โครงการ

การเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

ชื่อโครงการ การวิเคราะห์ปริมาณกลูโคสจากคาร์โบไฮเดรตในอาหารของคนไทยโดยการจำลองการย่อยในหลอดทดลอง
Analysis of Availability of Glucose from Thai Common Carbohydrate Food by Means of In Vitro Digestion

ชื่อนิสิต นายสรรชัย วิริยะชาติ **เลขประจำตัว** 5832065223

ภาควิชา ชีววิทยา

ปีการศึกษา 2562

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การวิเคราะห์ปริมาณกลูโคสจากคาร์โบไฮเดรตในอาหารของคนไทยโดยการจำลองการย่อยในหลอดทดลอง

Analysis of Availability of Glucose from Thai Common Carbohydrate Food by Means of In Vitro Digestion

นายสรรชัย วิริยะชาติ

อาจารย์ที่ปรึกษา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุกัญญา เจริญพร

โครงงานวิทยาศาสตร์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาชีววิทยา ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2562

โครงงานวิทยาศาสตร์ฉบับนี้ได้รับการสนับสนุนจาก
โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์
ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชื่อโครงการ	: การวิเคราะห์ปริมาณกลูโคสจากคาร์โบไฮเดรตในอาหารของคนไทยโดยการจำลองการย่อยในหลอดทดลอง
นิสิตผู้ดำเนินโครงการ	: นายสรรชัย วิริยะชาติ
อาจารย์ที่ปรึกษา	: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุกัญญา เจริญพร
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	:
ภาควิชา	: ชีววิทยา

บทคัดย่อ

ในปัจจุบัน เป็นที่ทราบกันว่าโรคอ้วนและโรคเบาหวานได้กลายเป็นปัญหาสำคัญในวงการสาธารณสุขไทย ปริมาณน้ำตาลในเลือดเป็นหนึ่งในปัจจัยที่สำคัญที่สุดในการทำให้เกิดโรค และเป็นดรรชนีที่ต้องเฝ้าระวังในผู้ป่วยโรคดังกล่าว อย่างไรก็ดี การอาศัยค่าดัชนีน้ำตาลเพื่อคาดการณ์ปริมาณน้ำตาลในเลือดมีข้อจำกัด ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตุประสงเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างน้ำตาลที่ได้หลังจากการย่อยในหลอดทดลองของคาร์โบไฮเดรตแต่ละชนิดและหาความสัมพันธ์ของค่าที่ได้กับค่าดัชนีน้ำตาลตามที่ได้มีการรายงานในตารางค่าดัชนีน้ำตาลสากล โดยจำลองการย่อยคาร์โบไฮเดรตในหลอดทดลองโดยเลียนแบบกระบวนการย่อยคาร์โบไฮเดรตในร่างกายมนุษย์ ทำการย่อยคาร์โบไฮเดรตจำนวน 12 ชนิด ได้แก่ ข้าวไรซ์เบอร์รี่ย์ ข้าวกล้องหอมมะลิ ข้าวกล้องหอมมะลิผสมข้าวเหนียวเขี้ยวงู ข้าวหอมมะลิ เส้นสปาเก็ตตี้ เส้นบะหมี่ เส้นวุ้นเส้น เส้นบะหมี่กึ่งสำเร็จ เส้นเล็ก เส้นหมี่ ในหลอดทดลอง จากนั้นเก็บตัวอย่างที่เวลา 0 30 60 90 และ 120 นาที หลังการจำลองการย่อยคาร์โบไฮเดรตในลำไส้เล็ก เพื่อนำไปวัดปริมาณน้ำตาลกลูโคส ผลการศึกษาพบว่าคาร์โบไฮเดรตในกลุ่มที่ผ่านการแปรรูปเป็นกลุ่มที่มีปริมาณน้ำตาลหลังการย่อยสูงสุดและต่ำสุดในกลุ่มคาร์โบไฮเดรตทั้งหมด โดยมีคาร์โบไฮเดรตที่ไม่ผ่านการแปรรูปจำพวกข้าวเกาะกลุ่มกันอยู่ระหว่างค่าสูงสุดและต่ำสุด เมื่อนำค่าปริมาณน้ำตาลกลูโคสที่วัดได้จากการย่อยในหลอดทดลองไปหาความสัมพันธ์กับค่าดัชนีน้ำตาลของคาร์โบไฮเดรต พบว่า ค่า Spearman's rho ที่ได้มีค่าเท่ากับ 0.102 ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าแอลฟาที่ 0.05 คือความมั่นใจทางสถิติ 95% แปลว่าปริมาณน้ำตาลที่ได้จากการย่อยในหลอดทดลองกับค่าดัชนีน้ำตาล ไม่มีความสำคัญเชิงสถิติ อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งผลดังกล่าวเกิดจากความแตกต่างระหว่างอาหารที่ใช้ทดสอบในตารางค่าดัชนีน้ำตาลสากล กับอาหารที่วางจำหน่ายในไทย เช่น ข้าวกล้อง และ ขนมปัง อย่างไรก็ดีการทดลองนี้ สามารถแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของปริมาณน้ำตาลในอาหารหลักของคนไทยได้ อาทิเช่น เส้นวุ้นเส้นมีปริมาณน้ำตาลหลังย่อยต่ำสุด ในขณะที่ เส้นบะหมี่กึ่งสำเร็จ และ เส้นเล็ก มีปริมาณน้ำตาลหลังย่อยสูงสุด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความมั่นใจทางสถิติ 95%

คำสำคัญ: การย่อยในหลอดทดลอง, ดัชนีน้ำตาล, น้ำตาลในเลือด

Research Title	: Analysis of Availability of Glucose from Thai Common Carbohydrate Food by Means of In Vitro Digestion
Student name	: Mr. Sarnchai Viriyachat
Advisor	: Assistant Professor Sukanya Jaroenporn, Ph.D.
Co-Advisor	:
Department of	: Biology

Abstract

Thai healthcare system is experiencing increases in diabetes and obesity-related diseases. These diseases are correlated with high blood sugar level, while lowering blood sugar level can alleviate these diseases. Food glycemic index is a conventional index that helps understand and predict foods' effect to blood sugar level. However, this index has many limitations. Therefore, this study aimed to compare post digestion glucose level between each group of carbohydrate, and to find correlation between glucose level from the study and glycemic index value as reported in the international glycemic index table. Twelve carbohydrates, such as riceberry, brown rice, mixed rice, sticky rice, jasmine rice, spaghetti, egg noodle, mung bean noodle, instant noodle, rice noodle and fine rice noodle, were digested in test tube by mimicking the carbohydrate digestion process in the human body. Samples were collected and determined glucose levels at 0, 30, 60, 90 and 120 min after mimic the carbohydrate digestion process in the small intestine. The results showed that modified carbohydrates contributed to both ends of the extreme producing both highest and lowest post digestion glucose level while unmodified carbohydrates from rice group produce moderate level of glucose, and cluster together tightly within group. To find correlation between glucose level and glycemic index value, the Spearman's rho of the experiment was 0.102, which was not enough to declare the experiment statistically significant (at rho = 0.05, or 95% confidence level). It might be because the sources of carbohydrates are different. However, this experiment demonstrated the trend of sugar content in Thai food. For example, mung bean noodle showed lowest glucose concentration, while instant noodle and rice noodle showed highest glucose concentration after these digestive processes.

Keywords: in vitro digestion, glycemic index, blood glucose level

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุกัญญา เจริญพร อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือผู้วิจัยในการทำการทดลองดังกล่าวตั้งแต่ขั้นตอนการวางแผนการทดลอง ตลอดไปจนถึงการแปรผล และ ตรวจสอบความถูกต้องของรูปเล่ม หากปราศจากการดูแลงานของท่านอาจารย์งานชิ้นนี้คงมิสามารถลุล่วงไปได้เลย ผู้วิจัยจึงอยากจะขอขอบคุณความเอาใจใส่ ความอดทน และ ความเมตตา ของอาจารย์ที่ได้ช่วยให้งานชิ้นนี้สำเร็จออกมาได้

ขอขอบพระคุณ นายณภัทร เอมดี นิสิตปริญญาโท ภายใต้การดูแลของอาจารย์สุกัญญา ที่คอยช่วยเหลือผู้วิจัยมาตลอดและได้ใส่ใจดูแลงานของผู้วิจัยเป็นอย่างดี งานนี้คงไม่สำเร็จหากขาดความมุมานะของท่านที่เป็นแรงบันดาลใจให้แก่ข้าพเจ้าเสมอ ข้าพเจ้าโชคดีมาก ๆ ที่ได้รับการดูแลจากท่านคนที่ข้าพเจ้าเคารพและชื่นชมเป็นอย่างยิ่ง ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณท่านไว้อย่างเป็นลายลักอักษรในที่นี้

ขอขอบคุณ นายสันติ สันติชัยเวคิน นิสิตจากมหาลัย Harvey Mudd เพื่อนรักของข้าพเจ้าที่คอยเป็นกำลังใจให้ข้าพเจ้าในวันที่ข้าพเจ้าท้อถอย และ เป็นที่ปรึกษาอันประเสริฐของข้าพเจ้าในยามที่ข้าพเจ้าติดขัด และ ช่วยตรวจทานงานเขียนของข้าพเจ้าในขั้นต้น ท่านเป็นกัลยาณมิตรในชีวิตของข้าพเจ้าอย่างแท้จริง และ ข้าพเจ้าขอขอบคุณท่านจากใจจริง

ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.จันทร์เพ็ญ จันทร์เจ้า, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนะกุล วรรณประเสริฐ และอาจารย์ ดร.เกรียง กาญจนวตี อาจารย์ผู้ประสานงานรายวิชา โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ ที่ให้คำปรึกษาข้าพเจ้ามาโดยตลอด ท่านอาจารย์ทั้งสามเป็นส่วนสำคัญยิ่งในงานของข้าพเจ้า ข้าพเจ้าขอขอบคุณในความอดทน ความเมตตา และ แรงใจ ที่ท่านอาจารย์ทั้งสามมีให้ข้าพเจ้าตลอดมาข้าพเจ้าคงไม่สามารถทำสิ่งที่ข้าพเจ้าทำได้โดยปราศจากความช่วยเหลือของท่านทั้งสาม

และสุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอขอบคุณหน่วยวิจัยไพรเมท ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ และ วัสดุอุปกรณ์ ในทำการทดลองครั้งนี้

สารบัญ

บทคัดย่อ ..... ก

Abstract ..... ข

กิตติกรรมประกาศ ..... ค

สารบัญ ..... ง

สารบัญตาราง ..... ช

สารบัญกราฟหรือรูปภาพ ..... ซ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1. ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจในการเสนอโครงการ 1

1.2. วัตถุประสงค์ของโครงการ 2

บทที่ 2 3

ทบทวนวรรณกรรม 3

2.1 กลไกการย่อยคาร์โบไฮเดรตในมนุษย์ (Carbohydrate Digestion in Human) 3

2.1.1 โครงสร้าง และ ลักษณะทางชีวเคมีของคาร์โบร์ไฮเดรตและเอนไซม์อะไมเลสที่ทำหน้าที่ในการย่อย 3

2.1.2 เอนไซม์บนผิวเยื่อบุลำไส้และการย่อยผลผลิตที่ได้จากเอนไซม์อะไมเลส 4

2.1.3 การดูดซึมกลูโคสผ่านผนังลำไส้ 4

2.2 ความแตกต่างและขีดจำกัดของการจำลองการย่อยคาร์โบไฮเดรตในหลอดทดลอง 4

2.2.1 นิยามของคาร์โบไฮเดรตที่สามารถถูกดูดซึมได้ (Available Carbohydrate) 5

2.2.2 ที่มาและความสำคัญของการพัฒนาการจำลองการย่อยคาร์โบไฮเดรตในลำไส้ 5

2.2.3 จุดเริ่มต้น ความหลากหลาย และ ขีดจำกัด ของการจำลองการย่อยในหลอดทดลอง 5

2.2.4 การตัดสินใจของผู้วิจัยหลังจากการทบทวนวรรณกรรม 6

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน 6

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน 7

3.1 การเลือกชนิดและแหล่งที่มาของคาร์โบไฮเดรต 7
3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทำการทดลอง 8
3.3 กรรมวิธีการปรุงให้สุก และ กรรมวิธีการเตรียมคาร์โบไฮเดรตปริมาณ 0.25 กรัมต่อตัวอย่าง ...8
3.4 การบดคาร์โบไฮเดรตและการจำลองการย่อยในปาก 10
3.5 การจำลองการย่อยในกระเพาะอาหาร 10
3.6 การจำลองการย่อยในลำไส้เล็ก และการเก็บตัวอย่าง ณ เวลา 0 นาที 10
3.7 การจำลองการย่อยในลำไส้ และ การเก็บตัวอย่าง ณ เวลา 30, 60, 90, และ 120 นาที 11
3.8 การรักษาสภาพตัวอย่างก่อนทำการตรวจหาปริมาณน้ำตาล 11
3.9 การเตรียม standard สำหรับการหาปริมาณน้ำตาลกลูโคส 11
3.10 การวัดปริมาณน้ำตาล 11
3.11 การคำนวณทางสถิติ 12
บทที่ 4 ผลการศึกษา 13
4.1 ผลที่ได้จากการเปรียบเทียบค่าน้ำตาลที่ได้จากการย่อย 13
4.1.1 ผลที่ได้จากการเปรียบเทียบภายในกลุ่มคาร์โบไฮเดรตที่ไม่ผ่านการแปรรูปจำพวกข้าว 15
4.1.2 ผลที่ได้จากการเปรียบเทียบภายในกลุ่มคาร์โบไฮเดรตที่ผ่านการแปรรูป 16
4.1.3 ผลที่ได้จากการเปรียบเทียบกลุ่มคาร์โบไฮเดรตทั้งหมดสิบสองชนิดอย่างเป็นองค์รวม. 17
4.2 การหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกลูโคสหลังการย่อยและค่าดัชนีน้ำตาล 18
บทที่ 5 อภิปรายผลการศึกษา 21
5.1 การแปรผลการทดลอง 21
5.2 การทำนายค่าดัชนีน้ำตาล และ ปัจจัยที่เกี่ยวข้อง 22
5.3 อาหารที่เหมาะกับการคุมน้ำตาลในเลือด 23
บทที่ 6 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ 24
6.1 สรุปผลการศึกษา 24
6.2 ข้อเสนอแนะ 24

