต่อช่วงแสง อายุการเก็บเกี่ยวสั้น ปลูกได้ปีละหลายครั้ง ทั้งนาปรังและนาปี ดันเตี้ยไม่หักล้มง่าย ตอบสนองต่อปุ๋ยและให้ผลผลิตสูง มูลนิธิข้าวไทยฯ ได้ตระหนักถึงความสำคัญของการอนุรักษ์และคุ้มครองทรัพยากรพันธุกรรมของข้าว

ไทย และกังวลถึงปัญหาต่างๆ ที่ได้เกิดขึ้นอันเกี่ยวข้องกับเรื่องพันธุ์ข้าวไทยทั้งในปัจจุบัน และความรุนแรงของปัญหาที่จะตามมาในอนาคต (มูลนิธิข้าวไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, 2554 : หน้า 97-99)

เมื่อประเทศไทยใช้เทคโนโลยีในการสร้างพันธุ์ใหม่ให้ผลผลิตสูง ขายได้ราคาดี โดยเฉพาะโครงการประกันราคาข้าวและโครงการรับจำนำข้าวของรัฐบาล ทำให้เกษตรกรหันมาปลูกข้าวนาปรัง ปลูกข้าวพันธุ์ปรับปรุงพันธุ์ใหม่ให้ผลผลิตสูง ข้าวที่ปลูกตั้งแต่ปุ๋ยตายายคือข้าวพื้นเมืองหลายพันธุ์จึงสูญหายไปจากท้องถื่น ข้าวพันธุ์ใหม่ให้ผลผลิตสูงแต่มีข้อด้อยต้องพึ่งปุ๋ยพึ่งยาฆ่าแมลงทุกขั้นตอนการปลูก ทำให้ต้นทุนการทำนาสูง ดินเสื่อมคุณภาพ และทำให้ชาวนาเจ็บป่วยจากพิษสารเคมีด้วย ชาวนาที่ตระหนักและยังรักษาพันธุ์พื้นเมืองไว้ก็หันมาปลูกข้าวพื้นเมือง (สุวัฒน์ อัสวไชยชาญ, 2551)

สำเริง แซ่ตัน (2553) ได้วิจัยการร่วมมือเครือข่ายงานอนุรักษ์พันธุ์ข้าวพื้นเมืองในภาคใต้ พบว่า พันธุ์ข้าวพื้นเมืองเป็นพันธุ์กรรมที่มีความหลากหลายแต่ได้มีการปลูกลดลงเนื่องจากพันธุ์ข้าวใหม่ๆ ที่มีการพัฒนาพันธุ์เข้ามาแทนที่พันธุ์พื้นเมือง

ประวีณา มณีรัตนรุ่งโรจน์ และคณะ (2555) ได้วิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและคุณภาพทางเคมีบางประการของเมล็ดข้าวพื้นเมืองภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย โดยการชั่งน้ำหนัก วัดขนาดความกว้าง ความยาว ความหนาของเมล็ดข้าวเปลือกและข้าวกล้อง วัดอัตราการยีดตัวของเมล็ดข้าวสุก วัดอัตราการซับน้ำของเมล็ดข้าว ตรวจสอบลักษณะทางเคมี คือหาปริมาณโปรตีน อะไมโลส ไกมันและคาร์โบไฮเดรต รวมทั้งวิตามินบี 1 วิตามินบี 2 วิตามินบี 3 และวิตามินบี 6 ผลการตรวจสอบข้าว 15 สายพันธุ์ ซึ่งพบว่าข้าวเปลือก และข้าวกล้องพันธุ์เจ้าเหลือง (GS no: 10166) มีขนาดเมล็ดยาวที่สุด ในขณะที่พันธุ์ข้าวเจ้าหางหมูใหญ่ (GS no: 554) มีความยาวน้อยที่สุด ข้าวพันธุ์ข้าวเจ้าหางหมูใหญ่ (GS no: 555) มีอัตราการยีดตัวของข้าวสุกสูงสุด ข้าวพันธุ์เหนียวดอกจาน (GS no: NRM 09003) มีอัตราการดูดซับน้ำสูงสุด จากการตรวจสอบคุณภาพทางเคมี พบว่ามีปริมาณโปรตีนระหว่างร้อยละ 1.00-11.63 อะไมโลสพบได้ตั้งแต่ร้อยละ 4.19-27.88 การตรวจสอบปริมาณไกมัน พบว่าข้าวพันธุ์เจ้าดำ (GS no: NRM 09008) และพันธุ์ข้าวเจ้าหางหมูใหญ่ 32-27 (GS no: 554) มีปริมาณไกมันมากที่สุดคือร้อยละ 1.89 การตรวจสอบปริมาณคาร์โบไฮเดรตพบว่า ข้าวพันธุ์เหนียวดำ (GS no: NRM 09003) มีปริมาณคาร์โบไฮเดรตสูงสุดคิดเป็นร้อยละ 90.48 ในการวิเคราะห์คุณภาพทางเคมีของรำข้าวเพื่อเป็นอาหารเสริม โดยวิเคราะห์หาปริมาณวิตามินบี 1 วิตามินบี 2 วิตามินบี 3 และวิตามินบี 6 ใน ข้าวที่มีปริมาณวิตามินบีมากที่สุดคือข้าวพันธุ์เหนียวดอกจาน (GS no: NRM 09003) คือ 0.24 (มก/100 ก.) ส่วนข้าวที่มีปริมาณวิตามินบี 2 วิตามินบี 3 และวิตามินบี 6 มากที่สุดคือพันธุ์ เจ้าแดง (GS no: 7776) ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการวิจัยในครั้งนี้ถือเป็นข้อมูลพื้นฐานในการส่งเสริม การเพาะปลูกและอนุรักษ์ข้าวพื้นเมือง และการนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ในอนาคตได้

เสถียร นันทะ และคณะ (2555) ได้วิจัยความหลากหลายพันธุ์ข้าวพื้นเมืองและการอนุรักษ์ของชุมชนในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ผลการศึกษาพบว่าชาวนามือมีความรู้เกี่ยวกับการจัดการและการอนุรักษ์ข้าวพื้นเมืองระบบไร่นาและนำไปสู่การปลูกข้าวที่หลากหลายพันธุ์ มีการใช้ข้าวพื้นเมืองในด้านต่างๆ วิเคราะห์ดีเอ็นเอเครื่องหมายพบว่า สามารถจัดกลุ่มของข้าวพื้นเมืองสายพันธุ์ต่างๆ ได้เป็น 7 กลุ่ม โดยมีค่าระยะห่างทางพันธุกรรม (%fixed difference) ตั้งแต่ 0-67.5 % ข้าวพื้นเมืองส่วนใหญ่จะจัดอยู่ในกลุ่มที่หนึ่งซึ่งส่วนใหญ่เป็นข้าวเหนียวยกเว้น สายพันธุ์โสมลิ ส่วนสายพันธุ์ข้าวในกลุ่มที่สามส่วนใหญ่เป็นข้าวเจ้า ได้แก่ สายพันธุ์เศรษฐีขาวน้อย เจ้าแดง เป็นต้น

วิจิต วิญญกุล และวิศาล บุญประกอบ (2552) ได้วิจัยผลิตภัณฑ์จากข้าวไร่ในอำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์ พบว่า การปลูกข้าวไร่สามารถทำกำไรให้กับเกษตรกรได้ ให้ผลตอบแทนมีค่ามากกว่าอัตราดอกเบี้ย 12 % และได้แปรรูปข้าวไร่ให้เป็นผลิตภัณฑ์ ดังนี้ ผลิตภัณฑ์ที่ 1 ข้าวกล้องงอกเขาค้อ 5 สายพันธุ์ ผลิตภัณฑ์ที่ 2 ข้าวเกรียบข้าวกล้องข้าวเหนียวดำเขาค้อ ผลิตภัณฑ์ที่ 3 ข้าวเม้าข้าวเหนียวดำเขาค้อผลิตภัณฑ์ที่ 4 เส้นก๋วยเตี๋ยวข้าวไร่ ผลิตภัณฑ์ที่ 5 ข้าวพองข้าวเหนียวดำเขาค้อเคลือบช็อกโกแลต ผลิตภัณฑ์ที่ 6 เต้าฮวยข้าวเหนียวดำงอก ผลิตภัณฑ์ที่ 7 ขนมจีนข้าวไร่ ผลิตภัณฑ์ที่ 8 น้ำข้าวกล้องงอกเขาค้อ 5 สายพันธุ์ พันธุ์ข้าวไร่ที่นิยมปลูกบนเขาค้อมี 5 สายพันธุ์ 1) ข้าวเหนียวดำ (ข้าวกำ) เรียกเป็นภาษาม้งว่าเบ้เบล่าล่า เรียกเป็นภาษาลีซอว่าจาหนีเนะเนะ 2) ข้าวเหนียวขาว เรียกเป็นภาษาม้งว่าเบ้เบล่าเค้อแต่ของพี่น้องลีซอไม่มีพันธุ์ข้าวเหนียวขาว (แต่จะมีพันธุ์ข้าวเหนียวแดงแทน) 3) ข้าวเหนียวแดง เรียกเป็นภาษาลีซอว่าจาหนีชีชี พี่น้องม้งก็ไม่มีพันธุ์ข้าวเหนียวแดงเช่นกัน แต่ก็จะมีเป็นพันธุ์ข้าวเหนียวขาวแทน 4) ข้าวเจ้าแดง เรียกภาษาม้งว่าเบ้ล่าเรียกลีซอว่าจาชีชี 5) ข้าวเจ้าขาวเรียกภาษาม้งว่าเบ้เค้อ เรียกเป็นภาษาลีซอว่าจากุฟู ซึ่งเป็นพันธุ์ข้าวที่นิยมปลูกเพราะเป็นข้าวเจ้าที่เวลาหุงแล้วขึ้นหม้อ

ภาณุศักดิ์ จิตแสง และธนาภรณ์ อธิปัญญากุล (2555) ได้วิจัยข้าวไร่และความมั่นคงทางด้านอาหาร : ประสิทธิภาพเชิงเทคนิคของการผลิตข้าวไร่ของเกษตรกรในจังหวัดขอนแก่น พบว่าข้าวเหนียวพันธุ์หอมสกลนครเป็นทางเลือกหนึ่งของเกษตรกรที่เพาะปลูกพืชไร่ในจังหวัดขอนแก่น โดยทำการเก็บการรวบรวมข้อมูลจำนวน 182 ตัวอย่าง ผลการศึกษาพบว่า ผลตอบแทนต่อขนาดของการผลิตของเกษตรกรเท่ากับ 0.88 ซึ่งอยู่ในระดับลดน้อยถอยลง ประสิทธิภาพการผลิตเชิงเทคนิคเท่ากับ 0.739 ดังนั้น เกษตรกรสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตเชิงเทคนิคได้อีกร้อยละ 26.1 โดยภาครัฐควรให้ความรู้ด้านการจัดการการผลิตแก่เกษตรกรเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตซึ่งจะส่งผลต่อการเพิ่มผลผลิตการผลิต

กาญจนา รุจิพจน์ และคณะ (2555) พัฒนาผลิตภัณฑ์ “ข้าวใหม่คว่ำ” จากข้าวไร่

ชุมชนมั่งในจังหวัดน่าน โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา จังหวัดน่าน ร่วมกับกลุ่มสมาชิกชุมชนบ้านถ้ำเวียงแกและบ้านผาหมี่ตำบลนาไร่หลวง อำเภอสองแคว จังหวัดน่าน ได้ทำการศึกษาทดลองร่วมกันโดยใช้พันธุ์ข้าวไร่ที่มีปลูกในชุมชน จำนวน 5 พันธุ์ คือ ข้าวขม ข้าวขาว ข้าวคอ ข้าวเหนียวขาว และข้าวเหนียวดำ การพัฒนาผลิตภัณฑ์ “ข้าวใหม่คว่ำ” ทำการเก็บเกี่ยวเมื่อข้าวไร่สุกแก่ประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ นวด และนำมาคว่ำในกระทะใบด้วยไฟฟืนตามภูมิปัญญาท้องถิ่น จนได้น้ำระเหยออกหมด จากนั้นนำไปผึ่งจนคลายร้อนแล้วบรรจุกระสอบฟาง ก่อนนำไปใส่โรงสีสมัยใหม่ให้ได้ข้าวสารคุณภาพดีและบรรจุถุงพลาสติกได้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีชื่อว่า “ข้าวใหม่คว่ำ”

จิรภา พงษ์จันดา และคณะ (2557) ศึกษาผลของพันธุ์ข้าวพื้นเมืองที่มีต่อสมบัติทางเคมีและกายภาพของแป้งข้าวคั่วแปรรูปโครงสร้างทางโมเลกุลและกายภาพ โดยทำการย่อยตัดกิ่งโมเลกุลอะ-ไมโลเปคตินในแป้งข้าวพื้นเมืองจำนวน 15 พันธุ์ ด้วยเอนไซม์ตัดกิ่ง (พูลูลูนาส) และดัดแปลงโครงสร้างทางกายภาพต่อเนื่องเพื่อให้เปลี่ยนสภาพเป็นแป้งทนย่อยชนิดที่ 3 ที่มีค่าดัชนีน้ำตาลต่ำเยื่อใยสูง ผลการวิจัยสมบัติทางเคมีกายภาพและค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณในแป้งข้าวคั่วแปรรูปที่ได้พบว่า แป้งข้าวคั่วแปรรูปที่ผลิตจากข้าวพื้นเมืองกลุ่มที่มีอะไมโลสสูง มีศักยภาพในการนำมาผลิตเป็นแป้งข้าวทนย่อยชนิดที่ 3 สูงกว่าที่ผลิตจากจากพันธุ์ข้าวที่มีอะไมโลสต่ำ โดยแป้งข้าวคั่วแปรรูปที่ผลิตได้มีปริมาณสตาร์ช ทนย่อย เพิ่มขึ้นจากแป้งข้าวธรรมชาติ 3 เท่า และมีค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณในระดับต่ำถึงปานกลาง คือในช่วง 56.26-63.73

ปทุมทริกา รัตนตรัยวงศ์ และคณะ (2557) ศึกษาคุณค่าทางโภชนาการ ของข้าวในแต่ระยะการเจริญสำหรับข้าวที่ปลูกในเขตภาคเหนือตอนล่าง โดยวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการ ลักษณะทางเคมีเชิงฟิสิกส์ และข้อมูลด้านศักยภาพทางเศรษฐกิจการแปรรูปของข้าวในแต่ระยะการเจริญ สำหรับข้าว จำนวน 10 สายพันธุ์ ที่นิยมปลูกในเขตภาคเหนือตอนล่าง ได้แก่ พันธุ์กข29 กข31 กข41 กข47 กข49 กข51 พิชญ์โลก2 สุพรรณบุรี1 ปทุมธานี1 และพันธุ์พวงเงิน พบว่าคุณค่าทางโภชนาการในข้าวระยะน้ำนมได้แก่ เหล็ก แคลเซียม ปริมาณกาบา และปริมาณคลอโรฟิลล์ของข้าวทุกสายพันธุ์มีปริมาณสูงมากกว่าข้าวในระยะข้าวเฒ่า และข้าวเต็มเมล็ดอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาการเจริญในทางตรงกันข้ามปริมาณอะไมโลสเพิ่มขึ้นตามระยะการเจริญของข้าว และค่าความคงตัวของแป้งสุกของข้าวระยะข้าวเฒ่ามีปริมาณใกล้เคียงกับข้าวเต็มเมล็ด โดยเฉพาะระยะน้ำนมที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง และเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจให้กับข้าวที่ได้รับความเสียหายจากอุทกภัยหรือภัยธรรมชาติทำให้ต้องเก็บเกี่ยวก่อนระยะเวลา

2.1.1 ข้าวเปลือก เมล็ดข้าวประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลัก 2 ส่วน คือ ส่วนที่ห่อหุ้มเมล็ด และส่วนเนื้อผลหรือเมล็ดข้าวกลิ้งดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบในเมล็ดข้าว

ที่มา : <https://sites.google.com/site/gabarices/prayoch-n-khxng-khaw-klxng-ngxk-1>

2.1.1.1 ส่วนที่ห่อหุ้มเมล็ด เปลือกข้าว หรือเกลบ เป็นส่วนที่อยู่ภายนอกสุด จะหุ้มเมล็ดเอาไว้ภายใน ส่วนนี้จะประกอบด้วย เปลือกนอกแผ่นใหญ่ เปลือกนอกแผ่นเล็ก หางข้าว ก้านหางดอกหรือข้าวเมล็ด และกลีบรองเมล็ด ส่วนที่ห่อหุ้มเมล็ด หรือเปลือกข้าวมีน้ำหนักประมาณร้อยละ 20 ของน้ำหนักเมล็ดข้าวเปลือก

1.1.1.2 ส่วนเนื้อผลหรือเมล็ดข้าวกล้อง เป็นส่วนที่เอาเกลบหรือเปลือกออกไปแล้วแต่ยังไม่ผ่านการขัดสี ประกอบด้วย

1) เนื้อหุ้มผล ประกอบไปด้วยเนื้อเยื่อ 3 ชั้น คือ อีพิการ์ป (Epicarp) เมโซคาร์ป (Mesocarp) และเอ็นโดคาร์ป (Endocarp) มีลักษณะเป็นเส้นใย พผนังเซลล์ประกอบด้วย โปรตีน เซลลูโลส (Cellulose) และเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) เนื้อหุ้มเมล็ดเป็นผนังเซลล์บางอยู่ถัดจากเนื้อหุ้มผลเข้าไป เนื้อเยื่อสองชั้นเรียงกันเป็นแถวอดุมไปด้วยสารประเภทไขมัน จึงทำให้มีคุณสมบัติในการป้องกันน้ำไม่ให้เข้าสู่เนื้อเมล็ด เนื้อเยื่ออะลูโรน (Aleurone layer) อยู่ถัดจากเนื้อเยื่อหุ้มเมล็ดเข้าไป ประกอบด้วยโปรตีน เฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลส เนื้อหุ้มเมล็ด และคัพภะ

2) เนื้อเมล็ด อยู่ด้านในสุดมีประมาณร้อยละ 68-70 ของเมล็ดข้าวภายใน

เซลล์ ประกอบด้วยแป้งและโปรตีนเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งแป้งในเมล็ดข้าวมีองค์ประกอบ 2 ชนิด ได้แก่ อะไมโลเปคติน และอะไมโลส ซึ่งมีอัตราส่วนแตกต่างกันตามชนิดของข้าว

3) คัพพะ หรือเรียกว่า จมูกข้าว คัพพะเป็นส่วนที่จะงอกเป็นต้นข้าว ต้นใหม่ ต่อไป ประกอบด้วยต้นอ่อน รากอ่อน เชื้อหุ้มต้นอ่อน เชื้อหุ้มรากอ่อน ท่อน้ำ ท่ออาหาร และใบเลี้ยง ในส่วนคัพพะนี้จะอุดมไปด้วยสารอาหาร แร่ธาตุและวิตามิน เพื่อการเจริญเติบโต สารอาหารที่มีมากคือโปรตีน ไขมันและวิตามิน วิตามินที่มีมากคือวิตามินบีและวิตามินอี การจำแนกชนิดของข้าวตามประเภทของเนื้อในหรือองค์ประกอบทางเคมีในเมล็ดข้าวสาร แบ่งได้เป็นข้าวเจ้าและข้าวเหนียว ข้าวทั้งสองชนิดนี้มีลำต้นและลักษณะอย่างอื่นเหมือนกันทุกอย่างแตกต่างกันที่ประเภทของเนื้อแป้งในเมล็ด แป้งจากข้าวเจ้าประกอบด้วยอะไมโลสประมาณ ร้อยละ 9-33 ส่วน ข้าวเหนียว ประกอบด้วยอะไมโลเปคติน เป็นส่วนใหญ่และมีอะไมโลสเพียงเล็กน้อยประมาณร้อยละ 5-7 เท่านั้น (พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์, 2553)

2.1.2 ข้าวกล้อง ส่วนเนื้อผล หรือข้าวกล้อง ปัจจุบันได้รับความนิยมบริโภคเพิ่มมากขึ้น ข้าวกล้องเป็นข้าวที่ไม่มีเปลือก ส่วนข้าวขาวเป็นข้าวที่แยกรำข้าว และจมูกข้าวออกไป ส่วนที่เหลืออยู่ส่วนใหญ่เป็นแป้ง กระบวนการขัดสีข้าวทำให้เกิดการสูญเสียวิตามิน และเกลือแร่ต่างๆ

2.2 แป้ง

2.2.1 การเกิดแป้ง แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่สะสมในพืชที่เกิดจากกระบวนการสังเคราะห์แสง สูตรเคมีของแป้ง ($C_6H_{10}O_5$)_n ประกอบด้วยอะไมโลส และอะไมโลเปคติน เมื่อบริโภคแป้งเข้าไปจะถูกย่อยให้เป็นกลูโคส (Glucose) และดูดซึมเข้าไปสลายตัวให้พลังงานตามกระบวนการทางชีวเคมี แป้งในอาหารแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ

2.2.1.1 แป้งที่ถูกย่อยสลายเป็นน้ำตาลกลูโคสได้ด้วยน้ำย่อยในลำไส้เล็ก มีผลต่อระดับน้ำตาลในเลือดโดยตรง

2.2.1.2 แป้งทนย่อย เป็นแป้งที่ไม่ถูกย่อยและไม่ถูกดูดซึมในลำไส้เล็กแต่จะสามารถผ่านเข้าไปถึงบริเวณลำไส้ใหญ่ แล้วจึงเปลี่ยนแปลงโดยการหมักที่ลำไส้ใหญ่ โดยเชื้อจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในลำไส้ใหญ่ ทำให้ได้เป็นกรดไขมันสายสั้นๆ ที่มีประโยชน์ต่อร่างกายโดยเฉพาะระบบทางเดินอาหาร

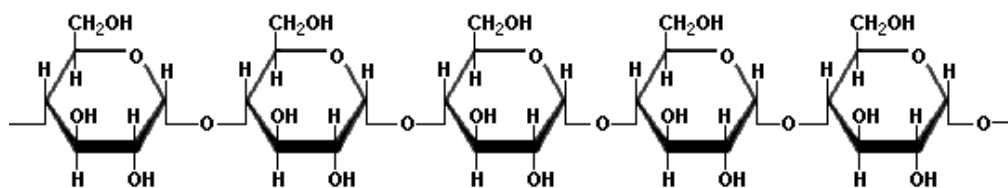
2.2.2 การย่อยแป้ง การย่อยสลายโมเลกุลของแป้งโดยทั่วไปประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้ คือการเกิดเจลลิตไนเซชัน (Gelatinization) เป็นขั้นตอนที่ทำให้เม็ดแป้งพองตัว โดยเม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำขณะที่ได้รับความร้อนทำให้เม็ดแป้งพองตัวเรียกอุณหภูมิช่วงนี้ว่า อุณหภูมิการเกิดเจล (Gelatinization temperature) จากนั้นเป็นขั้นตอนการลดความหนืดของแป้งที่เกิดเจลโดยการย่อย

โมเลกุลของแป้งแบบสุ่มของลูกโซ่กลูโคส ทำให้แยกเป็นสายสั้นๆ มีขนาดโมเลกุลเล็กลง และมีความหนืดลดลง เรียกว่า การเกิดลิกูแฟคชัน (Liquefaction) และการเกิดแซคคาริฟิเคชัน (Saccharification) เป็นขั้นตอนการย่อยแป้งให้เป็นโมเลกุลของน้ำตาล ภายหลังการย่อยจะได้น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว โมเลกุลคู่ หรือน้ำตาลโมเลกุลสูงกว่า ผลผลิตที่ได้ก็คือ กลูโคส มอลโตส (Maltose) หรือมอลโตไตรโอส (Maltotriose) (จิรนาถ บุญคง, 2554)

2.2.3 ชนิดของแป้ง แป้งประกอบด้วยโมเลกุลของกลูโคสต่อกันเป็นสายยาว หรือเรียกว่า โพลีเมอร์ของกลูโคส ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

2.2.3.1 อะไมโลสเป็นโพลีเมอร์เชิงเส้นประกอบด้วยโมเลกุลของกลูโคสประมาณ 200-2,000 โมเลกุล โมเลกุลของกลูโคสจะเชื่อมต่อกันด้วยพันธะแอลฟา-1,4 ไกลโคซิดิก (α -1,4-glycosidic bond) ดังรูปที่ 2.2 แป้งที่ได้จากพืชต่างชนิดกันจะมีตำแหน่งการวางตัวของอะไมโลสภายในเม็ดแป้งต่างกัน อะไมโลสบางส่วนแทรกอยู่ในกลุ่มของอะไมโลเปคติน บางส่วนกระจายอยู่ทั้งในส่วนอสัณฐาน (Amorphous regions) ซึ่งเป็นส่วนที่โมเลกุลมีการจัดเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ และส่วนผลึก (Crystalline regions) ที่โมเลกุลมีการจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ อะไมโลสที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่จะพบเป็นเกลียวคู่ (Double helix) กับอะไมโลเปคตินในส่วนใจกลางเม็ดแป้ง ส่วนอะไมโลสโมเลกุลขนาดเล็กจะพบอยู่ตามขอบเม็ดแป้ง แป้งต่างชนิดกันมีปริมาณอะไมโลสไม่เท่ากัน แป้งส่วนใหญ่จะมีอะไมโลสประมาณร้อยละ 25 แป้งบางชนิดมีปริมาณอะไมโลสสูงถึงร้อยละ 70-75 เช่น แป้งข้าวโพด (High amylose corn starch) แต่แป้งบางชนิดไม่มีอะไมโลสเลยเรียกว่า แป้งแวกซี (waxy starch)

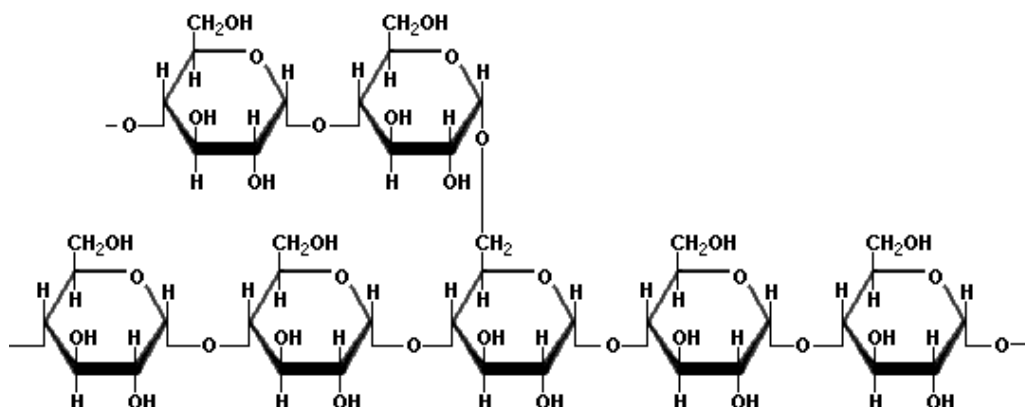
อะไมโลสมีความสามารถในการจับกับไอโอดีน โดยจะพันเป็นเกลียวรอบไอโอดีนได้ สารประกอบเชิงซ้อน (Amylose-iodine complex) ที่มีสีน้ำเงิน สีที่เกิดขึ้นจะผันแปรตามความยาวและจำนวนเกลียวของสายอะไมโลส สีที่เกิดขึ้นนี้ใช้ในการตรวจสอบและบ่งบอกลักษณะเฉพาะของแป้งที่มีอะไมโลสเป็นองค์ประกอบได้ แต่วิธีการนี้ก็อาจจะได้ผลที่คลาดเคลื่อนได้ เนื่องจากมีข้อจำกัดจากความไม่คงตัวของสีที่เกิดขึ้น จากการที่อะไมโลเปคตินที่มีความยาวของกิ่งก้านมากๆ ก็สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีนได้เช่นเดียวกับอะไมโลส ซึ่งอาจทำให้การวิเคราะห์ปริมาณอะไมโลสคลาดเคลื่อนเกินกว่าปริมาณที่มีอยู่จริงในแป้งได้ ดังนั้น วิธีการวิเคราะห์ปริมาณอะไมโลสที่มีความเที่ยงตรงมากขึ้นจะต้องทำการตกตะกอนอะไมโลเปคตินออกไปก่อน แล้วจึงทำการวิเคราะห์ปริมาณอะไมโลสที่เหลืออยู่



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของอะไมโลส

ที่มา : Food-info, 2017

2.2.3.2 อะไมโลเพคติน เป็นแป้งที่มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นโพลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสจับกันด้วยพันธะแอลฟา-1,4 ไกลโคซิดิก และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาของกลูโคสจับกันด้วยพันธะ แอลฟา-1,6 ไกลโคซิดิก ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของอะไมโลเพคติน

ที่มา : Food-info, 2017

2.2.4 การย่อยและการดูดซึมแป้ง การย่อยและการดูดซึมแป้งส่วนใหญ่จะเกิดที่ลำไส้เล็กแต่จะมีแป้งส่วนน้อยประมาณร้อยละ 10 ที่เรียกว่า แป้งทนย่อย จะไม่ถูกย่อยโดยเอนไซม์และไม่ถูกดูดซึมที่ลำไส้เล็ก แต่สามารถผ่านเข้าไปสู่ลำไส้ใหญ่ทำให้เกิดกระบวนการหมักโดยจุลินทรีย์ที่ลำไส้ใหญ่ กระบวนการย่อยและการดูดซึมแป้งจะเกิดขึ้นตามลำดับดังต่อไปนี้

2.2.4.1 แป้งจะถูกย่อยครั้งแรกในปากโดยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส (α -amylase) ที่สร้างมาจากต่อมน้ำลาย มีค่า pH ประมาณ 6.7 เกิดการย่อยแป้งตรงบริเวณพันธะแอลฟา-1,4 ไกลโคซิดิก แต่ไม่สามารถย่อยแป้งตรงบริเวณพันธะแอลฟา-1,6 ไกลโคซิดิกได้ ผลจากการย่อยแป้งโดยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสในน้ำลาย จะได้คาร์โบไฮเดรตที่มีโมเลกุลเล็กกว่าแป้ง แต่ใหญ่กว่าน้ำตาล เรียกว่า เด็กซ์ตริน (Dextrin) แล้วเด็กซ์ตรินจะถูกย่อยต่อไปได้น้ำตาลโมเลกุลคู่ คือ มอลโตส

เนื่องจากอาหารส่วนใหญ่จะถูกเคี้ยว และอยู่ในปากเป็นช่วงเวลาสั้นๆ จึงทำให้การย่อยแป้งมีน้อยกว่าร้อยละ 5 ของแป้งทั้งหมดที่รับประทานเข้าไป แป้งส่วนใหญ่จะถูกส่งไปที่กระเพาะอาหารและนำไปย่อยต่อในลำไส้เล็ก

2.2.4.2 แป้งที่ถูกย่อยในกระเพาะอาหาร เนื่องจากภาวะความเป็นกรดของน้ำย่อย บริเวณกระเพาะอาหารมีค่าประมาณของ pH น้อยกว่า 4 ทำให้เอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสในน้ำลายที่ทำงานได้ดีในภาวะ pH ประมาณ 6.7 ถูกยับยั้งทำให้ไม่สามารถย่อยแป้งที่อยู่ในกระเพาะอาหารได้

