การผลิตมอลโทเด็กซ์ทรินจากมันสำปะหลังที่มีฤดูเก็บเกี่ยวต่างกันและสมบัติทางเคมีกายภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้

นางสาวรุ่งนภา ศรีวิกุล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PRODUCTION OF MALTODEXTRINS FROM CASSAVA WITH DIFFERENT HARVESTING SEASONS AND THEIR PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES

Miss Rungnapa Sriwikul

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Food Technology
Department of Food Technology
Faculty of Science
Chulalongkorn University
Academic Year 2015
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การผลิตมอลโทเด็กซ์ทรินจากมันสำปะหลังที่มีฤดูเก็บเกี่ยวต่างกันและสมบัติทางเคมีกายภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้
โดย	นางสาวรุ่งนภา ศรีวิกุล
สาขาวิชา	เทคโนโลยีทางอาหาร
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ขนิษฐา ธนานุวงศ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร.จิรารัตน์ อนันตกูล

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

....ประธานกรรมการ

(อาจารย์ ดร.ดริษ กวักเพฑูรย์)

....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.ขนิษฐา ธนานุวงศ์)

....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์ ดร.จิรารัตน์ อนันตกูล)

....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนจันทร์ มหาวนิช)

....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร.ณัฐิญา ดียิ่ง)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รุ่งนภา ศรีวิกุล : การผลิตมอลโทเด็กซ์ทรินจากมันสำปะหลังที่มีฤดูเก็บเกี่ยวต่างกันและสมบัติทางเคมีกายภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ (PRODUCTION OF MALTODEXTRINS FROM CASSAVA WITH DIFFERENT HARVESTING SEASONS AND THEIR PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.ขนิษฐา ธนานุวงศ์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: รศ. ดร.จิรารัตน์ อนันตกูล, 85 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากระบวนการผลิตมอลโทเด็กซ์ทริน (MD) จากสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผลิตจากหัวมันสำปะหลังที่มีฤดูการเก็บเกี่ยวต่างกัน หาภาวะที่เหมาะสมในการผลิต MD โดยใช้เอนไซม์ให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีค่า DE 3 ระดับ คือ ต่ำ (DE < 5) กลาง (DE 10 - 15) และสูง (DE 18 - 20) และวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ตัวอย่างสตาร์ชที่ใช้ผลิตจากหัวมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูแล้งและฤดูฝน พบว่าสตาร์ชทั้ง 2 ชนิดมีองค์ประกอบทางเคมีใกล้เคียงกัน แต่สตาร์ชที่ผลิตจากหัวมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูแล้งมีค่า peak viscosity, breakdown และ setback สูงกว่า แต่มีค่า pasting temperature, onset และ peak gelatinization temperature ต่ำกว่าสตาร์ชที่ผลิตจากหัวมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูฝน ($p \leq 0.05$) การผลิต MD ใช้เอนไซม์กลุ่ม thermostable α-amylase ที่จำหน่ายทางการค้า 2 ชนิด ย่อยน้ำแป้ง 30% ที่ 95 °C ใช้ความเข้มข้นของเอนไซม์ ปริมาณแคลเซียมอิออนและค่า pH ที่ดีที่สุดของเอนไซม์แต่ละชนิด ย่อยตัวอย่างเป็นเวลา 15 - 150 นาที ที่เวลาการย่อยเท่ากันพบว่าชนิดของสตาร์ชไม่มีอิทธิพลต่อค่า DE ของ MD ที่ได้ ($p > 0.05$) ยกเว้นที่เวลาในการย่อย 120 นาที แต่ชนิดของเอนไซม์มีผลต่อค่า DE ที่ได้ ($p \leq 0.05$) เวลาที่เหมาะสมในการย่อยสตาร์ชเพื่อผลิต MD ที่มีค่า DE ต่ำและกลางคือ 15 และ 90 นาที ตามลำดับ สำหรับการผลิต MD ที่มีค่า DE สูงใช้เอนไซม์ thermostable α-amylase ทางการค้า 2 ชนิด ย่อยขั้นแรกเป็นเวลา 90 นาทีแล้วจึงใช้ glucoamylase ทางการค้า 2 ชนิด ย่อยขั้นที่สองให้ได้ค่า DE ที่ต้องการ ทำแห้ง MD ที่ผลิตได้ด้วยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย ได้ MD ผงที่มีความชื้น 2.11 - 4.30% และค่าผลผลิต 21.98 - 40.72% จากข้อมูลการกระจายของสายโซ่กิ่งก้านที่เป็นองค์ประกอบ (chain length distribution) ของมอลโทเด็กซ์ทริน พบว่า เมื่อค่า DE เพิ่มขึ้น น้ำตาลโมเลกุลเล็กมีสัดส่วนเพิ่มขึ้นแต่โอลิโกแซคคาไรด์สายยาวมีสัดส่วนลดลง MD ในกลุ่ม DE เดียวกันที่ผลิตจากสตาร์ชและเอนไซม์ต่างชนิดมีรูปแบบการกระจายของสายโซ่กิ่งก้านต่างกันเล็กน้อย เมื่อพิจารณาสมบัติทางกระแสวิทยาของสารละลายMD DE ต่ำ กลาง และสูง ความเข้มข้น 20% และ 30% พบว่าสารละลายทุกตัวอย่างแสดงพฤติกรรมการไหลเป็น Newtonian ยกเว้นสารละลาย MD DE ต่ำ ความเข้มข้น 30% แสดงพฤติกรรมการไหลเป็น pseudoplastic และพบว่าที่ความเข้มข้นเดียวกันเมื่อค่า DE เพิ่มขึ้น ค่าความหนืด (η) มีแนวโน้มลดลง เมื่อวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของสารละลาย MD ความเข้มข้น 30% พบว่าเมื่อ MD มีค่า DE สูงขึ้น สารละลายที่เตรียมได้มีค่า glass transition temperature of maximally freeze-concentrated unfrozen phase (T_g') ต่ำลงแต่มีค่า unfrozen water สูงขึ้น และพบค่าเอนทาลปีของการหลอมผลึกเนื่องจากรีโทรกราเดชันในสารละลาย MD ที่มีค่า DE ต่ำเท่านั้น เมื่อพิจารณา sorption isotherm พบว่า ที่ a_w 0.11 - 0.56 MD มีพฤติกรรมการดูดความชื้นคล้ายกันในทุกตัวอย่าง แต่ที่ a_w 0.75 - 0.92 MD ผงที่มีค่า DE สูงขึ้นมีแนวโน้มในการดูดความชื้นได้ดีขึ้นด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าตัวอย่างในกลุ่ม DE เดียวกันที่ผลิตจากสตาร์ชและเอนไซม์ต่างชนิดมีสมบัติทางกระแสวิทยา สมบัติทางความร้อนและพฤติกรรมการดูดความชื้นที่คล้ายกันด้วย

ภาควิชา	เทคโนโลยีทางอาหาร	ลายมือชื่อนิสิต	....
สาขาวิชา	เทคโนโลยีทางอาหาร	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก	....
ปีการศึกษา	2558	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม	....

5772122823 : MAJOR FOOD TECHNOLOGY
KEYWORDS: CASSAVA STARCH; HARVESTING SEASON; PROPERTIES; MALTODEXTRIN; ALPHA-AMYLASE

RUNGNAPA SRIWIKUL: PRODUCTION OF MALTODEXTRINS FROM CASSAVA WITH DIFFERENT HARVESTING SEASONS AND THEIR PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES. ADVISOR: ASSOC. PROF. KANITHA TANANUWONG, Ph.D., CO-ADVISOR: ASSOC. PROF.JIRARAT ANUNTAGOOL, Ph.D., 85 pp.

This research aimed to study production of maltodextrins (MDs) from cassava with different harvesting seasons, to determine suitable conditions for preparing low-DE (DE < 5), mid-DE (DE 10 - 15) and high-DE (DE 18 - 20) MD using enzymes, and to determine their physicochemical properties. Starch samples were prepared from cassava roots harvested in dry and rainy season. Results showed that both starch samples had similar chemical compositions, but they had different pasting and thermal properties determined by Rapid Visco-Analyzer (RVA) and differential scanning calorimeter (DSC), respectively. Starch from dry season cassava had higher RVA peak viscosity, breakdown, and setback but lower RVA pasting temperature, DSC onset and peak gelatinization temperature than rainy season cassava starch ($p \leq 0.05$). Production of MDs from both starch samples was conducted using two types of commercial thermostable α-amylases. Hydrolysis of 30% starch slurry was done at 95 °C. For each type of the enzyme, optimum concentration of enzyme and calcium ion in the suspension, as well as pH of the suspension were used. Hydrolysis time was varied within 15 - 150 minutes. At any given hydrolysis time, type of starch did not affect dextrose equivalent (DE) of the MDs ($p > 0.05$) except at 120 minutes hydrolysis time. However, type of enzyme influenced the DE ($p \leq 0.05$). Hydrolysis time for producing low-DE and mid-DE MDs from both starch samples was 15 and 90 minutes, respectively. In preparation for high-DE MD, two types of commercial thermostable α-amylases were used for first step of hydrolysis (90 min hydrolysis time). Then two types of commercial glucoamylases were used for second step of hydrolysis (15 - 30 min hydrolysis time). MDs were dried by spray dryer. Dried MDs had 2.11 - 4.30% moisture content and 21.98 - 40.72% yield. The data of chain length distribution showed that when DE increased, proportion of low molecular weight saccharides increased, but that of long chain oligosaccharides decreased. MDs with similar DE prepared from different starch and enzyme types had similar chain length distribution pattern. Flow behavior of 20% and 30% MD solutions was Newtonian except 30% low-DE MD solution exhibited pseudoplastic behavior. At the same concentration, viscosity (η) tended to decrease as DE increased. For thermal properties, as DE increased, glass transition temperature of maximally freeze-concentrated unfrozen phase (T_g') of 30% MD solutions decreased while unfrozen water increased. Moreover, enthalpy of retrogradation was found only in low-DE MD solutions. At a_w 0.11 - 0.56, all samples had similar sorption isotherm; however, at a_w 0.75 - 0.92, the higher DE MDs tended to be more hygroscopic. In addition, MDs from different starch and enzyme types, at the same DE level, had similar rheological and thermal properties as well as sorption isotherm.