6.2.1 ข้อเสนอแนะในการนำไปใช้ประโยชน์ 24
6.2.2 การศึกษาเพิ่มเติม 24
เอกสารอ้างอิง 26
ภาษาไทย 26
ภาษาอังกฤษ 26
ภาคผนวก 30
ภาคผนวก 1: ตารางการชั่งน้ำหนักคาร์โบไฮเดรต 0.25 กรัมในตัวอย่าง 31
ภาคผนวก 2: ผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อแยกกลุ่มคาร์โบไฮเดรตโดยการคำนวณทางสถิติแบบ Duncan 34

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1 แหล่งที่มาของคาร์โบไฮเดรตที่ไม่ผ่านการแปรรูป 7
ตาราง 2 แหล่งที่มาของคาร์โบไฮเดรตที่ผ่านการแปรรูป.....7
ตารางที่ 3 อัตราส่วนระหว่างข้าวและน้ำที่ใช้ในการหุงให้สุก 9
ตารางที่ 4 ระยะเวลาที่ใช้ในการลวกเส้นคาร์โบไฮเดรตให้สุก 9
ตารางที่ 5 แสดงปริมาณน้ำตาลหลังย่อยของคาร์โบไฮเดรตทชนิดต่าง ๆ ที่เวลา 0, 30, 60, 90 และ 120 นาที..... 14
ตารางที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกลูโคสหลังการย่อยของคาร์โบไฮเดรตททั้ง 12 ชนิด และค่าดัชนีน้ำตาล ด้วยการทดสอบความสัมพันธ์ทางสถิติของ Spearman โดยใช้โปรแกรม SPSS 18

สารบัญกราฟหรือรูปภาพ

กราฟที่ 1 แสดงปริมาณน้ำตาลหลังย่อยที่เวลา 0, 30, 60, 90 และ 120 นาที ของคาร์โบไฮเดรตทที่ไม่ผ่านการแปรรูปจำพวกข้าว ได้แก่ ข้าวไรซ์เบอร์รี่ย์ ข้าวกล้องหอมมะลิ ข้าวกล้องหอมมะลิผสม ข้าวเหนียวเขี้ยวงู และข้าวหอมมะลิ โดยรายงานค่าเป็น mean± SEM ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงถึงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ p<0.05 15
กราฟที่ 2 แสดงปริมาณน้ำตาลหลังย่อยที่เวลา 0, 30, 60, 90 และ 120 นาที ของคาร์โบไฮเดรตทที่ผ่านการแปรรูป ได้แก่ ขนมปัง เส้นสปาเก็ตตี้ เส้นบะหมี่ เส้นวุ้นเส้น เส้นบะหมี่กึ่งสำเร็จ เส้นเล็ก และเส้นหมี่ โดยรายงานค่าเป็น mean± SEM ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงถึงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ p<0.05..... 16
กราฟที่ 3 แสดงปริมาณน้ำตาลหลังย่อยที่เวลา 0, 30, 60, 90 และ 120 นาที ของคาร์โบไฮเดรตททั้ง 12 ชนิด ได้แก่ ข้าวไรซ์เบอร์รี่ย์ ข้าวกล้องหอมมะลิ ข้าวกล้องหอมมะลิผสม ข้าวเหนียวเขี้ยวงู ข้าวหอมมะลิ ขนมปัง เส้นสปาเก็ตตี้ เส้นบะหมี่ เส้นวุ้นเส้น เส้นบะหมี่กึ่งสำเร็จ เส้นเล็ก และเส้นหมี่ โดยรายงานค่าเป็น mean± SEM 17
กราฟที่ 4 การทดสอบสมการการถดถอยเชิงเส้นของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกลูโคสหลังการย่อยของคาร์โบไฮเดรตททั้ง 12 ชนิด และค่าดัชนีน้ำตาล 20

บทที่ 1
บทนำ

1.1. ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจในการเสนอโครงการ

ในปัจจุบันกลุ่มโรคไม่ติดต่อเรื้อรังอาทิเช่นโรคเบาหวานนั้นได้กลายเป็นปัญหาหลักของวงการสาธารณสุขไทย (Kaufman et al., 2011) โดยจากข้อมูลสถิติของสมาคมโรคเบาหวานแห่งประเทศไทยพบว่าในปี พ.ศ. 2557 ผู้ป่วยโรคเบาหวานมีจำนวนมากถึง 4.8 ล้านคน คิดเป็น 8.9 เปอร์เซ็นต์ของประชากรที่มีอายุมากกว่า 15 ปี และมีผู้เสียชีวิตจากโรคเบาหวานจำนวน 11,389 คน นอกจากนี้ยังพบประชากรที่ป่วยเป็นโรคเบาหวานเพิ่มขึ้น 2 เปอร์เซ็นจาก 6.9 เปอร์เซ็นต์ในปี พ.ศ. 2552 โดยประชากรที่มีอายุ 15-29 ปี และ 30-44 ปี มีอัตราการป่วยเป็นโรคเบาหวานอยู่ที่ 2.1 และ 5.4 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ (เอกพลากร และ คณะ, 2559) โดยอาหารที่มีส่วนส่งเสริมให้เกิดโรคเบาหวานคือคาร์โบไฮเดรต ที่จะเปลี่ยนเป็นน้ำตาลเมื่อผ่านกระบวนการย่อยของร่างกาย หากคาร์โบไฮเดรตนั้นถูกย่อยเร็วก็จะได้น้ำตาลเร็ว ซึ่งการที่เซลล์ในร่างกายจะนำน้ำตาลไปใช้เป็นพลังงานได้นั้น จำเป็นต้องอาศัยฮอร์โมนอินซูลินซึ่งผลิตจากตับอ่อน ดังนั้นถ้าในเลือดมีระดับน้ำตาลสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ตับอ่อนก็ต้องผลิตอินซูลินเร็วขึ้นเพื่อสอดรับกับระดับน้ำตาลในเลือดที่สูงขึ้น หากในเลือดมีน้ำตาลมากขึ้นก็ต้องใช้อินซูลินจำนวนมากขึ้น ทำให้ตับอ่อนต้องทำงานหนักขึ้น การที่มีระดับน้ำตาลในเลือดสูงอยู่เสมอจึงเป็นสิ่งที่ควรหลีกเลี่ยง โดยเฉพาะคนที่เป็นเบาหวาน เนื่องจากตับอ่อนทำงานได้ไม่ดีเท่าที่ควร

จะเห็นได้ว่าอาหารกลุ่มคาร์โบไฮเดรตเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ระดับน้ำตาลในเลือดหลังอาหารสูงขึ้นดังนั้นการเลือกชนิด และปริมาณของคาร์โบไฮเดรต จึงมีความสำคัญในการทำให้ระดับน้ำตาลในเลือดสมดุลและสามารถควบคุมโรคเบาหวานได้ดีขึ้น ปัจจุบันได้มีการใช้ดัชนีน้ำตาลหรือ Glycemic index (GI) เป็นดัชนีวัดคุณภาพของคาร์โบไฮเดรตในอาหารที่มีผลต่อระดับน้ำตาลในเลือดสำหรับในวงการแพทย์และนักโภชนาการ ทั่วโลก จะยอมรับผลการประเมินจากการศึกษาในร่างกายมนุษย์เท่านั้น โดยวัดจากผลการย่อยแป้งเป็นน้ำตาลกลูโคสและดูดซึมน้ำตาลกลูโคสเข้าสู่กระแสเลือดทำให้ระดับน้ำตาลในเลือดเพิ่มสูงขึ้น ในช่วงเวลา 2 ชั่วโมง หลังการบริโภค เปรียบเทียบกับระดับน้ำตาลในเลือดหลังจากบริโภคคาร์โบไฮเดรตมาตรฐานในช่วง 2 ชั่วโมงเช่นเดียวกัน (Jenkins et al., 1981)

โดยในปี 2014 มีการค้นพบว่าการรับประทานอาหารที่มีค่าดัชนีน้ำตาลสูงนั้นมีความสัมพันธ์กับความเสี่ยงโรคเบาหวานที่เพิ่มขึ้น (Bhupathiraju et al., 2014) และต่อมาในปี 2019 ได้มีการยืนยันความสัมพันธ์ดังกล่าวว่าเป็นไปในรูปแบบของการเป็นสาเหตุของโรค (Livesey et al., 2019) เนื่องด้วยเหตุผลดังกล่าวในข้างต้นทำให้การศึกษาดัชนีน้ำตาลมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งในทางการแพทย์ แต่อย่างไรก็ดีการศึกษาดัชนีน้ำตาลในร่างกายมนุษย์นั้นทำได้ยาก และมีข้อจำกัด จึงได้

เกิดความพยายามในการทำนายค่าดัชนีน้ำตาลจากการย่อยคาร์โบไฮเดรตในหลอดทดลองขึ้น อาทิ เช่น การทำนายค่าดัชนีน้ำตาลโดยการใช้ค่าน้ำตาลที่ถูกปล่อยออกมาอย่างรวดเร็วหลังการย่อยในหลอดทดลองเป็นเวลา 20 นาที (Englyst et al., 1999) ซึ่งอาศัยการแบ่งคาร์โบไฮเดรตออกเป็นกลุ่มย่อย ๆ ผ่านคุณสมบัติทางการย่อย (Englyst and Hudson, 1996) หรือการใช้ค่าน้ำตาลที่สามารถแพร่ผ่านเยื่อเลือกผ่าน หลังจากการย่อยในหลอดทดลองเป็นเวลาสองชั่วโมง (Argyri et al., 2016) ไปจนถึงการทำนายโดยอาศัยค่าทางจลศาสตร์ของเอนไซม์ α-amylase (Edwards et al., 2019)

เนื่องจากคนไทยในปัจจุบันมีรูปแบบการรับประทานอาหารที่เปลี่ยนแปลงไป (Pingali, 2004) การศึกษาดัชนีน้ำตาลของอาหารจำพวกคาร์โบไฮเดรตซึ่งเป็นอาหารหลักของคนไทยจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะจำลองการย่อยคาร์โบไฮเดรตในหลอดทดลองโดยให้ความสนใจกับปริมาณน้ำตาลที่สามารถแพร่ผ่านเยื่อเลือกผ่านดังที่ถูกเสนอโดย Argyri และคณะในปี 2016 (Argyri et al., 2016) โดยจะใช้ข้าวชนิดต่าง ๆ ซึ่งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ไม่ได้ผ่านกรรมวิธีทางอุตสาหกรรม (Kosulwat, 2002) และคาร์โบไฮเดรตที่แปรรูปอื่น ๆ ที่อยู่คู่กับสังคมไทยมาเนิ่นนาน อย่าง เส้นก๋วยเตี๋ยว วุ้นเส้น และเส้นบะหมี่กึ่งสำเร็จรูป ตลอดไปจนถึง คาร์โบไฮเดรตแปรรูปที่มาจากวัฒนธรรมการบริโภคของชาวตะวันตกที่ได้รับความนิยมในประเทศไทย เช่นขนมปัง และ เส้นสปาเก็ตตี้ รวมจำนวน 12 ชนิด ในการทำการทดลอง

1.2. วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสที่สามารถแพร่ผ่านเยื่อเลือกผ่าน (dialysable glucose) ที่ได้จากการย่อยคาร์โบไฮเดรตจากข้าวและผลิตภัณฑ์แปรรูปจำนวน 12 ชนิด ในหลอดทดลอง เพื่อประเมินปริมาณกลูโคสที่ร่างกายสามารถดูดซึมได้จากการย่อย

1.2.2 เพื่อหาความสัมพันธ์ของค่า dialysable glucose ที่ได้จากการย่อยคาร์โบไฮเดรตดังกล่าวกับค่า Glycemic Index ที่เคยมีรายงานวิจัยไว้แล้ว

บทที่ 2

ทบทวนวรรณกรรม

2.1 กลไกการย่อยคาร์โบไฮเดรตในมนุษย์ (Carbohydrate Digestion in Human)

ในการทำการทดลองเพื่อจำลองการย่อยคาร์โบไฮเดรตนั้น ผู้วิจัยเล็งเห็นความสำคัญในการทำความเข้าใจกลไกการย่อยอาหารจำพวกคาณ์โบไฮเดรตที่เกิดขึ้นในมนุษย์เป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากการทำความเข้าใจขั้นตอนและแบบแผนการทดลองที่จะได้ทำการกล่าวถึงในบทถัดไปต้องอาศัยความรู้พื้นฐานในด้านดังกล่าวเป็นอย่างมาก ณ ที่นี้ผู้วิจัยจึงได้ทำการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับเรื่องดังกล่าว และ ทำการถอดความวรรณกรรม มาไว้ ณ ที่นี้ โดยผู้วิจัยได้เลือกเอกสารการทบทวนวรรณกรรมของ นายแพทย์ Gary M. Gray, M.D. (Gray, 1970) เป็นพื้นฐานในการทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับหัวข้อดังกล่าว

2.1.1 โครงสร้าง และ ลักษณะทางชีวเคมีของคาร์โบร์ไฮเดรตและเอนไซม์อะไมเลสที่ทำหน้าที่ในการย่อย