2.2.4.3 แป้งที่ถูกย่อยในลำไส้เล็ก เมื่อแป้งถูกส่งผ่านต่อเข้าไปยังบริเวณลำไส้เล็กจะถูกย่อยต่อโดยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส ที่หลั่งออกมาจากตับอ่อน (Pancreatic amylase) ซึ่งมีปริมาณมาก (ประมาณร้อยละ 50-80) เมื่อเปรียบเทียบกับแอลฟา-อะไมเลสที่หลั่งจากต่อมน้ำลาย (ประมาณร้อยละ 20-40) ประกอบกับอาหารจะอยู่ในส่วนลำไส้เล็กนานกว่าอยู่ในปาก จึงทำให้แป้งที่เหลือเกือบทั้งหมดถูกย่อยโดยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสจากตับอ่อนที่หลั่งเข้าสู่ลำไส้เล็กส่วนดูโอดินัม (Duodenum) ทำให้ได้ผลจากการย่อยแป้ง คือ โอลิโกแซ็กคาไรด์ (Oligosaccharide) ซึ่งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วยมโนแซ็กคาไรด์ตั้งแต่ 2-20 โมเลกุลเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิก เช่น มอลโตส มอลโตไตรออสและแอลฟา-ลิมิตเด็คซ์ตริน (α -limit dextrins) ซึ่งเป็นโพลีเมอร์ของโมเลกุลกลูโคสประมาณ 8 หน่วยต่อกันด้วยพันธะแอลฟา-1,6 ไกลโคซิดิก เกิดจากการที่เอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสไม่สามารถย่อยแป้งตรงพันธะแอลฟา-1,6 ไกลโคซิดิกในโครงสร้างของ อะไมโลเปคตินได้ ต้องถูกย่อยโดยเอนไซม์ตัดกิ่ง (Debranching enzyme) เนื่องจากเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสไม่สามารถย่อยแป้งให้เป็นมโนแซ็กคาไรด์ได้โดยตรง กลุ่มโอลิโกแซ็กคาไรด์จะต้องถูกย่อยต่อไปโดยเอนไซม์ที่สร้างจากเซลล์เยื่อเมือก (Mucosal cells) บริเวณไมโครวิลไล (Microvilli) ของลำไส้เล็กที่มีลักษณะคล้ายขนแปรงเล็กๆ หรือนิ้วมียื่นออกไปมากมาย

ส่วนในขั้นตอนสุดท้ายของการย่อยแป้งจะมีเอนไซม์กลูโคอะไมเลส (Glucoamylase) ที่จะย่อยสลายพันธะแอลฟา-1,4 ไกลโคซิดิกตรงบริเวณส่วนปลาย (Terminal) รวมทั้งส่วนที่อยู่ถัดจากจุดที่แตกแขนง (Branching point) และสลายพันธะแอลฟา-1,6 ไกลโคซิดิก โดยจะตัดกลูโคสครั้งละหนึ่งหน่วยจากปลายด้าน non-reducing เข้าไป เพื่อให้ได้กลูโคสที่เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว ซึ่งจะถูกลดซึมผ่านเซลล์เยื่อเมือกของลำไส้เล็กเข้าสู่หลอดเลือดดำที่นำเลือดมาจากระบบทางเดินอาหารเพื่อเข้าสู่ระบบไหลเวียนเลือดที่ตับต่อไป

2.2.5 ประเภทของแป้ง

2.2.5.1 แป้งที่ถูกย่อยสลายได้อย่างรวดเร็ว (Rapidly digestible starch : RDS) พบได้ในอาหารที่มีส่วนประกอบของแป้งเมื่อผ่านการหุงใหม่ สามารถย่อยสลายไปเป็นน้ำตาลกลูโคสได้อย่างรวดเร็วภายในเวลา 20 นาที

2.2.5.2 แป้งที่ถูกย่อยสลายได้อย่างช้าๆ (Slowly digestible starch : SDS) พบได้ใน ธัญพืชสด อาหารประเภทเส้นที่ทำสุกแล้ว สามารถย่อยสลายได้อย่างช้าๆ แต่ยังถูกย่อยเป็นน้ำตาล กลูโคสได้อย่างสมบูรณ์ โดยใช้เวลาดังแต่ 20 – 110 นาที

2.2.5.3 แป้งทนย่อย (Resistant starch : RS) พบในเมล็ดธัญพืชที่ถูกบด หรือแป้งที่เกิดการคืนตัว ซึ่งจะสามารถทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ในลำไส้เล็ก

2.3 แป้งทนย่อย

แป้งเป็นโพลีเมอร์ชนิดหนึ่ง และเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญที่ได้มาจากพืช แป้งมีสองรูปแบบ คือ อะไมโลสและอะไมโลเพคติน ซึ่งเกิดจากกลูโคสเกิดพันธะกันเป็นโมเลกุลยาว อะไมโลเพคติน มีพันธะแอลฟา-1,6 จำนวนมาก และมีพันธะที่เป็นกิ่งก้านมากกว่าอะไมโลส แป้งเมื่อกินจะถูกย่อยในปากและในกระเพาะด้วยน้ำย่อยแอลฟา-อะไมเลส กลายเป็นน้ำตาลเข้าสู่กระแสเลือด บางกรณีแป้งจะไม่ถูกย่อยให้เป็นกลูโคสด้วยเอนไซม์แสดงว่าแป้งนั้นเป็นแป้งทนย่อย จากคำนิยามของ European Flair Concerted Action on Resistant Starch (EURESTA) หมายถึงแป้งและผลิตภัณฑ์ของแป้งที่ไม่สามารถถูกย่อยด้วยเอนไซม์และถูกดูดซึมในลำไส้เล็กของมนุษย์สุขภาพดี (สุนันทา ทองทา, 2552)

แป้งทนย่อยเป็นแป้งที่ไม่สามารถถูกย่อยด้วยเอนไซม์ย่อยแป้ง ดังนั้นจึงไม่ถูกดูดซึมในลำไส้เล็กของมนุษย์ เนื่องจากแป้งประเภทนี้ย่อยด้วยเอนไซม์เพียงบางส่วนหรือย่อยช้า ๆ จึงเรียกอีกชื่อหนึ่งได้ว่า แป้งทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ พลังงานที่ได้จากการย่อยแป้งทนย่อยนี้จึงมีปริมาณต่ำกว่าแป้งที่ใช้โดยทั่วไป จึงมีคุณสมบัติเป็นแป้งที่ให้พลังงานต่ำ มีคุณสมบัติเทียบเท่าเส้นใยอาหาร เมื่ออยู่ในลำไส้ใหญ่จะถูกย่อยโดยจุลินทรีย์ได้ผลิตภัณฑ์เป็นกรดไขมันสายสั้น (short-chain fatty acids) ที่มีประโยชน์ เช่น กรดอะซิติก (acetic acid) กรดโพรพิโอนิก (propionic acid) และกรดบิวทริก (butyric acid) เป็นต้น กรดไขมันเหล่านี้จะช่วยสร้างความแข็งแรงให้แก่เซลล์ผนังลำไส้ใหญ่ หรือทำหน้าที่คล้ายกับใยอาหารที่สามารถยับยั้งการดูดซับสารอาหารบางอย่างได้อย่างเช่น น้ำตาลและไขมันที่เป็นต้นเหตุของโรคเบาหวาน โรคอ้วน โรคหัวใจ หรือโรคมะเร็ง

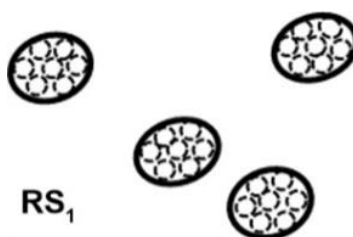
ในแป้งข้าวโพด และแป้งมันฝรั่งมีอะไมโลส มี RS มาก มีความทนทานต่อการย่อย และดูดซึมไม่สมบูรณ์ที่ลำไส้เล็ก แป้งจากธัญพืชส่วนใหญ่จะย่อยและดูดซึมอย่างช้าๆ แต่สมบูรณ์ อาจเนื่องจากแป้งมันฝรั่งมีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรน้อยกว่า แป้งข้าวสาลีพันธุ์ต่างกันมี RS ที่ต่างกัน แป้งข้าวสาลีพันธุ์ใช้เป็นแหล่ง RS ได้ แป้งที่มาจากแหล่งต่างๆมี RS แตกต่างกันด้วย นอกจากนี้อัตราส่วนของอะไมโลสกับอะไมโลเพคตินเป็นอีกปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณ ดังนั้น RS ขึ้นอยู่กับสิ่งต่อไปนี้

- ความเป็นผลึกของสตาร์ช
- โครงสร้างเกรนูล (Granules)
- อัตราส่วนของอะไมโลสกับอะไมโลเพคติน

- การเรียงตัวของอะไมโลสกับอะไมโลเปคตินภายในโครงสร้างสตาร์ช
- อัตราการเกิดรีโทรเกรเดชัน
- ความยาวของสายโซ่อะไมโลส
- ส่วนเป็นเส้นตรงของอะไมโลเปคติน
- ปัจจัยด้านสภาวะในกระบวนการผลิต
- ระยะเวลาและอุณหภูมิการเก็บ

2.3.1 ชนิดของแป้งทนย่อย แป้งทนย่อยมีอยู่ด้วยกัน 5 ประเภท

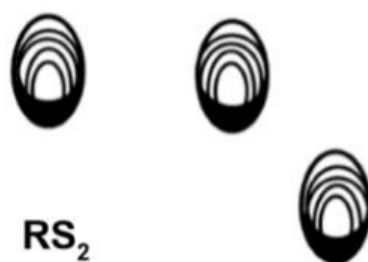
2.3.1.1 แป้งทนย่อย type 1 (Physically inaccessible starch, RS1) เป็นแป้งที่มีความคงทนต่อการย่อย ที่ไม่สามารถถูกย่อยด้วยเอนไซม์ เนื่องจากลักษณะทางกายภาพที่ทำให้เอนไซม์ไม่สามารถเข้าไปย่อยเม็ดแป้งได้ เพราะเม็ดแป้งถูกห่อหุ้มอยู่ในร่างแหของโปรตีน หรือถูกตรึงอยู่ในเซลล์หุ้มเมล็ดพืช ทำให้เอนไซม์ไม่สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ RS1 มีในธรรมชาติ เช่น ถั่ว หรือเมล็ดธัญพืช เมล็ดพืชที่ถูกขัดสีบางส่วน เป็นต้น RS1 นี้เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ การทำอาหารจาก RS1 จะใช้ความร้อนมาก และเวลานาน



รูปที่ 2.4 ประเภทของแป้งทนย่อยประเภทที่ 1

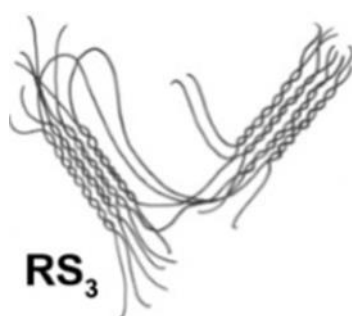
ที่มา : ธนากร รติธรรมธร, 2560

2.3.1.2 แป้งทนย่อย type 2 (Resistant granular starch, RS2) เป็นแป้งที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ มีโครงสร้างเม็ดแป้งซึ่งไม่มีรู หรือช่องให้เอนไซม์เข้าไปในเม็ดแป้งที่ยังคงรูปร่าง หรือคงสภาพอยู่ในเม็ดแป้งดิบ เนื่องจากโมเลกุลภายในเม็ดแป้งมีการอัดกันอย่างหนาแน่นทำให้ยากต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ ตัวอย่างของแป้งชนิดนี้คือ แป้งจากกล้วยดิบ และแป้งมันฝรั่งดิบ



รูปที่ 2.5 ประเภทของแป้งทนย่อยประเภทที่ 2
ที่มา : ธนากร รติธรรมธร, 2560

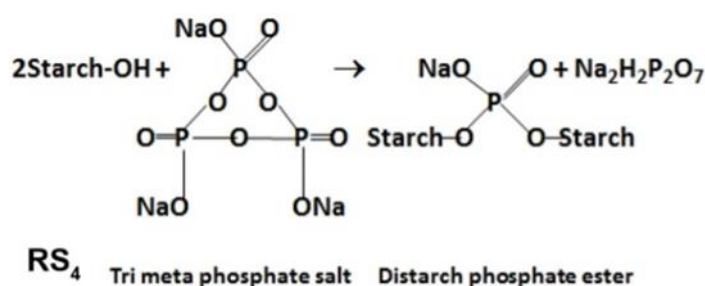
2.3.1.3 แป้งทนย่อย type 3 (Retrogradation starch, RS3) เป็นแป้งทนย่อยที่มีมากที่สุด เป็นแป้งที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ ซึ่งเกิดจากการจัดเรียงตัวใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของสายอะไมโลสระหว่างการลดอุณหภูมิของแป้งที่ผ่านการเกิดเจลลิตในเซชัน โดยแป้งนี้จะผ่านกระบวนการเจลลิตในเซชันและมีการทำให้เย็นและเกิดกระบวนการคืนตัว (Retrogradation) ทำให้เกิดโครงสร้างตาข่ายสามมิติที่มีความแข็งแรง และสามารถทนต่อการย่อยของเอนไซม์ ตัวอย่างของแป้งชนิดนี้อยู่ในอาหารที่ผ่านขบวนการ หุง ต้ม อบ และทำให้เย็น เช่น ขนมปัง มันฝรั่งที่สุกและทำให้เย็น เป็นต้น



รูปที่ 2.6 ประเภทของแป้งทนย่อยประเภทที่ 3
ที่มา : ธนากร รติธรรมธร, 2560

2.3.1.4 แป้งทนย่อย type 4 (Chemically modification starch, RS4) เกิดจากกระบวนการดัดแปรแป้งทางเคมีที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโมเลกุลของแป้ง โดยมี

พันธะชนิดอื่นที่นอกเหนือไปจากพันธะแอลฟา 1,4 และ 1,6 ซึ่งทำให้โมเลกุลของแป้งมีความแข็งแรงของพันธะมากขึ้น เช่น การทำเอสเทอริฟิเคชัน (esterification) ครอสลิงกิง (cross linking) อีเทอร์ิฟิเคชัน (etherification) เป็นต้น ทำให้เกิดหมู่แทนที่หรือพันธะเพิ่มขึ้นภายในโครงสร้างของแป้ง ทำให้เอนไซม์ไม่สามารถเข้าไปย่อยได้



รูปที่ 2.7 ประเภทของแป้งทนย่อยประเภทที่ 4

ที่มา : ธนากร รติธรรมธร, 2560

2.3.1.5 แป้งทนย่อย type 5 (Amylose-lipid complexed starch, RS5) เป็นแป้งทนย่อยที่เกิดจากการรวมตัวของอะไมโลสกับไขมันเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีโครงสร้างที่แข็งแรงมีความเสถียรต่อความร้อนสูง และสามารถทนต่อการย่อยของเอนไซม์ได้ (สุนันทา ทองทา และ ธนาวิทย์ กุลรัตนรักษ์, 2557)

2.3.2 แป้งทนย่อยกับสุขภาพ แป้งทนย่อยถูกนำไปประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารมากมายหลายประเภท โดยใช้คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของแป้ง ปรับปรุงหรือพัฒนาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เพิ่มคุณค่าทางโภชนาการ เมื่อศึกษาข้อมูลพบว่าแป้งทนย่อยนี้มีประโยชน์ด้านสุขภาพดังนี้

2.3.2.1 มีรายงานการวิจัยทางวิทยาศาสตร์ทั้งในมนุษย์และสัตว์ทดลองว่าแป้งต้านทานการย่อยมีประโยชน์และสามารถนำไปพัฒนาใช้ในทางคลินิกที่เน้นประโยชน์ต่อระบบทางเดินอาหารเป็นหลักผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการหมักแป้งทนย่อยโดยจุลินทรีย์ในลำไส้ใหญ่คือ กรดไขมันชนิดสายสั้นที่สำคัญ ได้แก่ กรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิกและกรดบิวทริกที่สามารถใช้เป็นแหล่งพลังงานที่ดีสำหรับเซลล์ลำไส้ใหญ่ (colonocytes) ทำให้มีเลือดมาเลี้ยงบริเวณเยื่อบุลำไส้ใหญ่มากขึ้น จึงช่วยกระตุ้นการเจริญเติบโตและการแบ่งตัวของเยื่อบุลำไส้ใหญ่ และช่วยเสริมสร้างภูมิคุ้มกันให้กับระบบทางเดินอาหาร บิวทริกเป็นกรดไขมันที่มีความจำเป็นต่อกระบวนการเมตาบอลิซึม

(Metabolism) ของเซลล์ในชั้นผิวของลำไส้ใหญ่ ป้องกันและยับยั้งการเปลี่ยนแปลงของเซลล์ลำไส้ที่ผิดปกติ ทำให้เซลล์เกิดการตายแบบธรรมชาติ (apoptosis) และยังช่วยลดปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ที่เป็นสาเหตุหนึ่งในการทำลายดีเอ็นเอ

2.3.2.2 อาหารที่มีปริมาณแป้งต้านทานการย่อยสูง จะมีค่า GI ต่ำการรับประทานอาหารที่มีค่า GI ต่ำอย่างเช่นในธัญพืชและผัก สามารถช่วยควบคุมให้ระดับน้ำตาลเข้าสู่กระแสเลือดอย่างช้า ๆ และสม่ำเสมอ ทำให้ระดับน้ำตาลในเลือดอยู่ในระดับปกติได้ ช่วยเพิ่มความรู้สึกอิ่มและลดความอยากอาหาร ระดับอินซูลินลดลง ส่งผลต่อการลดระดับไขมัน ควบคุมระดับคอเลสเตอรอล ลดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคหัวใจและโรคเบาหวาน มีรายงานการวิจัยที่พบว่าอาหารที่มีแป้งต้านทานการย่อยจะถูกย่อยประมาณ 5-7 ชั่วโมงหลังการรับประทาน ทำให้ระดับน้ำตาลในเลือดและอินซูลินลดลง ส่วนแป้งที่ถูกทำให้ร้อนและเกิดการสุกจะถูกย่อยทันทีหลังรับประทาน ทำให้ระดับน้ำตาลในเลือดและอินซูลินเพิ่มขึ้นหลังการรับประทาน (สุนันทา ทองทา, 2553)

2.3.2.3 แป้งที่ทนย่อย ช่วยป้องกันหรือลดสภาวะโรคอ้วน มีบทบาทในการลดคอเลสเตอรอลในเส้นเลือด ลดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคไขมันอุดตันในเส้นเลือด โรคหัวใจ และโรคเบาหวาน เป็นต้น

2.3.2.4 ความสัมพันธ์ของปริมาณแป้งทนย่อยกับดัชนีน้ำตาล ดัชนีน้ำตาลหรือ GI เป็นดัชนีที่ใช้ตรวจวัดคุณภาพของอาหารประเภทคาร์โบไฮเดรต ซึ่งหลังจากการรับประทานและเข้าสู่ระบบการย่อยและดูดซึมของร่างกายสามารถเพิ่มระดับน้ำตาล ในเลือดได้มากหรือน้อยโดยเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน คือ น้ำตาลกลูโคส ซึ่งการรับประทานอาหารที่มีค่าดัชนีน้ำตาลสูงจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของน้ำตาลกลูโคสในกระแสเลือดอย่างรวดเร็วและสูงมาก ในขณะที่การรับประทานอาหารที่มีค่าดัชนีน้ำตาลต่ำจะมีน้ำตาลเข้าสู่กระแสเลือดอย่างช้า ๆ และสม่ำเสมอ ทำให้ร่างกายสามารถควบคุมปริมาณน้ำตาลในเลือดให้อยู่ในระดับปกติได้ง่าย

ประเภทของอาหารที่มีค่าดัชนีน้ำตาลดังนี้

อาหารที่มีค่าดัชนีน้ำตาลสูง ได้แก่ ขนมปังขาว ข้าวเม็กลีดสั้น มันฝรั่ง ลูกเกด ผลไม้อบแห้ง ก๋วยเตี๋ยว แครอท และผลไม้ที่มีรสหวาน

อาหารที่มีค่าดัชนีน้ำตาลปานกลาง ได้แก่ อาหารประเภทเส้น ถั่วคั่ว ถั่วฝักยาว ไอศกรีม มันเทศ น้ำส้มคั้น บลูเบอรี่ ข้าวโพดหวาน ข้าวโพดคั่ว ชุปถั่ว และข้าวกล้อง

อาหารที่มีค่าดัชนีน้ำตาลต่ำ ได้แก่ ถั่วชนิดต่างๆ ผัก อาหารที่มีเส้นใยสูง ก๋วยเตี๋ยวมะเขือเทศ แอปเปิ้ล ธัญพืชที่มีน้ำตาลต่ำ และโยเกิร์ตไขมันต่ำ

มีการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแป้งทนย่อยกับค่าดัชนีน้ำตาลพบว่า มีความผกผันกัน หมายความว่าแป้งทนย่อยสามารถช่วยลดการตอบสนองต่อระดับน้ำตาล และระดับ

สอร์โอมอนอินซูลินในกระแสเลือดได้ ดังนั้นอาหารที่มีค่าดัชนีน้ำตาลต่ำจะมีปริมาณแป้งทนย่อยสูงนั่นเอง ซึ่งการจัดแบ่งประเภท และแหล่งของอาหารที่มีค่าดัชนีน้ำตาลต่างๆ แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ประเภทและแหล่งอาหารที่มีค่าดัชนีน้ำตาลต่างๆ

อาหาร	แหล่งของอาหาร	ค่าดัชนีน้ำตาล
อาหารที่มีค่าดัชนีน้ำตาลสูง (High GI Food)	ขนมปังขาว คอร์นเฟลก ข้าวเม็ล็ดสั้น มันฝรั่งอบ มันฝรั่งทอด ไอศกรีม ผลไม้อบแห้ง ผลไม้ที่มีรสหวาน	≥ 70
อาหารที่มีค่าดัชนีน้ำตาล ปานกลาง (Medium GI Food)	อาหารประเภทเส้น ถั่วคั่ว ถั่วฝักยาว มันเทศ ข้าวโพดหวาน ข้าวโพดคั่ว ข้าวกล้อง โฮลวีต	56-69
อาหารที่มีค่าดัชนีน้ำตาลต่ำ (Low GI Food)	ถั่วชนิดต่างๆ ผัก ธัญพืชที่มีน้ำตาลต่ำ โยเกิร์ตไขมันต่ำ เกรฟฟรุต แอปเปิ้ล มะเขือเทศ	≤ 55

ที่มา : จิรนาถ บุญคง, 2554

ทางด้านอุตสาหกรรมอาหาร แป้งทนย่อยนั้นใช้เป็นเส้นใยอาหารในผลิตภัณฑ์ หรือเพิ่มเส้นใยอาหาร เนื่องจากมีขนาดอนุภาคเล็ก มีสีขาว ไม่มีกลิ่น อุ่มน้ำได้น้อย มีการพองตัวได้ จึงนิยมใช้ในอาหารปรุงสุกหรือผ่านการอบ เช่น เบเกอรี่ ธัญพืชแปรรูป อาหารเส้น อาหารทอด เป็นต้น และบางครั้งใช้เป็นสารเติมแต่งที่เป็นพรีไบโอติกส์ (prebiotics)

2.3.3 การผลิตแป้งทนย่อย

การผลิตแป้งทนย่อยมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี ได้แก่ 1) การใช้ความร้อนขึ้นในการแปรรูปแป้งโดยทำให้แป้งมีความชื้นประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ แล้วให้ความร้อนมากกว่า 100 องศาเซลเซียส 2) การใช้เอนไซม์ย่อยแป้ง เพื่อเพิ่มอัตราการคินตัว สำหรับแป้งที่มีอะไมโลสต่ำ 3) การใช้ความร้อนและเอนไซม์ควบคู่กัน สำหรับแป้งที่มีอะไมโลสสูง และ 4) การใช้สารเคมีทำให้เกิดโครงสร้างที่เอนไซม์ย่อยแป้งทำงานไม่ได้ เช่น โซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต (Sodium trimetaphosphate) ในสภาพธรรมชาติแป้งมีองค์ประกอบเป็นอะไมโลสและอะไมโลเปคติน มีโครงสร้างเม็ดแป้งอัดกันแน่น ทำให้ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ และถ้าแป้งนั้นมีอะไมโลสในปริมาณมากก็จะทนการย่อยมากขึ้นด้วย และเมื่อให้ความร้อนกับแป้งจนถึงขั้นทำให้เกิดเจลที่เรียกว่า กระบวนการเจลาติไนเซชันและทำให้เกิดการคินตัว จะเกิดโครงสร้างผลึกของอะไมโลสที่ทนต่อการย่อยมากขึ้นไปอีก โดยปกติแป้งจะถูก

ย่อยด้วยเอนไซม์ย่อยแป้งเมื่อย่อยอย่างสมบูรณ์จะได้กลูโคสอย่างมากมาย แต่ถ้าแป้งนั้นมีโครงสร้างเชิงซ้อนกับไขมัน หรือชีวโมเลกุลอื่นๆ ก็จะทำให้การย่อยยากขึ้นไปด้วย

มีการผลิตข้าวกล้องสุขภาพโดยนำข้าวที่มีอะไมโลสสูง เช่น ข้าวพันธุ์พิษณุโลก 2 และพันธุ์ กข 31 นำข้าวเปลือกไปอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบด ร่วมกับการเก็บในที่อับอากาศ แล้วพบว่า ข้าวกล้องที่ได้มีค่า GI ลดลง จากข้าวพันธุ์พิษณุโลก 2 เดิมค่า GI เท่ากับ 67.8 ลดเหลือ 65.2 ข้าวพันธุ์ กข 31 เดิมค่า GI เท่ากับ 67.8 ลดเหลือ 61.3 แต่ข้าวกล้องที่ได้มีคุณภาพทางด้านเนื้อสัมผัสแข็ง และสีมีสีน้ำตาลเพิ่มขึ้น (คู่มือการผลิตข้าวกล้องสุขภาพ, 2560)

2.3.4 การเกิดแป้งทนย่อยชนิด RS3

RS3 เกิดจากการนำแป้งมาให้ความร้อนจนเกิดเจลลิตในเซชันทำให้โมเลกุลของแป้งที่ประกอบด้วยอะไมโลสและอะไมโลเพคตินละลายออกมาเมื่อเย็นโมเลกุลอะไมโลสจะจัดเรียงตัวใหม่ได้ผลึกที่มีความแข็งแรงซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่าเกิดการคืนตัวหรือรีโทรเกรเดชัน การเกิด RS3 ที่มีการศึกษากันอย่างกว้างขวางได้ศึกษา โดยการนำ amylose VII และแป้งมันฝรั่งมาเป็นวัตถุดิบตั้งต้น การเกิด RS3 ขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง ปริมาณอะไมโลส ขนาดโมเลกุล อุณหภูมิ และเวลาการเกิดเจลลิตในเซชัน และอุณหภูมิ และเวลาของการเกิดรีโทรเกรเดชัน การจะผลิตแป้งที่มี RS3 สูงควรจะผลิตจากแป้งที่มีปริมาณอะไมโลสสูง แป้งข้าวโพดเมื่อผ่านกระบวนการแล้วทำให้มีอะไมโลสสูง 50-70% อะไมโลสมีอิทธิพลต่อการเกิด RS3 สูง

RS3 ส่วนใหญ่เกิดจากกระบวนการรีโทรเกรเดชันของโมเลกุลอะไมโลส เมื่อแป้งได้รับความร้อนจนเกิดกระบวนการเจลลิตในเซชันอย่างสมบูรณ์ โมเลกุลของอะไมโลส และอะไมโลเพคตินเกิดการกระจาย เมื่อปล่อยให้เย็นตัวลง โมเลกุลอะไมโลสรูปร่างเกลียวคู่จะมาเกิดพันธะกันทำให้โครงสร้างเป็นเกลียวคู่โดยหนึ่งสายเกลียวประกอบด้วยกลูโคส 6 โมเลกุล เป็นโครงสร้างที่สามารถอุ้มน้ำ และไม่มีการดูดน้ำเข้ามาอีก ส่งผลให้มีความหนืดคงตัวมากขึ้น เกิดเป็นลักษณะคล้ายเจลเหนียวหรือผลึก เมื่อเวลาผ่านไปเกิดกระบวนการรีโทรเกรเดชันมากขึ้น ทำให้เกลียวคู่เกิดการเรียงตัวหนาแน่นและแข็งแรง ทำให้เกิดการทนย่อยเอนไซม์ได้

2.4 การวิเคราะห์ปริมาณแป้งทนย่อย

2.4.1 การวิเคราะห์ปริมาณแป้งทนย่อยตามวิธี McCleary

ชั่งตัวอย่างสตาร์ช 0.1 กรัม เติมน้ำละลายเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสจากตับอ่อนที่มีเอนไซม์อะไมโลกลูโคไซด์ 4 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง เติมน้ำตาลกลูโคส 4 มิลลิลิตร บั่นเหวี่ยงที่ 3000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาทีที่ทั้งส่วนใส่น้ำตะกอนมาเติมน้ำตาลกลูโคสความเข้มข้นร้อยละ 50 ปริมาตร 8 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน บั่นเหวี่ยงที่ 3000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาทีที่ทั้งส่วนใส่น้ำตะกอนมาเติมน้ำตาลกลูโคส

เข้มข้นร้อยละ 50 ปริมาตร 8 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน ปั่นเหวี่ยงที่ 3000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที
 ที่ส่วนใต้น้ำตะกอนมาเติมเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 50 ปริมาตร 8 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน เติมน้ำ 2 โมลาร์ โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ ปริมาตร 2 มิลลิลิตร แล้วนำไปปั่นเป็นเวลา 20 นาทีในอ่างน้ำแข็ง เติมน้ำละลาย 1.2 โมลาร์ โซเดียมอะซิเตตบัฟเฟอร์พีเอช 3.8 ปริมาตร 8 มิลลิลิตร และเติมเอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดสความเข้มข้น 3300 หน่วย/มิลลิลิตร ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร โดยทันที นำไปปั่นที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที นำไปปั่นเหวี่ยงที่ 3000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาทีที่ปิดตัวอย่างที่ได้มา 0.1 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลองเติมน้ำละลายกลูโคสออกซิเดส/เพอร์ออกซิเดส 3 มิลลิลิตร นำไปปั่นที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที แล้วนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 510 nm คำนวณปริมาณ RS $RS = \Delta E \times (F/W) \times 9.27$ (McCleary, B.V. and. Monaghan, D.A., 2002.)