Department:	Food Technology	Student's Signature	....
Field of Study:	Food Technology	Advisor's Signature	....
Academic Year:	2015	Co-Advisor's Signature	....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้โดยความกรุณาอย่างยิ่งของรองศาสตราจารย์ ดร.ขนิษฐา ธนานุวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.จิรารัตน์ อนันตกูล อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาสละเวลามาให้คำปรึกษา แนะนำ ช่วยเหลือ และให้กำลังใจตลอดระยะเวลาการดำเนินงานวิจัย รวมทั้งช่วยชี้แนะปรับปรุงวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.ดริษ กวักเพฑูรย์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนจันทร์ มหาวนิช และ ดร.ญัฐิญา ดียิ่ง ที่ให้ความกรุณาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รวมทั้งช่วยชี้แนะปรับปรุงวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ บริษัท เยนเนรัล สตาร์ช จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์สตาร์ชมันสำปะหลังและมอลโทเด็กซ์ทรินทางการค้าที่ใช้ในงานวิจัย รวมทั้งสนับสนุนทุนวิจัย

ขอขอบพระคุณทุนสนับสนุนงานวิจัยจากโครงการพัฒนาศักยภาพบุคลากรเพื่อการวิจัยและพัฒนา สำหรับภาคอุตสาหกรรม (NUI-RC) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)

ขอบขอบคุณเพื่อน ๆ ในระดับปริญญาโท และพี่ ๆ ในระดับปริญญาเอก รวมทั้งเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการในภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหารทุกท่าน ที่คอยให้ความช่วยเหลือ ชี้แนะการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในงานวิจัย และให้กำลังใจตลอดระยะเวลาการดำเนินงานวิจัย

ท้ายที่สุด ขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัว ที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .... จ
กิตติกรรมประกาศ .... ฉ
สารบัญ .... ช
สารบัญตาราง .... ฌ
สารบัญรูป .... ฎ
บทที่ 1 บทนำ 1
บทที่ 2 วารสารปริทัศน์ 3
2.1 สตาร์ชมันสำปะหลัง 3
2.2 มอลโทเด็กซ์ทริน 4
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตมอลโทเด็กซ์ทรินจากสตาร์ชชนิดต่าง ๆ และสมบัติของมอลโทเด็กซ์ทรินที่ผลิตได้ 7
2.4 การเปลี่ยนสถานะของอาหารในขณะแช่แข็ง 12
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย 16
3.1 วัตถุดิบ 16
3.2 อุปกรณ์ 16
3.3 ขั้นตอนและวิธีการทดลอง 17
บทที่ 4 ผลและวิจารณ์การทดลอง 25
4.1 สมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผลิตจากหัวมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูแล้งและฤดูฝน 25
4.2 การผลิตมอลโทเด็กซ์ทรินจากสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผลิตจากหัวมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูแล้งและฤดูฝนโดยใช้ thermostable α-amylase 27

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

4.3 การเตรียมมอลโทเด็กซ์ทรินผง วิเคราะห์โครงสร้างและสมบัติของมอลโทเด็กซ์ทรินผงที่ผลิตได้ 30

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 50

รายการอ้างอิง 52

ภาคผนวก ก วิธีวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี 56

ภาคผนวก ข วิธีวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ 67

ภาคผนวก ค ข้อมูลผลการทดลองเพิ่มเติม 75

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 85

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 ภาวะที่ใช้ในการผลิตมอลโทเด็กซ์ทริน DE ต่ำและกลางสำหรับเอนไซม์แต่ละชนิด......18

ตารางที่ 3.2 ภาวะที่ใช้ในการผลิตมอลโทเด็กซ์ทริน DE สูงสำหรับเอนไซม์แต่ละชนิด......19

ตารางที่ 4.1 ผลของฤดูการเก็บเกี่ยวหัวมันสำปะหลังต่อองค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชมันสำปะหลัง......25

ตารางที่ 4.2 ผลของฤดูการเก็บเกี่ยวหัวมันสำปะหลังต่อสมบัติของเพสต์ขณะร้อนและเย็นของสตาร์ชมันสำปะหลัง......27

ตารางที่ 4.3 ผลของฤดูการเก็บเกี่ยวหัวมันสำปะหลังต่อสมบัติทางความร้อนของสตาร์ชมันสำปะหลัง......27

ตารางที่ 4.4 ผลของชนิดเอนไซม์ต่อค่า DE ของมอลโทเด็กซ์ทรินจากสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผลิตจากมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูแล้งและฤดูฝน......29

ตารางที่ 4.5 ร้อยละผลผลิต ความชื้น และค่า DE ของมอลโทเด็กซ์ทรินผงที่มี DE ต่ำ......31

ตารางที่ 4.6 ร้อยละผลผลิต ความชื้น และค่า DE ของมอลโทเด็กซ์ทรินผงที่มี DE กลาง......31

ตารางที่ 4.7 ร้อยละผลผลิต ความชื้น และค่า DE ของมอลโทเด็กซ์ทรินผงที่มี DE สูง......32

ตารางที่ 4.8 รูปแบบการกระจายของสายโซ่กิ่งก้านที่เป็นองค์ประกอบของมอลโทเด็กซ์ทริน DE ต่ำ......33

ตารางที่ 4.9 รูปแบบการกระจายของสายโซ่กิ่งก้านที่เป็นองค์ประกอบของมอลโทเด็กซ์ทริน DE กลาง......34

ตารางที่ 4.10 รูปแบบการกระจายของสายโซ่กิ่งก้านที่เป็นองค์ประกอบของมอลโทเด็กซ์ทริน DE สูง......35

ตารางที่ 4.11 ค่า η, K และ n ของสารละลายมอลโทเด็กซ์ทริน DE ต่ำ ความเข้มข้น 20% และ 30%......39

ตารางที่ 4.12 ค่า η ของสารละลายมอลโทเด็กซ์ทริน DE กลาง ความเข้มข้น 20% และ 30%......40

ตารางที่ 4.13 ค่า η ของสารละลายมอลโทเด็กซ์ทริน DE สูง ความเข้มข้น 20% และ 30%......41

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4.14 สมบัติทางความร้อนของสารละลายมอลโทเด็กซ์ทริน DE ต่ำ ความเข้มข้น 30%......42

ตารางที่ 4.15 สมบัติทางความร้อนของสารละลายมอลโทเด็กซ์ทริน DE กลาง ความเข้มข้น 30%......43

ตารางที่ 4.16 สมบัติทางความร้อนของสารละลายมอลโทเด็กซ์ทริน DE สูง ความเข้มข้น 30%......44

ตารางที่ ก.1 การปรับ gradient ของ sodium acetate สำหรับคอลัมน์ PA-1 66

ตารางที่ ข.1 Temperature profile 68

ตารางที่ ข.2 อัตราส่วนเกลือต่อน้ำที่ใช้ในการเตรียมสารละลายเกลืออิ่มตัวชนิดต่าง ๆ......74

ตารางที่ ค.1 ค่า η ของสารละลายมอลโทเด็กซ์ทริน DE ต่ำและกลาง ความเข้มข้น 20% ที่ผลิตจากเอนไซม์ต่างชนิด 81

ตารางที่ ค.2 ค่า η ของสารละลายมอลโทเด็กซ์ทริน DE ต่ำและกลาง ความเข้มข้น 20% ที่ผลิตจากสตาร์ชต่างชนิด......81

ตารางที่ ค.3 ค่า K และ n ของสารละลายมอลโทเด็กซ์ทริน DE ต่ำ ความเข้มข้น 30% ที่ผลิตจากเอนไซม์และสตาร์ชต่างชนิด......82

ตารางที่ ค.4 ค่า T_g' ของสารละลายมอลโทเด็กซ์ทริน DE ต่ำและกลาง ความเข้มข้น 30% ที่ผลิตจากสตาร์ชต่างชนิด......82

ตารางที่ ค.5 ค่า T_g' ของสารละลายมอลโทเด็กซ์ทริน DE ต่ำและกลาง ความเข้มข้น 30% ที่ผลิตจากเอนไซม์ต่างชนิด......83

ตารางที่ ค.6 ค่า T_g' ของสารละลายมอลโทเด็กซ์ทริน DE สูง ความเข้มข้น 30% ที่ผลิตจากเอนไซม์และสตาร์ชต่างชนิด 83

ตารางที่ ค.7 ค่า frozen water ของสารละลายมอลโทเด็กซ์ทริน DE ต่ำ กลาง และสูง ความเข้มข้น 30% ที่ผลิตจากเอนไซม์ต่างชนิด......84

ตารางที่ ค.8 ค่า ΔH_r ของสารละลายมอลโทเด็กซ์ทริน DE ต่ำ ความเข้มข้น 30% ที่ผลิตจากเอนไซม์ต่างชนิด......84

ตารางที่ ค.9 ค่า ΔH_r ของสารละลายมอลโทเด็กซ์ทริน DE ต่ำ ความเข้มข้น 30% ที่ผลิตจากสตาร์ชต่างชนิด 84

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 กระบวนการผลิตมอลโทเด็กซ์ทรินโดยใช้เอนไซม์กลุ่ม α-amylase ในอุตสาหกรรม 5

รูปที่ 2.2 แผนภาพแสดงสถานะของสารละลายน้ำตาลซูโครสที่อุณหภูมิและความเข้มข้นต่าง ๆ..... 13

รูปที่ 2.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงสถานะของสารละลาย (สลล.) ระหว่างการลดอุณหภูมิลงจนเกิดผลึกน้ำแข็งมากที่สุด และเมทริกซ์สารละลายเปลี่ยนเป็นสถานะคล้ายแก้ว..................................... 14

รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงการเตรียมตัวอย่างมอลโทเด็กซ์ทรินที่มีค่า DE ต่ำและกลาง 20

รูปที่ 3.2 แผนผังแสดงการเตรียมตัวอย่างมอลโทเด็กซ์ทรินที่มีค่า DE สูง....................................... 21

รูปที่ 4.1 ค่า DE ของมอลโทเด็กซ์ทรินจากสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผลิตจากมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูแล้งและฤดูฝน และผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์ thermostable α-amylase ที่มีจำหน่ายทางการค้า 2 ชนิดเป็นเวลาต่าง ๆ.. 29

รูปที่ 4.2 sorption isotherm ที่ 30 °C ของมอลโทเด็กซ์ทรินผงที่มีค่า DE ต่ำ............................. 47

รูปที่ 4.3 sorption isotherm ที่ 30 °C ของมอลโทเด็กซ์ทรินผงที่มีค่า DE กลาง.......................... 47

รูปที่ 4.4 sorption isotherm ที่ 30 °C ของมอลโทเด็กซ์ทรินผงที่มีค่า DE สูง 48

รูปที่ 4.5 sorption isotherm ที่ 30 °C ของมอลโทเด็กซ์ทรินผงที่มีค่า DE ต่ำ กลาง และสูง 49

รูปที่ ก.1 กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสกับค่าการดูดกลืนแสงที่ 745 nm 63

รูปที่ ข.1 DSC thermogram ของสารละลายมอลโทเด็กซ์ทริน DE กลางความเข้มข้น 30% จากมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูฝนที่ผลิตโดยเอนไซม์ชนิด non-GMO... 71

รูปที่ ค.1 รูปแบบการกระจายของสายโซ่กิ่งก้านที่เป็นองค์ประกอบของมอลโทเด็กซ์ทริน DE ต่ำ (ก) กลาง (ข) และสูง (ค) จากมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูแล้งที่ผลิตโดยเอนไซม์ชนิด GMO........ 75

รูปที่ ค.2 รูปแบบการกระจายของสายโซ่กิ่งก้านที่เป็นองค์ประกอบของมอลโทเด็กซ์ทริน DE ต่ำ (ก) กลาง (ข) และสูง (ค) จากมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูแล้งที่ผลิตโดยเอนไซม์ชนิด non-GMO... 76

รูปที่ ค.3 รูปแบบการกระจายของสายโซ่กิ่งก้านที่เป็นองค์ประกอบของมอลโทเด็กซ์ทริน DE ต่ำ (ก) กลาง (ข) และสูง (ค) จากมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูฝนที่ผลิตโดยเอนไซม์ชนิด GMO 77

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ ค.4 รูปแบบการกระจายของสายโซ่กิ่งก้านที่เป็นองค์ประกอบของมอลโทเด็กซ์ทริน DE ต่ำ (ก) กลาง (ข) และสูง (ค) จากมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูฝนที่ผลิตโดยเอนไซม์ชนิด non-GMO 78

รูปที่ ค.5 รูปแบบการกระจายของสายโซ่กิ่งก้านที่เป็นองค์ประกอบของมอลโทเด็กซ์ทรินทางการค้า; CL1 (ก) CL2 (ข) CM1 (ค) และ CM2 (ง) 79

รูปที่ ค.6 DSC thermogram ของสารละลายมอลโทเด็กซ์ทริน DE ต่ำ (ก) กลาง (ข) และสูง (ค) ความเข้มข้น 30% จากมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูฝนที่ผลิตโดยเอนไซม์ชนิด non-GMO 80

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 1
บทนำ

มอลโทเด็กซ์ทรินเป็นผลิตภัณฑ์ในกลุ่มของอนุพันธ์ที่ได้จากการย่อยสลายแป้ง (starch hydrolysates) ประกอบด้วยโมเลกุล D-glucose เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α-(1,4) และ α-(1,6) ซึ่งมีค่าสมมูลเด็กซ์โทรส (dextrose equivalent, DE) ไม่เกิน 20 สามารถละลายในน้ำเย็น ไม่มีความหวานหรือมีความหวานน้อย และไม่ดูดความชื้น (non-hygroscopic characteristic) สามารถอยู่ทั้งในรูปของผงแห้ง (dried powder) หรือของเหลวเข้มข้น (concentrated liquid) จัดเป็นส่วนผสมที่มีหน้าที่หลากหลายและมีการใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น ใช้ในการผลิตผงปรุงรสกลุ่ม spray-dried encapsulated powders โดยจะช่วยกักเก็บกลิ่นรส ใช้เป็นสารเพิ่มปริมาณ (bulking agent) ในอาหารผง เช่น เครื่องดื่มผง ซอส/น้ำเกรวี่ผง แป้งเค้กหรือคุกกี้สำเร็จรูป ใช้เป็นสารเพิ่มกลิ่นรส (flavor enhancer) และใช้เป็นสารทดแทนไขมัน (fat replacer) ทั้งนี้การใช้งานจะขึ้นกับค่า DE ของผลิตภัณฑ์ (Wang และ Wang, 2000; กล้าณรงค์ ศรีรอต และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2546) กระบวนการผลิตมอลโทเด็กซ์ทรินสามารถแบ่งได้เป็น 2 รูปแบบ คือ ใช้กรดร่วมกับความร้อนสูง และใช้เอนไซม์กลุ่ม thermostable α-amylase โดยการใช้เอนไซม์ในการผลิตมอลโทเด็กซ์ทรินนั้น เอนไซม์จะตัดพันธะ α-(1,4) ของแอมิโลสในแป้ง (Marchal และคณะ, 1999) โดยจะตัดได้มากหรือน้อยขึ้นกับภาวะในการผลิต เช่น ความเข้มข้นของน้ำแป้ง เอนไซม์ และแคลเซียมอิออน อุณหภูมิ ค่า pH และเวลาในการผลิต เป็นต้น ยิ่งพันธะถูกตัดมาก ค่า DE จะยิ่งสูงขึ้น

มันสำปะหลังจัดเป็นวัตถุดิบเริ่มต้นที่มีราคาถูกและนิยมนำมาผลิตเป็นแป้งและอนุพันธ์จากแป้งในประเทศไทย มันสำปะหลังเป็นพืชที่ปลูกมากเป็นอันดับสามในประเทศไทยรองจากข้าวและอ้อย ในปี พ.ศ. 2555 - 2559 ประเทศไทยมีพื้นที่การเก็บเกี่ยวมันสำปะหลังเพิ่มขึ้นจาก 7,911,323 เป็น 8,829,038 ไร่ ผลผลิตหัวมันสำปะหลังเพิ่มขึ้นจาก 26,601,090 เป็น 32,942,373 ตัน (สมาคมการค้ามันสำปะหลังไทย, 2559ก) และในปี พ.ศ. 2549 - 2558 ประเทศไทยส่งออกมันเส้นเพิ่มขึ้นจากปริมาณ 3,967,125 ตันเป็น 7,424,891 ตัน และแป้งมันสำปะหลังเพิ่มขึ้นจากปริมาณ 2,308,033 เป็น 3,828,468 ตัน (สมาคมการค้ามันสำปะหลังไทย, 2559ข) สตาร์ชมันสำปะหลังไม่มี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย CHULALONGKORN UNIVERSITY

ความหลากหลายของปริมาณแอมิโลสอย่างมากเหมือนกับข้าวโพด (0 - 70% ตามพันธุ์ข้าวโพด) และข้าว (0 - 40% ตามพันธุ์ข้าว) (Breuninger และคณะ, 2009) อย่างไรก็ดี Sriroth และคณะ (2000) พบว่าหัวมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวต่างฤดู (ฤดูแล้งและฤดูฝน) จะให้สตาร์ชที่มีโครงสร้างและสมบัติทางเคมีกายภาพ เช่น การให้ความหนืดและเนื้อสัมผัสของเจลที่ต่างกันด้วย แต่ยังไม่พบงานวิจัยที่รายงานถึงผลของสตาร์ชมันสำปะหลังที่มีสมบัติต่างกัน (เนื่องจากมีสายพันธุ์ต่างกัน และ/หรือฤดูเก็บเกี่ยวต่างกัน) ต่อสมบัติของมอลโทเด็กซ์ทรินที่ผลิตได้

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อศึกษากระบวนการผลิตมอลโทเด็กซ์ทรินจากสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผลิตจากหัวมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูที่ต่างกัน (ฤดูแล้งและฤดูฝน) โดยใช้เอนไซม์กลุ่ม thermostable α-amylase หาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตมอลโทเด็กซ์ทรินที่มีค่า DE 3 ระดับ ได้แก่ ต่ำ (DE $<$ 5) กลาง (DE 10 - 15) และสูง (DE 18 - 20) และวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ข้อมูลที่ได้จะเป็นประโยชน์ในการควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์และสามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานเพื่อการต่อยอดสู่การผลิตในระดับอุตสาหกรรมได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 2
วารสารปริทัศน์

2.1 สตาร์ชมันสำปะหลัง

มันสำปะหลัง (*Manihot esculenta* Crantz) เป็นพืชที่มีความสำคัญของไทยเป็นอันดับสามรองจากข้าวและอ้อย (Sriroth และคณะ, 2000) ซึ่งมีส่วนเนื้อที่มีแป้งอยู่ 25.87 - 41.88% โดยน้ำหนัก สามารถนำมาสกัดแยกเป็นสตาร์ชออกมาได้ (มูลนิธิสถาบันพัฒนามันสำปะหลังแห่งประเทศไทย, 2543) มันสำปะหลังจะปลูกในช่วงเดือนพฤศจิกายนถึงมกราคมถือเป็นช่วงปลายฝน (late rain crop) หรือฤดูแล้งและช่วงเดือนกุมภาพันธุ์ถึงเมษายนถือเป็นช่วงต้นฝน (early rain crop) หรือฤดูฝนและจะเก็บเกี่ยวหลังปลูกแล้ว 10 - 12 เดือน ซึ่งภาวะแวดล้อมในการเพาะปลูกและก่อนการเก็บเกี่ยว เช่น ปริมาณน้ำฝน ช่วงเวลาในการเก็บเกี่ยว มีผลต่อคุณภาพของสตาร์ชมันสำปะหลังที่ได้ (Sriroth และคณะ, 2000; กล้าณรงค์ ศรีรอต และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2546)