ลักษณะที่แตกต่างกันในเชิงโครงสร้างของคาร์โบไฮเดรตที่เกิดจากโพลิเมอร์กลูโคสมีความสำคัญต่อการศึกษาการย่อยคาร์โบไฮเดรตในมนุษย์เป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากโครงสร้างดังกล่าวนั้นส่งผลโดยตรงต่อการทำงานของเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสซึ่งเป็นเอนไซม์หลักที่ทำหน้าที่ในการย่อยคาร์โบร์ไฮเดรตให้มีขนาดโมเลกุลเล็กลง คาร์โบร์ไฮเดรตที่มีโครงสร้างในแบบที่เรียกว่า อะไมโลส นั้นเป็นสายของกลูโคสที่เชื่อมกันด้วยพันธะไกลโคสิดิคที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 4 บนโมเลกุลน้ำตาลกลูโคสโดยมีขนาดที่หลากหลายตั้งแต่ที่ประกอบด้วยโมเลกุลกลูโคสประมาณ 25 โมเลกุลไปจนถึงสองพันโมเลกุล พันธะ 1,4 ไกลโคสิดิคภายในสายอะไมโลสหรือโอลิโกแซคคาไรด์ นั้นเป็นพันธะเกี่ยวข้องกับการทำงานของเอนไซม์ อะไมเลสจากทั้งน้ำลายและตับอ่อน โดยเอนไซม์อะไมเลสมีหน้าที่ในการสลายพันธะดังกล่าวนั่นเอง เมื่อเป็นเช่นนั้น ซับเสตรดที่เล็กที่สุดของเอนไซม์อะไมเลสจึงเป็นโอลิโกแซคคาไรด์ของกลูโคสที่ 4 และ 5 โมเลกุลตามลำดับ และ ผลผลิตสุดท้ายที่ได้จากการทำงานของเอนไซม์ดังกล่าวเป็น มอลโทส และ มอลโทไตรโอส ตามลำดับ การย่อยของเอนไซม์อะไมเลสจึงไม่ได้ทำให้เกิดน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวขึ้นมาเป็นผลิตภัณฑ์แต่อย่างใด ในส่วนของคาร์โบร์ไฮเดรตอีกประเภทที่เรียกว่าอะไมโลเพกตินนั้น มีความแตกต่างออกไปจากอะไมโลสในแง่ของการทรลักษณะของการแตกกิ่งของสายโพลิเมอร์ด้วยพันธะ 1,6 ไกลโคสิดิคเพิ่มขึ้นมาโดยพันธะดังกล่าวจะเกิดขึ้นซ้ำทุก ๆ 25 โมเลกุลกลูโคสในสายโพลิเมอร์ เนื่องจากเอนไซม์อะไมเลสนั้นขาดความสามารถในการกระตุ้น

ปฏิกิริยาในการสลายพันธะดังกล่าว ทำให้ผลลัพธ์ที่ได้จากการย่อยอะไมโลเพคตินนั้นมีผลผลิตเป็นโอลิโกแซคคาไรด์ที่เรียกว่า แอลฟาร์เดกซ์ตริน เพิ่มขึ้นมาอีกหนึ่งชนิด

2.1.2 เอนไซม์บนผิวเยื่อบุลำไส้และการย่อยผลผลิตที่ได้จากเอนไซม์อะไมเลส

หลังจากการย่อยโดยเอนไซม์อะไมเลส ผลผลิตที่เกิดขึ้นไม่ว่าจะเป็น มอลโทส มอลโทไตรโอส หรือ แอลฟาร์เดกซ์ตริน ล้วนต้องผ่านการย่อยสลายพันธะให้อยู่ในรูปของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่เรียกว่ากลูโคสก่อนการดูดซึม ซึ่งเอนไซม์ที่ทำหน้าที่ดังกล่าวนั้น มีการรวมตัวกันอยู่บนตำแหน่งที่จำเพาะซึ่งก็คือด้านผิวของเยื่อบุลำไส้ที่หันเข้าหาช่องว่างภายในลำไส้ โดยอนไซม์ที่เกี่ยวข้องได้แก่ มอลเทส ที่ทำหน้าที่ในการสลายพันธะภายในโมเลกุลน้ำตาลมอลโทส และ มอลโทไตรโอส และ ไอโซมอลเทส ที่ทำหน้าที่ในการสลายพันธะของโมเลกุลแอลฟาร์เดกซ์ตริน จากการทำงานของเอนไซม์ทั้งหมดที่กล่าวไปข้างต้นกับซับสเตรตทั้งที่เริ่มต้นจากอะไมโลสหรืออะไมโลเพกตินก็ดีผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้ออกมานั้นล้วนเป็นกลูโคสทั้งสิ้น ในการทดลองการย่อยอาหารจำพวกคาร์โบไฮเดรตจำพวกแป้ง จึงให้ความสำคัญกับน้ำตาลกลูโคสเป็นหลัก

2.1.3 การดูดซึมกลูโคสผ่านผนังลำไส้

เนื่องจากเกิดการสะสมความเข้มข้นของกลูโคสในเซลล์ลำไส้ทำให้การขนส่งกลูโคสจากช่องว่างในลำไส้เข้าสู่เซลล์เยื่อบุลำไส้มีทิศทางสวนกับศักย์ความเข้มข้น ส่งผลให้กระบวนการการลำเลียงกลูโคสเข้าสู่ร่างกายนั้นเป็นกระบวนการที่ต้องอาศัยพลังงาน โดยเยื่อบุลำไส้ลำเลียงกลูโคสโดยอาศัยการลำเลียงโดยใช้พลังงานแบบทุติยภูมิโดยอาศัยการนำกลูโคสเข้าสู่เซลล์ร่วมกับโซเดียมไอออน นอกจากนี้การลำเลียงกลูโคสยังมีกลไกที่อยู่ในสภาวะสมดุลกับการย่อยคาร์โบไฮเดรตอีกด้วย กล่าวคือ อัตราการย่อยสลายคาร์โบไฮเดรตนั้นจะใกล้เคียงกับขีดจำกัดในการลำเลียงน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว ถึงแม้ว่าประสิทธิภาพในการย่อยของเอนไซม์จะสูงกว่าอัตราดังกล่าวก็ตาม ทำให้การผลิตซ้ำซึ่งสมดุลดังกล่าวในหลอดทดลองนั้นเกิดขึ้นได้ยาก

2.2 ความแตกต่างและขีดจำกัดของการจำลองการย่อยคาร์โบไฮเดรตในหลอดทดลอง

ผู้วิจัยเล็งเห็นถึงความจำเป็นอีกประการหนึ่งในการศึกษาระบบการย่อยในหลอดทดลองที่ถูกพัฒนาขึ้นมาอย่างหลากหลายในปัจจุบัน เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการดัดแปรงแบบแผนการดำเนินงานของผู้วิจัยเอง ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาและถอดความเอกสารการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวเนื่องกับหัวข้อดังกล่าว ดังที่ได้ถูกเสนอโดย James W. Woolnough และ คณะ (Woolnough et al., 2008) และได้สรุปความโดยย่อออกมาได้ดังนี้

2.2.1 นิยามของคาร์โบไฮเดรตที่สามารถถูกดูดซึมได้ (Available Carbohydrate)

องค์กร Glycaemic Carbohydrate Definition Committee ได้ให้นิยาม Available Carbohydrate ไว้ว่า เป็นคาร์โบไฮเดรตที่มาจากอาหารซึ่งผ่านการย่อยและดูดซึมในรูปของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวและถูกนำไปใช้ในกระบวนการเมทาบอลิซึมของร่างกาย

2.2.2 ที่มาและความสำคัญของการพัฒนาการจำลองการย่อยคาร์โบไฮเดรตในลำไส้

ในปี 2006 สมาชิกของ Glycaemic Carbohydrate Definition Committee ได้แสดงความกังวลเกี่ยวกับการศึกษาค่าดัชนีน้ำตาลภายในสิ่งมีชีวิต เนื่องจากปัญหาที่เกิดขึ้นมากจากความแตกต่างของปัจเจก องค์กรดังกล่าวจึงเล็งเห็นถึงความสำคัญของการพัฒนาระบบที่มีความแม่นยำในการจำลองการย่อยคาร์โบไฮเดรตในหลอดทดลอง โดยถึงแม้ว่าเวลาจะล่วงเลยมาหลายปีแล้วก็ตาม แต่ระบบการจำลองการย่อยคาร์โบไฮเดรตในหลอดทดลองที่ได้รับการยอมรับกันในวงกว้างนั้นก็ยังไม่เป็นรูปธรรมมากนัก

2.2.3 จุดเริ่มต้น ความหลากหลาย และ ขีดจำกัด ของการจำลองการย่อยในหลอดทดลอง

แต่เดิมนั้นการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลในอาหารจำพวกคาร์โบไฮเดรตนั้นมีจุดเริ่มต้นมาจากความพยายามที่จะทำการศึกษากากอาหารที่ไม่สามารถย่อยได้ในอาหารที่เป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรต อย่างที่พบในงานของ D.A.T. Southgate ในปี 1969 และได้รับการพัฒนาต่อโดย H.N. Englyst และ C.S. Berry อย่างต่อเนื่องตามลำดับ ดังที่ผู้วิจัยได้ทำการกล่าวถึงการทดลองของ H.N. Englyst ในฐานะตัวแทนของสายการทดลองดั้งเดิมดังกล่าวในบทที่ 1

ในปัจจุบันแบบแผนการทดลองที่ได้รับการพัฒนามาเพื่อเติมเต็มหน้าที่ดังกล่าวก็มีให้ศึกษาอย่างมากมาย แต่อย่างไรก็ดีปริมาณที่เพิ่มขึ้นของแบบแผนการทำการทดลองของผู้วิจัยที่แตกต่างกันนั้นนำมาซึ่งความแตกต่างที่ทำให้การจำลองการย่อยคาร์โบไฮเดรตในหลอดทดลองขาดแบบแผนที่สามารถจะนำมาเป็นมาตราฐานในการเปรียบเทียบได้ อาทิเช่น การตัดสินใจที่จะละกระบวนการการย่อยที่เกิดขึ้นในกระเพาะในบางการทดลอง ซึ่งในบางครั้งก็ไม่ก่อให้เกิดนัยยะสำคัญ แต่ในบางครั้งเช่นในกรณีของเส้นพาสต้าที่มีโปรตีนผสมอยู่มากขั้นตอนดังกล่าวก็กลับมีนัยยะสำคัญขึ้นมาอย่างเห็นได้ชัด นอกจากนี้รูปแบบการบดอาหารเพื่อจำลองการย่อยในปากก็มีวิธีที่แตกต่างกันอย่างมาก ตั้งแต่การเคี้ยวโดยอาสาสมัคร ไปจนถึงการปั่นให้เป็นเนื้อเดียวกัน โดยการเปรียบเทียบค่าดัชนีน้ำตาลของที่ได้จากการย่อยในหลอดทดลองซึ่งผ่านการบดด้วยกรรมวิธีที่ต่างกันนั้นมีค่าที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด อีกทั้งความเข้มข้น ชนิด และ สภาวะแวดล้อมของเอนไซม์ที่แตกต่างกันก็ส่งผลต่อการทำนายค่าดัชนีน้ำตาลอย่างมีนัยยะสำคัญไม่แพ้กัน

2.2.4 การตัดสินใจของผู้วิจัยหลังจากการทบทวนวรรณกรรม

ดังที่ผู้วิจัยได้เสนอไปในบทที่หนึ่ง ผู้วิจัยเลือกใช้แบบแผนการทดลองของ Argyri และ คณะ เนื่องจากหลังจากได้ทำการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องผู้วิจัยเล็งเห็นถึงขีดจำกัดในการเลียนแบบกระบวนการการย่อยในธรรมชาติ และ การขาดแบบแผนที่ตายตัวในสายงานดังกล่าว ซึ่งนำมาสู่การตัดสินใจของผู้วิจัยที่ว่า การทดลองของผู้วิจัยนั้นควรอาศัยความเรียบง่ายเป็นหลักเพื่อความสะดวกต่อการทำซ้ำ แต่ก็ไม่ควรเรียบง่ายเกินไป แบบแผนการดำเนินงานของผู้วิจัยจึงอยู่ระหว่าง การดำเนินงานที่ซับซ้อนในแบบดั้งเดิมดัง และ ความเรียบง่ายของการใช้เอนไซม์เพียงชนิดเดียวในการทำนายค่าดัชนีน้ำตาลดังที่ปรากฏในสายงานดังกล่าวในช่วงหลัง

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงาน

3.1 การเลือกชนิดและแหล่งที่มาของคาร์โบไฮเดรต

ผู้วิจัยได้ทำการแบ่งคาร์โบไฮเดรตที่เลือกใช้ออกเป็นสองกลุ่มคือคาร์โบไฮเดรตที่ผ่านการแปรรูปและคาร์โบไฮเดรตที่ไม่ผ่านการแปรรูปดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 1 โดยได้ทำการเลือกซื้อคาร์โบไฮเดรตจากแหล่งที่มีการติดฉลากโภชนาการเพื่อความสะดวกในการคำนวณปริมาณคาร์โบไฮเดรต โดย แหล่งที่มาของคาร์โบไฮเดรตเป็นไปดังนี้

ตารางที่ 1 แหล่งที่มาของคาร์โบไฮเดรตที่ไม่ผ่านการแปรรูป

ชนิดของคาร์โบไฮเดรต	**แหล่งที่มา (ยี่ห้อการค้า)**
ข้าวหอมมะลิ ทุ่งกุลาร้องไห้	Tesco Lotus
ข้าวเหนียวเขี้ยวงู	Top
ข้าวไรซ์เบอร์รีย์	หงส์ทอง
ข้าวกล้องหอมมะลิ	หงส์ทอง
ข้าวกล้องหอมมะลิผสมข้าวทับทิมและข้าวหอมนิล	ธรรมคัลเจอร์