2.4.2 การวิเคราะห์ปริมาณแป้งทนย่อยตามวิธี Shin และ คณะ

ชั่งแป้งตัวอย่าง 0.5 กรัม ลงในฟอสเฟตบัฟเฟอร์พีเอช 6 ปริมาตร 25 มิลลิลิตร และ 0.2 มิลลิลิตร Termamyl บ่มในอ่างน้ำร้อนควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที ทำให้เย็น ปรับพีเอชให้เท่ากับ 4.5 ด้วยสารละลายไฮโดรคลอริก 0.275 นอร์มอล เติมน้ำเอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดส 0.5 มิลลิลิตร บ่มในอ่างน้ำร้อนควบคุมอุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที ทำให้เย็นและปรับพีเอชเป็น 7.5 ด้วย สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.375 นอร์มอล เติมน้ำละลายเอนไซม์โปรติเอส (ละลายเอนไซม์โปรติเอส 40 มิลลิกรัมในฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 50 มิลลิลิตร) บ่มในอ่างน้ำร้อนควบคุมอุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที นำไปหมุนเหวี่ยงที่ 3,000 รอบต่อนาที นาน 10 นาที ล้างตะกอน 2 ครั้ง ด้วยเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 85 และน้ำกลั่นตามลำดับกรองผ่าน glass filtering crucible คำนวณหาปริมาณ RS หาได้จากสมการ $RS (\%) = \frac{[น้ำหนักของส่วนที่ไม่ละลายน้ำที่เหลืออยู่ (g) \times 100]}{น้ำหนักตัวอย่าง (g)}$ (สันสนีย์, 2558)

2.4.3 การวิเคราะห์หาปริมาณแป้งต้านทานการย่อยด้วยเอนไซม์ตามวิธีของ AOAC method (2002.02)

การวิเคราะห์หาปริมาณแป้งต้านทานการย่อยด้วยเอนไซม์ตามวิธีของ AOAC method (2002.02) โดยชั่งตัวอย่างแป้งมา 0.1 กรัม ใส่ในหลอดทดลองที่มีฝาปิด เติมน้ำเอนไซม์ผสมระหว่าง Pancreatic α -amylase และ AMG (3U/ml) ที่เตรียมในสารละลาย ทริส-โซเดียมมาลีเอตบัฟเฟอร์ ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ pH 6.0 ปริมาตร 4 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องผสมสารละลาย (Vortex mixer) และนำไปปั่นที่เครื่องเขย่าควบคุมอุณหภูมิ (Shaking water bath) ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง โดยวางหลอดในแนวนอนกับการเคลื่อนที่และเขย่าตลอดเวลา จากนั้นนำมาเติมเอทานอล 99 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 4 มิลลิลิตร เพื่อหยุดปฏิกิริยา และนำไป

ปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3,000 rpm เป็นเวลา 10 นาที เทส่วนที่ใสใส่ลงในหลอดทดลอง จากนั้นนำมาเติมเอทานอล 50 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 2 มิลลิลิตร จากนั้นนำมาเติมสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 2 โมลาร์ ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ลงในแต่ละหลอด ผสมให้เข้ากัน เติมโซเดียมอะซิเตด บัฟเฟอร์ ความเข้มข้น 1.2 โมลาร์ pH 3.8 ปริมาตร 8 มิลลิลิตร และเติมเอนไซม์ Amylogucosidase (3,300 U/ml) ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันแล้วนำไปปั่นใน water bath ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

สำหรับตัวอย่างที่มีปริมาณ RS น้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์) ให้นำสารละลายมาโดยปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร และเติม GOPOD reagent ปริมาตร 3 มิลลิลิตร และนำไปปั่นที่ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 20 นาที แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 510 นาโนเมตรและนำมาเทียบกับสารมาตรฐานเพื่อหาปริมาณกลูโคสและคำนวณหาปริมาณแป้งทนย่อยด้วยเอนไซม์จากสูตร

$$\text{ปริมาณ RS (กรัม/100 กรัมตัวอย่าง)} = \Delta A \times F/W \times 9.27$$

เมื่อ ΔA = ค่าการดูดกลืนแสง

F = ปริมาณกลูโคสที่วิเคราะห์ได้

W = น้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์ (g)

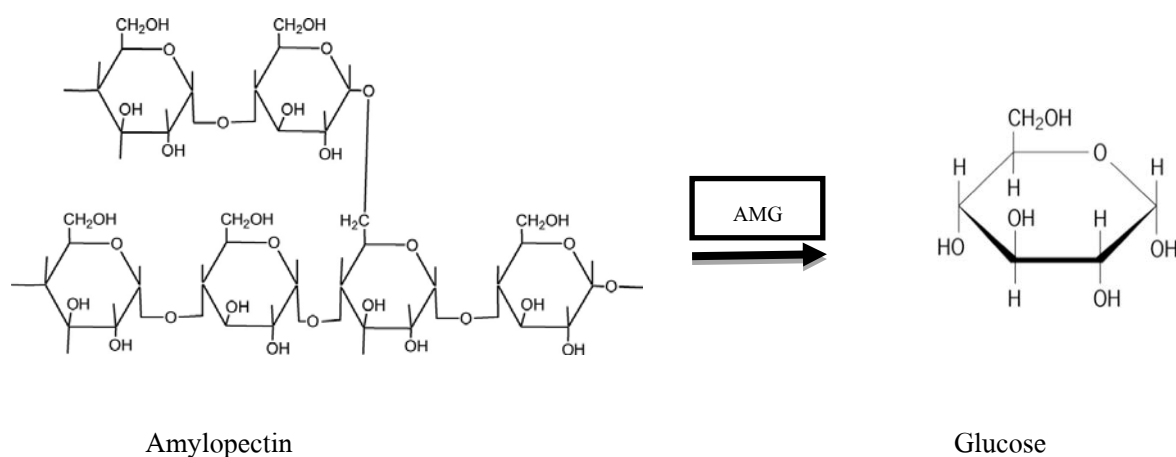
9.27 = แฟกเตอร์สำหรับ Glucose

2.4.5 เอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์แป้งทนย่อย

เอนไซม์คือ กลุ่มของโปรตีนที่มีหน้าที่พิเศษแตกต่างจากโปรตีนอื่นๆทั่วไป กล่าวคือ มีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาทางชีวเคมีที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ของสิ่งมีชีวิตได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง เพื่อใช้ในการสังเคราะห์องค์ประกอบภายในเซลล์ และระบบการย่อยอาหาร เป็นต้น โดยเอนไซม์จะมีความจำเพาะต่อสารที่ทำปฏิกิริยาที่เรียกว่า ซับสเตรด (Substrate) และสามารถเร่งปฏิกิริยาโดยไม่ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์อื่น ตลอดทั้งเอนไซม์จะเพิ่มอัตราเร็วของปฏิกิริยาโดยลดพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาได้ (สุกัญญา สุนทรส, 2558)

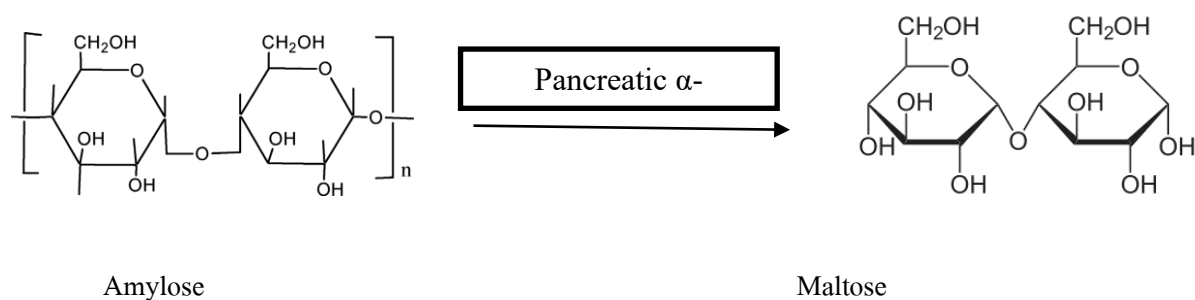
2.4.5.1 เอนไซม์อะไมโลกลูโคไซด์ (Amyloglucosidase, AMG)

เอนไซม์อะไมโลกลูโคไซด์ (EC 3.2.1.3) เป็นเอนไซม์ที่ใช้เพื่อเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสสตาร์ชโดยตัดโมเลกุลของน้ำตาลกลูโคสออกจากโมเลกุลของสตาร์ชที่ตำแหน่งปลายด้านนอนรีดิวซิง (non-reducing end) ของพันธะไกลโคซิดิก ทั้งที่ตำแหน่งแอลฟา-1,4 และ 1,6



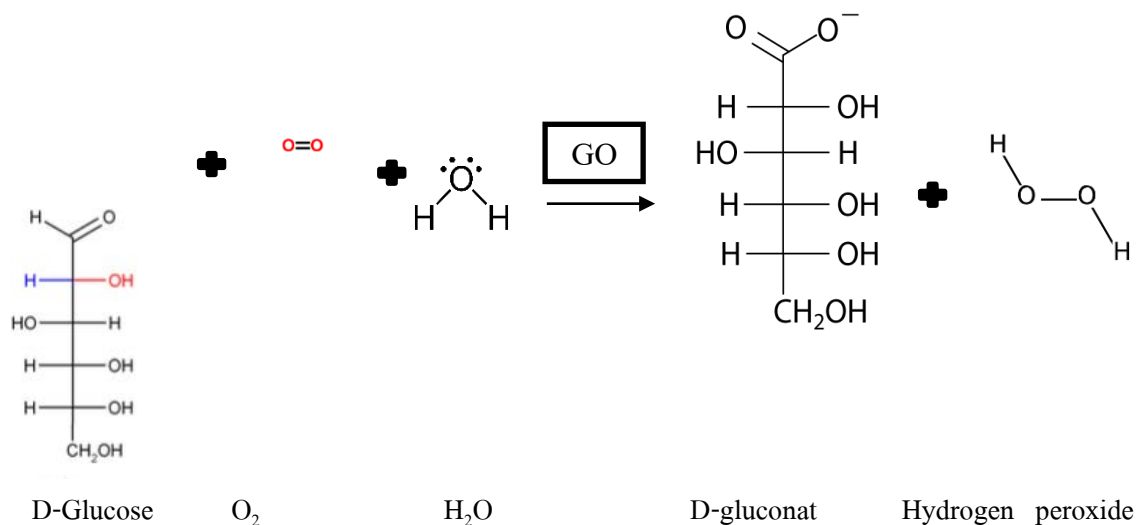
2.4.5.2 เอนไซม์อะไมเลสจากตับอ่อน (Pancreatic α -amylase)

เอนไซม์อะไมเลสจากตับอ่อน (EC 3.2.1.1) เป็นเอนไซม์ที่ไฮโดรไลซ์พันธะไกลโคซิดิกภายในสายโพลีเมอร์ของโมเลกุลแป้งและไกลโคเจน (glycogen) ที่ตำแหน่งแอลฟา 1-4 แบบสุ่มทำให้โมเลกุลของแป้งและไกลโคเจนถูกไฮโดรไลซ์ได้น้ำตาล เช่น น้ำตาลมอลโตส และกลูโคสอย่างรวดเร็ว เอนไซม์แอลฟาอะไมเลสพบทั่วไปในระบบการย่อยอาหาร (digestive system) ของมนุษย์ และสัตว์เช่น ในน้ำลายและน้ำย่อยจากตับอ่อน (พัคตร์ประไพ, 2546)

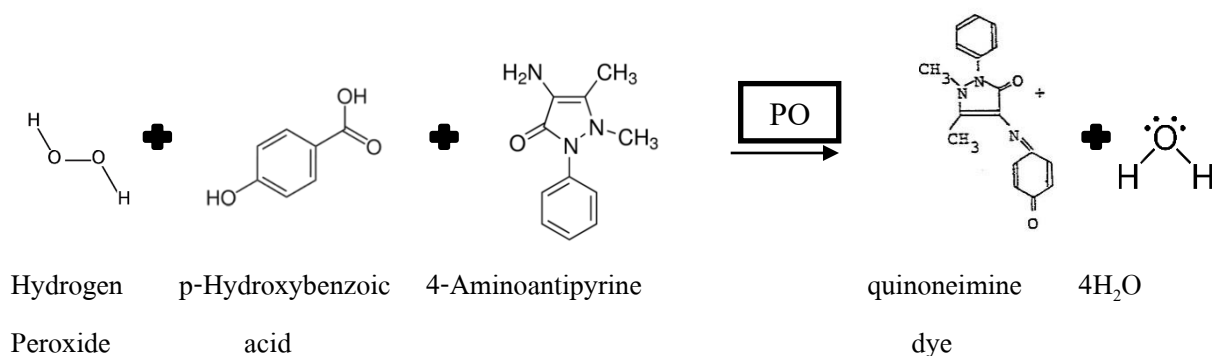


2.4.5.3 เอนไซม์กลูโคสออกซิเดส เพอร์ออกซิเดส (Glucose oxidase/peroxidase)

กลูโคสออกซิเดส (EC 1.1.3.4) เป็นเอนไซม์ที่เร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำตาลกลูโคสด้วยออกซิเจนได้เป็นกรดกลูโคนิกและไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ เพื่อลดปริมาณน้ำตาลกลูโคสในอาหารให้น้อยลงช่วยป้องกันไม่ให้อาหารเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่อาศัยเอนไซม์



เปอร์ออกซิเดส (EC 1.11.1.7) คือเอนไซม์ที่เร่งปฏิกิริยาการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ให้เป็นน้ำ



2.5 สเปกตรัมเป้นทน้อยจาก FTIR

เทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR) เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ศึกษาโครงสร้างของโมเลกุลของสาร สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งเชิงคุณภาพ และเชิงปริมาณ สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งสถานะของแข็ง ของเหลว หรือแก๊ส เทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปีอาศัยกระบวนการดูดกลืนช่วงคลื่นอินฟราเรดของโมเลกุล ทำให้เกิดการสั่นของโมเลกุล ทำให้สามารถทราบหมู่ฟังก์ชันภายในโมเลกุลได้

การติดตามการเกิดกระบวนการรีโทรเกรเดชัน และการเกิดผลึกสามารถดูสเปกตรัมได้จากเครื่อง Fourier transform infrared spectrometer โดยอาศัยหลักการที่เมื่อโมเลกุลได้รับแสงในช่วงอินฟราเรดจะถูกกระตุ้นให้มีระดับพลังงานสูงขึ้นทำให้เกิดการสั่น แบบยืดตัว (stretching) และสั่นแบบงอ

(bending) ทำให้เกิดพีก (peak) ของการดูดกลืนแสงอินฟราเรด ที่ค่าความถี่ต่าง ๆ ซึ่งเกิดจากหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญ คือ

หมู่ฟังก์ชันนอกกรุป	ค่า wave number(cm^{-1})
COH	1200-100
สตาร์ชเจลาติโนเซชัน ในมันฝรั่ง	1022, 995
สตาร์ชจากกระบวนการรีโทรเกรเดชัน	1053, 1047, 1022, 1000

พีกที่ wave number 1047, 1022 cm^{-1} จะบ่งบอกถึงการจัดเรียงตัวแบบเกลียวคู่ต่อส่วนอสัณฐาน (Ratio of short-rang molecular order to amorphouse,) ดังนี้

- การเพิ่มขึ้นของพีกที่ wave number 1047 cm^{-1} มีความสัมพันธ์กับปริมาณผลึก(Crystalline)ในโครงสร้างโมเลกุลของสตาร์ช

-พีกที่ wave number 1022 cm^{-1} มีความสัมพันธ์กับส่วนอสัณฐาน(Amorphous) ในโครงสร้างโมเลกุลของสตาร์ช

-ค่า RSA สัมพันธ์กับระยะเวลาการเกิดกระบวนการรีโทรเกรเดชันในโมเลกุลของสตาร์ช

-พีกที่ wave number 1053, 1003 cm^{-1} มีความสัมพันธ์กับกระบวนการรีโทรเกรเดชันในโมเลกุลของสตาร์ช พีก1053 cm^{-1} เป็นผลที่เกิดจากอะไมโลเปคตินเกิดเป็นเกลียวคู่ และพัฒนาเป็นผลึกโครงสร้าง (สุนันทา ทองทา, 2553)

J.Y.Kim et al. (2017) ได้ศึกษาโครงสร้าง และคุณสมบัติเชิงทนย่อยที่เกิดจากการใช้แป้งข้าวทำให้เกิดพันธะโดยใช้กรดซิตริก (CARS) โดยการนำแป้งข้าว(NRS)มาทำให้เกิดพันธะ cross-linked โดยใช้กรดซิตริก ความเข้มข้น 0, 1, 10, 30% w/w แล้วนำแป้งทั้งสองชนิดไปวัด FTIR พบพีกที่พบ พีกที่ broad wave number ดังนี้

3000-3600 cm^{-1} และ 2932 cm^{-1} เกิดจาก OH และ CH stretching

1650 cm^{-1} เกิดจาก OH bending

1420 cm^{-1} เกิดจาก CH bending

1018-1155 cm^{-1} เกิดจากpyranose ที่มาจาก glucose residues

1734 cm^{-1} เกิดจากหมู่ carboxyl R-COOR

J.Wang et al. (2014) นำข้าวที่มีแป้งทนย่อยอัดกับ KBr แล้วนำไปวัด IR ตั้งแต่ที่ 4000 cm^{-1} ถึง 400 cm^{-1} ไปตรวจสอบตรวจสอบสเปกตรัมของRS โดยดูสเปกตรัมที่แบนด์ ดังต่อไปนี้

3400 cm^{-1} ที่เกิดจาก OH

2800 cm^{-1} ที่เกิดจาก CH_2

1600 cm^{-1} ที่เกิดจาก COO^-

1300 cm^{-1} 1022 cm^{-1} ที่เกิดจาก C-O-H

620 cm^{-1} ที่เกิดจาก pyranose ring

C. Bao, et al. (2017) ได้ศึกษาโครงสร้างแป้ง โดยการวัดด้วย FTIR ทำให้ทราบสูตรโครงสร้างของสารที่อยู่ในผลึกของแป้ง แบนด์ที่ 3100- 3700 cm^{-1} แป้งทนย่อยชนิด RS3 มีการดูดกลืนแสงแล้วเกิดแบนด์ที่ 995, 1022, 1047 cm^{-1} ตามลำดับ แบนด์ที่ 995 และ 1047 cm^{-1} สัมพันธ์กับโครงสร้างโมเลกุลในแป้ง แบนด์ที่ 1022 cm^{-1} สัมพันธ์กับโครงสร้างผลึกโมเลกุลในแป้ง ถ้าค่าของ $R_{1047/1022}$ สูงกว่า $R_{995/1022}$ แสดงว่ามีผลึกของแป้งทนย่อย

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปาริฉัตร พุกภัยวิวัฒนากุล (2556) ได้ทำการศึกษาการผลิตสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ชนิดต่างๆ และการตรวจสอบคุณสมบัติฟิสิกส์ไปโอติก โดยได้ทำการศึกษาจากสตาร์ชจากข้าว เมล็ดขนุน และถั่วเขียว ซึ่งมีปริมาณอะไมโลสแตกต่างกัน สตาร์ชทั้ง 3 ชนิดมีรูปร่างโครงสร้างผลึกแบบ A อุณหภูมิของการเกิดเจลลิตในเซชันและอุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชเมล็ดขนุนมีค่าสูงกว่าสตาร์ชข้าว และสตาร์ชถั่วเขียว นอกจากนี้สตาร์ชเมล็ดขนุนมีปริมาณสตาร์ชทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์สูงถึงร้อยละ 26.99 ซึ่งสูงกว่าสตาร์ชถั่วเขียว และสตาร์ชข้าว โดยการเพิ่มความเข้มข้นของเอนไซม์พูลูลูแลนส และระยะเวลาการตัดสายกิ่งสามารถเพิ่มระดับการย่อยด้วยเอนไซม์ของสตาร์ชข้าว สตาร์ชเมล็ดขนุน และสตาร์ชถั่วเขียว โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับร้อยละ 99.02 96.19 96.83 ตามลำดับ สตาร์ชที่ผ่านการตัดกิ่ง และนำไปผ่านการรีโทรเกรเดชันพบว่ารูปแบบโครงสร้างผลึกของสตาร์ชทั้ง 3 ชนิด เปลี่ยนแปลงจากแบบ A เป็นแบบ B และพบว่าปริมาณผลึกอุณหภูมิการเกิดเจลลิตในเซชัน และปริมาณสตาร์ชทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษานานขึ้น โดยสตาร์ชที่ผ่านการรีโทรเกรเดชันทั้ง 3 ชนิดจัดอยู่ในกลุ่มของสตาร์ชที่มีปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ในระดับสูงมาก

มานิชญ์ สุธีรพัฒนานนท์ (2549) ได้ทำการศึกษาโดยผ่านกระบวนการเอ็กทราคชัน และกรรมวิธีการเตรียมแป้งที่ทำให้เกิดแป้งทนการย่อยสูงสุดเพื่อให้พาสต้าข้าวเจ้าที่ได้มีคุณสมบัติเชิงหน้าที่ด้านสุขภาพมากขึ้น แป้งทนการย่อยไม่ถูกย่อยสลายได้โดยเอนไซม์ในลำไส้เล็ก ดังนั้นแป้งทนการย่อยจึงมีคุณสมบัติคล้ายกับเยื่อใยอาหาร ซึ่งมีประโยชน์ต่อระบบขับถ่าย ช่วยลดระดับไขมันในเลือด ลดความเสี่ยงต่อการเกิดไขมันอุดตันในเส้นเลือด โรคหัวใจ โรคเบาหวาน เพิ่มความเป็นกรดที่ช่วงปลายลำไส้ใหญ่จากการย่อยสลายของจุลินทรีย์ในลำไส้ใหญ่เป็นกรดไขมันโมเลกุลสั้น ทำให้เพิ่มปริมาณและปรับสภาพอุจจาระ จากการเพิ่มปริมาณแป้งด้านทานการย่อยโดยการผสมแป้งข้าวเจ้าที่

ผ่านการย่อยบางส่วนด้วยเอนไซม์อะไมเลสกับแป้งข้าวเจ้าที่ใช้สำหรับผลิตพาสต้าข้าวเจ้าในระดับที่ 5-7% พบว่ามีผลทำให้มีปริมาณแป้งทนการย่อยในพาสต้าข้าวเจ้าคั่วสุกแล้วเพิ่มขึ้นถึง 65% ทำให้ผลิตภัณฑ์พาสต้าข้าวเจ้าที่ได้มีปริมาณเชื้อใยอาหารรวมสูงกว่า 2% ถือว่าอยู่ในกลุ่มอาหารที่มีเส้นใย ซึ่งจากเดิมมีเพียง 0.85% เท่านั้น

สุนันทา ทองทา (2561) ได้ศึกษาการผลิตแป้งทนย่อยต่อเอนไซม์ชนิด 3 โดยใช้แป้งข้าวโปรตีนต่ำเป็นวัตถุดิบ ผู้วิจัยได้ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการตัดกิ่งสตาร์ชข้าวจาก 3 ตัวแปร สภาวะที่เลือกคือ สตาร์ชข้าวตัดกิ่งที่เตรียมโดยใช้ความเข้มข้นของสตาร์ชข้าว 14.5% ร่วมกับปริมาณเอนไซม์ พูลูลานเนส 60 ยูนิตต่อกรัมแป้ง เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งแสดงค่าระดับการย่อยสูงสุด และมีปริมาณแป้งทนย่อยเกิดขึ้น 15.9% การศึกษาสภาวะการบ่มสตาร์ชข้าวตัดกิ่งต่อการสร้างแป้งทนย่อย พบว่าการเพิ่มปริมาณสตาร์ชความเข้มข้น 15-30% และการเพิ่มระยะเวลาการบ่มจาก 24 เป็น 72 ชั่วโมงไม่มีผลต่อการสร้างแป้งทนย่อย โดยมีปริมาณแป้งทนย่อยเกิดขึ้นในช่วง 26-31% สำหรับอุณหภูมิการบ่มที่ 4 25 50 80 และ 100 องศาเซลเซียสไม่มีผลต่อการสร้างแป้งทนย่อย มีปริมาณแป้งทนย่อยเกิดขึ้นในช่วง 26-33% การบ่มสตาร์ชข้าวตัดกิ่งในสภาวะอุณหภูมิการบ่มแบบวนรอบที่ อุณหภูมิ 30/80 องศาเซลเซียส ใช้เวลาการบ่ม 48 ชั่วโมง พบว่าการบ่มแบบวนรอบ 3 รอบที่ใช้ระยะเวลาการเติบโตผลึกนานกว่าเวลาการเกิดนิวเคลียสมีปริมาณแป้งทนย่อยเกิดขึ้น 32% ขณะที่การบ่มแบบวนรอบ 3.5 รอบ ซึ่งใช้ระยะเวลาการเติบโตผลึกสั้นกว่ามีปริมาณแป้งทนย่อยเกิดขึ้น 37% การบ่มแบบวนรอบโดยใช้อุณหภูมิการเกิดนิวเคลียส 30 และ 60 องศาเซลเซียส ไม่มีผลต่อการสร้างแป้งทนย่อย

สุนันทา ทองทา (2553) ได้ศึกษาการเกิดแป้งทนย่อย type 3 จากแป้งของข้าวสามพันธุ์ คือ พันธุ์กข 6 พันธุ์พิษณุโลกและพันธุ์สุพรรณบุรี 90 โดยทำการตัดกิ่งอะไมโลเปคตินด้วยเอนไซม์พูลูลานเนสและใช้พูลูลานเนสร่วมกับไอโซอะไมเลสแล้วดูผลของการคั่ว จากการศึกษาพบว่าอัตราการคั่วของแป้งที่ใช้พูลูลานเนสร่วมกับไอโซอะไมเลสมีอัตราสูงกว่าที่ใช้พูลูลานเนสอย่างเดียว

ศศิพร รัตนสุวรรณ และสุนีย์ โชตินิรนาท (2561) ได้ศึกษาผลของการผลิตสตาร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์พูลูลานเนส และการเกิดรีโทรเกรเดชันร่วมกับการคัดแปรความร้อน-ความชื้นของสตาร์ชถั่ว โดยศึกษาผลของการผลิตสตาร์ชทนย่อยประเภทที่ 3 จากสตาร์ชถั่วเขียว ถั่วดำ และถั่วแดงหลวง โดยผ่านการตัดกิ่งสตาร์ชถั่วด้วยเอนไซม์พูลูลานเนส 0.02 มิลลิกรัมต่อกรัมสตาร์ชที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 36 ชั่วโมง พบว่าสตาร์ชทนย่อยลดลง เมื่อบ่มตัวอย่างที่ผ่านการตัดกิ่งที่ อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0 1 3 7 และ 14 วัน แล้วทำให้แห้งแบบแช่เยือกแข็ง พบว่าสตาร์ชถั่วทั้งสามชนิดมีแนวโน้มของปริมาณสตาร์ชทนย่อยเพิ่มสูงขึ้น จากนั้นนำสตาร์ชถั่วที่ผ่านการตัดกิ่งร่วมกับการคัดแปรความร้อน-ความชื้น พบว่าสตาร์ชถั่วทั้งสามชนิด มีปริมาณสตาร์ชทนย่อยเพิ่มสูงขึ้น ($p \leq 0.05$)

คันสนีย อุดมคติ และคณะ (2558) ได้ศึกษาใช้แป้งข้าวที่ได้จากปลายข้าวพันธุ์เหลืองประ-ทิว อายุการเก็บมากกว่า 4 เดือน มาหมักร่วมกับการให้ความร้อนและความชื้น (fermentation and heat moisture treatment, FHMT) ในการผลิตขนมจีน โดยนำแป้งที่ผ่านการหมัก 1 วันและผ่านกระบวนการให้ความร้อนร่วมกับความชื้นที่ระดับความชื้น 25% และอุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ซึ่งมีแป้งทน้อยเท่ากับ 5.29% มาผลิตเป็นเส้นขนมจีน จากการวิจัยพบว่า เส้นขนมจีนมีแป้งทน้อยเพิ่มมากขึ้นเมื่อใช้แป้ง FHMT เพิ่มขึ้น เนื้อสัมผัสมีความแข็งเพิ่มขึ้น และมีความเหนียวน้อยลง เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นขนมจีนที่ผลิตด้วยวิธีดั้งเดิมเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้แป้งข้าว FHMT ยังทำให้เส้นขนมจีนไม่ขาดง่ายในระหว่างการโรยเส้น จากการทดลองทางประสาทสัมผัสพบว่าสามารถใช้แป้งข้าว FHMT ในการทำเส้นขนมจีนได้มากที่สุดถึง 50% ของแป้งทั้งหมด เพื่อให้ขนมจีนยังคงเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค

อุดมศักดิ์ มหาวิวัฒน์ และคณะ (2559) ได้ทำการวิจัยถึงทดลองในอาสาสมัคร 2 กลุ่ม ๆ ละ 30 ราย ซึ่งแต่ละกลุ่ม จะมีเพศชาย 15 ราย และเพศหญิงจำนวน 15 ราย กลุ่มทดลองได้รับประทานข้าวเหนียวดัดแปลงค่าดัชนีน้ำตาลต่ำ และกลุ่มควบคุม ได้รับประทานข้าวเหนียวที่ไม่ได้ดัดแปลงค่าดัชนีน้ำตาล วัดระดับน้ำตาลในเลือดด้วยเครื่องตรวจน้ำตาลในเลือด ชื่อ ACCU-CHEK Performa version3 อาสาสมัครทั้ง 2 กลุ่ม มีค่าเฉลี่ยอายุ น้ำหนัก ส่วนสูง และค่า BMI ที่ใกล้เคียงกันกล่าวคือไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Pair Sample T-test) ($p < 0.05$) พบว่า กลุ่มทดลองภายหลังการรับประทาน ให้ระดับน้ำตาลในเลือด ในนาที่ที่ 30 60 และ 90 นาที มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 134.93 138.52 และ 117.14 mg/dl ตามลำดับ กลุ่มควบคุม ได้ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำตาลในเลือดเท่ากับ 141.47 150.27 และ 124.60 mg/dl ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์หาความแตกต่างด้วย ANOVA –test พบว่า กลุ่มทดลองทั้งสอง มีผลของระดับน้ำตาลภายหลังการรับประทาน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติทางสถิติ ($p < 0.05$) ผลการศึกษาครั้งนี้ช่วยสนับสนุนการเลือกบริโภคข้าวเหนียวดัดแปลงค่าดัชนีน้ำตาลต่ำ ทำให้ลดน้ำตาลในเลือดได้อย่างมีนัยสำคัญ

E. Agama-Acevedo, et al. (2018) ได้ศึกษา RS ที่เกิดขึ้นโดยนำแป้งที่อะไมโลสสูง (70%) ไปเติมน้ำให้เป็นแป้งที่มีน้ำในแป้ง 40%w/w ไปอบไอน้ำในแรงดันสูง (autoclave) ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที ทำให้แห้งโดยอบในตู้อบ (OD) ที่ 40 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง และทำให้แห้งโดยฟรีซดราย (freezing-drying, FD) วิธีไฮโดรเทอร์มอล (hydrothermal treatment, HT) ของแป้งที่มีน้ำในแป้ง 40%w/w ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 3 12 24 ชั่วโมง ก็ถูกนำมาใช้สำหรับการทำให้ตัวอย่างแห้ง พบว่าวิธีการทำให้ตัวอย่างแห้งมีผลกับค่า RS วิธีทำให้แห้งโดยอบในตู้อบเพิ่มค่า RS วิธีทำให้แห้งโดยฟรีซดรายลดค่า RS วิธีไฮโดรเทอร์มอลเวลาที่ใช้เพิ่มขึ้นมีผลทำให้เพิ่มค่า RS ค่าความสัมพันธ์ของ RS กับความเป็นผลึกของแป้งมีค่าต่ำ ($r^2 = 0.69$) ค่าความสัมพันธ์ของ RS กับค่าที่วัดได้จากช่วงสั้นๆ ในเทคนิค FTIR มีค่าสูง ($r^2 = 0.96$) ดังนั้นสรุปได้ว่า

RS มีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกับ double-helix และสารประกอบ amylose-lipid ระหว่างการทำให้แห้ง และการให้ความร้อนกับแป้ง

A. Kumar et al. (2018) ได้การศึกษาข้าวในประเทศอินเดีย พบว่าประชากรโลกเกินครึ่งหนึ่ง นิยมกินข้าวเป็นอาหารหลัก ข้าวมีแป้งเป็นองค์ประกอบ หลังจากกินอาหารแล้ว แป้งข้าวจะถูกย่อย ด้วยเอนไซม์ แล้วเปลี่ยนเป็นกลูโคสเพื่อใช้เป็นพลังงานให้กับร่างกาย พลังงานที่เหลือจะถูกเปลี่ยน ให้เป็นไกลโคเจน หรือไขมันเก็บไว้ใช้ภายหลัง ดังนั้นถ้ากินข้าวมากจะทำให้มีปัญหา เช่น อ้วน เบาหวาน เป็นต้น ข้าวเริ่มย่อยจากในปากด้วยเอนไซม์อะไมเลส และถูกย่อยมาเรื่อยๆในทางเดิน อาหาร โดยทั่วไปในข้าวสวจะมีแป้งทนย่อยน้อยกว่าร้อยละ 3 จะเกิด RS5 ซึ่งเกิดจากสารประกอบ ของอะไมโลสกับไขมัน ข้าวที่มี RS มากทำให้ค่า GI ต่ำทำให้ย่อยได้ช้าทำให้น้ำตาลในเลือดเพิ่มช้าๆ ข้าวมีค่า RS 0.35-2.57% มีค่า GI 60.07-70.36 มีอะไมโลส (amylose content, AC) 3.75-23.32 % พบว่าค่า RS สัมพันธ์กับค่า GI แสดงด้วยค่า $r = -0.688$