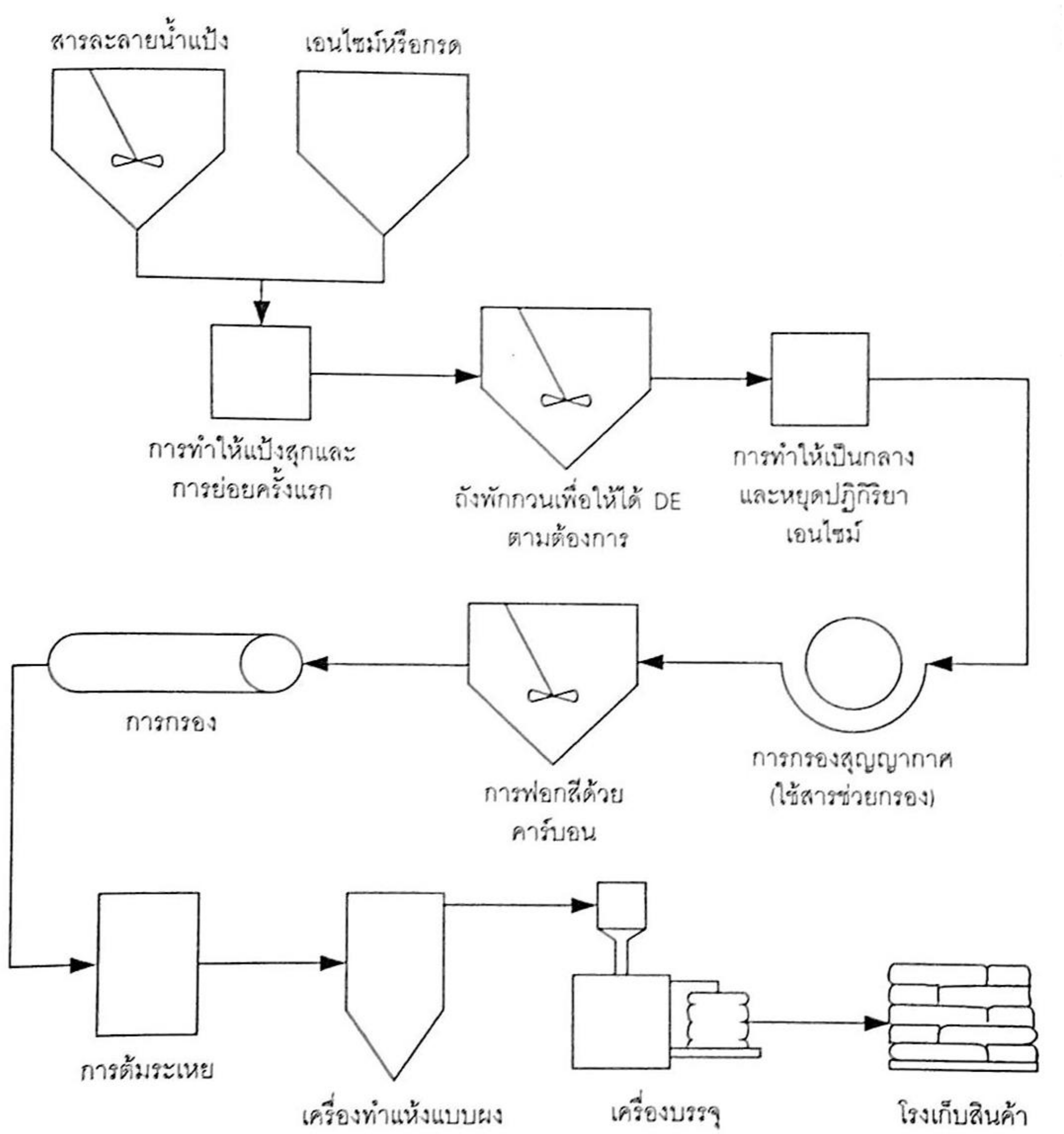
ปริมาณน้ำฝนถือเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อคุณภาพสตาร์ช เนื่องจากพืชใช้น้ำในการเจริญเติบโต แม้มันสำปะหลังเป็นพืชที่ทนแล้งได้ดีแต่ภาวะแล้งมีผลต่อคุณภาพของสตาร์ชอย่างมาก หากระยะเริ่มต้นของการเพาะปลูกมันสำปะหลังอยู่ในภาวะแล้ง หัวมันจะมีน้ำหนักแห้ง ปริมาณสตาร์ช และปริมาณแอมิโลสในเม็ดสตาร์ชต่ำกว่า รวมทั้งมีขนาดเม็ดสตาร์ชเล็กกว่า ใช้อุณหภูมิในการพองตัวสูงกว่า มีความสามารถในการดูดน้ำและมีความหนืดต่ำกว่าหัวมันที่เริ่มปลูกในภาวะที่มีฝน ในด้านโครงสร้างของแอมิโลสและแอมิโลเพกทินพบว่าฤดูเก็บเกี่ยวที่ต่างกันจะมีผลต่อโครงสร้างของเม็ดสตาร์ช โดยสัดส่วนของแอมิโลสและแอมิโลเพกทินมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย สตาร์ชจากหัวมันที่เก็บเกี่ยวในฤดูแล้งจะมีการกระจายของขนาดเม็ดสตาร์ชในรูปแบบ normal distribution แต่สตาร์ชจากหัวมันที่เก็บเกี่ยวในฤดูฝนจะมีการกระจายอยู่ในรูปแบบ bimodal distribution แต่ฤดูการเก็บเกี่ยวมีผลน้อยต่อความเป็นผลึก รูปแบบการกระจายตามขนาดของสายโซ่แอมิโลเพกทินที่ได้จากการย่อยด้วย isoamylase องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชและเวลาในการย่อยโดยเอนไซม์ glucoamylase ซึ่งสตาร์ชที่มีคุณภาพและสมบัติด้านเคมีกายภาพที่ต่างกันส่งผลอย่างมากต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้จากสตาร์ช (Asaoka และคณะ, 1991; Sriroth และคณะ, 2000; Sriroth และคณะ, 1999; กล้าณรงค์ ศรีรอต และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2546)

2.2 มอลโทเด็กซ์ทริน

มอลโทเด็กซ์ทรินเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลายแป้ง (starch hydrolysates) ซึ่งมีค่าสมมูลเด็กซ์โทรส (dextrose equivalent, DE) ไม่เกิน 20 ประกอบด้วยส่วนที่ย่อยได้จากแอมิโลสและแอ-มิโลเพกทิน อาจมีขนาดเล็กตั้งแต่กลูโคสจนถึงพอลิเมอร์ที่เป็นสายยาว ขึ้นกับระดับของการย่อยมอลโทเด็กซ์ทรินสามารถผลิตให้อยู่ในรูปของเหลวหรือผงแห้งก็ได้ขึ้นกับการนำไปใช้งาน เป็นส่วนผสมที่มีหน้าที่หลากหลาย สามารถนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมอาหารได้อย่างกว้างขวาง เช่น ช่วยกักเก็บกลิ่นรส (flavor) ในผงปรุงรสกลุ่ม spray-dried encapsulated powders ใช้เป็นสารเพิ่มปริมาณ (bulking agent) ในอาหารผง และสารทดแทนไขมัน เป็นต้น การใช้งานต่าง ๆ เหล่านี้ขึ้นกับค่า DE ของผลิตภัณฑ์ ค่า DE นี้ยังใช้ในการจำแนกประเภทของมอลโทเด็กซ์ทริน โดยมอลโท-เด็กซ์ทรินที่มีค่า DE แตกต่างกันจะมีสมบัติทางกายภาพต่างกันด้วย (กล้าณรงค์ ศรีรอต และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2546; จิรารัตน์ ทัตติยกุล, 2537)

2.2.1 การผลิตมอลโทเด็กซ์ทริน

กระบวนการผลิตมอลโทเด็กซ์ทรินต้องทำให้น้ำแป้งสุกกลายเป็นของเหลวที่มีความหนืดต่ำ ประกอบด้วยขั้นตอนเจลาติไนเซชัน (gelatinization process) และขั้นตอนลิเคอแฟคชัน (liquefaction process) ขั้นตอนเจลาติไนเซชันจะเป็นการให้ความร้อนแก่น้ำแป้งและกวนอย่างสม่ำเสมอ ทำให้เม็ดสตาร์ชพองตัวและแตกออก เป็นกระบวนการปรับสภาพให้สตาร์ชเหมาะกับการทำงานของกรดหรือเอนไซม์ ในอุตสาหกรรมนิยมใช้อุณหภูมิสำหรับขั้นตอนนี้ในช่วง 82 - 105 °C สำหรับขั้นตอนลิเคอแฟคชันจะเป็นการย่อยสตาร์ชเพื่อให้น้ำแป้งมีความหนืดลดลง แบ่งได้เป็น 2 รูปแบบ คือ ใช้กรดร่วมกับความร้อนสูง และใช้เอนไซม์กลุ่ม thermostable α-amylase ในการใช้กรดหรือเอนไซม์ในการผลิตจะนิยมทำขั้นตอนเจลาติไนเซชันและลิเคอแฟคชันพร้อมกัน แผนภาพโดยรวมของกระบวนการผลิตมอลโทเด็กซ์ทรินแสดงดังรูปที่ 2.1 (กล้าณรงค์ ศรีรอต และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2546)