ตารางที่ 2 แหล่งที่มาของคาร์โบไฮเดรตที่ผ่านการแปรรูป

ชนิดของคาร์โบไฮเดรต	**แหล่งที่มา (ยี่ห้อการค้า)**
เส้นเล็ก	ท่าสยาม
เส้นหมี่	ท่าสยาม
เส้นบะหมี่	มังกรคู่
เส้นวุ้นเส้น	มังกรคู่
เส้นบะหมี่กึ่งสำเร็จรูป	มาม่า
เส้นสปาเก็ตตี้	Balducci
ขนมปังขาว	ฟาร์มเฮ้าส์

3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทำการทดลอง

สารเคมีที่ใช้ในการทดลองครั้งนี่มีที่มาจากผู้ผลิตรายต่าง ๆ ดังนี้

1. α-Amylase from Aspergillus oryzae powder, ~30 U/mg (Sigma-Aldrich; Taufkirchen, Germany; catalog no. 10065)
2. Amyloglucosidase solution from Aspergillus niger for use in Total Dietary Fiber Assay (Supelco; Sigma-Aldrich; Taufkirchen, Germany; catalog no. A9913)
3. Bile Salts (Himedia; Mumbai, India; catalog no. RM-008)
4. 3,5-Dinitrosalicylic acid 98% (Sigma-Aldrich; Taufkirchen, Germany; catalog no. 128848)
5. Pancreatin (Codex; Carlo ERBA; Val de Reuil, France)
6. Pepsin from porcine gastric mucosa powder, ≥250 units/mg solid(Sigma-Aldrich; Taufkirchen, Germany; catalog no. P7000)
7. PIPES disodium salt ≥99% (titration) (Sigma-Aldrich; Taufkirchen, Germany; catalog no. P3768)
8. Potassium sodium tartrate tetrahydrate puriss., 99.0-101.0% (calc. on H2O free substance) (Riedel-de Haën; Seelze, Germany; catalog no. 25508)

3.3 กรรมวิธีการปรุงให้สุก และ กรรมวิธีการเตรียมคาร์โบไฮเดรตปริมาณ 0.25 กรัมต่อตัวอย่าง

การเตรียมคาร์โบไฮเดรตเกิดขึ้นทั้งสิ้นสามครั้งตามจำนวนการทดลองสามซ้ำ โดยคาร์โบไฮเดรตจะถูกชั่งทั้งก่อนและหลังการปรุงให้สุขเพื่อหาอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นของน้ำหนักหลังการปรุง เพื่อใช้ในการคูณกับปริมาณคาร์โบไฮเดรตในน้ำหนักแห้งที่มีคาร์โบไฮเดรต 0.25 กรัม ตามฉลากโภชนาการบนบรรจุภัณฑ์ เพื่อให้ได้น้ำหนักของน้ำที่เพิ่มขึ้น จากนั้นจึงนำไปบวกกับน้ำหนักตั้งต้นที่ใช้ในการคูณ เพื่อใช้ในการชั่งตัวอย่างที่มีคาร์โบไฮเดรต 0.25 กรัมที่รวมน้ำหนักน้ำหนักน้ำที่เพิ่มขึ้น โดยเวลาที่ใช้ในการปรุงคาร์โบไฮเดรตแต่ละชนิดและวิธีการปรุงสามารถดูได้จากตารางที่ผู้วิจัยได้ทำการแนบไว้ด้านล่าง

ตารางที่ 3 อัตราส่วนระหว่างข้าวและน้ำที่ใช้ในการหุงให้สุก

แหล่งคาร์โบไฮเดรต	**ปริมาตรข้าวต่อน้ำ**	**หมายเหตุ**
ข้าวทับทิมผสมข้าวกล้อง	1:2.2	หม้อหุงข้าวไฟฟ้า
ข้าวไรซ์เบอรร์รี่	1:2	หม้อหุงข้าวไฟฟ้า
ข้าวกล้อง	1:1.5	หม้อหุงข้าวไฟฟ้า
ข้าวหอมมะลิ	1:1.3	หม้อหุงข้าวไฟฟ้า
ข้าวเหนียว	1:1	หม้อหุงข้าวไฟฟ้า

ตารางที่ 4 ระยะเวลาที่ใช้ในการลวกเส้นคาร์โบไฮเดรตให้สุก

แหล่งคาร์โบไฮเดรต	**ระยะเวลาที่ใช้ในการต้ม**	**หมายเหตุ**
เส้นสปาเก็ตตี้	8 นาที	ผ่านน้ำเย็นหลังต้ม
เส้นบะหมี่	4 นาที	ผ่านน้ำเย็นหลังต้ม
วุ้นเส้น	4 นาที	-
บะหมี่กึ่งสำเร็จรูป	3 นาที	-
เส้นเล็ก	1 นาที	-
เส้นหมี่	1 นาที	-
ขนมปัง	-	-

3.4 การบดคาร์โบไฮเดรตและการจำลองการย่อยในปาก

หลังจากคาร์โบไฮเดรตผ่านกระบวนการทำให้สุก คาร์โบไฮเดรตจะถูกย้ายลงไปในแผ่น six well plate จากนั้นจึงผ่านเข้าสู่กระบวนการการบดด้วยก้นหลอดทดลองพลาสติกขนาด 25 มิลลิลิตรเป็นเวลา 20 วินาทีเพื่อจำลองการเคี้ยวในปาก จากนั้นทำการเติมเอนไซม์แอลฟาร์อะไมเลสความเข้มข้น 46.25 ยูนิต/มิลลิลิตร ปริมาตร 1 มิลลิลิตรลงไปในแต่ละหลุม เพื่อจำลองการย่อยในปาก โดยทำการบ่มในเครื่อง shaking incubator ที่ความเร็ว 110 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที

3.5 การจำลองการย่อยในกระเพาะอาหาร

หลังจากเสร็จสิ้นขั้นตอนการย่อยในปาก ก็จะเข้าสู่ขั้นตอนการปรับค่าพีเอชให้ใกล้เคียงกับค่าพีเอชในกระเพาะอาหารเพื่อจำลองการย่อยในกระเพาะ โดยการปรับพีเอชนั้นจะอาศัยการเติมน้ำกลั่นที่มีค่าพีเอช 2.5 จากการเติมกรดไฮโรคลอริกความเข้มข้น 0.1 M โดยจะทำการเติมน้ำที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 2.5 เป็นปริมาตร 1 มิลลิลิตร ลงไปในชุดทดลองทั้งหกหลุม ก่อนทำการเติมเอนไซม์เพพซินที่ความเข้มข้น 4 กรัม ในกรดไฮโรคลอริกความเข้มข้น 0.1 M ปริมาตร 100 มิลลิลิตร โดยทำการเติมสารละลายเพพซินดังกล่าวลงไป 0.1 มิลลิลิตร เพื่อจำลองการย่อยในกระเพาะอาหาร โดยทำการบ่มในเครื่อง shaking incubator ที่ความเร็ว 110 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

3.6 การจำลองการย่อยในลำไส้เล็ก และการเก็บตัวอย่าง ณ เวลา 0 นาที

หลังจากทำการย่อยในกระเพาะอาหาร ทำการใส่ cell strainer ที่มี pore size ขนาด 70 μm ลงไปในหลุมที่ใช้ทดลอง แล้วจึงทำการปรับค่าพีเอชของสารละลายตัวอย่างให้มีเหมาะสมต่อการย่อยในลำไส้ โดยใช้สารละลายบัฟเฟอร์ที่เตรียมโดยใช้ PIPES ความเข้มข้น 0.1 M และผ่านการปรับพีเอชให้มีค่าเท่ากับ 6.5 โดยจะทำการเติมสารละลายบัฟเฟอร์ทั้งสิ้นเป็นปริมาตร 3 มิลลิลิตรต่อหลุม โดยการเติมบัฟเฟอร์จะไม่ใช่การเติมลงไปในสารละลายตัวอย่างโดยตรงแต่จะเป็นการเติมสารละลายผ่าน cell strainer หลังจากนั้นจึงทำการบ่มด้วยเครื่อง shaking incubator ที่ความเร็ว 110 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เพื่อจำลองการเพิ่มขึ้นของค่าพีเอชในลำไส้เล็กตอนบน เมื่อเสร็จสิ้นขั้นตอนดังกล่าว ทำการดูดสารละลายตัวอย่างปริมาตร 0.2 มิลลิลิตร ผ่านทาง cell strainer เพื่อใช้หาค่าปริมาณน้ำตาลที่ได้ก่อนการย่อยในลำไส้จะเกิดขึ้น โดยกำหนดตัวอย่างดังกล่าวเป็นตัวอย่าง ณ เวลา 0 นาที

3.7 การจำลองการย่อยในลำไส้ และ การเก็บตัวอย่าง ณ เวลา 30, 60, 90, และ 120 นาที

หลังจากกระบวนการการปรับพีเอชเสร็จสิ้นลง จะเข้าสู่ขั้นตอนการเติมเอนไซม์เพื่อจำลองการย่อยในลำไส้ โดยก่อนการทำการเติมเอนไซม์จะทำการถอด cell strainer ออกก่อน แล้วจึงทำการใส่ cell strainer ดังกล่าวคืนหลังการเติมเอนไซม์ โดยเอนไซม์ที่ทำการเติมได้แก่ เอนไซม์ amyloglucosidase ความเข้มข้น 3,260 ยูนิต/มิลลิลิตร ปริมาตร 15 ไมโครลิตร ต่อหลุม และ เอนไซม์กลุ่มแพนคริเอทิน ที่ได้ทำการผสมกับเกลือน้ำดีในอัตราส่วน 0.2 กรัม/1.2 กรัม โดยละลายในโซเดียมไบคาร์บอเนตความเข้มข้น 0.1 M โดยทำการเติมทั้งสิ้นปริมาตร 1 มิลลิลิตรต่อหลุม หลังจากนั้นจึงทำการบ่ม ด้วยเครื่อง shaking incubator ที่ความเร็ว 110 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และเก็บตัวอย่างผ่าน cell strainer ครั้งละ 0.2 มิลลิลิตร ทุกๆ 30 นาที เพื่อเป็นตัวอย่าง ณ เวลา นาที 30, 60, 90, และ 120 นาที

3.8 การรักษาสภาพตัวอย่างก่อนทำการตรวจหาปริมาณน้ำตาล

ตัวอย่างที่ทำการเก็บที่เวลา 0, 30, 60 ,90, และ 120 นาที ปริมาตร 0.2 มิลลิลิตร นั้นจะถูกนำมาผสมกับ เอทานอล ปริมาตร 0.8 มิลลิลิตร ทันที จากนั้นทิ้งไว้เป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นจึงทำการปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่อง centrifuge ที่ความเร็ว 5,000 รอบต่อนาทีเพื่อให้ตกตะก่อน ก่อนทำการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อรอการตรวจหาปริมาณน้ำตาล

3.9 การเตรียม standard สำหรับการหาปริมาณน้ำตาลกลูโคส

ทำการเตรียมสารละลายกลูโคสความเข้มข้น 16 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร เพื่อใช้ในการเจือจางให้ได้สารละลายกลูโคสความเข้มข้น 0, 0.5, 1, 2, 4 และ 8 มิลลิกรัมต่อมิลลิตร เพื่อใช้ในการทำ standard curve โดยจะผ่านขั้นตอนเดียวกับการตรวจปริมาณน้ำตาลปกติทุกประการ โดย standard curve จะถูกทำใหม่ทุกครั้งที่มีการวัดน้ำตาล เพื่อให้ได้ค่าที่สะท้อนความเป็นจริง

3.10 การวัดปริมาณน้ำตาล

การวัดปริมาณทำโดยอาศัยเทคนิคที่เรียกว่า DNS method โดยมีขั้นตอนการทำการทดลองดังนี้

1. ทำการเติมตัวอย่างที่ต้องการหาปริมาณน้ำตาล และ สารละลาย standard ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ลงไปใน หลอดทดลอง

2. จากนั้นจึงทำการเติมน้ำกลั่น 0.5 มิลลิลิตร ตามด้วย โซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 3.9 M ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร
3. ทำการเติม DNS reagent (3,5-dinitrosalicyiic acid 0.3 กรัม ผสมกับ NaOH 0.48 กรัม ผสมกับ sodium/potassium tartrate 9 กรัม ใน Deionized Water 30 มิลลิลิตร) ปริมาตร 2 มิลลิลิตร
4. ทำการต้มในน้ำเดือดเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง ก่อนนำไปเจือจางด้วยอัตราส่วน 1 มิลลิลตร ต่อน้ำ 10 มิลลิลิตร แล้วจึงทำการตรวจหาปริมาณน้ำตาลด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิตรี ที่ความยาวคลื่น 530 nm

3.11 การคำนวณทางสถิติ

การสร้างกราฟ standard curve และการเทียบหาปริมาณน้ำตาลทำโดยใช้โปรแกรม Microsoft excel รายงานผลเป็น Mean ± SE ในส่วนของการทดสอบความเหมือนและต่างระหว่างกลุ่มและภายในกลุ่มคาร์โบไฮเดรตได้ใช้การทดสอบทางสถิติแบบ Two-Way ANOVA โดยใช้โปรแกรม SPSS Statistics ยอมรับค่าความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (p-value ≤ 0.05) ในส่วนของการทำนายค่าดัชนีน้ำตาลได้ใช้การทดสอบที่เรียกว่า Spearman's Correlation Test โดยใช้โปรแกรม SPSS Statistics ในส่วนของกราฟการย่อยในหลอดทดลองหรือ Digestion Curve ทำการสร้างโดยอาศัยโปรแกรม GraphPad