P.V. Hung et al. (2018) ได้ศึกษาการเกิด RS ในแป้งข้าวที่มีอะไมโลสสูง แป้งข้าวธรรมดา และแป้งข้าวเหนียวโดยวิธีการให้ความร้อนขึ้นในสภาพเป็นกรด พบว่าการเกิดโพลีเมอร์ในแป้งข้าว ธรรมชาติที่ใช้กรดซิตริก กรดแลกติก หรือกรดอะซิติกมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ RS ที่เกิดขึ้น ข้าวที่ให้ความร้อนขึ้นในสภาพเป็นกรดอยู่ในช่วง 30.1-39.0% ในแป้งข้าวให้ความร้อนขึ้นมี RS 18.5-23.9% ในแป้งข้าวมี RS 6.3-10.2% การให้ความร้อนขึ้นในสภาพเป็นกรดทำให้การพองตัว และความหนืดลดลง แต่เพิ่มการละลายของแป้ง รูปร่างผลึกเหมือนเดิม เมื่อเปรียบเทียบกับชนิดกรด พบว่ากรดซิตริกทำให้เกิด RS มากที่สุด รองลงมากรดแลกติก กรดอะซิติก ตามลำดับ งานวิจัยนี้มี ประโยชน์สำหรับการทำอาหารสุขภาพที่มี RS สูง

B. A. Ashwar et al. (2017) ได้ศึกษาโครงสร้าง คุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ และการย่อยในหลอด ทดลองของ RS4 จากแป้งข้าว แป้งข้าวเตรียมมาจากข้าวหลายพันธุ์ มีการทำให้แป้งเกิดมี RS4 จำนวน มากโดยใช้ STMP/STPP พบว่ามีค่าฟอสฟอรัส 0.33-0.35 % ค่า DS 0.016-0.018 เมื่อนำไปหา สเปกตรัมด้วย FTIR พบแบนที่เกิดจาก -OH ที่ 3290 cm^{-1} แบนที่เกิดจาก P=O ที่ $1244\text{-}1266\text{ cm}^{-1}$ ซึ่ง เกิดจากการที่แป้งผ่านขบวนการ STMP/STPP แป้งที่เกิดมี RS4 เพิ่มความสามารถในการดูดน้ำ เพิ่มความสามารถในการดูดน้ำมัน ในขณะที่ค่าอะไมโลส การละลาย การบวมน้ำ และการทะลุผ่าน ของแสงลดลง ขบวนการ STMP/STPP ทำให้แป้งเกิดการคงตัว SEM แสดงภาพให้เห็นว่าแป้ง เกิดมี RS4 อย่างสมบูรณ์

K. Tsuiiki et al. (2016) ได้ศึกษาข้าวญี่ปุ่น พบว่าในปัจจุบันอาหารหลายชนิดได้มีการพัฒนาให้ มีแคลอรีต่ำ ซีเรียลที่มี RS จะมีแคลอรีต่ำ เพิ่มกรดไขมัน และมีผลทำให้ลดการเป็นมะเร็งลำไส้ ข้าว ประกอบด้วยแป้งที่ย่อยด้วยเอนไซม์ และ RS ในการแปรรูปข้าวด้วยวิธีต่างๆทำให้ RS ในข้าว แตกต่างกัน ในข้าวหนึ่งที่มีวิธีต่างกันจะมี $15 \leq RS \leq 35\%$

J. Wang et al. (2014) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของแป้งท่อย RS ในกล้วย 2 ชนิด หลังจากเก็บเกี่ยวแล้ว โดยเก็บ 7 ขั้นตอนของการบ่ม โครงสร้างของ RS สามารถวิเคราะห์ได้โดย กล้องจุลทรรศน์ SEM XRD IR คุณสมบัติทางฟิสิกส์ เช่น การละลายน้ำ ความจุในการอุ้มน้ำ การพองตัว การโปร่งแสง สเปกตรัมของการดูดกลืนแสงของแป้งที่ย้อมด้วยไอโอดีน ผลการวิเคราะห์พบว่า RS ในกล้วยที่เก็บ 7 ขั้นตอนของการบ่มมีความแตกต่างกัน IR สเปกตรัมของ RS จะเกิดเบนที่ 3400 cm^{-1} จากหมู่ OH เบนที่ 2800 cm^{-1} จากหมู่ CH_2 พีคที่ 1600 cm^{-1} เกิดจากหมู่ COO^- เบนที่ 1300 cm^{-1} และ 1022 cm^{-1} จากหมู่ C-O-H พีคที่ 620 cm^{-1} จากวง pyranose ค่าการวัดด้วย VIS ของ starch-iodine absorption spectra ของ RS จากกล้วยมีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 560-580 nm จากการทดลองนี้ทำให้สามารถนำ RS ในกล้วยไปประยุกต์ใช้ได้

J.Y.Kim et al. (2017) ได้ศึกษาโครงสร้าง และคุณสมบัติแป้งท่อยที่เกิดจากการใช้แป้งข้าวทำให้เกิดพันธะโดยใช้กรดซิตริก (CARS) โดยการนำแป้งข้าว(NRS)มาทำให้เกิดพันธะ cross-linked โดยใช้กรดซิตริก ความเข้มข้น 0 1 10 30% w/w จากนั้นนำแป้งท่อยไปวัด SEM จะเห็นภาพโครงสร้างของเม็ดแป้ง เมื่อวัดด้วย FT-IR เมื่อเปรียบเทียบกับ NRS กับ CARS จะเกิดพีคใหม่ที่ 1734 cm^{-1} แล้ววัด x-ray diffraction เพื่อพิสูจน์ พบว่าผลึกของ CARSจะเล็กกว่า NRS สเปกตรัม ^{13}C NMR ของ CARS10 และ CARS30 จะมีพีคที่ 45.55 ppm ส่วน CARS30 จะมีพีคที่ 178.94 ppm ค่า swelling factor light transmittance thermal properties pasting properties ของ CARS จะมีค่าต่ำกว่า NRS อย่างมีนัยสำคัญ ค่าแป้งท่อยใน CARS เพิ่มขึ้น

K. Kaur and N. Singh (2000) ศึกษาผลของการเกิดสารประกอบ amylose-lipid ระหว่างปรุงอาหารของแป้งข้าวที่เติมกรดไขมัน myristic acid palmitic acid และ stearic acid กรดไขมันที่ต่างกันถูกเติมลงในแป้งข้าว 1.5 3.0 4.5% แล้วปรุงใน visco-amylograph ที่ 95 องศาเซลเซียส นาน 30 60 90 นาที พบว่าเมื่อเพิ่มระดับกรดไขมันในแป้งข้าวที่ปรุงนาน 30-90 นาที สารประกอบ amylose-lipid เพิ่มขึ้นการละลายน้ำลดลง ถ้าใช้เวลาปรุงนานสารประกอบ amylose-lipid จะเพิ่ม กรด myristic acid จะทำให้เกิดสารประกอบ amylose-lipid ได้มากกว่ากรด palmitic acid ส่วน stearic acid จะเกิดน้อยที่สุด สเปกตรัมของแป้งข้าวที่ใส่กรดไขมันย้อมไอโอดีน และแป้งข้าวที่ไม่ใส่กรดไขมันที่ย้อมไอโอดีนนำมาเปรียบเทียบกันเพื่อดูการเกิดสารประกอบ amylose-lipid ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 630 nm และ 520 nm จะลดลงเมื่อเพิ่มกรดไขมัน myristic acid จะทำให้ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 630 nm และ 520 nm มากที่สุด

S. Zeng et al. (2015) ได้ศึกษาผลของการเตรียม RS3 จากแป้งเมล็ดบัวด้วยวิธีการเตรียมที่ต่างกัน โดยแป้งเมล็ดบัวจะผ่านกระบวนการที่ต่างกันดังนี้ 1)ให้ความร้อนขึ้นที่ความดันสูง (autocaving method, GP -LRS3) 2)ให้ความร้อนขึ้นด้วยไมโครเวฟ (microwave-moisture method, MP -LRS3) นำแป้งเมล็ดบัว 150g ใส่ส่วนผสมน้ำ 3:20 แล้วไปให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ

640W นาน 2 นาที ทำให้เย็นที่อุณหภูมิห้องแล้วแช่แข็ง 24 ชั่วโมง แล้วนำอบที่ 50 องศาเซลเซียสจนแห้ง บดแล้วร่อนผ่านร่อนขนาด 185 ไมครอน 3) ให้อัลตราโซนิก-ความร้อนขึ้นที่ความดันสูง (ultrasonic-autocaving method, UP -LRS3) นำแป้งเมล็ดข้าว 450g ใส่ในน้ำสัดส่วนแป้งต่อน้ำ 9:20 แล้วไปแช่ในตู้เย็นแล้วไปเข้าอัลตราโซนิกที่ 300 W 55 นาที 25 องศาเซลเซียส แล้วนำไปเข้าเครื่องนึ่งแรงดันสูง 115 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที ทำให้เย็นที่อุณหภูมิห้องแล้วแช่แข็ง 24 ชั่วโมง แล้วนำอบที่ 50 องศาเซลเซียสจนแห้ง บดแล้วร่อนผ่านร่อนขนาด 185 ไมครอน จากนั้นนำแป้งที่ผ่านขบวนการทั้งสามชนิด ไปหาโครงสร้างโดยใช้ environmental scanning electron microscopy (ESEM) XRD FTIR NMR และวัดการละลาย (solubility) การพอง (swelling power) และอื่นๆ

H. Zeng et al. (2018) ได้ศึกษาโครงสร้าง และ prebiotic activity ของ RS จากแป้งเมล็ดข้าว โดยนำแป้งเมล็ดข้าวไปตกตะกอนด้วย เอทานอล 20% และ 30% ตั้งชื่อว่า LRS3-20% และ RS-30% ตามลำดับ แล้วนำไปศึกษาการบวมน้ำ และการละลายพบว่า LRS3-20% มีค่าน้อยกว่า RS-30% เมื่อหาค่าความชื้นของ LRS3-20% และ RS-30% ไม่มีความแตกต่าง LRS3-20% และ RS-30% มีน้ำหนักโมเลกุล $2.0 \times 10^4 - 4.0 \times 10^4$ และ $1.0 \times 10^4 - 4.0 \times 10^4$ g/mol รูปร่างผิวของผงแป้ง LRS3-20% ขรุขระ ในขณะที่ RS-30% รูปร่างผิวเรียบมากกว่า ทั้ง LRS3-20% และ RS-30% มีผลึกเป็นรูป B-type แต่ LRS3-20% มีโครงสร้างแบบ double-helices มากกว่า LRS3-20% มี prebiotic activity มากกว่า RS-30% ผลนี้สัมพันธ์กับความขรุขระของผิวและโครงสร้างแบบ double-helices

W. R. Sullivan et al. (2017) ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อคุณสมบัติของผลึก และ RS ระหว่างการเก็บของขนมปังขาว RS สามารถเกิดขึ้นได้ระหว่างเก็บอาหาร RS มีประโยชน์ต่อสุขภาพมาก การทดลองนี้ได้ศึกษาอุณหภูมิการเก็บ และระยะเวลาที่เก็บที่มีผลต่อคุณสมบัติของผลึกและ RS ในขนมปัง ผู้วิจัยได้ทำก้อนขนมปังขาวอบแล้วเก็บไว้ในตู้เย็น แช่แข็ง และอุณหภูมิห้อง นำมาวิเคราะห์ตั้งแต่เตรียมเสร็จและทุกวันจนครบเจ็ดวัน ค่า RS และ ค่า XRD ที่ได้แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิและเวลาที่เก็บมีผลต่อคุณสมบัติของผลึก และปริมาณ RS การเก็บในตู้เย็นจะมีผลทำให้เกิดผลึก และ RS ของแป้งได้มากกว่าเก็บในแช่แข็งและเก็บที่อุณหภูมิห้อง จากสถิติพบว่า RS ของแป้งขนมปังกับค่าแพทเทิร์น XRD มีความสัมพันธ์กัน โดยค่าแพทเทิร์นใน XRD 96.7% ตรงกับค่า RS

ดังนั้นจากเอกสาร และงานวิจัยดังกล่าวทำให้ผู้วิจัยสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นแนวทางในการศึกษาพัฒนาข้าวทนย่อยได้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

การวิจัยในครั้งนี้เป็นการวิจัยและพัฒนาโดยใช้การวิจัยเชิงทดลอง โดยมีลำดับขั้นตอนการดำเนินงาน ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองดังนี้

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย

ตัวอย่าง	เวลาที่ปลูก	สถานที่ปลูก
1. ข้าวกล้องหอมมะลิ	2561	นาหมู่ 3 ต.ชอนไพร อ.เมือง จ.เพชรบูรณ์
2. ข้าวหอมมะลิ	2561	นาหมู่ 3 ต.ชอนไพร อ.เมือง จ.เพชรบูรณ์
3.ข้าว กข 43	2561	นาหมู่ 10 ต.โพงาม อ.สรรคบุรี จ.ชัยนาท
4.ข้าวกล้อง กข 43	2561	นาหมู่ 10 ต.โพงาม อ.สรรคบุรี จ.ชัยนาท
5.ข้าวกล้องลิ้มฟัว	2560	นาหมู่ 3 ต.ชอนไพร อ.เมือง จ.เพชรบูรณ์
6.ข้าวกล้องหอมนิล	2560	อ.เขาค้อ จ.เพชรบูรณ์
7.ข้าวขาวม้ง	2560	บ้านเล้าลือ ต.เจ๊กน้อย อ.เขาค้อ จ.เพชรบูรณ์
8.ข้าวพญาลิมาแก	2560	นาหมู่ 3 ต.ชอนไพร อ.เมือง จ.เพชรบูรณ์
9.ข้าวรองถนน	2560	นาบ้านทุ่งหินปูน ต.น้ำร้อน อ.เมือง จ.เพชรบูรณ์

3.1 การตรวจปริมาณแป้งทenyoy

3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ชื่อสารเคมี	บริษัทผู้ผลิต/จำหน่าย
Ethanol 95%	UNION SCIENCE
Sulfuric acid (H_2SO_4)	CARLO ERBA
Hydrochloric acid (HCl)	CARLO ERBA
Sodium hydroxide (NaOH)	CARLO ERBA
alpha - Amylase	REACH
Glucoamylase	REACH
Protease	REACH
Disodium hydrogen phosphate (Na_2HPO_4)	ศึกษาภัณฑ์พานิช
Sodium dihydrogen phosphate (NaH_2PO_4)	MERCK
Potassium dichromate ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$)	CARLO ERBA

3.1.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือและอุปกรณ์	บริษัทผู้ผลิต/จำหน่าย
Infrared spectrometer รุ่น spectrum two	PERKIN ELMER
เครื่องชั่งวิเคราะห์ 4 ตำแหน่ง	METTLER TOLEDO
pH meter รุ่น S220	METTLER TOLEDO
ตู้อบลมร้อน (Hot air oven)	MEMMERT
หม้อนึ่งอัดไอ (autoclave)	
อ่างอัลตราโซนิคส์ (ultrasonic bath)	
Filter glass crucible	ROBU
ชุดเครื่องกรองแบบสุญญากาศ (Vacuum pump)	-
เครื่องแก้ว	-
เทอร์โมมิเตอร์	-
ปิเปต	-
ตะแกรงร่อนแป้ง	-
เครื่องปั่นไฟฟ้า	-
Water bath	-

3.1.3 วิธีการหาปริมาณแป้งทนย่อย

3.1.3.1 การเตรียมตัวอย่าง

หุงตัวอย่างข้าวที่หุงและผ่านขบวนการด้วยวิธีต่างๆแล้ว มาอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน จนแห้งสนิท จากนั้นปั่นตัวอย่างให้ละเอียดด้วยเครื่องปั่นไฟฟ้า แล้วร่อนด้วยตะแกรงร่อน (U.S.A. Standard testing sieve tyler equivalent 32 mesh 500 micrometer 0.0197 inches) เก็บตัวอย่างที่ผ่านการร่อนเรียบร้อยแล้วใส่ถุงซิปล็อค ปิดให้สนิท นำไปวิเคราะห์หาปริมาณแป้งที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ต่อไป

3.1.3.2 การเตรียมสารละลาย

1) เตรียมสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์พีเอช 6

เตรียมสารละลาย A และ B โดยสารละลาย A เตรียมจาก Disodium hydrogen phosphate (Na_2HPO_4) 7.80 กรัม ในน้ำ 1000 มิลลิลิตร และสารละลาย B เตรียมจาก

Sodium dihydrogen phosphate (NaH_2PO_4) 8.90 กรัม ในน้ำ 1000 มิลลิลิตร จากนั้นเตรียมฟอสเฟตบัฟเฟอร์ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร โดยใช้สารละลาย A 123 มิลลิลิตร และสารละลาย B 877 มิลลิลิตร ผสมกันแล้วปรับให้มีพีเอช 6 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 6 โมลาร์ และไฮโดรคลอริก 6 โมลาร์ โดยใช้เครื่องพีเอชมิเตอร์ในการวัด

2) เตรียมสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.275 นอร์มอล

เตรียมสารละลายไฮโดรคลอริก 0.275 นอร์มอล ปริมาตร 250 มิลลิลิตร โดยปีเปตกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 5.7 มิลลิลิตร ใส่ในขวดปรับปริมาตร 250 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

3) เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.375 นอร์มอล

เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.375 นอร์มอล ปริมาตร 250 มิลลิลิตร โดยชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ 3.75 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นเล็กน้อยใส่ลงขวดปรับปริมาตร 250 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

4) เตรียมสารละลายไดโครเมต-กรดซัลฟิวริกสำหรับล้างฟิลเตอร์กลาสคริสตัล

เตรียมได้โดยการผสมโปแตสเซียมไดโครเมต 92 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น 458 มิลลิลิตร จากนั้นค่อยๆ เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้นปริมาณ 800 มิลลิลิตร คนด้วยแท่งแก้วจนกระทั่งสารละลายเข้ากันดี จะได้สารละลายสีแดง (ระหว่างการเทกรดซัลฟิวริกเข้มข้นลงไป สารละลายจะมีความร้อนเกิดขึ้นในปริมาณมาก จะต้องคนด้วยแท่งแก้วคนสลับกับการเทกรดลงไป) หลังจากเตรียมเสร็จแล้วทิ้งไว้ให้เย็นก่อนใช้งาน

3.1.3.3 ขั้นตอนวิธีวิเคราะห์

1) ชั่งตัวอย่างข้าวที่เตรียมไว้ใส่ปิเปตเตอร์ 0.5 กรัม จากนั้นเติมฟอสเฟตบัฟเฟอร์พีเอช 6 ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ตามด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส 0.2 มิลลิลิตร

2) นำตัวอย่างจากข้อ 1) มาบ่มในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำออกวางไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

3) นำมาปรับให้เป็นพีเอช 4.5 ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 0.2 นอร์มอล แล้วเติมเอนไซม์กลูโคอะไมเลส 0.5 มิลลิลิตร นำไปบ่มต่อที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที นำออกให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

4) นำมาปรับให้เป็นพีเอช 7.5 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.3 นอร์มอล จากนั้นเติม (เอนไซม์โปรติเอส 1 มิลลิลิตร ในฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 50 มิลลิลิตร) นำไปบ่มต่อที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที นำออกวางไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

5) กรองด้วยฟیلเตอร์กลาสครุชชีเบลเบอร์ 2 ขนาด 50 มิลลิเมตรที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอน แล้วล้างตะกอนด้วย เอทานอล 85 เปอร์เซ็นต์ ตามด้วยน้ำกลั่น

6) อบฟیلเตอร์กลาสครุชชีเบลในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนัก และทำซ้ำจนได้น้ำหนักที่แน่นอน เพื่อใช้ในการคำนวณ

7) คำนวณหาปริมาณแป้งที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ (RS) โดยสมการ ดังนี้

$$\%RS = \frac{\text{น้ำหนักของตะกอนที่เหลือ}}{\text{น้ำหนักตัวอย่าง}} \times 100$$

3.2 วิธีเพิ่มปริมาณแป้งทนย่อยในข้าว

3.2.1 หุงข้าวในหม้อหุงข้าว ใช้ข้าว 2 ถ้วยตวง ใส่ น้ำ 3 ถ้วยตวง แล้วนำไปแช่ในตู้เย็นช่องธรรมดา และช่องแช่แข็ง ระยะเวลา 12 ชั่วโมง นำไปอบที่ 50 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง

3.2.2 หุงข้าวในหม้อหุงข้าว 2 ถ้วยตวง ใส่ น้ำ 3 ถ้วยตวง มีการใส่น้ำมันมะพร้าว 2 ช้อนชา แล้วนำไปแช่ในตู้เย็นช่องธรรมดา และช่องแช่แข็ง ระยะเวลา 12 - 50 ชั่วโมง นำไปอบที่ 50 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง ตามวิธีของ K. Kaur and N. Singh (2000) ที่ศึกษาผลของการเกิดสารประกอบ amylose-lipid

3.2.3 หุงโดยวิธีนำข้าว 100 กรัม ใส่กรดน้ำส้ม 30% นำไปใส่ในขวดปิดฝาวางไว้ที่อุณหภูมิห้อง (23-34 องศาเซลเซียส) นาน 24 ชั่วโมง แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 8 ชั่วโมง แล้วนำไปทำให้เป็นกลางโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 โมลาร์ แล้วล้างด้วยน้ำกลั่น จากนั้นทำให้แห้งโดยอบที่ 50 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง ตามวิธีของ P.V. Hung et al. (2018) ได้ศึกษาการเกิด RS3 ในแป้งข้าวที่มีอะไมโลสสูง แป้งข้าวธรรมดา และแป้งข้าวเหนียวโดยวิธีการให้ความร้อนขึ้นในสภาพเป็นกรด

3.2.4 หุงโดยนำข้าว 1 ถ้วยตวง ใส่ น้ำ 1.5 ถ้วยตวง แล้วนำไปเข้าไมโครเวฟที่ความร้อนกลาง (medium) นาน 15 นาที แล้วนำไปแช่ในตู้เย็นที่ 4 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 24 ชั่วโมง นำไปอบที่ 50 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง ซึ่งคัดแปลงมาจากวิธีของ S. Zeng et al. (2015) ที่ให้ความร้อนขึ้นด้วยไมโครเวฟ (microwave-moisture method, MP -LRS3) ได้ทดลองเพิ่ม RS3 ในแป้งเมล็ดบัว

3.2.5. นำข้าว 1 ถ้วยตวง ใส่ น้ำ 1.5 ถ้วยตวง แล้วนำไปเข้าในอ่างอัลตราโซนิกส์ที่ power 300 W นาน 55 นาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส แล้วนำไปเข้าหม้อนึ่งอัดไอ (autoclave) ที่อุณหภูมิ 115 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที เย็นแล้วเก็บแช่ในตู้เย็นที่ -6 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 24 ชั่วโมง นำไปอบที่ 50 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง ซึ่งคัดแปลงมาจากวิธีของ S. Zeng et al. (2015) ที่นำไป

ทำอัลตราโซนิก-ความร้อนขึ้นที่ความดันสูง (ultrasonic-autocaving method, UP -LRS3) ได้ทดลองเพิ่ม RS3 แป้งเมล็ดบัว

3.3 ตรวจสอบสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของข้าวที่ผ่านการทำให้เป็นข้าวทนย่อย

3.3.1 ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Light microscopy และ Polarizing microscopy)

นำข้าวที่มีแป้งทนย่อยละลายในกลีเซอรอล (glycerol 50%) นำไปส่องกล้องวัดแบบธรรมดา และแสงโพลาไรซ์

3.3.2 อินฟราเรด (Infared spectroscopy)

นำข้าวที่มีแป้งทนย่อยนำไปวัด IR ตั้งแต่ที่ 4000 cm^{-1} ถึง 400 cm^{-1} ไปตรวจสอบตรวจสอบสเปกตรัมของ RS โดยดูสเปกตรัมที่เบนด์ดังต่อไปนี้

เบนด์ที่ 3400 cm^{-1} ที่เกิดจาก OH	เบนด์ที่ 2800 cm^{-1} ที่เกิดจาก CH_2
เบนด์ที่ 1600 cm^{-1} ที่เกิดจาก COO^-	เบนด์ที่ 1300 cm^{-1} 1022 cm^{-1} ที่เกิดจาก C-O-H
เบนด์ที่ 620 cm^{-1} ที่เกิดจาก pyranose ring	

(J.Wang et al.,2014)

3.3.3 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของแป้งที่ย้อมด้วยไอโอดีน (starch-iodine absorption spectra)

นำข้าวที่มีแป้งทนย่อย 50 มิลลิกรัม ละลายลงใน 10 ml DMSO ที่มี 10% ของยูเรีย 6.0 โมลาร์ เขย่าให้เข้ากัน นำมา 2.0 มิลลิลิตร ละลายน้ำ 25 มิลลิลิตร แล้วเติม 1.0 ml $\text{I}_2\text{-KI}$ (2.0 มิลลิกรัมของ I_2 / มิลลิลิตร และ 20.0 มิลลิกรัมของ KI / มิลลิลิตร) ผสมกันใน volumetric flask 50 มิลลิลิตร ปรับปริมาตร นำสารละลายไปวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสง โดยใช้ UV-VIS ที่ความยาวคลื่น 500-800 nm

3.4 สถิติในการวิเคราะห์

ข้อมูลจากการวิเคราะห์นำมาใช้หลักสถิติดังต่อไปนี้

3.4.1 ตรวจสอบความแม่นยำ (accuracy)

การตรวจสอบความแม่นยำโดยหาค่าที่วัดได้เปรียบเทียบกับค่าจริง ในการทดลองนี้ใช้วิธีเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ได้กับวิธีมาตรฐาน (standard method) ที่ได้รับการยอมรับ

3.4.2 ตรวจสอบความเที่ยง (precision)

ตรวจสอบความเที่ยง โดยการทดลองซ้ำกันหลายๆครั้งในสถานะเดิมๆ พร้อมกันเวลาเดียวกัน จะได้ค่าทำซ้ำ (repeatability) ส่วนการทดลองซ้ำกันหลายๆครั้งในเวลาต่างกันจะได้ค่า

การทวนซ้ำ (reproducibility) ถ้ามีค่าใกล้เคียงกันแสดงว่ามีความเที่ยงสูง การกระจายของข้อมูลสามารถแสดงความเที่ยงได้ ด้วยค่าดังนี้

3.4.2.1 ค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ย (average deviation; d)

ค่าเบี่ยงเบนการวัดแต่ละครั้ง d_i

$$d_i = X_i - \bar{X}_{เฉลี่ย}$$

$$d = \sum d_i \div N$$

3.4.2.2 ค่าพิสัย (range ;spread; W) ซึ่งแสดงค่าข้อมูลสูงสุดกับค่าข้อมูลต่ำสุด

$$W = \text{ค่าสูงสุด} - \text{ค่าต่ำสุด}$$

3.4.2.3 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation ; SD)

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอาจนำเสนอเป็นค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (CV) หรือค่าร้อยละเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) โดยวิเคราะห์ปริมาณแบ่งที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ตามขั้นตอนที่กล่าวมาแล้ว 10 ชั่วโมง และคำนวณหา %RSD หรือ CV ดังสมการ

$$\%RSD \text{ หรือ } CV = \frac{SD \times 100}{\bar{X}}$$

$$SD = \text{ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน}$$

$$\bar{X} = \text{ค่าเฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมด}$$

ซึ่งโดยปกติ %RSD หรือค่า CV < 5% ถ้า %RSD หรือค่า CV ยิ่งน้อยแสดงว่าวิธีนั้นมีความเที่ยงสูง

3.4.3 ตรวจสอบความคลาดเคลื่อน

3.4.3.1 ค่าร้อยละการกลับคืน เพื่อให้วิธีวิเคราะห์มีความแม่นยำ และความเที่ยงมีการหาค่าร้อยละการกลับคืน (percent recovery) ดังนี้

$$\text{ค่าร้อยละการกลับคืน} = (\text{ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์} \div \text{ค่าที่ระบุไว้ในสารมาตรฐาน}) \times 100$$

3.4.3.2 การเปรียบเทียบวิธีวิเคราะห์

ใช้วิธีมาตรฐานมาเปรียบเทียบกับวิธีอื่นโดยทั้งสองวิธีมีขั้นตอนการวิเคราะห์ที่

แตกต่างกัน (เนื่องจากการทดลองนี้หาสารมาตรฐานไม่ได้ จึงตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ที่ได้ว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่) โดยใช้การทดสอบแบบ t-test โดยการนำผลการวิเคราะห์ที่ได้จากตัวอย่างเดียวกันจากวิธีวิเคราะห์ 2 วิธีมาทดสอบ ค่า t ที่คำนวณได้เรียก t_{cal} นำไปเปรียบเทียบกับ t ในตารางเรียก t_{table} ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ต้องการ ถ้าค่า t_{cal} มีค่ามากกว่า t_{table} แสดงว่าทั้งสองวิธีมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

การวิจัยการเพิ่มปริมาณแป้งด้านทานการย่อยในข้าวพันธุ์พื้นเมืองที่ปลูกในจังหวัดเพชรบูรณ์ ผลการวิจัยดังต่อไปนี้

4.1. ผลการตรวจปริมาณแป้งทนย่อยในข้าว

ในการทดลองนี้ได้ทดสอบวิธีวิเคราะห์ดังนี้

4.1.1 ผลการทดสอบความเที่ยง(Precision)

การตรวจสอบความเที่ยงโดยการทดลองซ้ำกันหลายๆครั้งในสภาวะเดิมๆพร้อมกันเวลาเดียวกัน จะได้ค่าทำซ้ำในการวิเคราะห์หาปริมาณแป้งทนย่อยได้ทดสอบความเที่ยงในตัวอย่างข้าว กข 43 โดยทำการวิเคราะห์ซ้ำ 10 ครั้ง ได้ผลดังตารางที่ 4.1 และทดสอบในข้าวหอมมะลิ 8 ครั้ง ผลดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบความเที่ยงในการหาปริมาณแป้งทนย่อยในข้าว กข 43

ครั้งที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	เฉลี่ย	SD	%RSD
%RS	10.19	9.90	10.28	10.46	9.46	10.20	9.80	10.85	10.85	10.51	10.17	0.39	3.83

ความเที่ยงของวิธีบอกได้ด้วยค่า %RSD จากการทดสอบพบว่าค่าเท่ากับ 3.88 ซึ่งถือว่ามีความเที่ยงสูง เนื่องจากโดยปกติ $\%RSD < 5\%$ แสดงว่าผลการทดลองนั้นใช้ได้ ถ้าค่า %RSD ยิ่งน้อยแสดงว่าวิธีนี้มีความเที่ยงสูง

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบความเที่ยงในการหาปริมาณแป้งทนย่อยในของข้าวหอมมะลิ

ครั้งที่	1	2	3	4	5	6	7	8	เฉลี่ย	SD	%RSD
%RS	7.18	6.39	7.34	7.96	7.1	7.07	7.15	6.8	7.19	0.35	4.86

จากการทดลอง พบว่าค่าสูงสุด 7.96 ค่าต่ำสุด 6.39 ค่า $\%RSD = 4.86$ ซึ่งค่า $\%RSD < 5\%$ หรือค่า %RSD ยิ่งน้อยแสดงว่าวิธีนี้มีความเที่ยงสูง

4.1.2. การตรวจสอบความเที่ยงโดยการค่าการทวนซ้ำ(reproducibility) การทดลองซ้ำกันหลายๆครั้งในเวลาต่างกัน ถ้ามีค่าใกล้เคียงกันแสดงว่ามีความเที่ยงสูง การกระจายของข้อมูลสามารถแสดงความเที่ยงได้ ด้วยค่าดังนี้

ตารางที่ 4.3 ค่า %RS ของ ข้าวกข 43 หุงใส่น้ำมันแช่แข็ง 12 ชม.