รูปที่ 2.1 กระบวนการผลิตมอลโทเด็กซ์ทรินโดยใช้เอนไซม์กลุ่ม α-amylase ในอุตสาหกรรม (กล้าณรงค์ ศรีรอต และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2546)

2.2.1.1 การใช้กรดร่วมกับความร้อนสูง

การใช้กรด เช่น กรดไฮโดรคลอริก ร่วมกับความร้อนสูงในการผลิตมอลโท-เด็กซ์ทริน กรดจะตัดพันธะ α-(1,4) และ α-(1,6) ในโมเลกุลแบบสุ่ม ทำให้ไม่สามารถควบคุมการผลิตเพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีสมบัติตามต้องการได้ กระบวนการนี้จะทำให้เกิดความหวานและเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลเนื่องจากความร้อน ซึ่งเป็นผลพลอยได้ที่ไม่ต้องการในผลิตภัณฑ์ (Marchal และคณะ, 1999)

2.2.1.2 การใช้เอนไซม์กลุ่ม thermostable α-amylase

เอนไซม์กลุ่ม thermostable α-amylase ซึ่งจัดเป็น endo-enzyme จะตัดพันธะ α-(1,4) ของแอมิโลสภายในโมเลกุลสตาร์ชได้เป็นอนุพันธ์ของสตาร์ชที่มีขนาดเล็กลง สามารถควบคุมการผลิตและสมบัติของผลิตภัณฑ์ได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้กรดร่วมกับความร้อนสูง (Marchal และคณะ, 1999) ปัจจัยที่เกี่ยวข้องในกระบวนการผลิตมอลโทเด็กซ์ทรินโดยใช้เอนไซม์กลุ่ม thermostable α-amylase ได้แก่ ความเข้มข้นของน้ำแป้ง ความเข้มข้นของเอนไซม์ เวลาในการให้ความร้อน ความร้อนที่ให้แก่น้ำแป้งในกระบวนการผลิต pH และปริมาณแคลเซียมอิออน (จิรารัตน์ ทัตติยกุล, 2537) นอกจากนี้ ชนิดของเอนไซม์ยังมีผลต่อภาวะในการผลิตมอลโท-เด็กซ์ทรินอีกด้วย (กล้าณรงค์ ศรีรอต และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2546)

2.2.2 การใช้ประโยชน์ของมอลโทเด็กซ์ทรินในอุตสาหกรรมอาหาร

มอลโทเด็กซ์ทรินถูกนำไปใช้ประโยชน์ที่หลากหลายในอุตสาหกรรมอาหาร การใช้งานมอลโทเด็กซ์ทรินจะแตกต่างกันไปตามค่า DE ของมอลโทเด็กซ์ทริน ซึ่งมอลโทเด็กซ์ทรินที่มีค่า DE ต่างกันจะมีสมบัติทางกายภาพที่ต่างกัน มอลโทเด็กซ์ทรินที่มีค่า DE ต่ำสามารถเกิดเจลที่ให้ลักษณะเป็นครีม ให้เนื้อสัมผัสเหมือนไขมันและลดปริมาณแคลอรีได้ มักนำไปใช้เป็นสารทดแทนไขมันในผลิตภัณฑ์ที่มีไขมันสูง เช่น ไอศกรีม น้ำสลัด บิสกิต แพนเค้ก ครีมเทียม และ fondants เป็นต้น มอลโทเด็กซ์ทรินที่มีค่า DE 10 - 20 นิยมนำมาช่วยกักเก็บกลิ่นรส (flavor) ในผงปรุงรสกลุ่ม spray-dried encapsulated powders โดยจับสารปรุงรสที่อยู่ในรูปน้ำมันและช่วยให้การทำแห้งมีประสิทธิภาพดีขึ้น นอกจากนี้ มอลโทเด็กซ์ทรินยังใช้เป็นสารเพิ่มปริมาณ (bulking agent) ในอาหารผง เช่น เครื่องดื่มผง (beverage mixes) ซอสสำเร็จรูป น้ำเกรวี่ผง แป้งเค้กหรือคุกกี้สำเร็จรูป เป็นต้น ใช้เป็นสารช่วยพา (carrier) ในสารสกัดจากยีสต์หรือมอลต์ ใช้ทดแทนแป้งและสารให้ความหวานในขนมหวานบางประเภท เช่น พุดดิ้ง ลูกกวาดเนื้อแข็ง และหมากฝรั่ง เป็นต้น และใช้เป็นสารเคลือบอาหารประเภทกรดเพื่อป้องกันปฏิกิริยาระหว่างกรดกับส่วนประกอบอื่น ๆ ในอาหาร ทำให้อายุการเก็บนานขึ้น (Chronakis, 1998; กล้าณรงค์ ศรีรอต และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2546)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตมอลโทเด็กซ์ทรินจากสตาร์ชชนิดต่าง ๆ และสมบัติของมอลโทเด็กซ์ทรินที่ผลิตได้

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตมอลโทเด็กซ์ทรินมีหลายชนิด การเลือกใช้ขึ้นกับราคาของวัตถุดิบนั้น ๆ ซึ่งแตกต่างไปในแต่ละประเทศ เช่น ประเทศไทยใช้สตาร์ชมันสำปะหลัง ประเทศสหรัฐอเมริกาใช้สตาร์ชข้าวโพด เป็นต้น แต่การใช้วัตถุดิบที่แตกต่างกัน ทำให้มอลโทเด็กซ์ทรินที่มีค่า DE ใกล้เคียงกันมีสมบัติทางเคมีกายภาพแตกต่างกันได้ จึงมีการศึกษากระบวนการผลิตมอลโทเด็กซ์ทรินจากสตาร์ชหลายชนิด เช่น สตาร์ชข้าวโพด สตาร์ชมันฝรั่ง สตาร์ชมันสำปะหลัง สตาร์ชข้าวเจ้า และสตาร์ชข้าวสาลี

จิรารัตน์ ทัตติยกุล (2537) ได้ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตมอลโทเด็กซ์ทรินจากแป้งมันสำปะหลัง โดยการเติมเอนไซม์ครั้งเดียวในการผลิตแบบกะ ใช้น้ำแป้งเข้มข้น 30% โดยน้ำหนัก และค่า pH เท่ากับ 6.5 แปรความเข้มข้นของเอนไซม์กลุ่ม thermostable α-amylase ชนิด Termamyl 120L® เป็น 0.01% 0.05% และ 0.10% แปรอุณหภูมิเป็น 80 85 และ 90 °C และแปรเวลาในการให้ความร้อนเป็น 40 80 และ 120 นาที พบว่าปัจจัยทั้งสามรวมทั้งอิทธิพลร่วมของแต่ละปัจจัยมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า DE ของผลิตภัณฑ์อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยเมื่อเพิ่มระดับของปัจจัยจะมีผลในการเพิ่มค่า DE ของผลิตภัณฑ์ ค่า DE ที่ได้อยู่ในช่วง 5.98 - 30.75 จากการทดลองหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตมอลโทเด็กซ์ทรินที่มีค่า DE ไม่เกิน 20 โดยใช้เทคนิค response surface methodology (RSM) ได้เวลาที่เหมาะสมคือ 40 - 80 นาที และความเข้มข้นของเอนไซม์อยู่ในช่วง 0.01 - 0.08% จากนั้นทดลองหาภาวะที่เหมาะสมโดยใช้เทคนิค RSM ในการผลิตมอลโทเด็กซ์ทรินที่มีค่า DE อยู่ในช่วง 10 - 14 ซึ่งเป็นชนิดที่นำมาใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารชนิดเหลว ได้ภาวะแรกคือใช้ความเข้มข้นของเอนไซม์ 0.015% อุณหภูมิ 85 °C และเวลา 60 นาที ได้มอลโทเด็กซ์ทรินที่มีค่า DE 10.06 ส่วนอีกภาวะใช้ความเข้มข้นของเอนไซม์ 0.05% อุณหภูมิ 80 °C และเวลา 45 นาที ได้มอลโทเด็กซ์ทรินที่มีค่า DE 14.11 เมื่อศึกษาสมบัติทางเคมีพบว่ามอลโทเด็กซ์ทรินที่มีค่า DE 10.06 และ 14.11 มีปริมาณลิเคอไฟสตาร์ชซึ่งเป็นปริมาณแป้งที่ละลายได้อยู่ 85.27% และ 88.79% ตามลำดับ จากนั้นจึงศึกษาการประยุกต์ใช้มอลโทเด็กซ์ทรินในการทดแทนน้ำมันพืชในน้ำสลัด พบว่าเมื่อนำมอลโทเด็กซ์ทรินที่มีค่า DE 10.06 และ 14.11 ซึ่งมีปริมาณของแข็งทั้งหมด 25.82% และ 26.32% ไปทำให้เข้มข้นจนเป็น 32.16% และ 47.43% ตามลำดับ มอลโทเด็กซ์ทรินทั้งสองจะมีความหนืดที่อุณหภูมิ 25 °C ใกล้เคียงกับน้ำมันตัวอย่าง และที่ปริมาณของแข็ง

เท่ากัน มอลโทเด็กซ์ทรินที่มีค่า DE สูงกว่าจะมีความหนืดต่ำกว่า เนื่องจากมีพอลิแซคคาไรด์สายสั้นมากกว่า และเมื่อวัดสมบัติด้านการไหลพบว่าลักษณะการไหลของมอลโทเด็กซ์ทรินทั้งสองเป็น Newtonian flow ซึ่งมีลักษณะเดียวกับน้ำมันพืช จึงสามารถใช้มอลโทเด็กซ์ทรินทั้งสองนี้ทดแทนน้ำมันพืชในน้ำสลัดชนิดข้นเพื่อลดพลังงานในผลิตภัณฑ์อาหารได้