บทที่ 4
ผลการศึกษา

4.1 ผลที่ได้จากการเปรียบเทียบค่าน้ำตาลที่ได้จากการย่อย

ทำการเปรียบเทียบปริมาณน้ำตาลจากตัวอย่างทั้งสิบสองชนิดด้วยโปรแกรม SPSS โดยใช้การทดสอบทางสถิติแบบ Two-Way ANOVA (ตารางที่ 5) เพื่อทำการแบ่งคาร์โบร์ไฮเดรตที่ได้ออกเป็นกลุ่มต่าง ๆ โดยแบ่งการทดสอบออกเป็นสามแบบได้แก่ การทดสอบเพื่อเปรียบเทียบคาร์โบไฮเดรตทั้งสิบสองชนิด การทดสอบเพื่อทำการเปรียบเทียบภายในกลุ่มคาร์โบไฮเดรตที่ไม่ผ่านการแปรรูป และ การทดสอบเพื่อทำการเปรียบเทียบภายในกลุ่มคาร์โบไฮเดรตที่ผ่านการแปรรูป โดยเลือกใช้สถิติแบบ Duncan ในการทดสอบ Post Hoc ได้ผลดังที่จะทำการอธิบายเป็นกลุ่มๆ ดังนี้

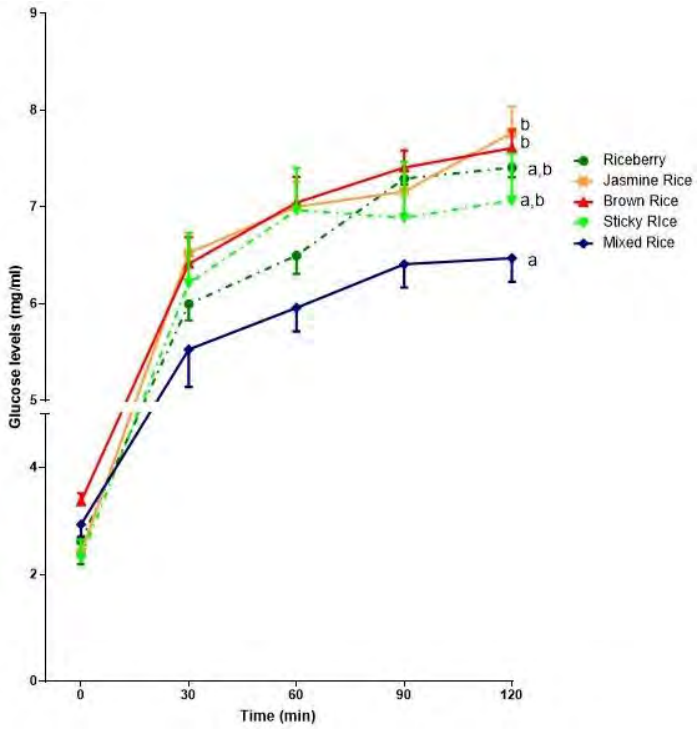
ตารางที่ 5 แสดงปริมาณน้ำตาลหลังย่อยของคาร์โบไฮเดรตทชนิดต่าง ๆ ที่เวลา 0, 30, 60, 90 และ 120 นาที

ชนิดของคาร์โบไฮเดรต		**ปริมาณน้ำตาลหลังย่อยของคาร์โบไฮเดรตท (มิลลิกรัม/มิลลิลิตร)**				
ภาษาไทย	**ภาษาอังกฤษ**	**0 นาที**	**30 นาที**	**60 นาที**	**90 นาที**	**120 นาที**
ข้าวไรซ์เบอร์รี่	Riceberry	2.62±0.51	6.00±0.24	6.50±0.17	7.09±0.06	7.40±0.10
ข้าวกล้องหอมมะลิ	Brown Rice	3.59±0.15	6.41±0.27	7.04±0.27	7.41±0.18	7.61±0.19
ข้าวกล้องหอมมะลิผสม	Mixed Rice	3.33±0.23	5.53±0.45	5.96±0.39	6.41±0.24	6.47±0.40
ข้าวเหนียวเขี้ยวงู	Sticky RIce	2.31±0.46	6.74±0.52	6.97±0.61	6.89±0.77	7.07±0.62
ข้าวหอมมะลิ	Jasmine Rice	2.40±0.32	6.25±0.17	7.00±0.26	7.16±0.20	7.77±0.27
ขนมปัง	Bread	3.57±0.27	5.94±0.23	6.17±0.33	6.24±0.14	6.95±0.04
เส้นสปาเก็ตตี้	Spaghetti	3.14±0.05	5.66±0.28	6.18±0.37	6.67±0.59	6.94±0.59
เส้นบะหมี่	Egg Noodle	3.06±0.12	5.43±0.13	5.58±0.27	5.84±0.32	6.01±0.35
เส้นวุ้นเส้น	Mung Bean Noodle	1.35±0.06	3.49±0.14	4.34±0.07	5.10±0.10	5.62±0.14
เส้นบะหมี่กึ่งสำเร็จ	Instant Noodle	3.95±0.20	6.79±0.39	7.52±0.45	7.88±0.51	8.17±0.55
เส้นเล็ก	Rice Noodle	2.79±0.34	6.27±0.31	7.55±0.30	8.13±0.15	9.35±0.21
เส้นหมี่	Fine Rice Noodle	3.07±0.20	6.41±0.47	6.62±0.49	7.24±0.50	7.58±0.52

รายงานค่าเป็น mean± SEM

4.1.1 ผลที่ได้จากการเปรียบเทียบภายในกลุ่มคาร์โบไฮเดรตที่ไม่ผ่านการแปรรูปจำพวกข้าว

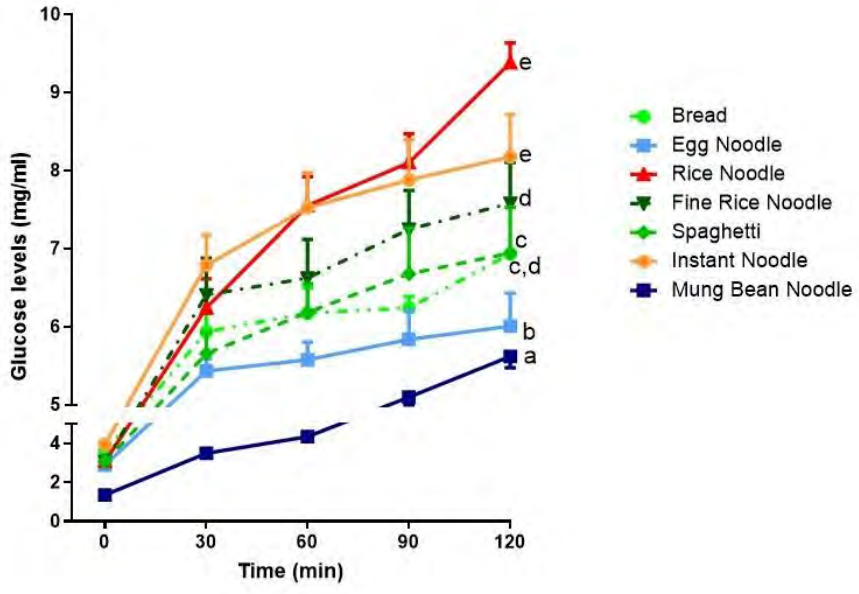
ผลที่ได้แสดงไว้ใน กราฟที่ 1 ที่สร้างจากการจัดกลุ่มทางสถิติแบบ Duncan สะท้อนให้เห็นว่าในกลุ่มของข้าวนั้น ข้าวกล้องหอมมะลิผสมข้าวทับทิมและข้าวหอมนิล หรือที่แสดงในตารางว่า mixed rice หรือ ข้าวผสมนั้น เป็นข้าวที่มีปริมาณน้ำตาลกลูโคสหลังย่อยต่ำที่สุดในกลุ่มข้าว (จากกลุ่ม a) และ แยกออกจากกลุ่มของข้าวที่มีปริมาณน้ำตาลกลูโคสหลังย่อยสูงที่สุดสองชนิด ซึ่งได้แก่ ข้าวหอมมะลิ หรือ jasmine rice และ ข้าวกล้องหอมมะลิ หรือ brown rice (จากกลุ่ม b) อย่างชัดเจน



กราฟที่ 1 แสดงปริมาณน้ำตาลหลังย่อยที่เวลา 0, 30, 60, 90 และ 120 นาที ของคาร์โบไฮเดรตทที่ไม่ผ่านการแปรรูปจำพวกข้าว ได้แก่ ข้าวไรซ์เบอร์รี่ย์ ข้าวกล้องหอมมะลิ ข้าวกล้องหอมมะลิผสม ข้าวเหนียวเขี้ยวงู และข้าวหอมมะลิ โดยรายงานค่าเป็น mean± SEM ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงถึงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $p<0.05$

4.1.2 ผลที่ได้จากการเปรียบเทียบภายในกลุ่มคาร์โบไฮเดรตที่ผ่านการแปรรูป

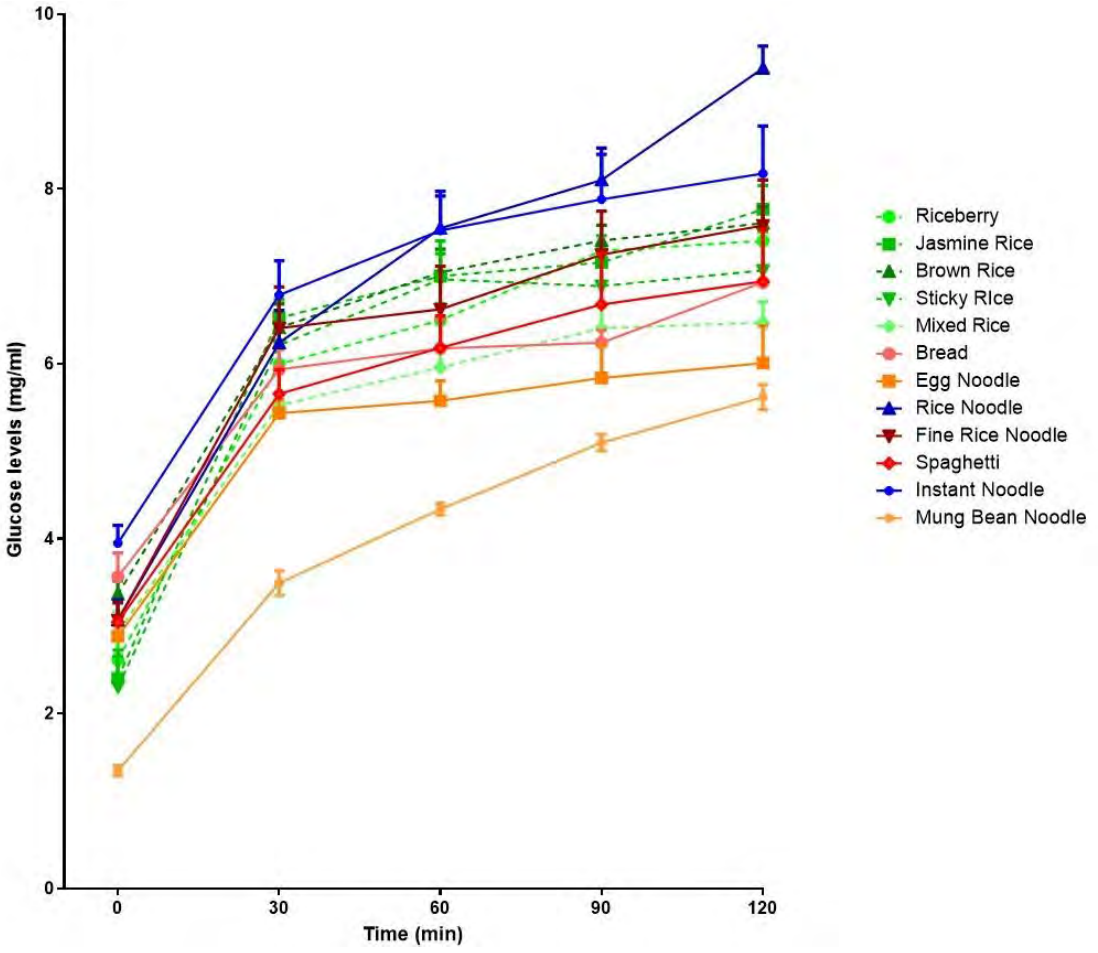
จากกราฟที่ 2 จะเห็นว่า หากพิจารณาจากผลการทดสอบแบบ Duncan เส้นวุ้นเส้น หรือ mung bean noodle (กลุ่ม a) นั้น มีปริมาณน้ำตาลหลักการย่อยต่ำที่สุด และ แยกออกจากกลุ่มอื่นอย่างชัดเจน เช่นเดียวกับ เส้นบะหมี่ หรือ egg noodle (กลุ่ม b) ที่มีปริมาณน้ำตาลหลังย่อยรองลงมาเป็นอันดับสอง และ แยกออกจากกลุ่มอื่นอย่างชัดเจนเช่นกัน ในกลุ่มถัดมาอีกสองกลุ่ม คือกลุ่ม c ที่ประกอบไปด้วย เส้นสปาเก็ตตี้ และ ขนมปังขาว และ กลุ่ม d ที่ประกอบไปด้วยขนมปังขาว และ เส้นหมี่ หรือ fine rice noodle จะเห็นได้ว่าสปาเก็ตตี้นั้น (จากกลุ่ม c) มีการแยกกลุ่มออกมาจากเส้นหมี่ (จากกลุ่ม d) อย่างเห็นได้ชัด ในส่วนของกลุ่ม e หรือกลุ่มสุดท้ายนั้นประกอบไปด้วย เส้นบะหมี่กึ่งสำเร็จรูป และ เส้นเล็ก หรือ rice noodle ซึ่งเป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตที่มีปริมาณน้ำตาลหลังย่อยสูงที่สุดสองชนิด