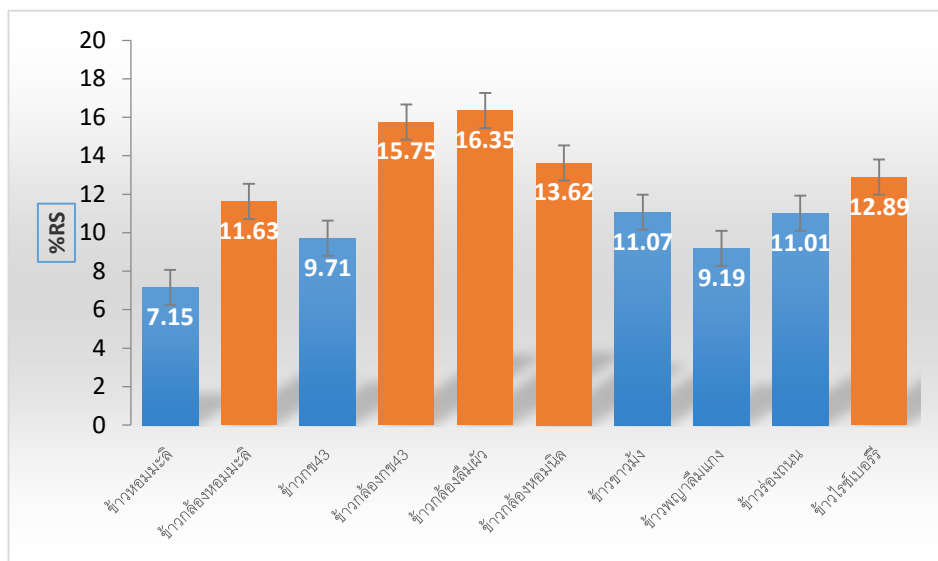
ครั้งที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	เฉลี่ย	SD	%RSD
%RS	8.56	8.50	8.81	9.17	8.26	8.61	8.42	8.25	8.77	9.25	9.28	8.47	9.18	8.73	0.38	4.35

จากการทดลอง พบว่าค่าสูงสุด 9.28 ค่าต่ำสุด 8.25 ค่า%RSD = 4.35 ซึ่งค่า %RSD < 5% หรือค่า %RSD ยิ่งน้อยแสดงว่าวิธีนั้นมีความเที่ยงสูง

4.1.3 ผลการตรวจปริมาณแป้งทนย่อยในข้าวหุง
ผลการตรวจปริมาณแป้งทนย่อยในข้าวพันธุ์พื้นเมืองเพชรบูรณ์ และพันธุ์ต่างๆที่หุงและอบให้แห้งแล้วดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการตรวจปริมาณแป้งทนย่อยในข้าวพันธุ์ต่างๆ

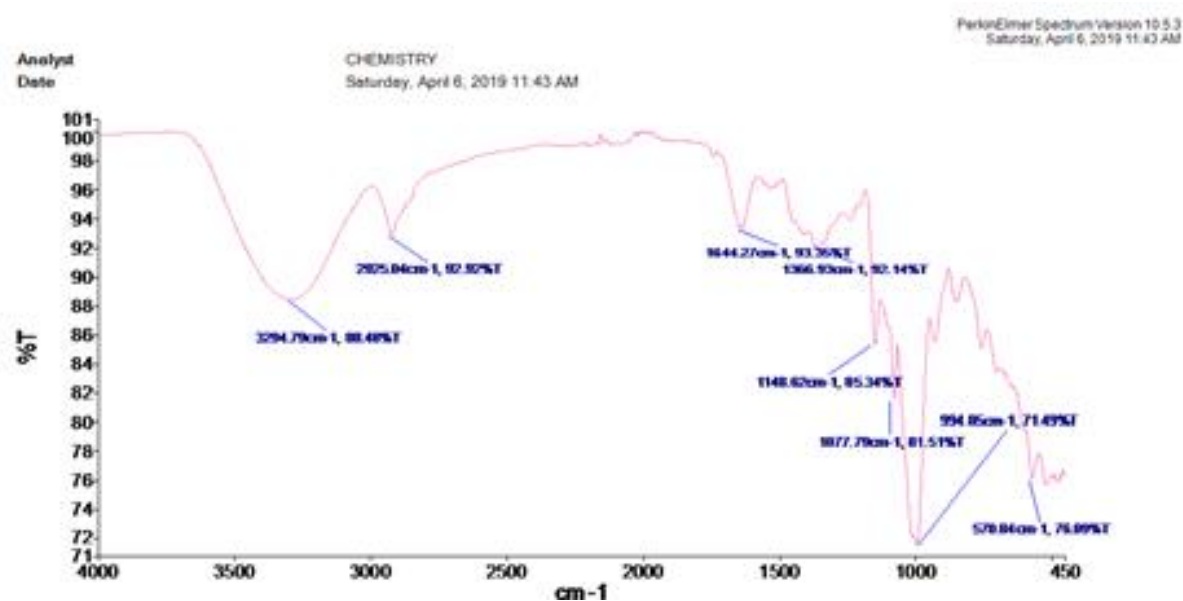
ชนิดตัวอย่าง	%RS เฉลี่ย $\pm$ SD	%RSD
1.ข้าวหอมมะลิ	7.15 $\pm$ 0.21	2.94
2.ข้าวกล้องหอมมะลิ	11.63 $\pm$ 0.33	2.8
3.ข้าวกข 43	9.71 $\pm$ 0.27	2.8
4.ข้าวกล้องกข 43	15.75 $\pm$ 0.09	0.57
5.ข้าวกล้องลิ้มฟัว	16.35 $\pm$ 0.21	1.28
6.ข้าวกล้องหอมนิล	13.62 $\pm$ 0.25	1.84
7.ข้าวขาวม้ง(ข้าวไร่)	11.07 $\pm$ 0.13	1.17
8.ข้าวพญาลิมาแกง	9.19 $\pm$ 0.15	1.52
9.ข้าวร่องถนน	11.01 $\pm$ 0.01	0.09
10.ไรซ์เบอร์รี่	12.89 $\pm$ 0.16	1.24



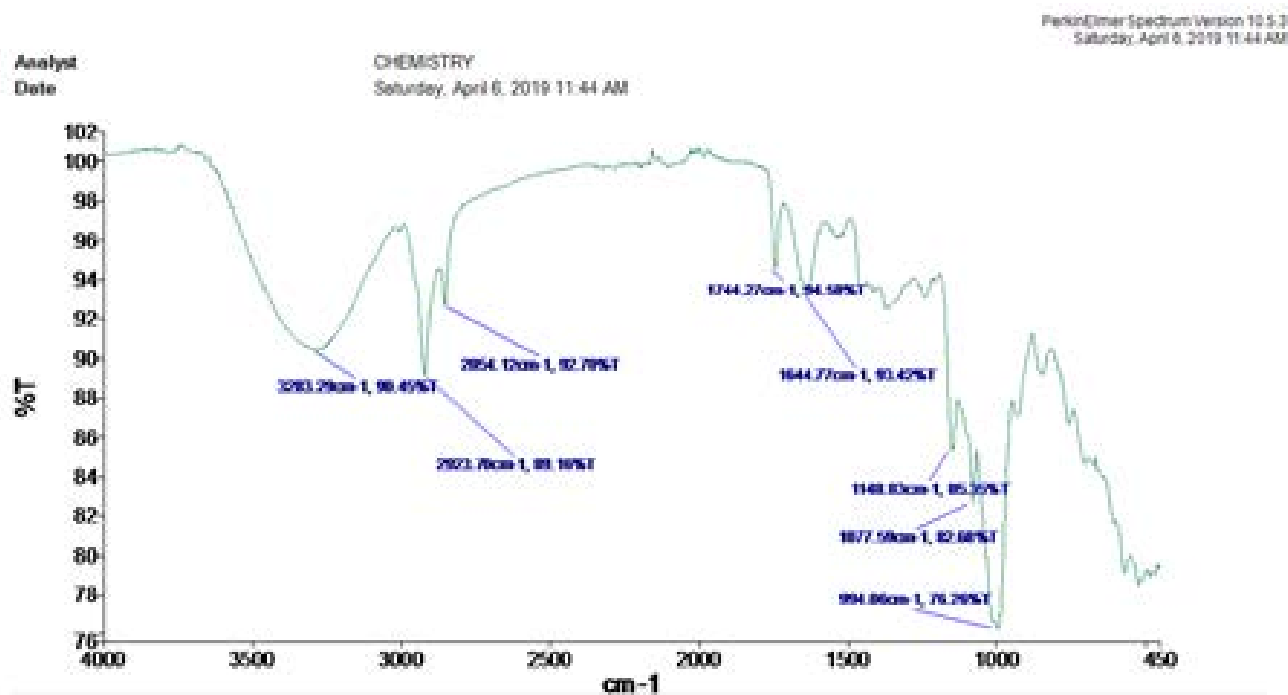
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงค่าแป้งทนย่อยในข้าว 9 ชนิด

จากตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.1 พบว่าข้าวกล้องมีแป้งทนย่อยมากกว่าข้าวขัดขาว ข้าวกล้องลิ้นควัวมีแป้งทนย่อยมากที่สุด

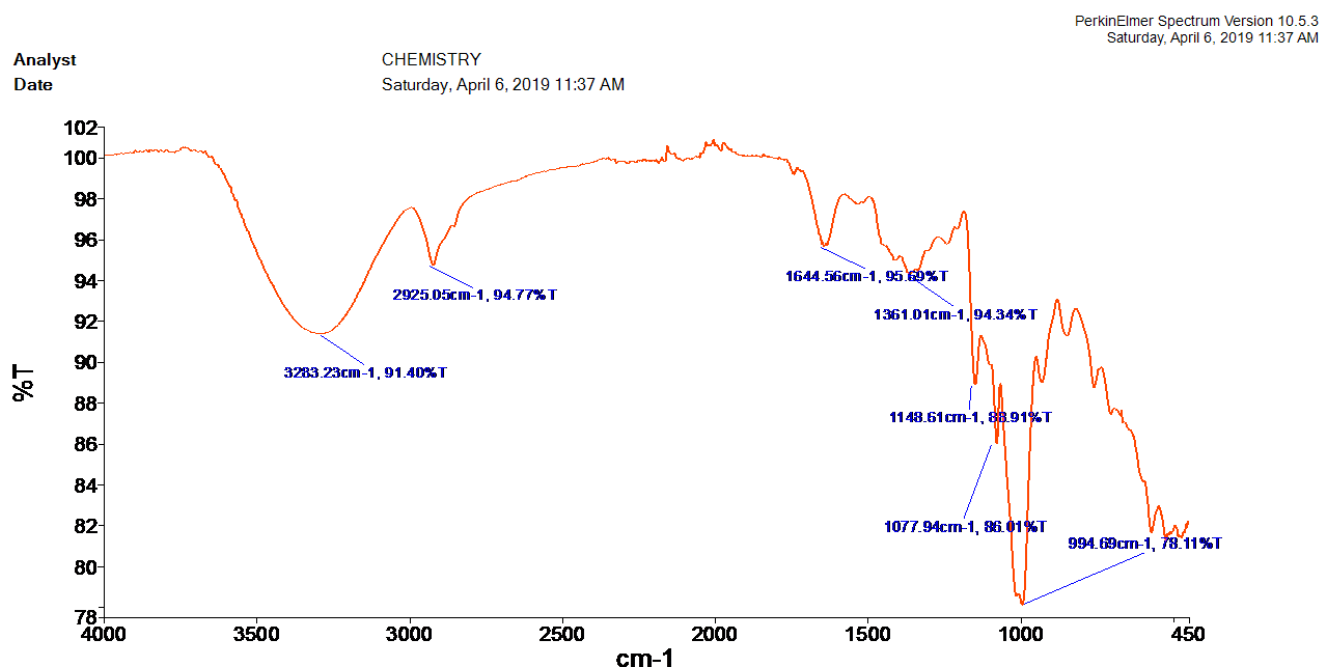
นำตัวอย่างข้าวหุงไปวัดด้วยเครื่อง FTIR ได้สเปกตรัมรวมดังรูปที่ 4.2- 4.10



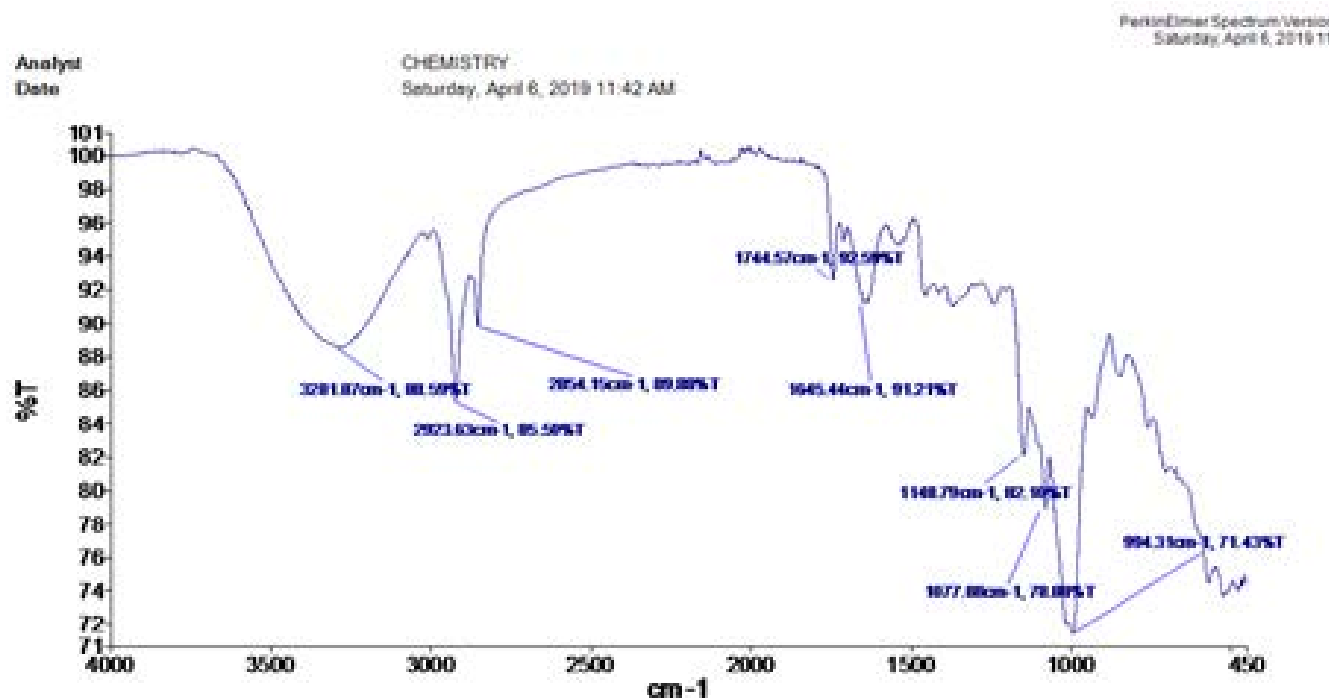
รูปที่ 4.2 แสดงสเปกตรัมของข้าวหอมมะลิเมื่อวัดด้วย IR



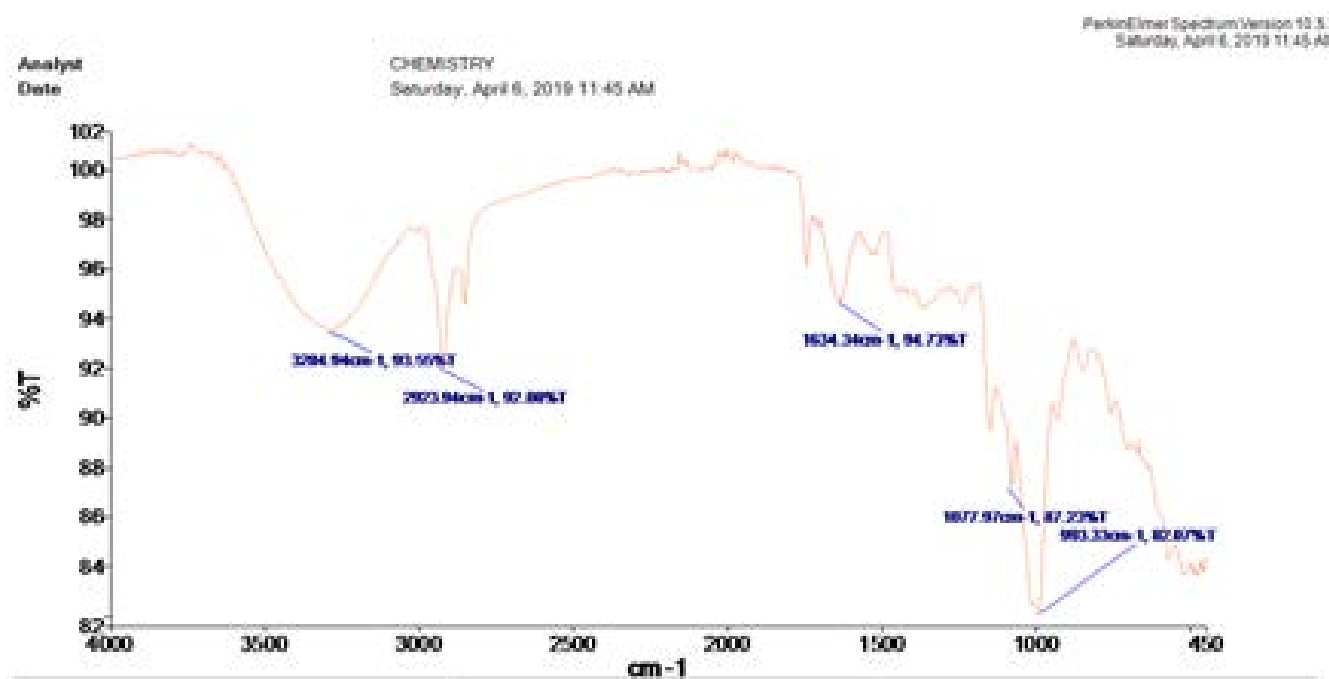
รูปที่ 4.3 แสดงสเปกตรัมของข้าวกล้องหอมมะลิเมื่อวัดด้วย IR



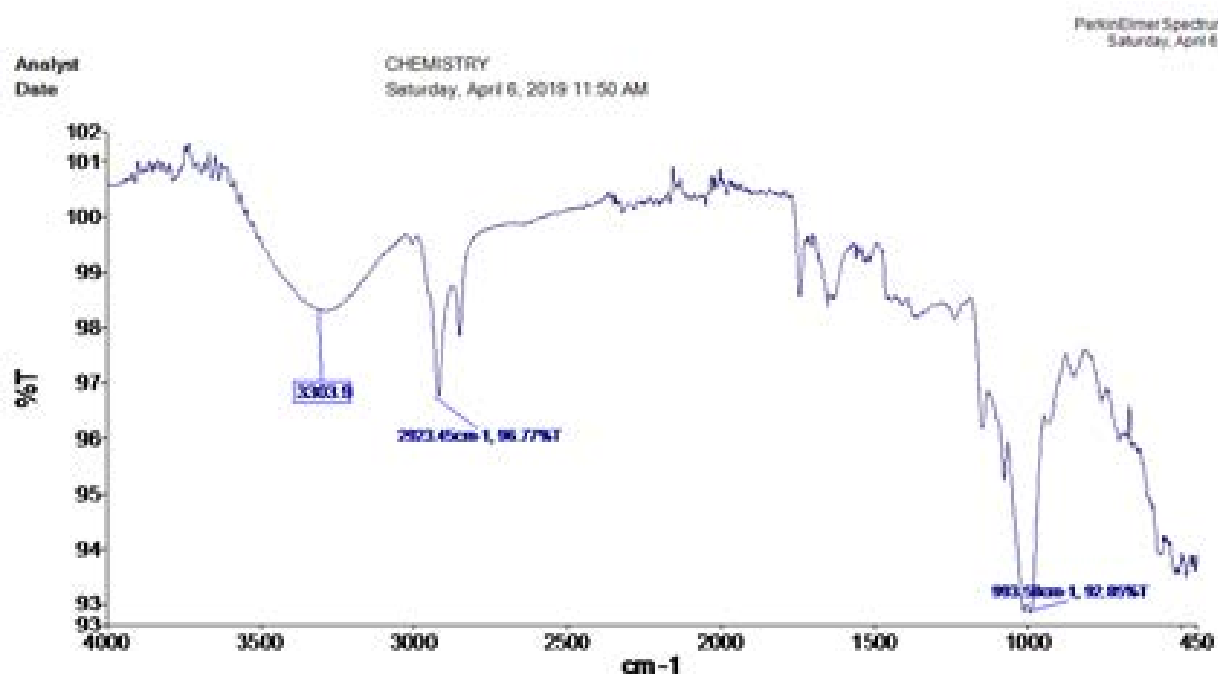
รูปที่ 4.4 แสดงสเปกตรัมของข้าว กข 43เมื่อวัดด้วย IR



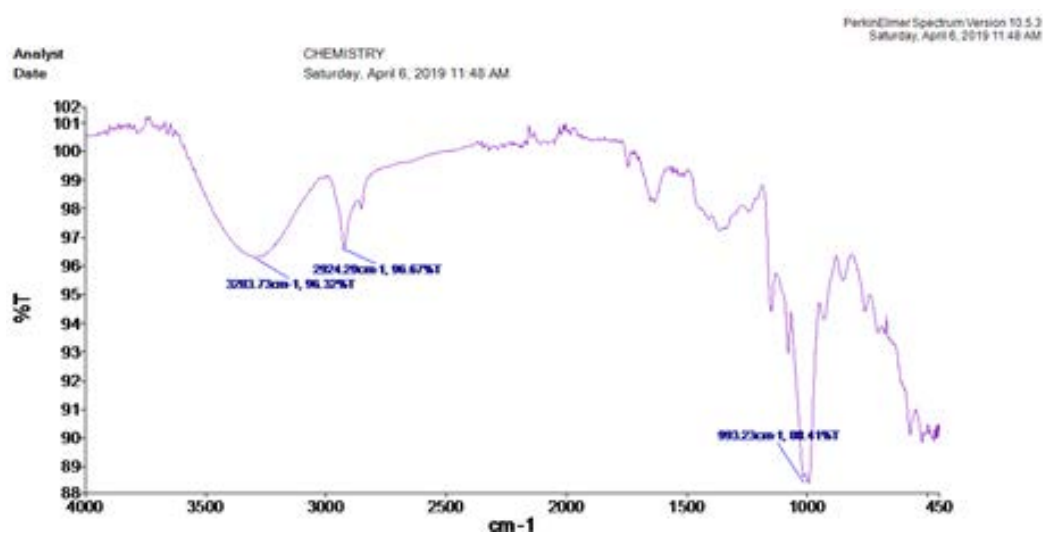
รูปที่ 4.5 แสดงสเปกตรัมของข้าวกล้องกข43 เมื่อวัดด้วย IR



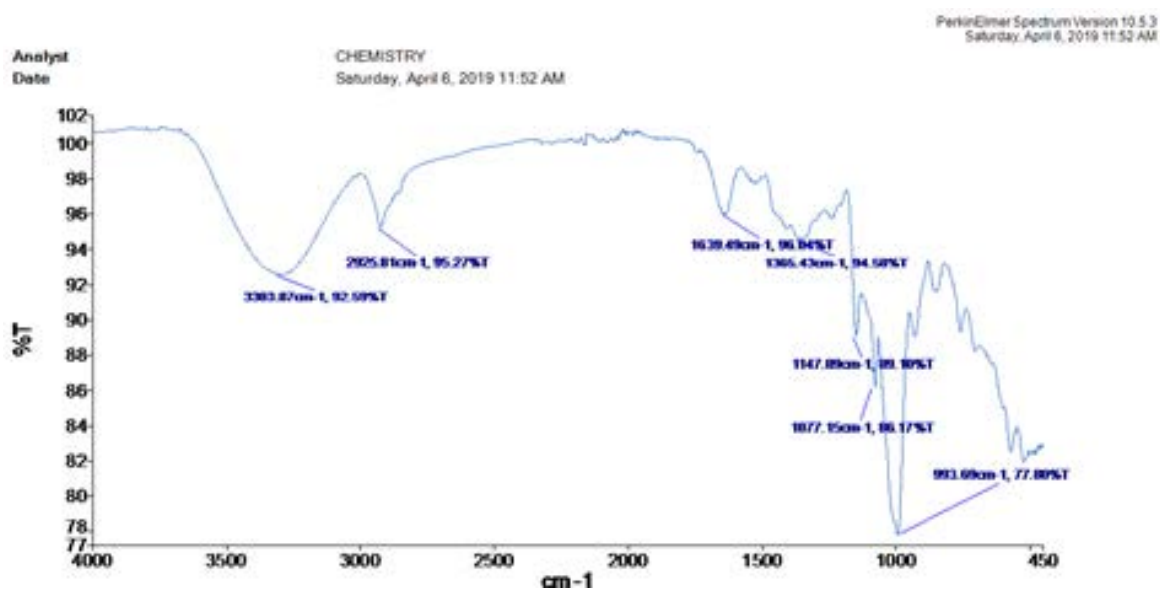
รูปที่ 4.6 แสดงสเปกตรัมของข้าวกล้องลิ้มฟัวเมื่อวัดด้วย IR



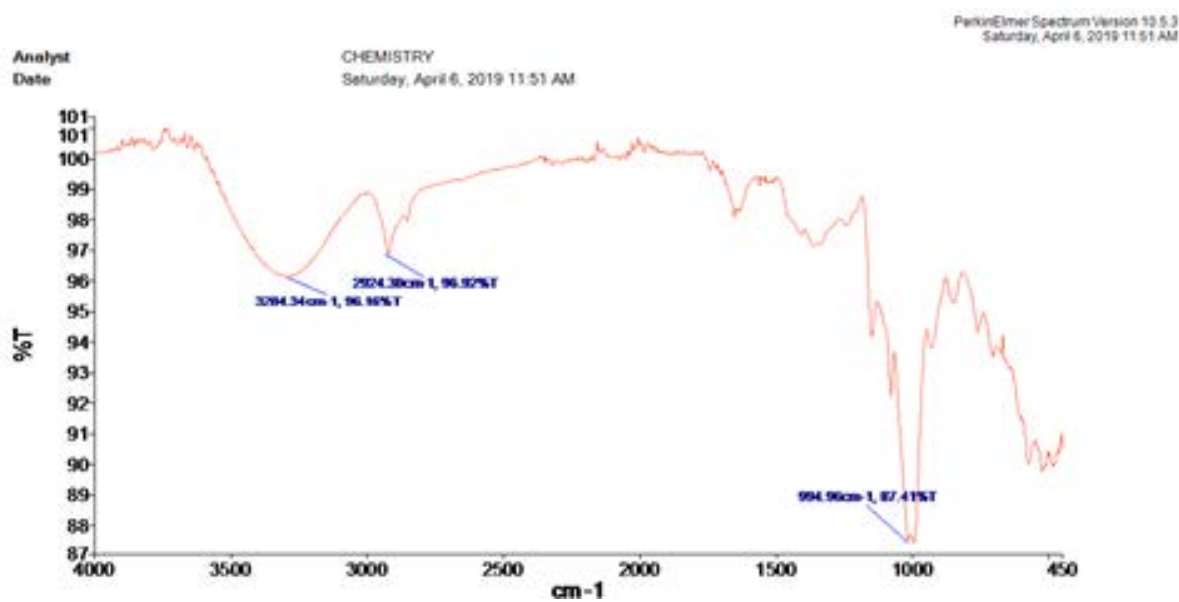
รูปที่ 4.7 แสดงสเปกตรัมของข้าวกล้องหอมนิล เมื่อวัดด้วย IR



รูปที่ 4.8 แสดงสเปกตรัมของข้าวขาวม้งเมื่อวัดด้วย IR



รูปที่ 4.9 แสดงสเปกตรัมของข้าวร่องถนนเมื่อวัดด้วย IR



รูปที่ 4.10 แสดงสเปกตรัมของข้าวพญาลิมาเมื่อวัดด้วย IR

ข้าวกล้องหอมมะลิ และข้าวกล้อง กข43 มีสเปกตรัมเหมือนกันที่ wavenumber 3,281 3,100 2,923 2,854 1,744 1,645 1,148 1,077 และ 994 cm^{-1}

ข้าวขัดขาวหอมมะลิ และกข43 มีสเปกตรัมที่คล้ายกันที่ wavenumber 3,281 2,923 2,854 1,645 1,148 1,077 และ 994 cm^{-1}

แสดงว่าการขัดสีข้าวทำให้หมู่ฟังก์ชันที่สั้นที่ wavenumber 3,100 และ 1,744 cm^{-1} ถูกขัดออกไป ทำให้มีสเปกตรัมบางจุดหายไป

ดังนั้นสเปกตรัมของ IR จึงสามารถบอกความเป็นข้าวกล้องและข้าวขัดขาวได้ สเปกตรัมของข้าวกล้อง มีที่ wavenumber 3,100 และ 1,744 cm^{-1} ไม่มี

4.2 ผลการทดลองหาวิธีเพิ่มปริมาณแป้งทนย่อยในข้าว

เมื่อทดลองหุงข้าวด้วยวิธีต่างๆ ดังต่อไปนี้

แบบที่ 1. หุงข้าวในหม้อหุงข้าว ใช้ข้าว 2 ถ้วยตวง ใส่ น้ำ 3 ถ้วยตวง แล้วนำไปแช่ในตู้เย็นช่องธรรมดา และช่องแช่แข็ง ระยะเวลา 12 ชั่วโมง นำไปอบที่ 50 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง HMT-RS3

แบบที่ 2. หุงข้าวในหม้อหุงข้าว 2 ถ้วยตวง ใส่ น้ำ 3 ถ้วยตวง มีการใส่น้ำมันมะพร้าว 2 ช้อนชา แล้วนำไปแช่ในตู้เย็นช่องธรรมดา และช่องแช่แข็ง ระยะเวลา 12 50 ชั่วโมง นำไปอบที่ 50 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง ตามวิธีของ K. Kaur and N. Singh (2000)

แบบที่ 3. นำข้าว 100 กรัม ใส่กรดน้ำส้ม 30% นำไปใส่ในขวดปิดฝาวางไว้ที่อุณหภูมิห้อง (23-34 องศาเซลเซียส) นาน 24 ชั่วโมง แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 110 เซลเซียสระยะเวลา 8 ชั่วโมง แล้วนำไปทำให้เป็นกลางโดยใช้ 1 โมลาร์ NaOH แล้วล้างด้วยน้ำกลั่น จากนั้นทำให้แห้งโดยอบที่ 50 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง ตามวิธีของ P.V. Hung et al. (2018) AAHMT- RS3

แบบที่ 4. นำข้าว 1 ถ้วยตวง ใส่ น้ำ 1.5 ถ้วยตวง แล้วนำไปเข้าไมโครเวฟที่ความร้อนกลาง (medium) นาน 15 นาที แล้วนำไปแช่ในตู้เย็นที่ 4 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 24 ชั่วโมง นำไปอบที่ 50 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง ซึ่งดัดแปลงมาจากวิธีของ S. Zeng et al. (2015) ที่ให้ความร้อนขึ้นด้วยไมโครเวฟ (microwave-moisture method, MP -LRS3)