Dokic และคณะ (1998) ศึกษาลักษณะทางโมเลกุล (molecular characteristics) ของมอลโทเด็กซ์ทรินจากสตาร์ชข้าวโพดที่ผลิตโดยใช้เอนไซม์ α-amylase ใช้การย่อย 2 ขั้นตอน (DE อยู่ในช่วง 13.76 - 19.87) และการใช้กรด (DE 20.29 และ 24.58) และเทียบกับมอลโทเด็กซ์ทรินทางการค้า (DE อยู่ในช่วง 10.00 - 21.77) พบว่ามอลโทเด็กซ์ทรินที่ผลิตโดยใช้เอนไซม์ α-amylase ที่มีค่า DE สูงกว่าจะมีค่า specific optical rotation ต่ำกว่า จากการศึกษาพฤติกรรมการไหล (rheological behaviour) ของสารละลายมอลโทเด็กซ์ทรินที่มีความเข้มข้น 100 - 500 g/dm^3 ที่อุณหภูมิ 20 - 50 °C โดยใช้วิธี rotational viscometry พบว่าสารละลายที่ได้แสดงลักษณะเป็น Newtonian เมื่อสารละลายมอลโทเด็กซ์ทรินที่มีความเข้มข้นจาก 100 เพิ่มเป็น 300 g/dm^3 มีความหนืดเพิ่มขึ้นน้อยมาก แต่เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นมากกว่า 300 g/dm^3 มอลโทเด็กซ์ทรินที่มีค่า DE ต่ำกว่าจะมีความหนืดเพิ่มขึ้นมากกว่า และมอลโทเด็กซ์ทรินทั้งหมดจะมีความหนืดลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และเมื่อศึกษา intrinsic viscosity ($[\eta]$) ของสารละลายมอลโทเด็กซ์ทรินเจือจางที่มีความเข้มข้น 0.002 - 0.01 g/cm^3 ที่อุณหภูมิ 20 °C โดยใช้ capillary viscometer และสร้างกราฟระหว่างค่า DE และ $[\eta]$ พบความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงของค่า $[\eta]$ ที่ลดลงตามค่า DE ที่เพิ่มขึ้น

Wang และ Wang (2000) ศึกษาโครงสร้างและสมบัติของมอลโทเด็กซ์ทรินที่มีจำหน่ายทางการค้าซึ่งผลิตจากสตาร์ชข้าวโพด (Maltrin M100 จาก Grain Processing Corp., DE 8.2) สตาร์ชมันฝรั่ง (Paselli MD10 จาก AVEBE America Inc., DE 5.9) และสตาร์ชข้าวเจ้า (Rice*Trin 10 จาก Zumbro, Inc., DE 14.2) จากการศึกษา %degree of polymerization (DP) ของคาร์โบไฮเดรตในมอลโทเด็กซ์ทรินจากสตาร์ชทั้ง 3 ชนิดที่ยังไม่ตัดสายโซ่กิ่ง (native maltodextrin) และรูปแบบการกระจายของคาร์โบไฮเดรตจำแนกตามขนาดโมเลกุลด้วยเทคนิค high-performance size-exclusion chromatography (HPSEC) พบว่ามอลโทเด็กซ์ทรินจากสตาร์ชมันฝรั่งมีคาร์โบไฮเดรตโมเลกุลใหญ่เป็นองค์ประกอบอยู่มากกว่า ขณะที่มอลโทเด็กซ์ทรินของสตาร์ชข้าวเจ้ามีคาร์โบไฮเดรตโมเลกุลเล็กเป็นองค์ประกอบอยู่มากกว่า โดยเฉพาะคาร์โบไฮเดรตที่มีค่า DP ต่ำกว่า 8

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

เมื่อวัดความหนืดของสารละลายมอลโทเด็กซ์ทรินเข้มข้น 10 - 40% ที่อุณหภูมิ 25 °C ด้วยเครื่อง Brookfield viscometer พบว่ามอลโทเด็กซ์ทรินจากสตาร์ชทั้ง 3 ชนิดมีความหนืดต่ำที่ความเข้มข้นของมอลโทเด็กซ์ทรินไม่เกิน 30% อย่างไรก็ตาม เมื่อความเข้มข้นของมอลโทเด็กซ์ทรินเพิ่มขึ้นเป็น 40% ความหนืดของมอลโทเด็กซ์ทรินจากสตาร์ชข้าวเจ้าจะเพิ่มขึ้นอย่างมาก ขณะที่ความหนืดของมอลโทเด็กซ์ทริน จากสตาร์ชข้าวโพดและสตาร์ชมันฝรั่งเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเกิดจากแอมิโลสที่เกิดรีโทรกราเดชันในมอลโทเด็กซ์ทรินที่ผลิตจากสตาร์ชข้าวเจ้า ทำให้ความหนืดของสารละลายมอลโทเด็กซ์ทรินดังกล่าวสูงผิดปกติ เมื่อพิจารณา sorption isotherm ของตัวอย่างที่ความชื้นสัมพัทธ์ 20 - 100% พบว่าค่าความชื้นที่สมดุลของมอลโทเด็กซ์ทรินจากสตาร์ชต่างชนิดกันที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่า 76% ค่อนข้างใกล้เคียงกัน แต่เมื่อความชื้นสัมพัทธ์สูงกว่า 76% มอลโทเด็กซ์ทรินจากสตาร์ชข้าวเจ้ามีค่าความชื้นที่สมดุลสูงที่สุด รองลงมาคือมอลโทเด็กซ์ทรินจากสตาร์ชข้าวโพดและสตาร์ชมันฝรั่ง ตามลำดับ ทั้งนี้ความสามารถในการดูดซับน้ำจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีคาร์โบไฮเดรตโมเลกุลเล็กเป็นองค์ประกอบในสัดส่วนที่สูงขึ้น มอลโทเด็กซ์ทรินจากสตาร์ชข้าวเจ้าจึงมีค่าความชื้นที่สมดุลที่สูงสุดด้วย และจากการศึกษาค่า glass transition temperature of maximally freeze-concentrated unfrozen phase (T_g') และการเกิดรีโทรกราเดชันของสารละลายมอลโทเด็กซ์ทริน 30% ด้วยเครื่อง differential scanning calorimeter (DSC) พบว่ามอลโทเด็กซ์ทรินจากสตาร์ชมันฝรั่งมีค่า T_g' สูงที่สุด รองลงมาคือ สตาร์ชข้าวโพดและสตาร์ชข้าวเจ้า ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่ามอลโทเด็กซ์ทรินจากสตาร์ชมันฝรั่งจะเกิดรีโทรกราเดชันระหว่างการเก็บ ขณะที่มอลโทเด็กซ์ทรินจากสตาร์ชอีก 2 ชนิดไม่เกิดรีโทรกราเดชันตลอดระยะเวลาการทดลอง ค่า T_g' ที่สูงและการเกิดรีโทรกราเดชันของมอลโทเด็กซ์ทรินจากสตาร์ชมันฝรั่งสัมพันธ์กับคาร์โบไฮเดรตโมเลกุลสูงที่มีอยู่ในสัดส่วนสูงกว่า สมบัติที่กล่าวไปเหล่านี้ล้วนสัมพันธ์กับสัดส่วนของคาร์โบไฮเดรตที่มีค่า DP ต่างกันในมอลโทเด็กซ์ทรินที่ศึกษา

Lumdubwong และ Seib (2001) ศึกษาการผลิตมอลโทเด็กซ์ทรินจากสตาร์ชข้าวสาลีแอมิโลสต่ำ (waxy wheat starch) 2 แบบคือ สตาร์ชที่ได้จากการฟลาวร์ข้าวสาลีพันธุ์ Kanto 107/BaiHuo (WxWS1) และสตาร์ชที่ได้จากฟลาวร์ข้าวสาลีผสม 2 สายพันธุ์คือ 99Y 3007 และ 99Y 3008 (WxWS2) โดยใช้สตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียว (waxy corn starch) (WxCS) เป็นตัวอย่างควบคุม ปรับความเข้มข้นของน้ำแป้งเริ่มต้นเป็น 15% โดยน้ำหนักแห้ง ใช้เอนไซม์ชนิด thermostable α-