กราฟที่ 2 แสดงปริมาณน้ำตาลหลังย่อยที่เวลา 0, 30, 60, 90 และ 120 นาที ของคาร์โบไฮเดรตที่ผ่านการแปรรูป ได้แก่ ขนมปัง เส้นสปาเก็ตตี้ เส้นบะหมี่ เส้นวุ้นเส้น เส้นบะหมี่กึ่งสำเร็จ เส้นเล็ก และเส้นหมี่ โดยรายงานค่าเป็น mean± SEM ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงถึงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $p<0.05$

4.1.3 ผลที่ได้จากการเปรียบเทียบกลุ่มคาร์โบไฮเดรตทั้งหมดสิบสองชนิดอย่างเป็นองค์รวม

จากกราฟที่ 3 แสดงให้เห็นว่า แหล่งคาร์โบไฮเดรตที่ผ่านการแปรรูปนั้นมีการกระจายตัวทั้งในช่วงที่สูงที่สุดและต่ำที่สุดในกลุ่มคาร์โบไฮเดรตทั้งหมด โดย เส้นวุ้นเส้น และ เส้นบะหมี่ ซึ่งแทนด้วยเส้นสีส้ม slop ของกราฟอยู่ในช่วงที่ต่ำที่สุด ส่วนเส้นบะหมี่กึ่งสำเร็จรูป และ เส้นเล็ก ซึ่งแทนด้วยสีน้ำเงิน slop ของกราฟอยู่ในช่วงที่สูงที่สุด โดยมีข้าวเกาะกลุ่มกันอยู่สี่ชนิดใน ได้แก่ ข้าวกล้องหอมมะลิ ข้าวหอมมะลิ ข้าวไรซ์เบอร์รี่ย์ และ ข้าวเหนียว ซึ่งแทนด้วยสีเขียว วางตัวรองลงมาจาก เส้นเล็ก และ เส้นบะหมี่กึ่งสำเร็จรูป ตามลำดับที่ได้กล่าวไปข้างต้น



กราฟที่ 3 แสดงปริมาณน้ำตาลหลังย่อยที่เวลา 0, 30, 60, 90 และ 120 นาที ของคาร์โบไฮเดรตทั้ง 12 ชนิด ได้แก่ ข้าวไรซ์เบอร์รี่ย์ ข้าวกล้องหอมมะลิ ข้าวกล้องหอมมะลิผสม ข้าวเหนียวเขี้ยวงู ข้าวหอมมะลิ ขนมปัง เส้นสปาเก็ตตี้ เส้นบะหมี่ เส้นวุ้นเส้น เส้นบะหมี่กึ่งสำเร็จ เส้นเล็ก และเส้นหมี่ โดยรายงานค่าเป็น mean± SEM

4.2 การหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกลูโคสหลังการย่อยและค่าดัชนีน้ำตาล

การหาความสัมพันธ์ของค่าดังกล่าวโดยอาศัยแบบทดสอบความสัมพันธ์ทางสถิติของ Spearman โดยใช้โปรแกรม SPSS โดยทำการเทียบค่าดัชนีน้ำตาล ดังตารางที่ 6 กับ ปริมาณน้ำตาลหลังการย่อยที่แต่ละเวลา จากการทดสอบพบว่าช่วงเวลาที่มีค่าความสัมพันธ์ดีที่สุดนั้นอยู่ในช่วง 90 นาทีหลังการย่อย และค่าความสัมพันธ์ดังกล่าวมีค่ามากขึ้นหลังทำการตัดคาร์โบไฮเดรตที่ค่าดัชนีน้ำตาลและปริมาณน้ำตาลที่ได้จากการย่อยสวนทางกันจนผิดปกติ

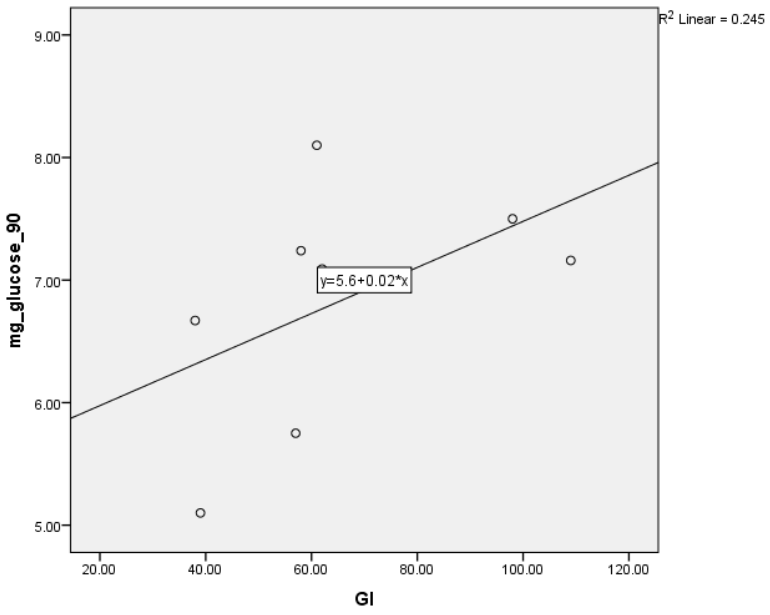
ตารางที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกลูโคสหลังการย่อยของคาร์โบไฮเดรตทั้ง 12 ชนิด และค่าดัชนีน้ำตาล ด้วยการทดสอบความสัมพันธ์ทางสถิติของ Spearman โดยใช้โปรแกรม SPSS

ชนิดอาหาร/ Food item	GI	GL	ปริมาณบริโภค/ Serving size	แหล่งที่มา/ Source	อ้างอิง/ Ref.
ข้าวหอมมะลิ/ Jasmine rice	109 ± 10	46	150 g	Golden World Foods, Bangkok, Thailand	Foster-Powell et al., 2002
ข้าวเหนียว/ Glutinous rice	98 ± 7	31	150 g	Bangsue Chia Meng Rice Mill, Bangkok, Thailand	Foster-Powell et al., 2002
ข้าวกล้อง/ Brown rice	55 ±5	18	150 g	ค่าเฉลี่ยจาก 3 การทดลอง/ Mean of 3 studies	Foster-Powell et al., 2002
เส้นเล็ก/ Rice noodles	61 ±6	23	180 g	Thai World, Bangkok, Thailand	Foster-Powell et al., 2002
สปาเกตตี้/ White Spaghetti	38 ±3	18	180 g	ค่าเฉลี่ยจาก 4 การทดลอง/ Mean of 4 studies	Foster-Powell et al., 2002

บะหมี่กึ่งสำเร็จรูป/ Instant noodles	47 ±1	19	180 g	ค่าเฉลี่ยจาก 3 การทดลอง/ Mean of 3 studies	Foster-Powell et al., 2002
วุ้นเส้น/ Mung bean noodles	39 ±9	18	180 g	Yantai cereals, China	Foster-Powell et al., 2002
เส้นเล็ก/ Rice vermicelli**	58	22	180 g	National Cereals, China	Foster-Powell et al., 2002
ขนมปัง/ White-wheat-flour bread	70 ± 0	10	30 g	ค่าเฉลี่ยจาก 6 การทดลอง/ Mean of 6 studies	Foster-Powell et al., 2002
ข้าวเหนียว/ Glutinous rice*	75	-	-	Thailand	Juliano et al., 1989
เส้นเล็ก/ Extruded fine rice noodles*	53	-	-	Thailand	Juliano et al., 1989
บะหมี่/ Wheat (egg) noodles*	57	-	-	Thailand	Juliano et al., 1989

วุ้นเส้น/ Mung bean noodles*	45	-	-	Thailand	Juliano et al., 1989

อย่างไรก็ดีถึงแม้ว่าการตัดค่าที่ผิดปกติออกไปจะทำให้ความสัมพันธ์มีความชัดเจนขึ้น แต่ที่ค่า Spearman's rho ที่เท่ากับ 0.102 หลักการตัดนั้น ก็ยังคงมีค่ามากกว่าค่าแอลฟาที่ 0.05 ที่ระดับความมั่นใจทางสถิติ 95% ทำให้ความสัมพันธ์ดังกล่าวไม่มีนัยยะสำคัญทางสถิติ ซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบสมการการถดถอยเชิงเส้น (กราฟที่ 4) จะเห็นได้ว่าจากการทดสอบสมการการถดถอยเชิงเส้นนั้น การกระจายตัวของข้อมูลไม่ได้มีลักษณะเป็นความสัมพันธ์ในเชิงสมการเส้นตรงนัก โดยสังเกตุได้จากการกระจายของข้อมูลบนกราฟ และ ค่า R square ที่ต่ำ ทำให้จุดประสงค์ในการทำนายค่าดัชนีน้ำตาลโดยอาศัยปริมาณน้ำตาลที่ได้หลังการย่อยไม่ประสบผลสำเร็จ



กราฟที่ 4 การทดสอบสมการการถดถอยเชิงเส้นของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกลูโคสหลังการย่อยของคาร์โบไฮเดรตทั้ง 12 ชนิด และค่าดัชนีน้ำตาล

บทที่ 5
อภิปรายผลการศึกษา

5.1 การแปรผลการทดลอง

จากผลการทดลองพบว่ากลุ่มคาร์โบไฮเดรตที่ผ่านการแปรรูปนั้นมีการกระจายตัวที่หลากหลาย ซึ่งผู้วิจัยมีความเห็นว่าการกระจายตัวที่กว้างของคาร์โบไฮเดรตในกลุ่มนี้ เกิดจากกรรมวิธีในการผลิตที่แตกต่างกันของคาร์โบไฮเดรตกลุ่มดังกล่าว โดยคาร์โบไฮเดรตที่ปริมาณน้ำตาลกลูโคสหลังย่อยสูงสุดสองอันดับแรกซึ่งได้แก่เส้นเล็กและเส้นบะหมี่กึ่งสำเร็จรูปนั้นมีลักษณะเป็นเส้นที่ทำมาจากแป้งสีเป็นองค์ประกอบหลัก ในขณะที่เส้นสปาเก็ตตี้ที่มีส่วนประกอบของไข่และมีปริมาณโปรตีนที่สูงมีการวางตัวในตอนกลางของคาร์โบไฮเดรตจำพวกเส้น ทำให้ผู้วิจัยคาดการณ์จากข้อมูลดังกล่าวว่า คาร์โบไฮเดรตที่มีปริมาณน้ำตาลกลูโคสหลังย่อยต่ำที่สุดสองชนิด ได้แก่ วุ้นเส้น และ เส้นบะหมี่นั้น อาจสามารถอธิบายได้โดยอาศัยปรากฏการณ์แบบเดียวกับที่เกิดขึ้นกับเส้นสปาเก็ตตี้ กล่าวคือ เส้นบะหมี่นั้นมีไข่เป็นองค์ประกอบเช่นเดียวกับเส้นสปาเก็ตตี้ ในขณะที่ เส้นวุ้นเส้นทำมาจากถั่วเขียวซึ่งประกอบไปด้วยโปรตีน ทำให้ผู้วิจัยตั้งสมมุติฐานว่าสำหรับคาร์โบไฮเดรตที่ผ่านการแปรรูปนั้นมีปัจจัยสำคัญต่อการย่อยเป็นสารจำพวกโปรตีน ซึ่งผลการศึกษาดังกล่าวสอดคล้องกับการค้นพบของ Kim และ คณะในปี 2008 ที่ค้นพบว่า โปรตีนในเส้นพาสต้าส่งผลต่อการย่อยคาร์โบไฮเดรตในทิศทางลบ (Kim et al, 2008) และ ปรากฏอยู่ในเอกสารทบทวนวรรณกรรม Singh และ คณะในปี 2013 (Singh et al, 2013)

ในส่วนของคาร์โบไฮเดรตในกลุ่มข้าวนั้น จากผลการทดลองจะเห็นว่า ข้าวสี่ชนิดได้แก่ ข้าวกล้อง ข้าวหอมมะลิ ข้าวไรซ์เบอร์รี่ย์ และ ข้าวเหนียว มีลักษณะการกระจายตัวแบบ เกาะกลุ่มกัน โดยมี ข้าวผสมแยกตัวออกมาในช่วงที่ต่ำลงมา ในการตีความชุดข้อมูลดังกล่าว ผู้วิจัยสันนิษฐานว่า การที่ข้าวกล้องและ ข้าวหอมมะลิ มีการกระจายตัวไปในทิศทางที่ใกล้เคียงกันนั้น เกิดจากการที่ข้าวกล้องชนิดที่เลือกใช้นั้นเป็นข้าวกล้องหอมมะลิ ซึ่งได้รับการสีที่ไม่แตกต่างจากข้าวหอมมะลิปกติอย่างมีนัยยะสำคัญ จึงให้ผลดังที่ปรากฏ ในส่วนของข้าวเหนียว และ ข้าวไรซ์เบอร์รี่ย์นั้น ผู้วิจัยมีข้อสันนิษฐานดังนี้ เป็นที่ทราบดีว่าข้าวเหนียว มีค่าดัชนีน้ำตาลใกล้เคียงกับข้าวหอมมะลิ ผลลัพธ์ดังกล่าวจึงไม่ผิดไปจากสมมุติฐาน ในส่วนของข้าวไรซ์เบอร์รี่ย์ที่แหล่งที่มาของค่าดัชนีน้ำตาลไม่ชัดเจนนั้น ผลที่ได้มีความสอดคล้องกับการทดลองวัดน้ำตาลในเลือดหลังการรับประทานคาร์โบไฮเดรตในรายวิชาปฏิบัติการชีววิทยาทั่วไป 1 ของภาควิชา

ชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ กล่าวคือ ข้าวดังกล่าวไม่มีความแตกต่างในปริมาณน้ำตาลในเลือดอย่างมีนัยยะสำคัญจากข้าวหอมมะลิ หรือข้าวกลุ่มอื่น ๆ ผู้วิจัยจึงมีความเห็นว่าการทบทวนค่าดัชนีน้ำตาลของข้าวชนิดดังกล่าวดังที่ปรากฏในวรรณกรรมภาษาไทยที่เข้าถึงได้ยากบางฉบับอาจมีความจำเป็นเป็นอย่างยิ่ง ในส่วนของข้าวผสมนั้น เป็นข้าวที่ได้รับการขัดสีน้อยที่สุดในบรรดาข้าวที่นำมาทดลองทุกชนิด ผู้วิจัยจึงสันนิษฐานว่า ปัจจัยดังกล่าวอาจเป็นปัจจัยสำคัญในการย่อย ซึ่งสมมุติฐานดังกล่าวสอดคล้องกับ การทดลองของ Sasaki และ คณะ ในปี 2016 ที่พบว่าข้าวที่ผ่านการสีต่างกันให้ปริมาณน้ำตาลที่ต่างกันหลังจากการย่อยในหลอดทดลอง (Sasaki et al, 2016)

5.2 การทำนายค่าดัชนีน้ำตาล และ ปัจจัยที่เกี่ยวข้อง

ในส่วนของการทำนายผลค่าดัชนีน้ำตาลนั้น ผู้วิจัยคาดการณ์ว่าเกิดจากความแตกต่างของอาหารที่นำมาใช้ และ อาหารที่ถูกใช้ในต้นฉบับการหาค่าดัชนีน้ำตาลจากแหล่งต่าง ๆ ที่ผู้วิจัยนำมา ความแตกต่างดังกล่าวเห็นได้อย่างชัดเจนในสองกรณี หนึ่ง กรณีของข้าวกล้อง ซึ่งหากดูจากค่าดัชนีน้ำตาลมีความแตกต่างจากข้าวหอมมะลิถึงเกือบเท่าตัว แต่จากการทดลองกับพบว่าข้าวทั้งสองมีการกระจายตัวที่จับกลุ่มไปด้วยกัน ผู้วิจัยตั้งสมมุติฐานเกี่ยวกับ กรณีดังกล่าวว่า อาจเกิดจากความแตกต่างของสายพันธุ์ข้าว และ การที่ข้าวกล้องของทางโลกตะวันตกผ่านการขัดสีน้อยกว่าและมีความเป็นเมล็ดมากกว่า ข้าวกล้องหอมมะลิที่ผู้วิจัยใช้ในการทดลอง ในส่วนที่สองนั้น หากดูจากการปรุงของข้าวแต่ละชนิดตามที่ผู้วิจัยได้กล่าวไปในบทก่อนๆ จะพบว่าการปรุงข้าวเป็นไปในลักษณะตามการรับประทานจริง ไม่ใช่การปรุงด้วยปริมาตรน้ำที่เท่ากัน ซึ่งจากงานวิจัยของ Sasaki และ คณะ ก็พบว่า ปริมาณน้ำที่ใช้ในการหุงนั้นส่งผลต่อการย่อยในหลอดทดลอง (Sasaki et al, 2016) ผู้วิจัยจึงคิดว่าการที่ข้าวกล้องและข้าวไรซ์เบอร์รี่ นั้นได้รับปริมาตรน้ำที่ใช้ในการหุงสูงกว่า ข้าวหอมมะลิ อาจเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิด ผลลัพธ์ดังกล่าว

ในส่วนของคาร์โบไฮเดรตชนิดที่สองที่สวนทางกับค่าดัชนีน้ำตาลนั้น ได้แก่ ขนมปังขาว ซึ่งหากยึดตามค่าดัชนีน้ำตาล ซึ่งควรจะมีการกระจายตัวอยู่ในตอนบนของชุดข้อมูล แต่กลับมีการกระจายตัวอยู่ในตอนกลาง ผู้วิจัยสันนิษฐานว่า เหตุการณ์ดังกล่าวเกิดจากความแตกต่างของขนมปังขาวตามขนบของโลกตะวันตกอย่างเช่นที่พบในประเทศสหรัฐอเมริกา และ ยุโรป และ ขนมปังขาวดังที่พบในประเทศไทย ในกรณีดังกล่าวผู้เขียนคิดว่าการศึกษาเพิ่มเติมเป็นเรื่องจำเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากเป็นที่ทราบกันดีว่า ขนมปังที่ต่างชนิดกันนั้น มีค่าดัชนีน้ำตาลที่ต่างกัน จึงมีความเป็นไปได้ว่า ขนมปังขาวชนิดที่ผู้วิจัยใช้ และ ชนิดที่

ใกล้เคียงตามที่พบในท้องตลาดประเทศไทย อาจไม่ใช่คาร์โบไฮเดรตค่าดัชนีน้ำตาลสูงดังที่คาดการณ์กันจากข้อมูลที่ตีพิมพ์จากการใช้ขนมปังของโลกตะวันตก

นอกจากนี้ในคาร์โบไฮเดรตชนิดอื่น ๆ ก็อาจมีความแปรปรวนในลักษณะดังกล่าวที่เกิดขึ้นมาจากความแตกต่างเช่นกัน แต่ในอัตราส่วนที่น้อยกว่า ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าการตัด ชุดข้อมูลของขนมปังและข้าวกล้องออก ส่งผลให้ค่านัยยะสัมพันธ์ของการทดสอบความสัมพันธ์ทางสถิติลดลง เกือบเท่าตัว แต่การลดลงของค่าดังกล่าวก็ยังไม่มากพอที่จะยืนยันความสัมพันธ์ดังกล่าว อย่างมีนัยยะสำคัญทางสถิติ ทั้งนี้ผู้วิจัยคาดว่าปัญหาดังกล่าวเกิดจากแหล่งที่มาที่หลากหลายของค่าดัชนีน้ำตาลในคาร์โบไฮเดรตทั้งสิบสองชนิดที่ผู้วิจัยได้ทำการสืบค้นมาในตอนต้น ซึ่งมีทั้งที่ทำในประเทศไทย ทำในต่างประเทศ ทำในผู้ป่วยเบาหวาน และ ทำในคนปกติ การเทียบเคียงจากค่าดังกล่าวจึงอาจไม่เที่ยงตรงนัก แตกต่างจากการทดลองต้นฉบับที่อาศัยข้อมูลจากเอกสารวิชาการเพียงฉบับเดียวในการอ้างค่าดัชนีน้ำตาล และ ใช้วัตถุดิบที่มาจากโลกตะวันตกเช่นเดียวกัน

5.3 อาหารที่เหมาะกับการคุมน้ำตาลในเลือด

หากยึดตามข้อมูลที่ได้จากการทดลองข้อผู้วิจัยคงพอจะกล่าวได้อย่างคร่าวๆ ถึงแนวทางในการรับประทานอาหารสำหรับผู้ที่ต้องการควบคุมระดับน้ำตาลในเลือดได้ดังนี้ ควรหลีกเลี่ยง เส้นเล็ก เส้นบะหมี่กึ่งสำเร็จรูป และ ข้าวสี่ชนิด ได้แก่ ข้าวกล้องหอมมะลิ ข้าวไรซ์เบอร์รี่ย์ ข้าวหอมมะลิ และ ข้าวเหนี่ยว ถ้าหากต้องการที่จะรับประทานข้าวควรรับประทานข้าวผสมที่ได้จากการผสม ข้าวสีนิล ข้าวกล้องหอมมะลิ และ ข้าวทับทิม ซึ่งผ่านการขัดสีต่ำ เนื่องจากมีปริมาณน้ำตาลกลูโคสหลังย่อยที่ต่ำกว่าข้าวชนิดอื่น ขนมปังและเส้นสปาเก็ตตี้เป็นตัวเลือกที่ไม่เลวนัก และ เส้นบะหมี่เป็นทางเลือกที่ดีที่สุดเป็นอันดับสองรองจากเส้นวุ้นเส้น ซึ่งเป็นทางเลือกที่ดีที่สุดอันดับหนึ่ง

บทที่ 6
สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการศึกษา

การทดลองของผู้วิจัยนั้น ให้ผลการทดลองที่มีแนวโน้มที่จะสามารถนำเอาไปประยุกต์ใช้ ในการตัดสินใจเลือกบริโภคคาร์โบไฮเดรตเพื่อควบคุมระดับน้ำตาลในเลือด ได้ดังที่ตั้งเป้าหมายไว้ในวัตถุประสงค์ของการทดลอง แต่อย่างไรก็ดีวัตถุประสงค์ในอีกข้อหนึ่งที่เกี่ยวกับการทำนายค่าดัชนีน้ำตาลนั้นไม่ประสบความสำเร็จดังที่ได้คาดหมายเอาไว้ โดยผลของการทดลองครั้งนี้ไม่ได้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ทางสถิติระหว่างน้ำตาลที่ได้จากการย่อยในหลอดทดลองและค่าดัชนีน้ำตาล ตามเหตุผลที่ผู้วิจัยได้ทำการอภิปรายไว้

6.2 ข้อเสนอแนะ

6.2.1 ข้อเสนอแนะในการนำไปใช้ประโยชน์

ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าการทดลองของผู้วิจัยนั้น จะสามารถก่อให้เกิดประโยชน์ในการเป็นแนวทางการในเลือกบริโภคคาร์โบไฮเดรตที่เหมาะสม สำหรับผู้ที่ต้องการควบคุมระดับน้ำตาลในเลือด ทั้งในผู้ป่วยเบาหวาน ผู้ป่วยโรคอ้วน และ ผู้ที่ต้องการดูแลสุขภาพ โดยผลการทดลองของผู้วิจัยดังที่ผู้วิจัยได้ทำการอภิปรายไปนั้น ได้แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของปริมาณน้ำตาลที่ได้หลังการย่อยในหลอดทดลองที่แบ่งแยกคาร์โบไฮเดรตออกเป็นกลุ่มอย่างง่ายๆ เพื่อความสะดวกในการเลือกบริโภค ผู้บริโภคสามารถเลือกได้ว่าตนต้องการบริโภค อาหารในกลุ่มที่ผ่านการแปรรูปหรือไม่ และ ในแต่ละกลุ่มมีแนวโมของการให้ปริมาณน้ำตาลหลังย่อยมากน้อยเพียงใด รวมถึงผู้วิจัยยังได้ทำการเปรียบเทียบระหว่างกลุ่ม ทั้งนี้ก็เพื่อความสะดวกในการนำไปประยุกต์ใช้งาน

6.2.2 การศึกษาเพิ่มเติม

ผู้วิจัยพบว่า การศึกษาเพิ่มเติมที่น่าสนใจมีดังนี้

1. การเปรียบเทียบข้าวแต่ละชนิดโดยการใช้ปริมาตรน้ำในการหุงเท่ากัน เพื่อตัดปัจจัยในส่วนของปริมาตร เพื่อศึกษาความแตกต่างของข้าวแต่ละชนิด

2. การเปรียบเทียบระหว่างขนมปังในประเทศแทบตะวันตก และ ขนมปังในประเทศไทย เพื่อหาสาเหตุที่ค่าดัชนีน้ำตาลสวนทางกลับค่าที่ได้จากการย่อยในหลอดทดลอง
3. การเปรียบเทียบผลการย่อยในหลอดทดลองกับค่าดัชนีน้ำตาลที่ทำการวัดขึ้นเพื่อการทดลองดังกล่าวโดยเฉพาะ เพื่อให้การทำนายค่าดัชนีน้ำตาลเป็นไปได้อย่างราบรื่นขึ้น

เอกสารอ้างอิง

ภาษาไทย

วิชัย เอกพลากร, หทัยชนก พรรคเจริญ, กนิษฐา ไทยกล้า, วราภรณ์ เสถียรนพเกล้า. 2559. การสำรวจสุขภาพประชาชนไทยโดยการตรวจร่างกายครั้งที่ 5 พ.ศ.2557 [ออนไลน์] แหล่งที่มา: https://www.hsri.or.th/researcher/research/new-release/detail/7711 [23 มกราคม 2563]

ภาษาอังกฤษ

Argyri, K., Athanasatou, A., Bouga, M., & Kapsokefalou, M. 2016. The Potential of an in Vitro Digestion Method for Predicting Glycemic Response of Foods and Meals. Nutrients, 8(4), 209: 1–12 doi: 10.3390/nu8040209

Atkinson, F., Foster-Powell, K., & Brand-Miller, J. 2008. International Tables of Glycemic Index and Glycemic Load Values: 2008. Diabetes Care, 31(12): 2281–2283 doi: 10.2337/dc08-1239

Bhupathiraju, S., Tobias, D., Malik, V., Pan, A., Hruby, A., Manson, J., Willett, W., & Hu, F. 2014. Glycemic Index, Glycemic Load, and Risk of Type 2 Diabetes: Results from 3 Large US Cohorts and an Updated Meta-Analysis. The American Journal of Clinical Nutrition, 100(1): 218–232 doi: 10.3945/ajcn.113.079533

Edwards, C., Cochetel, N., Setterfield, L., Perez-Moral, N., & Warren, F. 2019. A Single-Enzyme System for Starch Digestibility Screening and Its Relevance to Understanding and Predicting the Glycemic Index of Food Products. Food & Function, 10(8): 4751–4760 doi: 10.1039/c9fo00603f

Englyst, H., & Hudson, G. 1987. Colorimetric Method for Routine Analysis of Dietary Fibre as Non-Starch Polysaccharides: A Comparison with Gas-Liquid Chromatography. Food Chemistry, 24(1): 63–76 doi: 10.1016/0308-8146(87)90084-7