แบบที่ 5 นำข้าว 1 ถ้วยตวง ใส่ น้ำ 1.5 ถ้วยตวง แล้วนำไปแช่ในอ่างอ่างอัลตราโซนิกส์ที่ power 300 W นาน 55 นาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส แล้วนำไปเข้า autoclave ที่อุณหภูมิ 115 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที เย็นแล้วเก็บแช่ในตู้เย็นที่ -6 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 24 ชั่วโมง นำไปอบที่ 50 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง ซึ่งดัดแปลงมาจากวิธีของ S. Zeng et al. (2015) ที่นำไปทำอ่างอัลตราโซนิกส์-ความร้อนขึ้นที่ความดันสูง (ultrasonic-autocaving method, UP -LRS3)

เมื่อทดลองในข้าวชนิดต่างๆผลการทดลองดังนี้

4.2.1 ข้าว กข43 เมื่อนำข้าว กข43 ไปทดลองหุงด้วยวิธีต่างๆ ผลดังตาราง 4.5 และ 4.6

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการหุงข้าว กข43 ด้วยแบบที่ 1-5

ชนิดตัวอย่าง	%RS เฉลี่ย $\pm$ SD	%RS เพิ่ม
ข้าว กข 43ดิบ(ค3)	7.46 $\pm$ 0.19	
ข้าว กข 43หุง (3)	7.87 $\pm$ 0.16	5.50
ข้าว กข 43หุง แล้วแช่แข็ง 12 ชม.(F)	7.81 $\pm$ 0.19	4.50
ข้าว กข 43หุงใส่น้ำมันแช่แข็ง 12 ชม.(F1)	7.72 $\pm$ 0.30	3.49
ข้าว กข 43หุงใส่น้ำมันแช่แข็ง 60 ชม.(F2)	8.31 $\pm$ 0.25	11.39
ข้าว กข 43แบบที่ 3 (AAHMT- R3)	6.57 $\pm$ 0.18	-
ข้าว กข 43แบบที่ 4 (MP -R3)	8.41 $\pm$ 0.16	10.07
ข้าว กข 43หุงแบบที่ 5 (UP-R3)	8.81 $\pm$ 0.16	18.09

จากตารางที่ 4.5 แสดงผลการหุงข้าว กข43 ด้วยวิธีธรรมดา และวิธีหุงใส่น้ำมัน แล้วแช่ตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 12 ชั่วโมง และ 60 ชั่วโมง พบว่าการหุงข้าว กข43ใส่น้ำมัน แล้วแช่ตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 60 ชั่วโมงทำให้มีแป้งทนย่อยเพิ่มจาก 7.46 $\pm$ 0.19 เป็น 8.31 $\pm$ 0.25 ดังนั้นเพิ่มขึ้นร้อยละ 11.39 ข้าวข้าว กข 43หุงแบบใส่กรดน้ำส้ม(วิธีที่3) ปริมาณแป้งทนย่อยไม่เพิ่มขึ้น

การหุงข้าว กข43 แบบที่ 5. คือ นำข้าว 1 ถ้วยตวง ใส่น้ำ 1.5 ถ้วยตวง แล้วนำไปแช่ในอ่างอัลตราโซนิกส์ที่ power 300 W นาน 55 นาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส แล้วนำไปเข้าหม้อนึ่งอัดไอ ที่อุณหภูมิ 115 องศาเซลเซียสนาน 15 นาที เย็นแล้วเก็บแช่ในตู้เย็นที่ -6 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 24 ชั่วโมง นำไปอบที่ 50 องศาเซลเซียสนาน 24 ชั่วโมง ซึ่งคัดแปลงมาจากวิธีของ S. Zeng et al. (2015)ที่นำไปเข้าอัลตราโซนิกส์-ความร้อนขึ้นที่ความดันสูง ทำให้มีแป้งทนย่อยจากข้าวดิบร้อยละ 7.46 $\pm$ 0.19 เพิ่มขึ้นร้อยละ 8.81 $\pm$ 0.16 ดังนั้นเพิ่มขึ้นร้อยละ 18.09 ซึ่งสอดคล้องกับ S. Zeng et al. (2015)

การหุงข้าว กข43 ด้วยวิธีธรรมดา และวิธีหุงใส่น้ำมัน แล้วแช่ตู้เย็นอุณหภูมิ 6 องศาเซลเซียส ผลดังตารางที่ตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 แสดงผลการหุงข้าว กข43 ด้วยวิธีด้วยวิธีที่ 1-2 เก็บแช่ 6 องศาเซลเซียส

ชนิดตัวอย่าง	%RS เฉลี่ย $\pm$ SD	%RS เพิ่ม
ข้าว กข43ดิบ(ค3)	7.46 $\pm$ 0.19	
ข้าว กข 43 หุง(3)	7.87 $\pm$ 0.16	5.50
ข้าว กข 43 หุง แช่ 6 องศาเซลเซียส 12 ชม.(T)	7.51 $\pm$ 0.84	0.67
ข้าว กข 43 หุงใส่น้ำมันแช่ 6 องศาเซลเซียส 12 ชม.(T1)	8.76 $\pm$ 0.18	17.43
ข้าว กข 43 หุงใส่น้ำมันแช่ 6 องศาเซลเซียส 60 ชม.(T2)	8.02 $\pm$ 0.35	7.5



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงผลการหุงข้าว กข43 ด้วยวิธีธรรมดา และวิธีหุงใส่น้ำมัน แล้วแช่ตู้เย็นอุณหภูมิ 6 องศาเซลเซียส

จากตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.11 แสดงผลการหุงข้าว กข43 ด้วยวิธีธรรมดา และวิธีหุงใส่น้ำมันแล้วแช่ตู้เย็นที่อุณหภูมิ 6 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 12 ชั่วโมง และ 60 ชั่วโมง พบว่าการหุงข้าว กข43 ใส่น้ำมัน แล้วแช่ตู้เย็นที่อุณหภูมิ 6 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 12 ชั่วโมง ทำให้แป้งทน

ย่อยเพิ่มจากร้อยละ 7.46±0.19 เป็นร้อยละ 8.76±0.62 ดังนั้นเพิ่มขึ้นร้อยละ 17.43 การหุงข้าว กข43 แบบที่ 5. ทำให้แป้งน่อยเพิ่มมากที่สุด ดังนั้นเพิ่มขึ้นร้อยละ 18.09

วิธีการหุงข้าว กข43 ด้วยวิธีธรรมดา เทียบกับวิธีหุงใส่น้ำมันแล้วแช่ตู้เย็นที่อุณหภูมิ 6 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 12 ชั่วโมงเมื่อทดสอบด้วย t-test ค่า sig (2-tailed) พบว่าต่ำกว่า 0.05 แสดงว่ามีความสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 สรุปการใส่น้ำมัน และอุณหภูมิมีผลต่อการเกิดแป้งน่อย

Paired Samples Statistics

		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean
Pair 1	กข43	7.8733	3	.15695	.09062
	น้ำมันแช่12ชม	8.4467	3	.18230	.10525

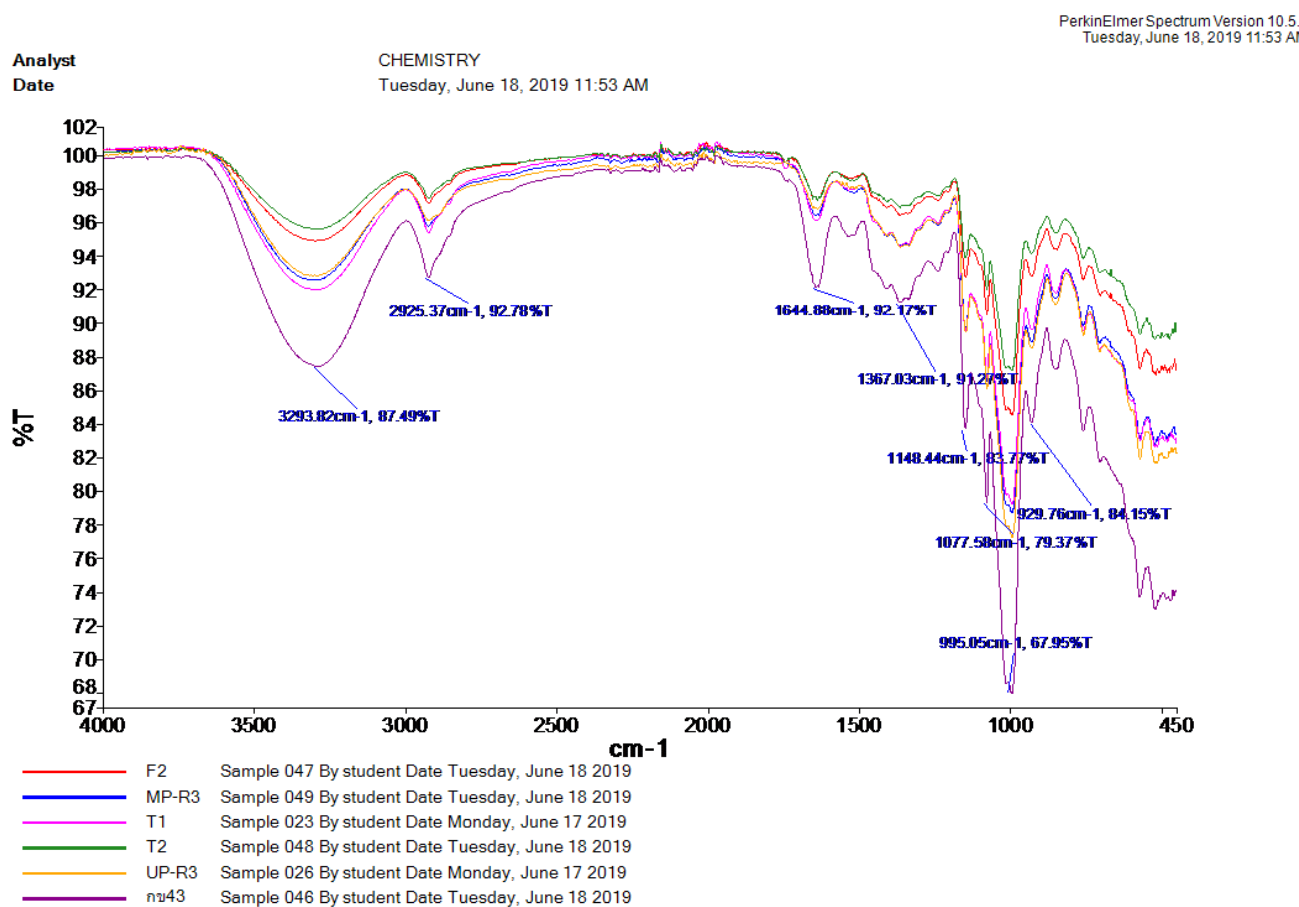
การทดสอบ	N	X	SD	t	sig
หุงข้าว กข43	3	7.87	0.16	-5.20	0.035
หุงข้าว กข43 แช่ตู้เย็นที่อุณหภูมิ 6 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 12 ชั่วโมง	3	8.45	0.18		

Paired Samples Test

		Paired Differences							
					95% Confidence Interval of the Difference				
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	Lower	Upper	t	df	Sig. (2-tailed)
Pair 1	กข43 - น้ำมันแช่ 12 ชม	-.57333	.19088	.11020	-1.04749	-.09917	-5.203	2	.035

ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างโดยวิธี FTIR

นำตัวอย่างข้าวไปวัดด้วยเครื่อง FTIR ได้สเปกตรัมรวมดังภาพ



หมายเหตุ

F2 คือ ข้าวกข 43 ที่หุงแบบใส่น้ำมันแช่แข็ง 60 ชม.

MP -R3 คือ ข้าวกข 43 ที่หุงแบบที่ 4.

T1 คือ ข้าวกข 43 หุงใส่น้ำมัน แช่6 องศาเซลเซียส 12 ชม.

T2 คือ ข้าวกข 43 หุงใส่น้ำมัน แช่6 องศาเซลเซียส 60 ชม.

UP-R3 หุงแบบที่ 5.

กข43 คือข้าวหุงด้วยหม้อหุงข้าว

รูปที่ 4.11 แสดงสเปกตรัมของข้าวกข 43 ที่หุงแบบต่างๆ เมื่อวัดด้วย IR

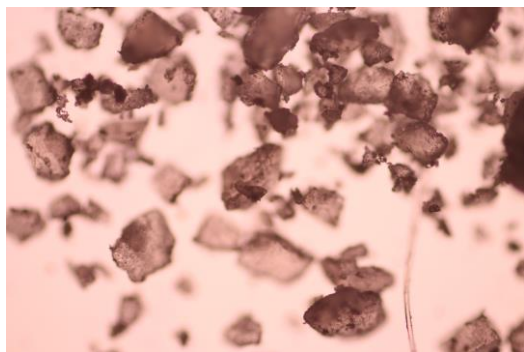
จากสเปกตรัมเมื่อวัดด้วย FT IR ข้าวกข 43 ที่หุงด้วยวิธีต่างๆพบแบนดังนี้ 3293 2925 1644 1367 1148 1077 1047 1022 995 929 cm⁻¹ ไปหาค่า Molecular order and Chemical shifts ของข้าวกข 43 ที่หุงด้วยวิธีต่างๆดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 แสดงผล **Molecular order and Chemical shifts** ของข้าวทง 43 ที่ทดลองหุงด้วยวิธีต่างๆ

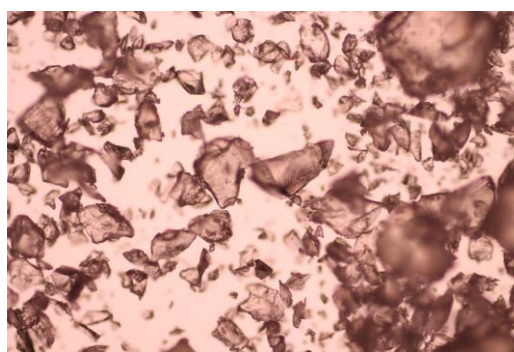
การหุง	$R_{1047/1022}$ (DO)	$R_{995/1022}$ (DD)
ข้าวดิบ(ค3)	1.05	0.97
ข้าวหุง(3)	1.11	0.95
หุง แล้วแช่ 6 องศาเซลเซียส 12ชม.(T1)	1.06	0.98
หุง แล้วแช่ 6 องศาเซลเซียส 60ชม.(T2)	1.04	0.99
หุงใส่น้ำมันแช่แข็ง 60 ชม.(F2)	1.05	0.98
MP –R3	1.06	0.98
UP –R3	1.19	1.08

การหุงข้าว ทง 43 แบบที่ 5 (UP –R3) ทำให้แป้งทนย่อยมากที่สุด ค่า $R_{1047/1022}$ (DO) มีค่าเท่ากับ 1.19 การหุงข้าวด้วยวิธีต่างๆทำให้เกิดแป้งทนย่อยได้ต่างกัน แป้งทนย่อยชนิด R3 มีการดูดกลืนแสงแล้วเกิดแบนที่ $995\ 1022\ 1047\ \text{cm}^{-1}$ ตามลำดับ แบนที่ 995 และ $1047\ \text{cm}^{-1}$ สัมพันธ์กับโครงสร้างโมเลกุลในแป้งทนย่อย แบนที่ $1022\ \text{cm}^{-1}$ สัมพันธ์กับโครงสร้างผลึกโมเลกุลในแป้งทนย่อย ถ้าค่าของ $R_{1047/1022}$ และ $R_{995/1022}$ สูง แสดงว่ามีผลึกของแป้งทนย่อย ค่า $R_{1047/1022}$ เป็นค่าแสดงค่า degree of ordered structure(DO) ข้าวทง 43 ดิบ(ค3) ข้าวที่ผ่านการหุงแล้ว(3) ข้าวที่หุงใส่น้ำมันแช่แข็ง60ชั่วโมง(T2) ข้าวที่หุงด้วยไมโครเวป(MP –R3) ข้าวที่หุงวิธีเข้าอัลตราโซนิกส์แล้วนึ่งไอน์สูง(UP –R3) มีค่า 1.05 1.11 1.04 1.06 1.19 ตามลำดับแสดงในตารางที่ 4.7 ผลแสดงว่าการหุงข้าว ทง 43 แบบที่ 5 (UP –R3) ทำให้เกิดค่า degree of ordered structureมากที่สุด แป้งทนย่อยจะมีโครงสร้างที่เกิดจากการจับตัวกันเกิดเป็นสายโซ่ยาวหลังจากเกิดขบวนการเจลลาคีไนซ์เซชัน (gelatinization) และมีการเกิดพันธะไฮโดรเจนในโครงสร้างผลึก ค่า $R_{995/1022}$ แสดงค่า degree of the double helix (DD) (ค3) ข้าวที่หุง (3), (T1) , (T2) (F2) (MP –R3) ,(UP –R3) มีค่า 0.97 0.95 0.98 0.99 0.98 0.98 1.08 ตามลำดับ ผลชี้ให้เห็นว่าการหุงข้าว ทง 43 แบบที่ 5 (UP –R3) ทำให้เกิดโครงสร้างแบบ double helix สอดคล้องกับ C. Bao, et al. (2017) และ S. Zeng et al. (2015)

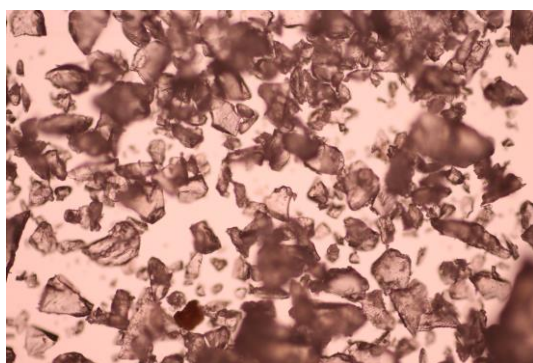
ผลการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ของข้าวทกข43 ที่หุงแบบต่างๆดังรูปที่ 4.12



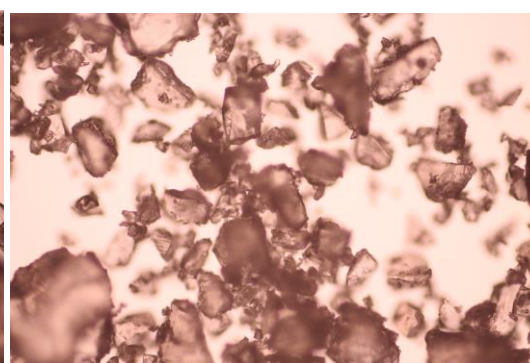
ค3



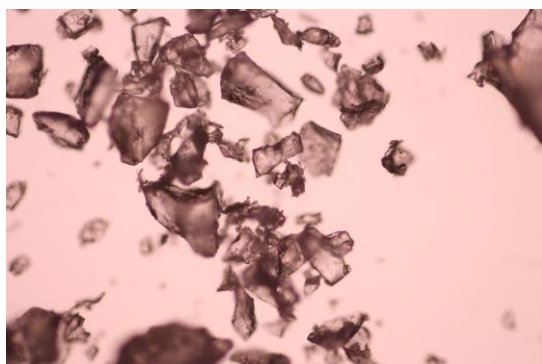
UP-R3



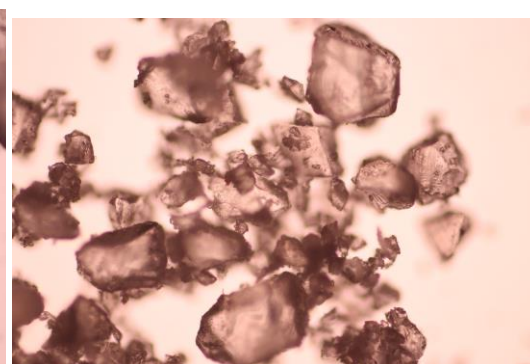
MP-R3



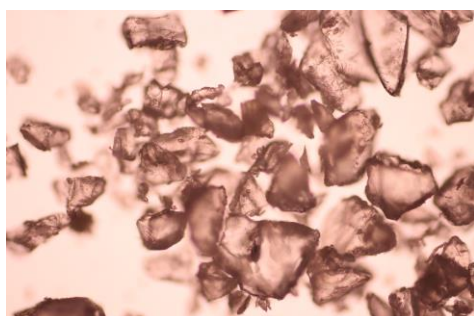
T2



T1



F2



3

รูปที่ 4.12 แสดงภาพจากกล้องจุลทรรศน์ของข้าวทกข43 ที่หุงแบบต่างๆ

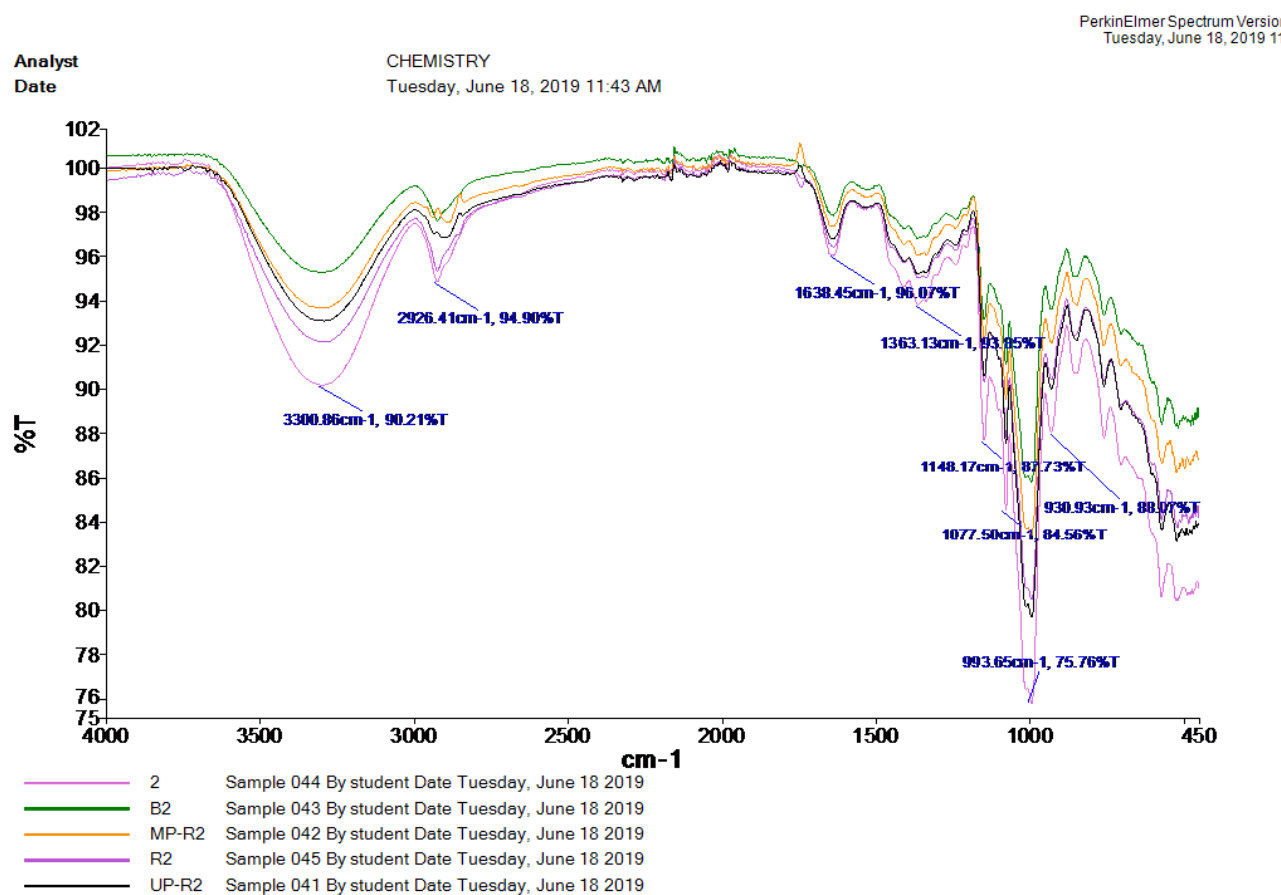
4.2.2 ข้าวหอมมะลิ เมื่อนำข้าวหอมมะลิไปทดลองหุงด้วยวิธีต่างๆ เมื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณแป้งทนย่อย ผลดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 แสดงผลการหาปริมาณแป้งทนย่อยข้าวหอมมะลิที่หุงด้วยวิธีต่างๆ

การหุง	%RS เฉลี่ย $\pm$ SD	%RS เพิ่ม
ข้าวดิบ(ค2)	7.12 $\pm$ 0.01	
ข้าวหุง (2)	7.15 $\pm$ 0.21	0.42
หุง แล้วแช่แข็ง 60 ชม.(B2)	7.56 $\pm$ 0.02	6.18
หุงใส่น้ำมันแช่แข็ง 60 ชม.(R2)	7.13 $\pm$ 0.08	0.14
ข้าวหอมมะลิหุงแบบที่ 3. (AAHMT-R2)	6.52 $\pm$ 0.02	-
ข้าวหอมมะลิหุงแบบที่ 4. (MP –R2)	7.12 $\pm$ 0.19	-
ข้าวหอมมะลิหุงแบบที่ 5. (UP –R2)	7.41 $\pm$ 0.08	4.07

พบว่าข้าวหอมมะลิเมื่อนำไปทดลองหุงด้วยวิธีต่างๆดังนี้ หุงด้วยหม้อหุงข้าว หุงแล้วแช่แข็ง 60 ชม.(B2) หุงใส่น้ำมันแช่แข็ง 60 ชม.(R2) ข้าวหอมมะลิหุงแบบที่ 5. (UP –R2) มีปริมาณแป้งทนย่อยเพิ่มขึ้นร้อยละ 0.42 6.18 0.14 4.07 ตามลำดับ ดังนั้นถ้าต้องการหุงข้าวหอมมะลิให้มีแป้งทนย่อยมากที่สุดคือหุง แล้วแช่แข็ง 60 ชม.

พบว่าข้าวหอมมะลิไม่ว่าจะหุงด้วยวิธีใดปริมาณแป้งทนย่อยจะไม่เพิ่มมาก ปริมาณแป้งทนย่อยในข้าวดิบจะมีค่าใกล้เคียงกันกับข้าวหุง
นำตัวอย่างข้าวไปวัดด้วยเครื่อง FTIR ได้สเปกตรัมรวมดังรูปที่ 4.13



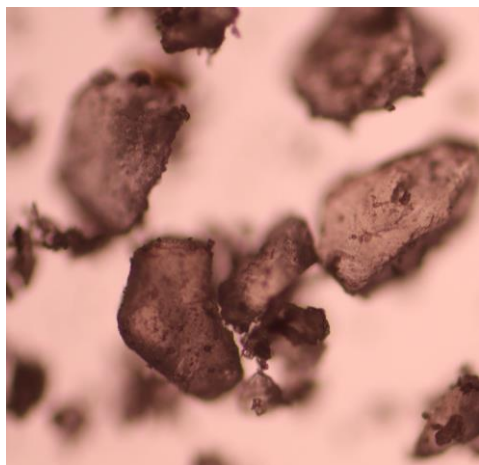
รูปที่ 4.13 แสดงสเปกตรัมของข้าวหอมมะลิเมื่อวัดด้วยเครื่อง FTIR

จากสเปกตรัมเมื่อวัดด้วย FT IR ข้าวหอมมะลิ ที่หุงด้วยวิธีต่างๆพบแบนดังนี้ 3300 2926 1638 1363 1148 1077 993 930 1047 1022 995 cm⁻¹ สำหรับข้าวหอมมะลิที่หุงแบบที่ 4 คือหุงด้วยไมโครเวฟไม่พบแบน 2926 cm⁻¹ แต่จะมีแบนที่ 2898 cm⁻¹ ไปหาค่า Molecular order and Chemical shifts ของข้าวหอมมะลิที่หุงด้วยวิธีต่างๆดังตารางที่ 4.9

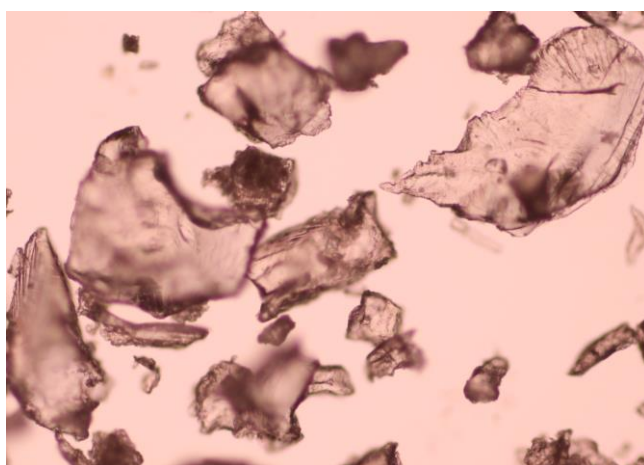
ตารางที่ 4.9 แสดงผล Molecular order and Chemical shifts ของข้าวหอมมะลิที่หุงด้วยวิธีต่างๆ

การหุง	R _{1047/1022} (DO)	R _{995/1022} (DD)
ข้าวดิบ(ค2)	1.09	0.95
ข้าวหุง (2)	1.07	0.97
หุง แล้วแช่แข็ง 60 ชม.(B2)	1.04	0.98
หุงใส่น้ำมันแช่แข็ง 60 ชม.(R2)	1.06	0.98
ข้าวหอมมะลิหุงแบบที่ 4. (MP -R2)	1.05	0.99
ข้าวหอมมะลิหุงแบบที่ 5. (UP -R2)	1.06	0.98

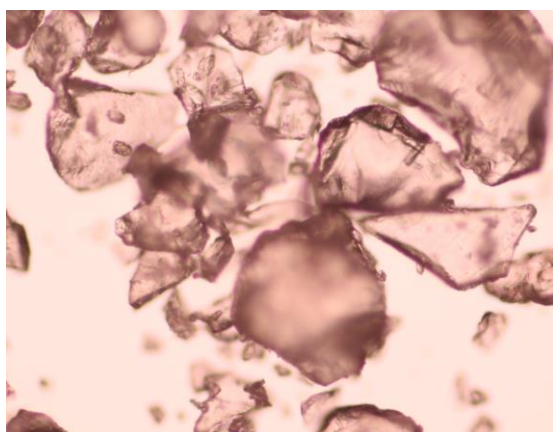
ผลการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ของข้าวหอมมะลิที่หุงแบบต่างๆดังรูปที่ 4.14