amylase Termamyl 120L® (3930 international units/ml ที่ pH 6.5 และอุณหภูมิ 25 °C) 0.0011 ml/g dry starch ใช้ Ca^{2+} 2 ppm ย่อยน้ำแป้งที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 5 - 10 นาทีและ 20 - 50 นาที เพื่อให้ได้มอลโทเด็กซ์ทรินที่มีค่า DE ต่ำ (1 - 2) และปานกลาง (9 - 10) ตามลำดับ พบว่ามอลโทเด็กซ์ทรินที่มีค่า DE ต่ำที่ได้จากการย่อย WxWS1, WxWS2 และ WxCS มีค่า DE 1.2 1.5 และ 2.1 ตามลำดับ ส่วนมอลโทเด็กซ์ทรินที่มีค่า DE ปานกลางที่ได้จากการย่อย WxWS1, WxWS2 และ WxCS มีค่า DE 9.2 9.8 และ 9.1 ตามลำดับ มอลโทเด็กซ์ทรินที่มีค่า DE ต่ำที่ได้จากการย่อย WxWS1 และ WxWS2 จะเกิดกลิ่นหืนเมื่อเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 60 °C เพียง 2 วัน ส่วนมอลโทเด็กซ์ทรินที่มีค่า DE ปานกลางที่ได้จากการย่อยสตาร์ชทั้ง 3 แบบจะไม่เกิดกลิ่นหืนแม้เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 30 วัน ด้านความสามารถในการละลายที่อุณหภูมิ 25 °C เมื่อพิจารณามอลโทเด็กซ์ทรินที่มี DE ต่ำ มอลโทเด็กซ์ทรินที่ผลิตจาก WxWS1 และ WxWS2 จะมีความสามารถในการละลายน้อยกว่ามอลโทเด็กซ์ทรินจาก WxCS และมีความใสน้อยกว่าเมื่อเตรียมเป็นสารละลาย 1% และ 5% เมื่อพิจารณามอลโทเด็กซ์ทรินที่มีค่า DE ปานกลางพบว่าทุกตัวอย่างสามารถละลายน้ำได้ 96 - 99% และให้สารละลายที่ความเข้มข้น 1 - 10% ที่มีความใส โดยทั่วไปความสามารถในการละลายของ MD จากสตาร์ชแอมิโลสต่ำจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากความยาวของสายกิ่ง α-(1,6) และความเล็กของโมเลกุล MD ที่มีความยาวสายโซ่อยู่ในช่วง 6 - 9 จะละลายน้ำได้ดี ดังนั้นสายโซ่ที่ยาวกว่าจะทำให้เครื่องดื่มขุ่น เมื่อเปรียบเทียบระหว่างมอลโทเด็กซ์ทรินที่มีค่า DE ต่ำและปานกลาง พบว่ามอลโทเด็กซ์ทรินที่มีค่า DE ปานกลางจะมีความหนืดจำเพาะ (specific viscosity) ของสารละลายมอลโทเด็กซ์ทริน 0.50% ในสารละลาย KOH 0.5M และค่า DP ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับมอลโทเด็กซ์ทรินที่มีค่า DE ต่ำ และมอลโทเด็กซ์ทรินทั้งหมดมี bulk density อยู่ในช่วง 0.26 - 0.33 g/cm^3 ซึ่งบ่งบอกว่ามอลโทเด็กซ์ทรินนี้แสดงสมบัติเป็น free-flowing นอกจากนี้เมื่อนำมอลโทเด็กซ์ทรินไปส่องกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) พบว่ามอลโทเด็กซ์ทรินที่มีค่า DE ต่ำจะมีเศษของเม็ดสตาร์ชที่หลงเหลือใหญ่กว่ามอลโทเด็กซ์ทรินที่มีค่า DE ปานกลาง และเมื่อศึกษารูปแบบการกระจายของขนาดคาร์โบไฮเดรตโดยใช้เทคนิค HPSEC พบว่าสัดส่วนของคาร์โบไฮเดรตโมเลกุลใหญ่ในมอลโทเด็กซ์ทรินของ WxWS มีมากกว่าในมอลโทเด็กซ์ทรินของ WxCS และมอลโทเด็กซ์ทรินที่มีค่า DE ต่ำทั้งหมดจะมีคาร์โบไฮเดรตโมเลกุลต่ำมากกว่าเมื่อเทียบกับมอลโทเด็กซ์ทรินทางการค้า STAR-DRI® 1 (A.E. Staley Manufacturing Co., Decatur, IL)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Slominska และคณะ (2003) ศึกษาการผลิตมอลโทเด็กซ์ทรินจากสตาร์ชมันฝรั่ง สตาร์ชข้าวโพด และสตาร์ชมันสำปะหลังโดยใช้เอนไซม์ชนิด Termamyl 120 LS® ใช้น้ำแป้ง 35% โดยน้ำหนักแห้ง ปรับ pH เป็น 5.9 แปรความเข้มข้นของเอนไซม์ในช่วง 60 - 145 Novo units/g dry starch ใช้ Ca^{2+} 30 ppm ย่อยแป้งที่ 95 °C วัดผลทุก 1 ชั่วโมง เป็นเวลา 3 ชั่วโมง พบว่าที่เวลาและความเข้มข้นของเอนไซม์เท่ากันมอลโทเด็กซ์ทรินจากสตาร์ชต่างชนิดกันจะมีค่า DE ใกล้เคียงกัน เมื่อศึกษาองค์ประกอบของคาร์โบไฮเดรตด้วยเทคนิค HPSEC พบว่ามอลโทเด็กซ์ทรินที่มีค่า DE ใกล้เคียงกันจะมีองค์ประกอบของคาร์โบไฮเดรตใกล้เคียงกันด้วย เช่นมอลโทเด็กซ์ทรินจากสตาร์ชข้าวโพด สตาร์ชมันสำปะหลัง และสตาร์ชมันฝรั่งที่มี DE ในช่วง 25 - 27 จะมีกลูโคสอยู่ในช่วง 1.8 - 2.0% และมีมอลโทสอยู่ในช่วง 12.8 - 14.6% ตามลำดับ เมื่อวัดความหนืดด้วยเครื่อง Rheotest RV 2 พบว่ามอลโทเด็กซ์ทรินจากสตาร์ชข้าวโพดมีความหนืดสูงที่สุด รองลงมาคือมอลโทเด็กซ์ทรินจากสตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ชมันสำปะหลัง ตามลำดับ และเมื่อศึกษาอัตราการกรองโดยวัดปริมาตรของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยโดยใช้ความเข้มข้นของเอนไซม์ 145 Novo units/g dry starch ที่เวลาในการย่อย 3 ชั่วโมง นำมากรองภายในเวลา 1 นาที ภายใต้ความดัน 60 kPa พบว่ามอลโทเด็กซ์ทรินจากสตาร์ชมันสำปะหลังมีความสามารถในการกรองสูงที่สุดคือ 15 ml/min ซึ่งเป็น 2 เท่าของมอล-โทเด็กซ์ทรินจากสตาร์ชมันฝรั่ง และ 3 เท่าของมอลโทเด็กซ์ทรินจากสตาร์ชข้าวโพด นั่นคือความสามารถในการกรองของมอลโทเด็กซ์ทรินจากสตาร์ชต่างชนิดมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) แม้จะมีค่า DE ใกล้เคียงกัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Khatoon และคณะ (2009) ศึกษาสมบัติของสตาร์ชดัดแปร (modified starch) จากสตาร์ชข้าวโพด สตาร์ชข้าวเจ้า และสตาร์ชมันสำปะหลัง โดยใช้เอนไซม์กลุ่ม thermostable α-amylase ที่ผลิตจาก *Bacillus licheniformis* แปรความเข้มข้นของน้ำแป้งเป็น 10% 15% และ 20% โดยน้ำหนักแห้งต่อปริมาตร ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95 ± 2 °C เป็นเวลา 15 นาที โดยกวนตลอดเวลา เติมสารละลายเอนไซม์ที่มีแคลเซียมอิออนอยู่ 200 ppm (1.33 IU/g starch) ย่อยแป้งที่อุณหภูมิ 90 ± 2 °C เป็นเวลา 30 นาที โดยวัดค่า DE ทุก 5 นาที พบว่าที่เวลาเท่ากัน น้ำแป้งที่มีความเข้มข้นต่ำกว่าจะมีค่า DE สูงกว่า และสำหรับสตาร์ชทุกชนิด เมื่อเวลาในการย่อยเพิ่มขึ้นค่า DE จะเพิ่มขึ้น แต่สำหรับตัวอย่างน้ำแป้งเข้มข้น 20% มีค่า DE เพิ่มขึ้นน้อยกว่าที่ความเข้มข้นอื่นเมื่อเพิ่มเวลาในการย่อย ที่เวลา 30 นาที สตาร์ชดัดแปรจากสตาร์ชข้าวโพดและสตาร์ชมันสำปะหลังที่มีความเข้มข้นของ

น้ำแป้ง 10% และ 15% และสตาร์ชดัดแปรจากสตาร์ชข้าวเจ้าที่มีความเข้มข้นของน้ำแป้ง 15% และ 20% จะมีค่า DE อยู่ในช่วง 8 - 12 ซึ่งเป็นช่วงค่า DE ที่สามารถนำไปใช้เป็นสารทดแทนไขมันในอาหารได้ ที่ความเข้มข้นของน้ำแป้ง 20% สตาร์ชดัดแปรจากสตาร์ชข้าวโพดและสตาร์ชมันสำปะหลังจะมี DE ต่ำ ($<$ 8.0) และที่ความเข้มข้นของน้ำแป้ง 10% สตาร์ชดัดแปรจากสตาร์ชข้าวเจ้าจะมีค่า DE สูง ($>$ 14.0) จากการวัดค่า storage modulus (G') ซึ่งแสดงถึงความเป็นของแข็งของตัวอย่างและค่า complex viscosity (η^*) ซึ่งแสดงถึงสมบัติทางวิทยากระแสโดยรวมที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและการไหลของตัวอย่างมีความเข้มข้น 15% และ 20% โดยน้ำหนักแห้ง โดยใช้ controlled stress rheometer วัดด้วย parallel plate ทดสอบแบบ dynamic oscillatory ใช้ความเร็วเชิงมุม 6.28 radian ที่อุณหภูมิ 25.0 ± 0.1 ℃ พบว่าตัวอย่างทั้ง 2 ความเข้มข้นให้ผลสอดคล้องกันคือ ระบบของสตาร์ชดัดแปรจะมีค่า G’ และ η^* น้อยกว่าระบบของสตาร์ชที่ไม่ดัดแปร นั่นคือสตาร์ชดัดแปรสามารถละลายน้ำได้ดีกว่า และอัตราการลดลงของค่า G’ และ η^* จะเพิ่มขึ้นเมื่อตัวอย่างมีปริมาณของแข็งมากขึ้น ตัวอย่างสตาร์ชมันสำปะหลังและสตาร์ชข้าวเจ้า และสตาร์ชดัดแปรของสตาร์ชทั้งสองให้ผลสอดคล้องไปในแนวเดียวกับตัวอย่างสตาร์ชข้าวโพด นอกจากนี้ เมื่อนำสตาร์ชดัดแปรมาส่องกล้องจุลทรรศน์ชนิด SEM พบว่าเม็ดสตาร์ชมีรูพรุนมากขึ้นและใหญ่ขึ้นเมื่อเทียบกับสตาร์ชที่ไม่ดัดแปร

จากงานวิจัยดังกล่าวจึงสรุปได้ว่าการผลิตมอลโทเด็กซ์ทรินจากสตาร์ชต่างชนิดกันภายใต้ปัจจัยที่กำหนดจะได้มอลโทเด็กซ์ทรินที่มีค่า DE ใกล้เคียงกัน แต่มีสมบัติทางเคมีกายภาพที่แตกต่างกันอาจเนื่องมาจากองค์ประกอบของคาร์โบไฮเดรตในมอลโทเด็กซ์ทรินที่แตกต่างกัน