Englyst, H., & Hudson, G. 1996. The Classification and Measurement of Dietary Carbohydrates. Food Chemistry, 57(1): 15–21 doi: 10.1016/0308-8146(96)00056-8

Englyst, K., Englyst, H., Hudson, G., Cole, T., & Cummings, J. 1999. Rapidly Available Glucose in Foods: An In Vitro Measurement that Reflects the Glycemic Response. The American Journal of Clinical Nutrition, 69(3): 448–454 doi: 10.1093/ajcn/69.3.448

Foster-Powell, K., Holt, S., & Brand-Miller, J. 2002. International table of glycemic index and glycemic load values: 2002. The American Journal of Clinical Nutrition, 76(1): 5–56 doi: 10.1093/ajcn/76.1.5

Gray, G. 1970. Carbohydrate Digestion and Absorption. Gastroenterology, 58(1): 96–107 doi: 10.1016/S0016-5085(70)80098-1

Jenkins, D., Wolever, T., Taylor, R., Barker, H., Fielden, H., Baldwin, J., Bowling, A., Newman, H., Jenkins, A., & Goff, D. 1981. Glycemic Index of Foods: A Physiological Basis for Carbohydrate Exchange. The American Journal of Clinical Nutrition, 34(3): 362–366 doi: 10.1093/ajcn/34.3.362

Juliano, B., Perez, C., Komindr, S., & Banphotkasem, S. 1989. Properties of Thai cooked rice and noodles differing in glycemic index in noninsulin-dependent diabetics. Plant Foods for Human Nutrition, 39(4):369-374 doi: 10.1007/bf01092074

Kaufman, N., Chasombat, S., Tanomsingh, S., Rajataramya, B., & Potempa, K. 2011 Public Health in Thailand: Emerging Focus on Non-Communicable Diseases. International Journal of Health Planning and Management, 26: e197–e212 doi: 10.1002/hpm.1078

Kim, E., Petrie, J., Motoi, L., Morgenstern, M., Sutton, K., Mishra, S., & Simmons, L. 2008. Effect of Structural and Physicochemical Characteristics of the Protein Matrix in Pasta on In Vitro Starch Digestibility. Food Biophysics, 3(2):229-234 doi: 10.1007/s11483-008-9066-7

Kosulwat, V. 2002 The Nutrition and Health Transition in Thailand. Public Health Nutrition, 5(1A):183-189 doi: 10.1079/PHN2001292

Livesey, G., Taylor, R., Livesey, H., Buyken, A., Jenkins, D., Augustine, L., Sievenpiper, J., Barclay A., Liu, S., Wolever, T., Willett, W., Brighenti, F., Salas-Salvadó, J., Björck, I., Rizkalla, S., Riccardi, G., La Vecchia, C., Ceriello, A., Trichopoulou, A., Poli, A., Astrup , A., Kendall, C., Ha, M., Baer-Sinnott, S., & Brand-Miller, J. 2019. Dietary Glycemic Index and Load and the Risk of Type 2 Diabetes: A Systematic Review and Updated Meta-Analyses of Prospective Cohort Studies. Nutrients 2019, 11(6), 1280: 1–51 doi: 10.3390/nu11061280

Pingali, P. 2004. Westernization of Asian Diets and the Transformation of Food Systems: Implications for Research and Policy. Food Policy, 32(3): 281-298 doi: 10.1016/j.foodpol.2006.08.001

Sasaki, T., Okunishi, T., Sotome, I., & Okadome, H. 2016 Effects of Milling and Cooking Conditions of Rice on In Vitro Starch Digestibility and Blood Glucose Response. Cereal Chemistry, 93(3): 242-247 doi: 10.1094/CCHEM-08-15-0155-R

Singh, J., Kaur, L., & Singh, H. 2013. Food Microstructure and Starch Digestion. Advances in food and nutrition research, 70:137-79 doi: 10.1016/B978-0-12-416555-7.00004-7

Woolnough, J., Monro, J., Brennan, C., & Bird, A. 2008. Simulating human carbohydrate digestion in vitro: A review of methods and the need for standardization. International Journal of Food Science & Technology, 43(12): 2245–2256 doi: 10.1111/j.1365-2621.2008.01862.x

ภาคผนวก

ภาคผนวก 1: ตารางการชั่งน้ำหนักคาร์โบไฮเดรต 0.25 กรัมในตัวอย่าง

การชั่งคาร์โบไฮเดรต 0.25 กรัม ในวันที่ 1

ชนิดของคาร์โบไฮเดรต	น้ำหนักก่อนทำให้สุก (g)	น้ำหนักหลังทำให้สุก (g)	% น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น	น้ำหนักแห้งที่มีคาร์โบไฮเดรต 0.25 g (g)	น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (g)	น้ำหนักสุทธิที่ชั่ง (g)
ข้าวไรซ์เบอร์รี่ย์	260	530	103.85	0.33	0.343	0.673
ข้าวกล้องหอมมะลิ	250	450	80.00	0.33	0.264	0.594
ข้าวกล้องหอมมะลิผสม	250	550	120.00	0.33	0.396	0.726
ข้าวเหนียวเขี้ยวงู	270	500	85.19	0.31	0.264	0.574
ข้าวหอมมะลิ	290	620	113.79	0.31	0.353	0.663
เส้นสปาเก็ตตี้	10	25	150	0.35	0.525	0.875
เส้นบะหมี่	8	23	188	0.33	0.619	0.949
เส้นวุ้นเส้น	5	15	200	0.33	0.660	0.990
เส้นบะหมี่กึ่งสำเร็จ	9	21	133	0.41	0.547	0.957
เส้นเล็ก	6	15	150	0.50	0.750	1.250
เส้นหมี่	5	14	180	0.40	0.720	1.120

การชั่งคาร์โบไฮเดรต 0.25 กรัม ในวันที่ 2

ชนิดของคาร์โบไฮเดรต	**น้ำหนักก่อนทำให้สุก (g)**	**น้ำหนักหลังทำให้สุก (g)**	**% น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น**	**น้ำหนักแห้งที่มีคาร์โบไฮเดรต 0.25 g (g)**	**น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (g)**	**น้ำหนักสุทธิที่ชั่ง (g)**
ข้าวไรซ์เบอร์รี่ย์	270	550	103.70	0.33	0.342	0.672
ข้าวกล้องหอมมะลิ	260	460	76.92	0.33	0.254	0.584
ข้าวกล้องหอมมะลิผสม	50	94	88.00	0.33	0.290	0.620
ข้าวเหนียวเขี้ยวงู	270	500	85.19	0.31	0.264	0.574
ข้าวหอมมะลิ	280	580	107.14	0.31	0.332	0.642
เส้นสปาเก็ตตี้	8	20	150.00	0.35	0.525	0.875
เส้นบะหมี่	8	21	163.00	0.33	0.536	0.866
เส้นวุ้นเส้น	5	15	200.00	0.33	0.660	0.990
เส้นบะหมี่กึ่งสำเร็จ	5	13	160.00	0.41	0.656	1.066
เส้นเล็ก	8	16	100.00	0.50	0.500	1.000
เส้นหมี่	5	11	120.00	0.40	0.480	0.880

การชั่งคาร์โบไฮเดรต 0.25 กรัม ในวันที่ 3

ชนิดของคาร์โบไฮเดรต	**น้ำหนักก่อนทำให้สุก (g)**	**น้ำหนักหลังทำให้สุก (g)**	**% น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น**	**น้ำหนักแห้งที่มีคาร์โบไฮเดรต 0.25 g (g)**	**น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (g)**	**น้ำหนักสุทธิที่ชั่ง (g)**
ข้าวไรซ์เบอร์รี่ย์	260	560	115.38	0.33	0.381	0.711
ข้าวกล้องหอมมะลิ	250	460	84.00	0.33	0.277	0.607
ข้าวกล้องหอมมะลิผสม	260	595	128.85	0.33	0.425	0.755
ข้าวเหนียวเขี้ยวงู	270	500	85.19	0.31	0.264	0.574
ข้าวหอมมะลิ	280	600	114.29	0.31	0.354	0.664
เส้นสปาเก็ตตี้	5	12	140.00	0.35	0.490	0.840
เส้นบะหมี่	6	17	183.00	0.33	0.605	0.935
เส้นวุ้นเส้น	5	17	240.00	0.33	0.792	1.122
เส้นบะหมี่กึ่งสำเร็จ	8	19	138.00	0.41	0.564	0.974
เส้นเล็ก	5	9	80.00	0.50	0.400	0.900
เส้นหมี่	5	14	180.00	0.40	0.720	1.120

ภาคผนวก 2: ผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อแยกกลุ่มคาร์โบไฮเดรตโดยการคำนวณทางสถิติแบบ Duncan

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติภายในกลุ่มข้าว

ชนิดของคาร์โบไฮเดรต		**ปริมาณน้ำตาลหลังย่อยของคาร์โบไฮเดรตท (มิลลิกรัม/มิลลิลิตร)**					Two-way ANOVA with Duncan post-hoc test
ภาษาไทย	**ภาษาอังกฤษ**	**0 นาที**	**30 นาที**	**60 นาที**	**90 นาที**	**120 นาที**	
ข้าวไรซ์เบอร์รี่ย์	Riceberry	2.62±0.51	6.00±0.24	6.50±0.17	7.09±0.06	7.40±0.10	a,b
ข้าวกล้องหอมมะลิ	Brown Rice	3.59±0.15	6.41±0.27	7.04±0.27	7.41±0.18	7.61±0.19	b
ข้าวกล้องหอมมะลิผสม	Mixed Rice	3.33±0.23	5.53±0.45	5.96±0.39	6.41±0.24	6.47±0.40	a
ข้าวเหนียวเขี้ยวงู	Sticky RIce	2.31±0.46	6.74±0.52	6.97±0.61	6.89±0.77	7.07±0.62	a,b
ข้าวหอมมะลิ	Jasmine Rice	2.40±0.32	6.25±0.17	7.00±0.26	7.16±0.20	7.77±0.27	b

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติภายในกลุ่มคาร์โบไฮเดรตแปรรูป

ชนิดของคาร์โบไฮเดรต		**ปริมาณน้ำตาลหลังย่อยของคาร์โบไฮเดรตท (มิลลิกรัม/มิลลิลิตร)**					**Two-way ANOVA with Duncan post-hoc test**
ภาษาไทย	**ภาษาอังกฤษ**	**0 นาที**	**30 นาที**	**60 นาที**	**90 นาที**	**120 นาที**	
ขนมปัง	Bread	3.57±0.27	5.94±0.23	6.17±0.33	6.24±0.14	6.95±0.04	c,d
เส้นสปาเก็ตตี้	Spaghetti	3.14±0.05	5.66±0.28	6.18±0.37	6.67±0.59	6.94±0.59	c
เส้นบะหมี่	Egg Noodle	3.06±0.12	5.43±0.13	5.58±0.27	5.84±0.32	6.01±0.35	b
เส้นวุ้นเส้น	Mung Bean Noodle	1.35±0.06	3.49±0.14	4.34±0.07	5.10±0.10	5.62±0.14	a
เส้นบะหมี่กึ่งสำเร็จ	Instant Noodle	3.95±0.20	6.79±0.39	7.52±0.45	7.88±0.51	8.17±0.55	e
เส้นเล็ก	Rice Noodle	2.79±0.34	6.27±0.31	7.55±0.30	8.13±0.15	9.35±0.21	e
เส้นหมี่	Fine Rice Noodle	3.07±0.20	6.41±0.47	6.62±0.49	7.24±0.50	7.58±0.52	d

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติระหว่างกลุ่ม

ชนิดของคาร์โบไฮเดรต		ปริมาณน้ำตาลหลังย่อยของคาร์โบไฮเดรตท (มิลลิกรัม/มิลลิลิตร)					Two-way ANOVA with Duncan post-hoc test
ภาษาไทย	ภาษาอังกฤษ	0 นาที	30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที	
ข้าวไรซ์เบอร์รี่	Riceberry	2.62±0.51	6.00±0.24	6.50±0.17	7.09±0.06	7.40±0.10	c,d,e
ข้าวกล้องหอมมะลิ	Brown Rice	3.59±0.15	6.41±0.27	7.04±0.27	7.41±0.18	7.61±0.19	e
ข้าวกล้องหอมมะลิผสม	Mixed Rice	3.33±0.23	5.53±0.45	5.96±0.39	6.41±0.24	6.47±0.40	b,c
ข้าวเหนียวเขี้ยวงู	Sticky RIce	2.31±0.46	6.74±0.52	6.97±0.61	6.89±0.77	7.07±0.62	c,d,e
ข้าวหอมมะลิ	Jasmine Rice	2.40±0.32	6.25±0.17	7.00±0.26	7.16±0.20	7.77±0.27	d,e
ขนมปัง	Bread	**3.57±0.27**	5.94±0.23	6.17±0.33	6.24±0.14	6.95±0.04	c,d
เส้นสปาเก็ตตี้	Spaghetti	3.14±0.05	5.66±0.28	6.18±0.37	6.67±0.59	6.94±0.59	c,d
เส้นบะหมี่	Egg Noodle	3.06±0.12	5.43±0.13	5.58±0.27	5.84±0.32	6.01±0.35	b
เส้นวุ้นเส้น	Mung Bean Noodle	1.35±0.06	3.49±0.14	4.34±0.07	5.10±0.10	5.62±0.14	a
เส้นบะหมี่กึ่งสำเร็จ	Instant Noodle	3.95±0.20	6.79±0.39	7.52±0.45	7.88±0.51	8.17±0.55	f
เส้นเล็ก	Rice Noodle	2.79±0.34	6.27±0.31	7.55±0.30	8.13±0.15	9.35±0.21	f
เส้นหมี่	Fine Rice Noodle	3.07±0.20	6.41±0.47	6.62±0.49	7.24±0.50	7.58±0.52	d,e