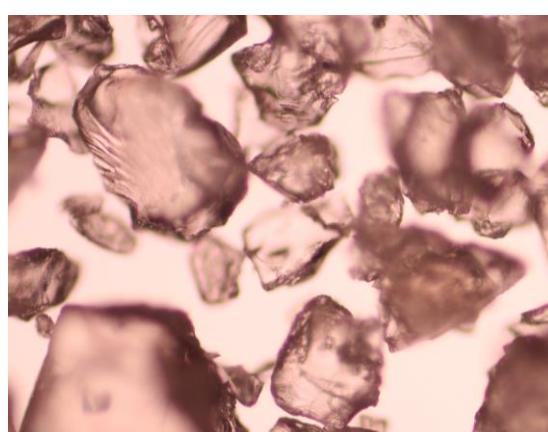
ค2



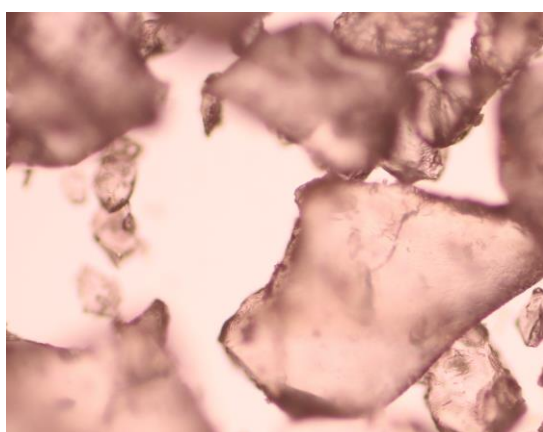
2



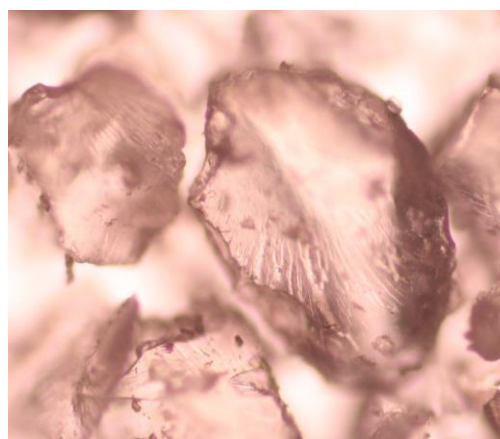
B2



R2



UP-R2



MP-R2

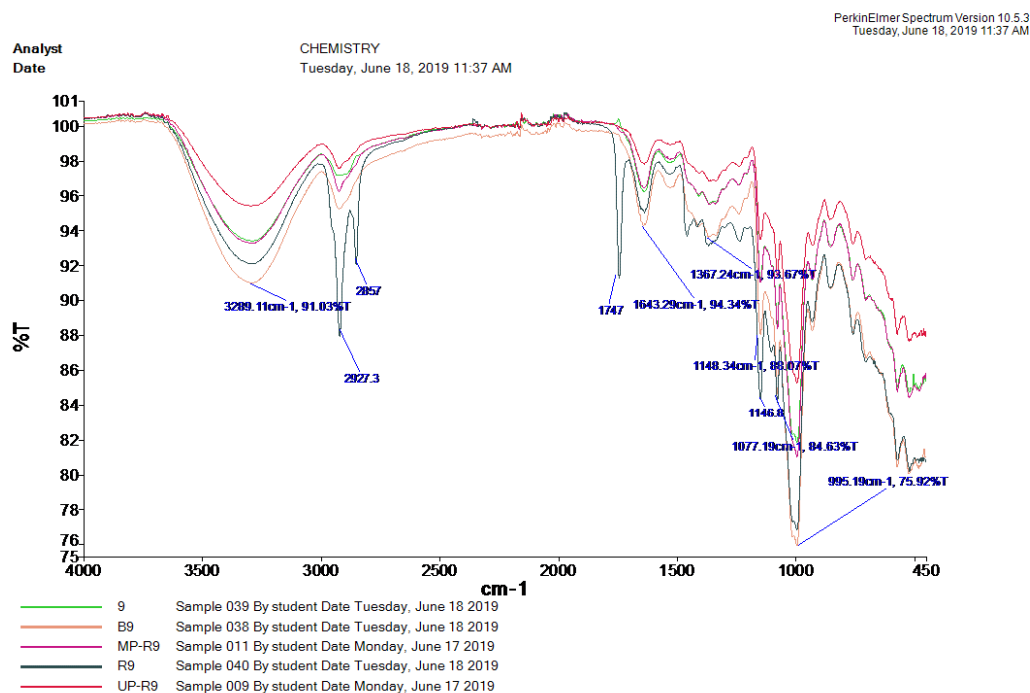
รูปที่ 4.14 แสดงการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ของข้าวหอมมะลิที่หุงแบบต่างๆ

4.2.3 ข้าวรองถนน เมื่อนำข้าวรองถนนไปทดลองหุงด้วยวิธีต่างๆ แล้วหาปริมาณแป้งทนย่อยผลดังตาราง 4.10

ตารางที่ 4.10 แสดงผลการหุงข้าวรองถนนด้วยวิธีต่างๆ

การหุง	%RS เฉลี่ย $\pm$ SD	%RS เพิ่ม
ข้าวข้าวรองถนนดิบ	8.94 $\pm$ 0.12	
ข้าวข้าวรองถนนหุง	11.10 $\pm$ 0.01	24.58
หุง แล้วแช่แข็ง 60 ชม.	11.05 $\pm$ 0.19	23.60
หุงใส่น้ำมันแช่แข็ง 60 ชม.	9.73 $\pm$ 0.08	8.84
AAHMT- RS3 แบบที่ 3.	8.86 $\pm$ 0.10	-
MP -R9	10.69 $\pm$ 0.18	9.27
UP -R9	11.02 $\pm$ 0.01	23.27

การหุงข้าวรองถนนด้วยวิธีต่างๆคือ หุงด้วยหม้อหุงข้าว หุงด้วยหม้อหุงข้าวแล้วแช่แข็ง 60 ชม. UP -R9 MP -R9 หุงใส่น้ำมันแช่แข็ง 60 ชม. เพิ่มแป้งทนย่อยร้อยละ 24.58 23.60 23.27 9.27 และ 8.84 ตามลำดับ ส่วนการหุงแบบ AAHMT- RS3 แบบที่ 3 ไม่เพิ่มแป้งทนย่อย นำตัวอย่างข้าวไปวัดด้วยเครื่อง FTIR ได้สเปกตรัมรวมดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 สเปกตรัมรวมของข้าวรองถนนที่หุงด้วยวิธีต่างๆวัดด้วยเครื่อง FTIR

จากสเปกตรัมเมื่อวัดด้วย FT IR ขั้วร่องถนนดิบ และขั้วร่องถนนที่หุงด้วยวิธีต่างๆพบแบนดังนี้ 3289 2926 1638 1363 1367 1148 1077 1047 1022 995 cm^{-1} สำหรับขั้วร่องถนนที่หุงแบบหุงใส่น้ำมันแช่แข็ง 60 ชม.พบแบน 2857 cm^{-1} และแบนที่ 1743 cm^{-1} เมื่อหาค่า Molecular order and Chemical shifts ของขั้วร่องถนนดิบ และขั้วร่องถนนที่หุงด้วยวิธีต่างๆดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 แสดงผล Molecular order and Chemical shifts ของขั้วร่องถนนที่หุงด้วยวิธีต่างๆ

การหุง	$R_{1047/1022}$ (DO)	$R_{995/1022}$ (DD)
ขั้วขั้วร่องถนนดิบ	1.07	0.96
ขั้วขั้วร่องถนนหุง	1.06	1.00
หุงแล้วแช่แข็ง 60 ชม.	1.07	0.98
หุงใส่น้ำมันแช่แข็ง 60 ชม.	1.07	0.98
MP –R9	1.06	0.98
UP –R9	1.04	0.98

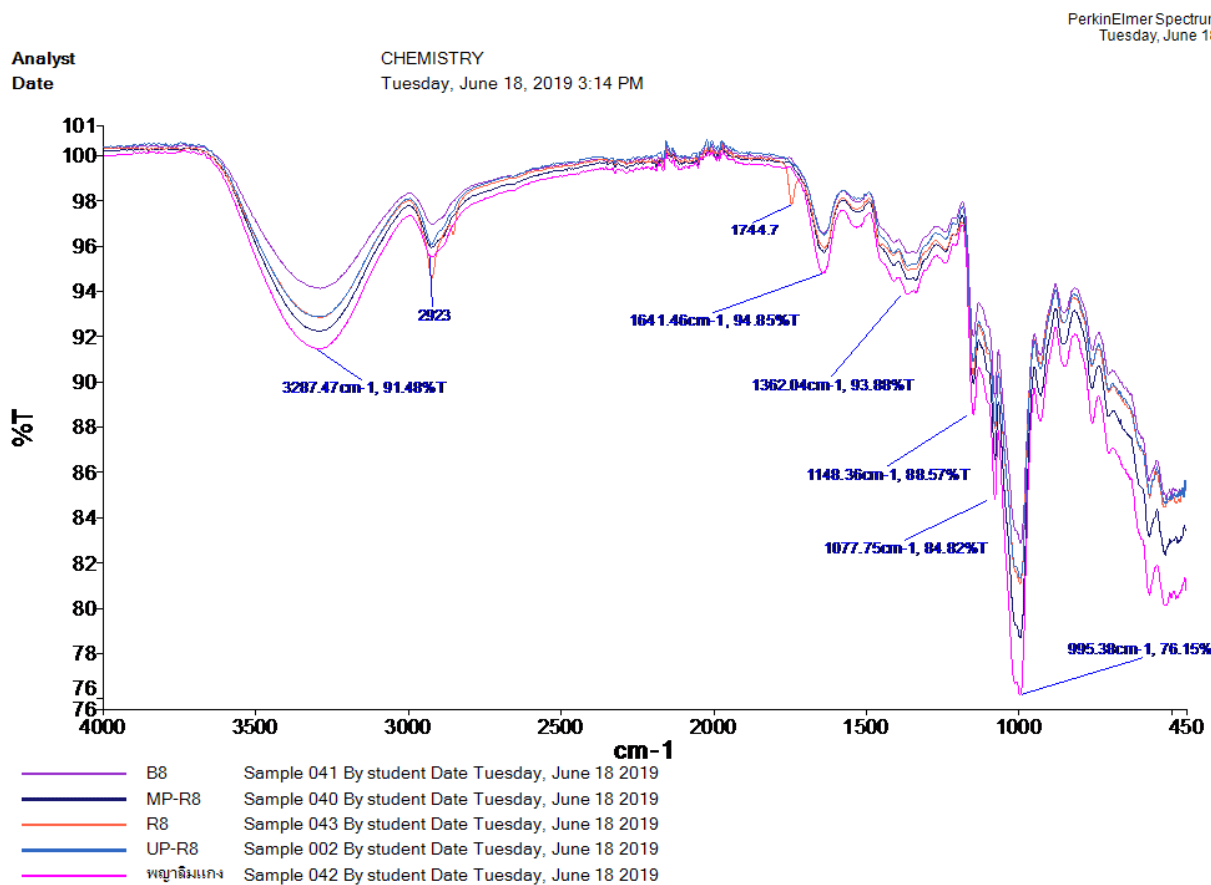
4.2.4 ขั้วพญาลิ้มแอง เมื่อนำขั้วพญาลิ้มแองไปทดลองหุงด้วยวิธีต่างๆ ผลดังตาราง 4.12

ตารางที่ 4.12 แสดงผลการหุงขั้วพญาลิ้มแองด้วยวิธีต่างๆ

การหุง	%RS เฉลี่ย $\pm$ SD	%RS เพิ่ม
ขั้วพญาลิ้มแองดิบ(ค8)	8.61 $\pm$ 0.11	
ขั้วพญาลิ้มแองหุง	9.19 $\pm$ 0.11	6.70
ขั้วพญาลิ้มแองหุง แล้วแช่แข็ง 60 ชม.(B8)	9.72 $\pm$ 0.35	28.9
ขั้วพญาลิ้มแองหุงใส่น้ำมันแช่แข็ง 60 ชม.(R8)	9.31 $\pm$ 0.16	8.10
AAHMT- RS3 แบบที่ 3.	9.03 $\pm$ 0.11	4.88
MP –R8	9.46 $\pm$ 0.20	9.87
UP –R8	9.10 $\pm$ 0.07	5.69

พบว่าขั้วพญาลิ้มแองหุง แล้วแช่แข็ง 60 ชม.ทำให้แป้งทนย่อยเพิ่มขึ้นร้อยละ 28.9

นำตัวอย่างข้าวพญาลิสมแกงไปวัดด้วยเครื่อง FTIR ได้สเปกตรัมรวมดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 สเปกตรัมรวมของข้าวพญาลิสมแกงวัดด้วยเครื่อง FTIR

จากสเปกตรัมเมื่อวัดด้วย FT IR ข้าวข้าวพญาลิสมแกงดิบ และข้าวพญาลิสมแกงที่หุงด้วยวิธีต่างๆพบแบนดังนี้ 3294 2926 1638 1358 1148 1077 1047 1022 995 cm⁻¹ สำหรับข้าวข้าวพญาลิสมแกงที่หุงแบบหุงไอน้ำมันแซ่แข็ง 60 ซม.พบแบน 2855 cm⁻¹ และแบนที่ 1745 cm⁻¹ เมื่อหาค่า Molecular order and Chemical shifts ของข้าวพญาลิสมแกงดิบ และข้าวพญาลิสมแกงที่หุงด้วยวิธีต่างๆดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 แสดงผล **Molecular order and Chemical shifts** ของข้าวพญาลิสมแกงที่หุงด้วยวิธีต่างๆ

การหุง	R _{1047/1022} (DO)	R _{995/1022} (DD)
ข้าวพญาลิสมแกงดิบ(ค8)	1.06	0.96
ข้าวพญาลิสมแกงหุง	1.07	0.98
ข้าวพญาลิสมแกงหุง แล้วแช่แข็ง 60 ชม.(B8)	1.05	0.98
ข้าวพญาลิสมแกงหุงใส่น้ำมันแช่แข็ง 60 ชม.(R8)	1.05	0.96
MP –R8	1.06	0.97
UP –R8	1.05	0.98

4.2.5 ข้าวขามมั่ง เมื่อนำข้าวขามมั่งไปทอดหุงด้วยวิธีต่างๆ ผลดังตาราง 4.14

ตารางที่ 4.14 แสดงผลการหุงข้าวขามมั่งด้วยวิธีต่างๆ

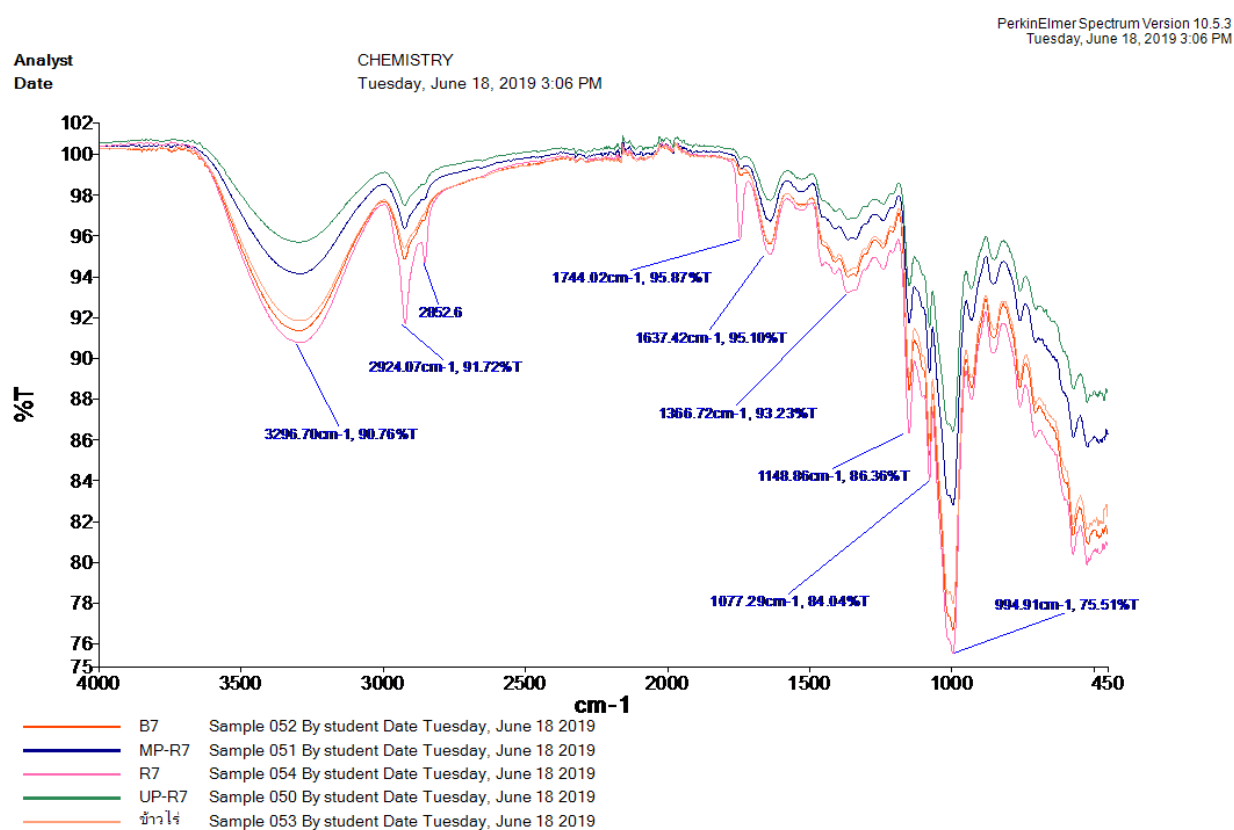
การหุง	%RS เฉลี่ย $\pm$ SD	%RS เพิ่ม
ข้าวขามมั่งดิบ(ค7)	8.04 $\pm$ 0.27	
ข้าวหุง (ข้าวไร่)	11.07 $\pm$ 0.13	37.69
หุง แล้วแช่แข็ง 60 ชม.(B7)	10.01 $\pm$ 0.09	24.5
หุงใส่น้ำมันแช่แข็ง 60 ชม.(R7)	9.45 $\pm$ 0.12	17.53
AAHMT- RS3 แบบที่ 3.	7.61 $\pm$ 0.17	-
MP – R7	10.42 $\pm$ 0.08	29.60
UP –R7	10.28 $\pm$ 0.03	27.86

การหุงข้าวขามมั่งด้วยวิธีต่างๆ พบว่าวิธีหุงด้วยหม้อหุงข้าวทำให้มีแป้งทนย่อยมากที่สุด การหุงด้วยหม้อหุงข้าวเพิ่มแป้งทนย่อยร้อยละ 37.69

การหุงแบบที่ 3. นำข้าว 100 กรัม ใส่กรดน้ำส้ม 30% นำไปใส่ในขวดปิดฝาวางไว้ที่อุณหภูมิห้อง(23-34 องศาเซลเซียส)นาน 24 ชั่วโมง แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 110 เซนเซียสระยะเวลา 8 ชั่วโมง แล้วนำไปทำให้เป็นกลางโดยใช้ 1 M NaOH แล้วล้างด้วยน้ำกลั่น จากนั้นทำให้แห้งโดยอบ

ที่ 50 องศาเซนเซียสนาน 24 ชั่วโมง ตามวิธีของ P.V. Hung et al. (2018) AAHMT- RS3 ไม่สามารถเพิ่มแป้งทนย่อยในข้าวได้

นำตัวอย่างข้าวขามังที่หุงด้วยวิธีต่างๆไปวัดด้วยเครื่อง FTIR ได้สเปกตรัมรวมดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 สเปกตรัม FTIR ข้าวขามังที่หุงด้วยวิธีต่างๆ

จากสเปกตรัมเมื่อวัดด้วย FT IR ข้าวขามังที่ดิบ และข้าวขามังที่หุงด้วยวิธีต่างๆพบแบนดังนี้ 3296 2924 1637 1366 1148 1077 1047 1022 995 cm⁻¹ สำหรับข้าวขามังที่หุงแบบหุงใส่น้ำมันแช่แข็ง 60 ชม.พบแบน 2852 cm⁻¹ และแบนที่ 1744 cm⁻¹ เมื่อหาค่า Molecular order and Chemical shifts ของข้าวขามังดิบ และข้าวขามังที่หุงด้วยวิธีต่างๆดังตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 แสดงผล **Molecular order and Chemical shifts** ของข้าวพญาลิสมงที่หุงด้วยวิธีต่างๆ

การหุง	R _{1047/1022} (DO)	R _{995/1022} (DD)
ข้าวขาวม้งดิบ(ด7)	1.08	0.96
ข้าวหุง (ข้าวไร่)	1.07	0.98
หุง แล้วยแช่แข็ง 60 ชม.(B7)	1.07	0.97
หุงใส่น้ำมันแช่แข็ง 60 ชม.(R7)	1.07	0.97
MP – R7	1.05	0.98
UP –R7	1.03	0.98

4.2.6 ข้าวกล้องลิสมง เมื่อนำข้าวกล้องลิสมงไปทดลองหุงด้วยวิธีต่างๆ ผลดังตารางที่ 4.15

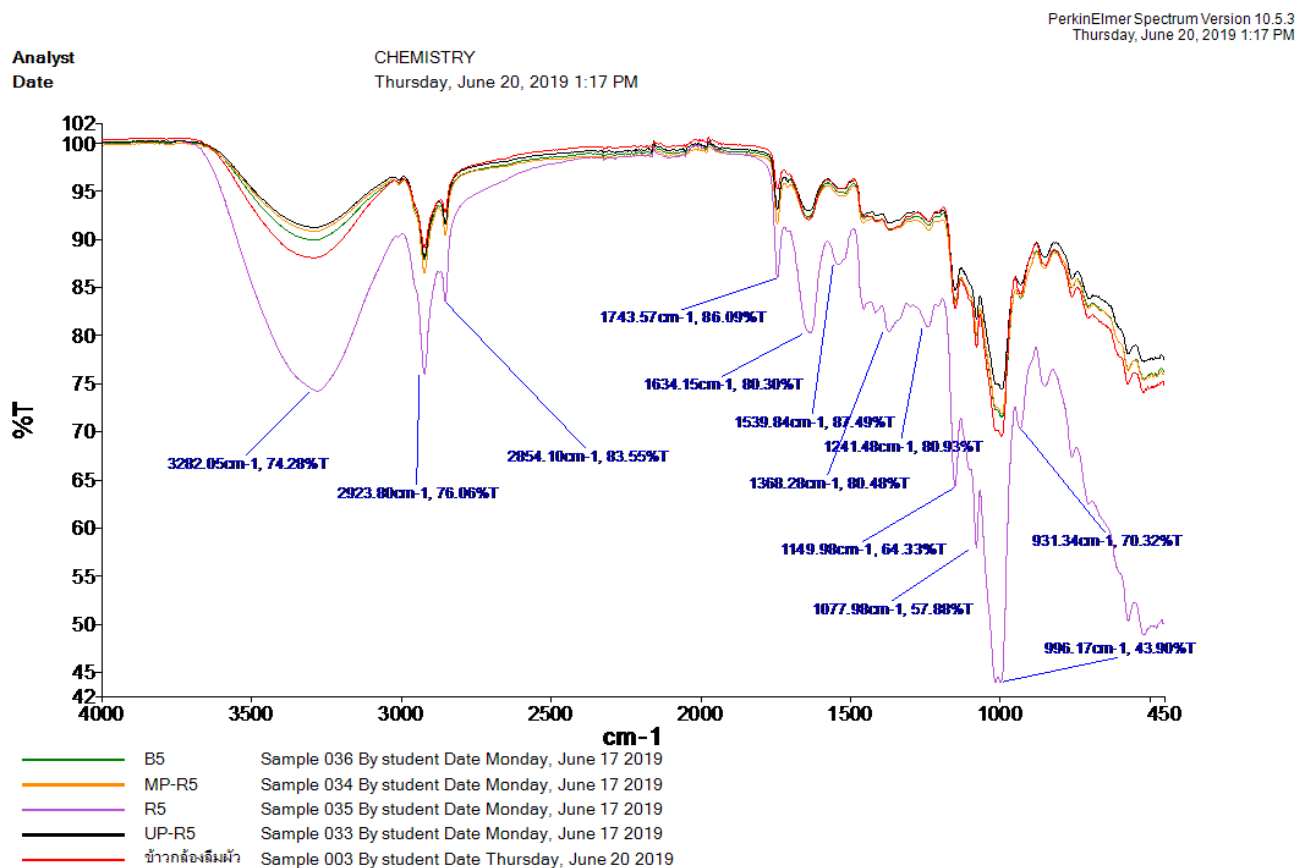
ตารางที่ 4.15 แสดงผลการหุงข้าวกล้องลิสมงด้วยวิธีต่างๆ

การหุง	%RS เฉลี่ย $\pm$ SD	%RS เพิ่ม
ข้าวดิบ(ด5)	13.78 $\pm$ 0.05	
ข้าวหุง(5)	16.35 $\pm$ 0.21	18.65
หุง แล้วยแช่แข็ง 60 ชม.(B5)	15.59 $\pm$ 0.02	13.13
หุงใส่น้ำมันแช่แข็ง 60 ชม.(R5)	14.02 $\pm$ 0.20	1.74
AAHMT- R5 แบบที่ 3.	14.08 $\pm$ 0.14	2.18
MP –R5	17.37 $\pm$ 0.21	26.05
UP –R5	16.09 $\pm$ 0.12	16.76

การหุงข้าวด้วยวิธี MP – R5 เพิ่มแป้งทนย่อย 26.05%

ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างโดยวิธี FTIR

ข้าวกล้องลิ้มผัดดิบ และข้าวกล้องลิ้มผัดที่ผ่านการหุงด้วยวิธีต่าง ๆ นำตัวอย่างข้าวไปวัดด้วย
เครื่อง FTIR ได้สเปกตรัมรวมดังรูปที่ 4.18 พบแบนที่ $3297 \quad 2923 \text{ cm}^{-1}$



รูปที่ 4.18 สเปกตรัม FTIR ข้าวกล้องลิ้มผัดที่ผ่านการหุงด้วยวิธีต่างๆ

ตารางที่ 4.16 แสดงผล **Molecular order and Chemical shifts** ของข้าวกล้องลิ้มผัดไป
ทดลองหุงด้วยวิธีต่างๆ

การหุง	R _{1047/1022} (DO)	R _{995/1022} (DD)
ข้าวดิบ(ด5)	1.06	0.97
ข้าวหุง(5)	1.09	0.97
หุง แล้วยแช่แข็ง 60 ชม.(B5)	1.07	0.97
หุงใส่น้ำมันแช่แข็ง 60 ชม.(R5)	1.21	0.95
MP -R5	1.07	0.96
UP -R5	1.07	0.97

บทที่ 5

สรุปผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การวิจัยการเพิ่มปริมาณแป้งต้านทานการย่อยในข้าวพันธุ์พื้นเมืองที่ปลูกในจังหวัดเพชรบูรณ์ มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มปริมาณแป้งทนย่อยในข้าวพันธุ์ต่างๆ ผู้วิจัยได้ศึกษาดังนี้

5.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณแป้งทนย่อยในข้าว 9 ชนิด

ค่าปริมาณแป้งทนย่อยในข้าว 9 ชนิดที่หุงในหม้อหุงข้าว ได้แก่ ข้าว กข 43 ข้าวกล้อง กข 43 ข้าวหอมมะลิ ข้าวกล้องหอมมะลิ ข้าวกล้องลิ้มฟัว ข้าวขาวม้ง ข้าวกล้องหอมนิล ข้าวพญาลิ้มแกง และข้าวร่องถนน พบว่าข้าวทั้ง 9 ชนิดมีค่าการทนย่อยต่างกันขึ้นกับพันธุ์ และการขัดสี พบว่าข้าวที่ทดลองมีค่าแป้งทนย่อยร้อยละ 7.15 – 16.3 ข้าวกล้องมีค่าแป้งทนย่อยร้อยละ 11.63 – 16.35 ข้าวขัดขาวมีค่าแป้งทนย่อยร้อยละ 7.15 – 11.07 ข้าวเจ้ามีแป้งชนิดอะไมเลสสูง หรือข้าวที่หุงแล้วมีลักษณะร่วนแข็ง เช่น ข้าวกล้อง กข 43 ข้าวขาวม้ง ข้าวหอมนิล และข้าวร่องถนน เป็นต้น จะเป็นข้าวที่มีปริมาณแป้งทนย่อยสูงกว่าข้าวที่เหนียวนุ่ม เช่น ข้าวหอมมะลิ ข้าว กข 43 และพญาลิ้มแกง เป็นต้น

ข้าวกล้องจะมีค่าแป้งทนย่อยมากกว่าข้าวขัดขาว เปรียบเทียบข้าวหอมมะลิ ถ้าสีเป็นข้าวกล้องพบว่าข้าวกล้องหอมมะลิมีค่าปริมาณแป้งทนย่อยมากกว่า ข้าวหอมมะลิขัดขาวร้อยละ 62.6 เมื่อเปรียบเทียบในข้าวกล้อง กข 43 มีค่าปริมาณแป้งทนย่อยมากกว่าข้าวขาว กข 43 ร้อยละ 62.2 ดังนั้นถ้าบริโภคข้าวกล้องจะทำให้ได้รับแป้งทนย่อยมากกว่าการบริโภคข้าวขัดขาว ซึ่งจะเป็นผลดีต่อสุขภาพ เพราะแป้งที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ไม่ถูกย่อยสลายในลำไส้เล็ก จะมีประโยชน์ต่อระบบขับถ่าย และระบบหมุนเวียนเลือด จึงมีคุณสมบัติเทียบเท่ากับเส้นใยอาหาร เกิดการหมักโดยจุลินทรีย์ในลำไส้ใหญ่ และผลิตกรดไขมันสายสั้นๆ เช่น แอซิเตต (acetate) บิวทิเรต (butyrate) และโพรพอไอเนต (propionate) และก๊าซ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อร่างกายมนุษย์ แป้งทนย่อยสามารถถูกดูดซึมได้ที่ลำไส้ใหญ่จนถึงตับ ได้กรดไขมันที่ช่วยให้สุขภาพของปลายลำไส้ใหญ่ดีขึ้น กรดบิวทิเรต จะช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของ transformed cell ในสิ่งมีชีวิต โดยจะยับยั้งจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรค เพิ่มปริมาณของเหลว ปรับสภาวะความเป็นกรด – ด่าง ให้ต่ำลง

เมื่อนำข้าว 9 ชนิดไปวัดสเปกตรัมโดย FTIR ข้าวกล้องแต่ละชนิดมีสเปกตรัมเหมือนกันที่ wavenumber 3,281 3,100 2,923 2,854 1,744 1,645 1,148 1,077 และ 994 cm^{-1} ข้าวขัดขาวแต่ละชนิดมีสเปกตรัมที่คล้ายกันที่ wavenumber 3,281 2,923 2,854 1,645 1,148 1,077 และ 994 cm^{-1}

ดังนั้นข้าวกล้อง มีสเปกตรัมที่แตกต่างกับข้าวขัดขาวคือที่ wavenumber 3,100 และ 1,744 สเปกตรัมของ IR สามารถบอกความเป็นข้าวกล้องและข้าวขัดขาวได้

5.2. ผลการทดลองหาวิธีเพิ่มปริมาณแป้งทนย่อยในข้าว

5.2.1 ข้าว กข43 เมื่อทดลองหุงข้าวด้วยวิธีต่างๆพบว่ามีการเพิ่มแป้งทนย่อยร้อยละ 6.57-8.81 การหุงข้าว กข43 แบบที่ 5. คือ นำข้าว 1 ถ้วยตวง ใส่ น้ำ 1.5 ถ้วยตวง แล้วนำไปหุงในอ่างอัลตราโซนิกส์ที่ power 300 W นาน 55 นาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส แล้วนำไปเข้าหม้อหุงข้าวไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 115 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที เย็นแล้วเก็บแช่ในตู้เย็นที่ -6 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 24 ชั่วโมง นำไปอบที่ 50 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง ซึ่งดัดแปลงมาจากวิธีของ S. Zeng et al. (2015) ที่นำไปใช้อัลตราโซนิกส์-ความร้อนขึ้นที่ความดันสูง ทำให้มีแป้งทนย่อยจากข้าวดิบร้อยละ 7.46 ± 0.19 เพิ่มเป็นร้อยละ 8.81 ± 0.16 ดังนั้นเพิ่มขึ้นร้อยละ 18.09 ซึ่งสอดคล้องกับ S. Zeng et al. (2015) เมื่อ นำข้าวไปทดลองเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิต่างกัน โดยนำข้าว กข 43 หุงด้วยวิธีธรรมดา และข้าว กข 43 ที่หุงใส่น้ำมันแล้วแช่ตู้เย็นที่อุณหภูมิ 6 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 12 ชั่วโมง และ 60 ชั่วโมง พบว่าการหุงข้าว กข43 ใส่น้ำมัน แล้วแช่ตู้เย็นที่อุณหภูมิ 6 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 12 ชั่วโมง ทำให้แป้งทนย่อยเพิ่มจากร้อยละ 7.46 ± 0.19 เป็นร้อยละ 8.76 ± 0.62 ดังนั้นเพิ่มขึ้นร้อยละ 17.43 การหุงข้าว กข43 แบบที่ 5. ทำให้แป้งทนย่อย เพิ่มมากที่สุด ดังนั้นเพิ่มขึ้นร้อยละ 18.09

วิธีการหุงข้าว กข43 ด้วยวิธีธรรมดา เทียบกับวิธีหุงใส่น้ำมันแล้วแช่ตู้เย็นที่อุณหภูมิ 6 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 12 ชั่วโมงเมื่อทดสอบด้วย t-test ค่า sig (2-tailed) พบว่าต่ำกว่า 0.05 แสดงว่ามีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 สรุปการหุงใส่น้ำมันมีผลต่อการเกิดแป้งทนย่อยสำหรับข้าว กข 43

นำตัวอย่างข้าวไปวัดด้วยเครื่อง FTIR ได้สเปกตรัมของ ข้าว กข 43 ที่หุงด้วยวิธีต่างๆพบแบนดังนี้ 3293 2925 1644 1367 1148 1077 1047 1022 995 929 cm^{-1} จากนั้นไปหาค่า Molecular order and Chemical shifts ของข้าว กข43 ที่หุงด้วยวิธีต่างๆ พบว่าการหุงข้าว กข 43 แบบที่ 5 (UP-R3) ทำให้แป้งทนย่อยมากที่สุด ค่า $R_{1047/1022}$ (DO) มีค่าเท่ากับ 1.19 การหุงข้าวด้วยวิธีต่างๆทำให้เกิดแป้งทนย่อยได้ต่างกัน แป้งทนย่อยชนิด R3 มีการดูดกลืนแสงแล้วเกิดแบนที่ 995 1022 1047 cm^{-1} ตามลำดับ แบนที่ 995 และ 1047 cm^{-1} สัมพันธ์กับโครงสร้างโมเลกุลในแป้งทนย่อยแบนที่ 1022 cm^{-1} สัมพันธ์กับโครงสร้างผลึกโมเลกุลในแป้งทนย่อย ถ้าค่าของ $R_{1047/1022}$ และ $R_{995/1022}$ สูง แสดงว่ามีผลึกของแป้งทนย่อย ค่า $R_{1047/1022}$ เป็นค่าแสดงค่า degree of ordered structure (DO) ผลแสดงว่าการหุงข้าว กข 43 แบบที่ 5 (UP-R3) ทำให้เกิดค่า degree of ordered structure มากที่สุด แป้งทนย่อยจะมีโครงสร้างที่เกิดจากการจับตัวกันเกิดเป็นสายโซ่ยาวหลังจากเกิดขบวนการเจลลาคีไนซ์เซชัน (gelatinization) และมีการเกิดพันธะไฮโดรเจนในโครงสร้าง ค่า $R_{995/1022}$ แสดงค่า degree of the double helix (DD) (ค3) ข้าวที่หุง (3), (T1), (T2) (F2) (MP -

R3), (UP-R3) มีค่า 0.97 0.95 0.98 0.99 0.98 0.98 1.08 ตามลำดับ ผลชี้ให้เห็นว่าการหุงข้าว กข 43 แบบที่ 5 (UP-R3) ทำให้เกิดโครงสร้างแบบ double helix สอดคล้องกับ C. Bao, et al. (2017) และ S. Zeng et al. (2015)

ผลการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ของข้าว กข 43 ที่หุงแบบต่างๆ พบว่าผลึกของข้าวที่หุงมีความคล้ายกัน เมื่อนำข้าวหอมมะลิไปทดลองหุงด้วยวิธีต่างๆ

5.2.2 ข้าวหอมมะลิ เมื่อนำข้าวหอมมะลิไปทดลองหุงด้วยวิธีต่างๆ เมื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณแป้งทนย่อย ผลพบว่าข้าวหอมมะลิเมื่อนำไปทดลองหุงด้วยวิธีต่างๆ ดังนี้ มีแป้งทนย่อยร้อยละ 6.52-7.56 การหุงด้วยหม้อหุงข้าว หุงแล้วแช่แข็ง 60 ชม. (B2) หุงใส่น้ำมันแช่แข็ง 60 ชม. (R2) ข้าวหอมมะลิหุงแบบที่ 5. (UP-R2) มีปริมาณแป้งทนย่อยเพิ่มขึ้นร้อยละ 0.42 6.18 0.14 4.07 ตามลำดับ ดังนั้นถ้าต้องการหุงข้าวหอมมะลิให้มีแป้งทนย่อยมากที่สุดคือ หุงแล้วแช่แข็ง 60 ชม. พบว่าข้าวหอมมะลิไม่ว่าจะหุงด้วยวิธีใดปริมาณแป้งทนย่อยจะไม่เพิ่มมาก ปริมาณแป้งทนย่อยในข้าวดิบจะมีค่าใกล้เคียงกันกับข้าวหุง เนื่องจากข้าวหอมมะลิเป็นข้าวนุ่มมีอะไมโลเพคตินสูง

เมื่อนำตัวอย่างข้าวไปวัดด้วยเครื่อง FTIR ได้สเปกตรัมของข้าวหอมมะลิที่หุงด้วยวิธีต่างๆ พบแบนดังนี้ 3300 2926 1638 1363 1148 1077 993 930 1047 1022 995 cm^{-1} สำหรับข้าวหอมมะลิที่หุงแบบที่ 4 คือหุงด้วยไมโครเวฟไม่พบแบน 2926 cm^{-1} แต่จะมีแบนที่ 2898 cm^{-1} ไปหาค่า Molecular order and Chemical shifts ของข้าวหอมมะลิที่หุงด้วยวิธีต่างๆ จะได้ค่าใกล้เคียงกัน DO เท่ากับ 1.04-1.09 และค่า DD เท่ากับ 0.95-0.99

5.2.3 ข้าวรองถนน เมื่อนำข้าวรองถนนไปทดลองหุงด้วยวิธีต่างๆ แล้วหาปริมาณแป้งทนย่อยพบว่าข้าวรองถนนมีแป้งทนย่อยร้อยละ 8.86-11.10 การหุงข้าวรองถนนจะมีผลทำให้เพิ่มแป้งทนย่อยดังนี้ หุงด้วยหม้อหุงข้าว หุงด้วยหม้อหุงข้าวแล้วแช่แข็ง 60 ชม. UP-R9 MP-R9 หุงใส่น้ำมันแช่แข็ง 60 ชม. เพิ่มแป้งทนย่อยร้อยละ 24.58 23.60 23.27 9.27 และ 8.84 ตามลำดับ ส่วนการหุงแบบ AAHMT-RS3 แบบที่ 3. ไม่เพิ่มแป้งทนย่อย การหุงด้วยหม้อหุงข้าวจะมีแป้งทนย่อยมากที่สุด

นำตัวอย่างข้าวไปวัดด้วยเครื่อง FTIR ข้าวรองถนนดิบ และข้าวรองถนนที่หุงด้วยวิธีต่างๆ พบแบนดังนี้ 3289 2926 1638 1363 1367 1148 1077 1047 1022 995 cm^{-1} สำหรับข้าวรองถนนที่หุงแบบหุงใส่น้ำมันแช่แข็ง 60 ชม. พบแบน 2857 cm^{-1} และแบนที่ 1743 cm^{-1} สอดคล้องกับ J.Y. Kim et al. (2017) ที่พบแบนใหม่ที่ไม่มีในแป้งดิบ แบนที่ 1744 cm^{-1} จะสัมพันธ์กับหมู่ฟังก์ชัน หมู่เอสเตอร์ R-COOR ซึ่งเกิดจากหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ในน้ำ กับหมู่คาร์บอกซิล (-C=O) ในแป้งเกิดพันธะกัน

5.2.4 ข้าวพญาลิสม์แกง เมื่อนำข้าวพญาลิสม์แกงไปทดลองหุงด้วยวิธีต่างๆ แล้ววิเคราะห์หาปริมาณแป้งทนย่อย พบแป้งทนย่อยร้อยละ 8.61-9.46 พบว่าการหุงข้าวพญาลิสม์แกงที่ทำให้มีแป้งทนย่อยมากที่สุด คือ หุงแล้วแช่แข็ง 60 ชม. ทำให้มีแป้งทนย่อยเพิ่มร้อยละ 28.9

จากสเปกตรัมเมื่อวัดด้วย FT IR ข้าวพญาลิสม์แกงดิบ และข้าวพญาลิสม์แกงที่หุงด้วยวิธีต่างๆ พบแบนดังนี้ 3294 2926 1638 1358 1148 1077 1047 1022 995 cm^{-1} สำหรับข้าวพญาลิสม์แกงที่หุงแบบหุงใส่น้ำมันแช่แข็ง 60 ชม. พบแบน 2855 cm^{-1} และแบนที่ 1745 cm^{-1}

5.2.5 ข้าวขามัง เมื่อนำข้าวขามังไปทดลองหุงด้วยวิธีต่างๆ แล้วหาปริมาณแป้งทนย่อย พบว่ามีแป้งทนย่อยร้อยละ 7.61-10.42 จากการทดลองเพิ่มแป้งทนย่อยด้วยการหุงข้าวขามังด้วยวิธีต่างๆ พบว่าวิธีหุงด้วยหม้อหุงข้าวทำให้มีแป้งทนย่อยมากที่สุด การหุงด้วยหม้อหุงข้าวเพิ่มแป้งทนย่อยร้อยละ 37.69

การหุงแบบที่ 3. คือ นำข้าว 100 กรัม ใส่กรดน้ำส้ม 30% นำไปใส่ในขวดปิดฝา วางไว้ที่อุณหภูมิห้อง (23-34 องศาเซลเซียส) นาน 24 ชั่วโมง แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 110 เซนเซียสระยะเวลา 8 ชั่วโมง แล้วนำไปทำให้เป็นกลางโดยใช้ 1 M NaOH แล้วล้างด้วยน้ำกลั่น จากนั้นทำให้แห้งโดยอบที่ 50 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง ตามวิธีของ P.V. Hung et al. (2018) AAHMT- RS3 ไม่สามารถเพิ่มแป้งทนย่อยในข้าวได้

นำตัวอย่างข้าวขามังที่หุงด้วยวิธีต่างๆ ไปวัดด้วยเครื่อง FTIR จากสเปกตรัมเมื่อวัดด้วย FT IR ข้าวขามังที่ดิบ และข้าวขามังที่หุงด้วยวิธีต่างๆ พบแบนดังนี้ 3296 2924 1637 1366 1148 1077 1047 1022 995 cm^{-1} สำหรับข้าวขามังที่หุงแบบหุงใส่น้ำมันแช่แข็ง 60 ชม. พบแบน 2852 cm^{-1} และแบนที่ 1744 cm^{-1}

5.2.6 ข้าวกล้องลิ้มผิว

การหุงข้าวกล้องลิ้มผิวด้วยวิธี MP -LRS3 เพิ่มแป้งทนย่อย 26.05%

ความสัมพันธ์อะไมโลสกับอะไมโลเพคตินในการเกิดแป้งทนย่อยของข้าวในการหุง

ข้าวกล้องลิ้มผิวดิบ และข้าวกล้องลิ้มผิวที่ผ่านการหุงด้วยวิธีต่างๆ

ข้าวกล้องลิ้มผิว การวัดด้วย FT-IR ทำให้ทราบสูตรโครงสร้างของสารที่อยู่ในผลึกของแป้ง แบนที่ 3100- 3700 cm^{-1} จะมีลักษณะเหมือนกันทั้งข้าวดิบและข้าวหุงด้วยวิธีต่างๆ

ข้าวกล้องลิ้มผิวดิบ (ค5) จะไม่พบแบนที่ 1744 cm^{-1} แต่จะพบแบนนี้ข้าวหุงด้วยวิธีต่างๆ ทั้ง 5 วิธี สอดคล้องกับ J.Y. Kim et al. (2017) ที่พบแบนใหม่ที่ไม่มีในแป้งดิบ แบนที่ 1744 cm^{-1} จะสัมพันธ์กับหมู่ฟังก์ชัน หมู่เอสเตอร์ R-COOR ซึ่งเกิดจากหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ในน้ำ กับหมู่คาร์บอกซิล (-C=O) ในแป้งเกิดพันธะกัน

ผล Molecular order and Chemical shifts ของข้าวกล้องลิ้มผิวไปทดลองหุงด้วยวิธีต่างๆ พบว่าข้าวที่ผ่านการหุงแล้ว(5) ข้าวที่หุงแล้วแช่แข็ง60ชั่วโมง(B5) ข้าวที่หุงด้วยไมโครเวป(MP – R5) ข้าวที่หุงวิธีเข้าอุตร้าโซนิกแล้วหนึ่งด้วยแรงดันสูง(UP –R5)จะพบแบนที่ 3297 cm^{-1} 2923 cm^{-1} 2854 cm^{-1} 1744 cm^{-1} 1645 cm^{-1} 1368 cm^{-1} 1148 cm^{-1} 1077 cm^{-1} 993 cm^{-1} 1047 cm^{-1} 1022 cm^{-1} และ 995 cm^{-1}

พบแบนที่ 3000 cm^{-1} ในข้าวที่หุงด้วยไมโครเวป(MP –R5) และข้าวที่หุงวิธีเข้าอุตร้าโซนิกแล้วหนึ่งด้วยแรงดันสูง(UP –R5)

พบแบนที่ 1539 cm^{-1} และ 931 cm^{-1} ในข้าวหุง

พบแบนที่ 1241 cm^{-1} ในข้าวหุง และในข้าวหุงใส่น้ำมัน

การหุงข้าวด้วยวิธีต่างๆทำให้เกิดแป้งทยอยได้ต่างกัน แป้งทยอยชนิด RS3 มีการดูดกลืนแสงแล้วเกิดแบนที่ 995 , 1022 , 1047 cm^{-1} ตามลำดับ แบนที่ 995 และ 1047 cm^{-1} สัมพันธ์กับโครงสร้างโมเลกุลในแป้งทยอย แบนที่ 1022 cm^{-1} สัมพันธ์กับโครงสร้างผลึกโมเลกุลในแป้งทยอย ถ้าค่าของ $R_{1047/1022}$ และ $R_{995/1022}$ สูง แสดงว่ามีผลึกของแป้งทยอย ค่า $R_{1047/1022}$ เป็นค่าแสดงค่า degree of ordered structure(DO) ข้าวกล้องลิ้มผิวดิบ(ค5) ข้าวที่ผ่านการหุงแล้ว(5) ข้าวที่หุงแล้วแช่แข็ง60ชั่วโมง(B5) ข้าวที่หุงด้วยไมโครเวป(MP –R5) ข้าวที่หุงวิธีเข้าอุตร้าโซนิกแล้วหนึ่งด้วยแรงดันสูง(UP –R5) มีค่า 1.06 1.07 1.21 1.09 1.07 1.07 ตามลำดับ ผลแสดงว่าการหุงข้าวกล้องลิ้มผิวแล้วแช่แข็ง60ชั่วโมงทำให้เกิดค่า degree of ordered structureมากที่สุด แป้งทยอยจะมีโครงสร้างที่เกิดจากการจับตัวกันเกิดเป็นสายโซ่ยาวหลังจากเกิดขบวนการเจลลาคีในซีเซชัน (gelatinization) และมีการเกิดพันธะไฮโดรเจนในโครงสร้างผลึก ค่า $R_{995/1022}$ แสดงค่า degree of the double helix (DD) (ค5) ข้าวที่หุง (5), (B5), (MP –R5), (UP –R5) มีค่า 0.97 0.97 0.97 0.95 0.96 0.97 ตามลำดับ ผลชี้ให้เห็นว่าการหุงทุกวิธีทำให้เกิดโครงสร้างแบบ double helix เท่ากับข้าวดิบ สอดคล้องกับ C. Bao, et al. (2017) และ S. Zeng et al. (2015)

บรรณานุกรม

- กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. (2544). พันธุ์พืชกรมวิชาการเกษตร.
- กาญจนา รุจิพจน์ และคณะ. (2555). การพัฒนาผลิตภัณฑ์ “ข้าวใหม่คว่ำ” จากข้าวไร่ชุมชนมั่งใน
จังหวัดน่าน. บทคัดย่อ การประชุมวิชาการข้าวแห่งชาติ ครั้งที่ 2 มิติใหม่วิจัยข้าวไทยพร้อม
รับการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศและการเปิดตลาดเสรีอาเซียน. หน้า 674 :
ปทุมธานี. สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ.
- คู่มือการผลิตข้าวกล้องสุขภาพ, เผยแพร่ใน
www.kmutt.ac.th/dtr/pdf/Pamphlet_Healthy_brown_rice.pdf 4 ก.ย 2560
- จิรนาถ บุญคง. (2554) Resistance Starch แป้งที่มีบทบาทต่อสุขภาพ. ว.เทคโนโลยีอาหาร
มหาวิทยาลัยสยาม ปีที่ 6 ฉบับที่ 1 มิ.ย 2553-พ.ค. 2554
- จิรภา พงษ์จันดา และคณะ. (2557). อิทธิพลของพันธุ์ข้าวพื้นเมืองที่มีต่อสมบัติทางเคมีกายภาพ และ
ค่าดัชนีน้ำตาลของแป้งข้าวคั่วแปรรูปโครงสร้างทางโมเลกุล และกายภาพ. รายงานการประชุม
วิชาการข้าวแห่งชาติ ครั้งที่ 3 ประจำปี 2557 ข้าวไทยสู่สากล ระหว่างวันที่ 11-12 กันยายน
พ.ศ. 2557 โรงแรมมิราเคิลแกรนด์ คอนเวนชั่น กรุงเทพมหานคร.
- ชาญชัย สุขสกุล และคณะ. 2557. การพัฒนาศักยภาพการตลาดเพื่อสร้างมูลค่าเพิ่มให้แก่เครือข่าย
เกษตรกรผู้ปลูกข้าวในจังหวัดเพชรบูรณ์. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ : มหาวิทยาลัยราชภัฏ
เพชรบูรณ์.
- ธนากร รติธรรมธร. (2560). ผลของการให้ความร้อนและการทำให้เย็นที่มีต่อการเปลี่ยนแปลง
โครงสร้างและการย่อยของแป้ง. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา, ปีที่ 21(2) : 248 – 259.
- เบญจพร ศรีสุวรรณและคณะ. (2556). ความหลากหลายของข้าวพื้นเมืองภาคเหนือ กรณีศึกษา : ข้าว
ไร่พื้นเมืองในจังหวัดเพชรบูรณ์. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ : มหาวิทยาลัยราชภัฏ
เพชรบูรณ์.
- ประวีณา มณีรัตน์รุ่งโรจน์ และคณะ. (2555). การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและคุณภาพทางเคมี
บางประการของเมล็ดข้าวพื้นเมืองภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย. บทคัดย่อ
การประชุมวิชาการข้าวแห่งชาติ ครั้งที่ 2 มิติใหม่วิจัยข้าวไทยพร้อมรับการเปลี่ยนแปลง
ของสภาพภูมิอากาศและการเปิดตลาดเสรีอาเซียน. หน้า 637 : ปทุมธานี. สำนักงานพัฒนา
วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ.
- ปทุมทริกา รัตนตรัยวงศ์ และคณะ. (2557). การศึกษาคุณค่าทางโภชนาการ ของข้าวในแต่ละระยะการ
เจริญสำหรับข้าวที่ปลูกในเขตภาคเหนือตอนล่าง. รายงานการประชุมวิชาการข้าวแห่งชาติ

ครั้งที่ 3 ประจำปี 2557 ข้าวไทยสู่สากล ระหว่างวันที่ 11-12 กันยายน พ.ศ. 2557. โรงแรมมิราเคิลแกรนด์ คอนเวนชั่น กรุงเทพมหานคร.

ประโยชน์ของข้าวกล้องงอก.(ออนไลน์). เข้าถึงได้จาก :

<https://sites.google.com/site/gabarices/prayochng-khxng-khaw-klxng-ngxk-1> (วันที่ค้นข้อมูล 30 ก.ค. 2562)

ประชุมวิชาการข้าวแห่งชาติ ครั้งที่ 2 มิติใหม่วิจัยข้าวไทยพร้อมรับการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศและการเปิดตลาดเสรีอาเซียน. หน้า 666 : ปทุมธานี. สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ.

ปาริฉัตร พุกภัยวิวัฒนากุล. (2556). การผลิตสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์จากสตาร์ชชนิดต่างๆ และ การตรวจสอบคุณสมบัติฟิสิกส์. วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์. (2553). Rice / ข้าว. ศูนย์เครือข่ายข้อมูลอาหารครบวงจร. (ออนไลน์).

เข้าถึงได้จาก : <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1657/rice-%E0%B8%82%E0%B9%89%E0%B8%B2%E0%B8%A7>. (วันที่ค้นข้อมูล 12 เมษายน 2562).

ภาณุศักดิ์ จิตแสง และธนาภรณ์ อธิปัญญากุล. (2555). ข้าวไร่และความมั่นคงทางด้านอาหาร : ประสิทธิภาพเชิงเทคนิคของการผลิตข้าวไร่ของเกษตรกรในจังหวัดขอนแก่น. บทความวิชาการ

มานิชญ์ สุธีรพัฒนานนท์. (2559). การเพิ่มปริมาณแป้งด้านทานการย่อยในผลิตภัณฑ์พาสต้าข้าวเจ้า. สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

มูลนิธิข้าวไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. (2552). ร่วมใจคุ้มครองพันธุ์ข้าวไทยเฉลิมพระเกียรติ. นนทบุรี : โรงพิมพ์มติชน จำกัด.

มูลนิธิข้าวไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. (2554). ก่อนจะกลายเป็นเมล็ดพันธุ์ที่สาบสูญกว่าข้าวจะเรียงเม็ด 10 ปี มูลนิธิข้าวไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. หน้า 97-99 : กรุงเทพฯ. บริษัท ดันเงินการพิมพ์ จำกัด.

วิจิต วิญญกุล และวิศาล บุญประกอบ. (2552). ผลิตภัณฑ์จากข้าวไร่ในอำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์. เพชรบูรณ์ : มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์.

ศศิธร แท่นทอง และคณะ (2558). ความหลากหลายพันธุ์ข้าวพื้นเมืองและการอนุรักษ์และใช้ประโยชน์ของข้าวพื้นเมืองเพชรบูรณ์. เพชรบูรณ์ : มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์.

ศศิพร รัตนสุวรรณ และสุนีย์ โชตินิรนาท (2561) ได้ศึกษาผลของการผลิตสตาร์ชทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์พอลิกลูตาเนส และการเกิดรีโทเกรเดชันร่วมกับการดัดแปรความร้อน-ความชื้นของ

สตาร์ชถั่ว. ว.ราชภัฏพระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. ปี 13 ฉบับที่ 2 (ก.ค.-ธ.ค.2561)
หน้า 133-145

ศันสนีย์ อุดมคติ, ประจเวท สาตมาลี และวิภา สุโรจนะเมธากุล. การใช้แป้งข้าวที่ผ่านกระบวนการ
หมักทางธรรมชาติร่วมกับการให้ความร้อนและความชื้นเพื่อเพิ่มสสารอาหารต่อการย่อยด้วย
เอนไซม์ในขนมจีน (2558) เผยแพร่ใน

opac.lib.buu.ac.th/opac/servlet/Search?DLang=T&Type...3... 4 ก.ย 2560

สุนันทา ทองทา และ ธนาวิทย์ กุลรัตนรักษ์. (2557) รายงานวิจัยการผลิตสสารอาหารที่ตรงต่อ
เอนไซม์. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สุนันทา ทองทา (2553) รายงานวิจัยคุณสมบัติแป้งข้าวที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์จากข้าวพันธุ์
ต่างๆเพื่อใช้เป็นอาหารสุขภาพ.มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี . เผยแพร่ใน

sutir.sut.ac.th:8080/sutir/bitstream/123456789/5651/1/Fulltext.pdf. 4 ก.ย 2560

สำเริง แซ่ตัน. (2553). การร่วมมือเครือข่ายงานอนุรักษ์พันธุ์ข้าวพื้นเมืองในภาคใต้. บทคัดย่อ การ
ประชุมวิชาการข้าวแห่งชาติ ครั้งที่ 13 ประจำปี 2553 “ขับเคลื่อนงานวิจัยข้าวไทยสู่นวัตกรรม” หน้า
120. กรุงเทพฯ : หจก.ฟรี-วัน.

เสถียร นันทะ และคณะ. (2555). ความหลากหลายพันธุ์ข้าวพื้นเมืองและการอนุรักษ์ของชุมชนใน
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย. บทคัดย่อ การประชุมวิชาการข้าวแห่งชาติ ครั้งที่
2 มิติใหม่วิจัยข้าวไทยพร้อมรับการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศและการเปิดตลาด
เสรีอาเซียน. หน้า 208 : ปทุมธานี. สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ.

เสถียร นันทะ . (2549). ข้าวamarcaแห่งรัฐพิษณุของชนอุษาคเนย์. เชียงใหม่ : วิทอินดิไซด์ จำกัด

สุวัฒน์ อัสวไชยชาญ. (2551). ข้าวไทย. กรุงเทพฯ:สำนักพิมพ์ปลาตะเพียน

สุมน อมรวิวัฒน์ (2553). สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชนโดยพระราชประสงค์ในพระบาทสมเด็จพระ
เจ้าอยู่หัว ฉบับเสริมการเรียนรู้ เล่ม 16. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์

อุดมศักดิ์ มหาวิวัฒน์, อัสวิน อมรสิน, ศิรินาถ ตงศิริ, กัญญภัศร์ ตลับไธสง, รุ่งทิพาภรณ์ พลวงษ์ษา
และสมฤดี สิงห์คำป้อง (2559). ผลของการบริโภคข้าวเหนียวคัดแปลงค่าดัชนีน้ำตาล และ
ข้าวเหนียวปกติ ต่อการระดับน้ำตาลในเลือดของวัยผู้ใหญ่ไทย เผยแพร่ใน

http://research.msu.ac.th/msu_journal/index.php?page=show_journal_article&j_id=2&article_id=1526. 9 ก.ย 2560

A. Kumar, U.Sahoo, B.Baisakha, O. Augustine Okpani, u. Ngangkham, Parameswaran C., n.

Basak, G. kumar, S.G. Sharma. (2018) Resistant starch could be decisive in
determining the glycemic index of rice cultivars. J. Cereal Sci. 79. 348-353

E. Agama-Acevedo, G. Pacheco-Vargas, L.A. Bello-Perez, J. Alvarez-Ramirez. (2018). Effect of

- drying method and hydrothermal treatment of pregelatinized Hylon VII starch on resistant starch content. *Food Hydrocolloids*. 77. 817-824.
- B. A. Ashwar , A. Gani, A. shah, F.A. Masoodi. (2017). Physicochemical properties, in-vitro digestibility and structural elucidation of RS4 from rice starch. *Int. J. Biol. Macromol.* 105. 471-477
- B.V. McCleary, and. Monaghan, D.A., (2002). Measurement of Resistant Starch. *J.AOAC International* 85: 665-675
- C. Bao, H. Zeng, Y. Zhang, L. Zhang, X. Lu, Z. Guo, S. Miao, B. Zheng. (2017) Structural characteristics and prebiotic effects of semen coicis resistant starches (type 3) prepared by different methods. *Int. J. Biol. Macromol.* 105. 671-679
- H. Zeng , P. Zeng, C. Zeng, C Huang, S Lin, B. Zeng, Y. Zeng. (2018) Structural properties and prebiotic activities of fractionated lotus seed resistant starches. *J.Food Chemistry*.251. 33-40.
- J.Y.Kim ,Y. Lee and Y. H. Chang. (2017) Structure and digestibility properties of resistant rice starch cross-linked with citric acid. *International Journal of Food Properties*. Vol.20 No.52 s2166-s2177
- J. Wang, X. J. Tang, P. S. Chen, H. H. Huang. (2014) . Changes in resistant starch from two banana cultivars during postharvest storage . *J.Food Chemistry*. 156. 319-325
- P.V. Hung, N. L. Vien, N.T.Lan Phi. (2018) Resistant starch improvement of rice starches under a combination of acid and heat-moisture treaments. *J.Food Chemistry*.191. 67-73
- K. Tsuiki., H. Fujisawa., A. Itoh., M. Sato, N.Fujita., (2016) Alterations of starch structure lead to increased resistant starch of steamed rice : Identification of high resistant starch rice lines *J. Cereal Sci.* 68. 88-92.
- K. Kaur and N. Singh (2000). Amylose-lipid complex formation during cooking of rice flour . *J.Food Chemistry*.71. 511-517.
- S. Zeng, X. Wu, S. Lin, H. Zeng, X. Lu, Y. Zhang, B. Zheng. (2015) . Structural characteristics and physicochemical properties of lotus seed resistant starch prepared by different methods. . *J.Food Chemistry*.186. 213-222.
- W. R. Sulliva., J. G. Hughes., R. W. Cockman., D. M. Small.,(2017) The effects of temperature on the crystalline properties and resistant starch during storage of white bread. *J.Food Chemistry*.228. 57-61.

ภาคผนวก ก

ประมวลภาพงานวิจัย



รูปที่ ผน.1 เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible spectrophotometer)



รูปที่ ผน.2 เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (water bath)



รูปที่ ผน.3 เครื่องพีเอชมิเตอร์



รูปที่ ผน.4 เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง



รูปที่ ผน5 การระเหยตัวทำละลายออกจากไขมันที่สกัดได้

ภาคผนวก ข
การจัดประชุมอบรม



รูปที่ ผน.6 การอบรมเชิงปฏิบัติการการเพิ่มปริมาณแป้งทนย่อยในข้าวให้เกษตรกรตำบลนายม



รูปที่ ผน.7 นิทรรศการการเพิ่มปริมาณแปรงทนย่อยในข้าวให้เกษตรกรอำเภอเมืองเพชรบูรณ์

ประวัติคณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการวิจัย

1. ชื่อ - นามสกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศศิธร แทนทอง
Asst. Prof.Dr. Sasithorn Thantong
2. ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์
2. หน่วยงานที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และ e-mail
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ อำเภอเมือง
จังหวัดเพชรบูรณ์ 67000
ที่อยู่(ที่บ้าน) 209 หมู่ 3 ตำบลชนไพร อำเภอเมือง จังหวัด
เพชรบูรณ์ 67000
โทรศัพท์ 089-6406439, 056-717123, 056-725144
E-mail : sasithornthantong@gmail.com
3. ประวัติการศึกษา
ปริญญาตรี สาขาวิชา เคมี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ปริญญาโท สาขาวิชา เคมี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ปริญญาเอก สาขาวิชา เกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ
 - 6.1 ทางด้านเคมีวิเคราะห์ การใช้เครื่องมือในการวิเคราะห์ เช่น เครื่อง GC , HPLC , AAS , IR
 - 6.2 ทางด้านวิเคราะห์อาหารและน้ำเนื่องจากเคยรับราชการที่กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ 10 ปี ทำงานเกี่ยวกับการตรวจ วิเคราะห์คุณภาพอาหาร เครื่องดื่มและน้ำ ตามมาตรฐานประกาศกระทรวงสาธารณสุข
 - 6.3 ทางด้านการเกษตร เนื่องจากนิยมเกษตรอินทรีย์ หลีกเลี่ยงการใช้เคมีเกษตร มีความรักในการเกษตร จึงมีงานอดิเรกในการปลูก ข้าว พืชผัก และผลไม้ไว้บริโภคในครัวเรือนตามแนวเศรษฐกิจพอเพียง