2.4 การเปลี่ยนสถานะของอาหารในขณะแช่แข็ง

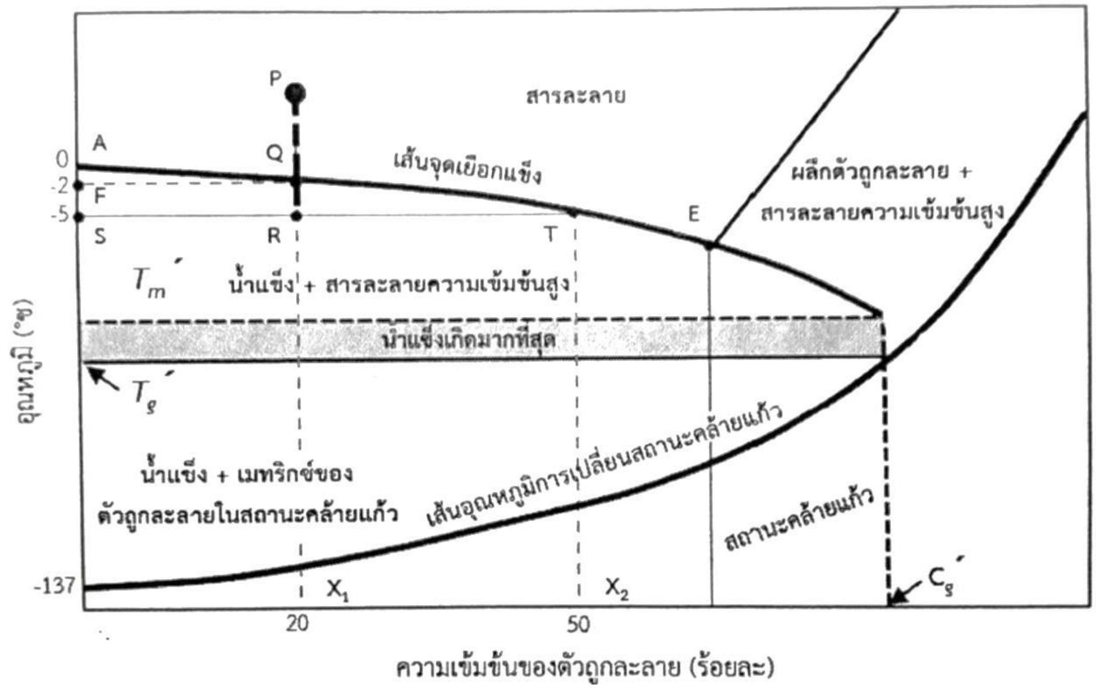
เนื่องจากอาหารส่วนใหญ่ประกอบด้วยน้ำและตัวถูกละลาย การเปลี่ยนสถานะของอาหารในขณะแช่แข็งและความคงตัวของอาหารในระหว่างการเก็บรักษาจึงอาจอธิบายได้จากแผนภาพแสดงสถานะของสารละลายในรูปที่ 2.2 ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงสถานะของสารละลาย ตัวถูกละลาย และตัวทำละลาย (ในที่นี้คือน้ำ) การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวแบ่งได้เป็น 2 รูปแบบ ดังนี้

2.4.1 การเปลี่ยนแปลงสถานะในภาวะสมดุล ได้แก่ การตกผลึกของน้ำแข็งจากสารละลาย การตกผลึกของตัวถูกละลายและการเกิดของผสมยูเทกติก ซึ่งการเปลี่ยนแปลงสถานะในภาวะสมดุลที่

เกี่ยวข้องกับอาหารแช่แข็ง คือ การตกผลึกของน้ำแข็งจากสารละลาย จากแผนภาพ สารละลายน้ำตาลซูโครสความเข้มข้น 20% มีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง (จุด P) เมื่อลดอุณหภูมิลงจนถึงเส้นจุดเยือกแข็ง (จุด Q) น้ำเริ่มตกผลึกเป็นน้ำแข็ง จากจุด Q สามารถอ่านค่าจุดเยือกแข็งได้เท่ากับ -2 ℃ (จุด F) หากลดอุณหภูมิลงไปต่ำกว่าเส้นจุดเยือกแข็งจะเกิดน้ำแข็งมากขึ้น ขณะที่ความเข้มข้นของสารละลายที่ยังไม่แข็งตัวจะเพิ่มขึ้นด้วย เมื่อลดอุณหภูมิลงจนถึง -5 ℃ (จุด R) จะสามารถคำนวณหาปริมาณน้ำแข็งที่เกิดขึ้น ปริมาณสารละลายที่ไม่แข็งตัวดังสมการที่ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ (สงวนศรี เจริญเหรียญ, 2558)

ปริมาณน้ำแข็งที่เกิดขึ้น (% โดยน้ำหนัก) = $\frac{\text{ความยาวของเส้น RT} \times 100}{\text{ความยาวของเส้น ST}}$ 2.1

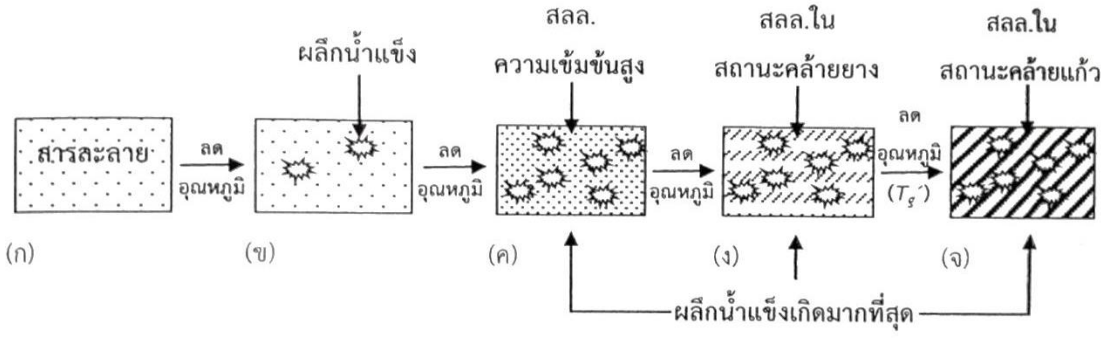
ปริมาณสารละลายที่ไม่แข็งตัว (% โดยน้ำหนัก) = $\frac{\text{ความยาวของเส้น RT} \times 100}{\text{ความยาวของเส้น ST}}$ 2.2



รูปที่ 2.2 แผนภาพแสดงสถานะของสารละลายน้ำตาลซูโครสที่อุณหภูมิและความเข้มข้นต่าง ๆ (สงวนศรี เจริญเหรียญ, 2558)

2.4.2 การเปลี่ยนแปลงสถานะในภาวะไม่สมดุล ในที่นี้จะกล่าวถึงรูปแบบที่เกี่ยวข้องกับอาหารแช่แข็ง คือ การเปลี่ยนแปลงสถานะของสารละลายความเข้มข้นต่ำ ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่

เกิดขึ้นในการแช่แข็งอาหารและสารละลาย จากรูปที่ 2.3 พบว่าเมื่อลดอุณหภูมิของสารละลายลง น้ำในส่วนที่แข็งตัวได้ (frozen water หรือ free water) จะเปลี่ยนสถานะเป็นผลึกน้ำแข็งได้มากที่สุดค่าหนึ่งดังรูปที่ 2.3 (ค) และยังมีน้ำบางส่วนที่ไม่สามารถแข็งตัวได้ (unfrozen water หรือ immobilized water) อยู่ภายในส่วนอสัณฐานซึ่งอยู่ในสถานะคล้ายยาง (rubbery state) ดังรูปที่ 2.3 (ง) หากลดอุณหภูมิลงไปอีกจนอุณหภูมิต่ำกว่าค่า glass transition temperature of maximally freeze-concentrated unfrozen phase (T_g') ส่วนอสัณฐานจะเปลี่ยนเป็นสถานะคล้ายแก้ว (glassy state) ดังรูปที่ 2.3 (จ) ดังนั้น ค่า T_g' จึงบ่งบอกการเกิด glass transition ในกรณีที่สารละลายมีความเข้มข้นสูงสุด และสามารถระบุได้จากแผนภาพแสดงสถานะของสารละลายในรูปที่ 2.2 ส่วนค่า T_m' (รูปที่ 2.2) เป็นจุดหลอมเหลวเริ่มต้นของน้ำแข็งที่เกิดมากที่สุดและค่า C_g' คือความเข้มข้นของสารละลายที่อยู่ในสถานะคล้ายแก้ว เมื่อเมทริกซ์ที่ไม่แข็งตัวนี้ได้ผ่านเข้าสู่สถานะคล้ายแก้วแล้ว อัตราการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ที่อาจเกิดในสารละลายหรืออาหารแช่แข็งในสภาพแช่แข็งจะลดลงอย่างมาก เนื่องจากในสถานะคล้ายแก้วโมเลกุลต่าง ๆ จะมีการเคลื่อนที่ช้ามาก (สงวนศรี เจริญเหรียญ, 2558) ดังนั้นอาหารที่เก็บรักษาในอุณหภูมิที่ต่ำกว่าค่า T_g' จะมีความคงตัวมากกว่าและมีอายุการเก็บนานกว่า



รูปที่ 2.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงสถานะของสารละลาย (สลล.) ระหว่างการลดอุณหภูมิลงจนเกิดผลึกน้ำแข็งมากที่สุด และเมทริกซ์สารละลายเปลี่ยนเป็นสถานะคล้ายแก้ว (สงวนศรี เจริญเหรียญ, 2558)

Levine และ Slade (1986) ศึกษาสมบัติทางความร้อนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยแป้ง (starch hydrolysis products) ที่มีจำหน่ายทางการค้าจำนวน 55 ตัวอย่างที่มีค่า DE ในช่วง 0.3 -

100 โดยใช้เทคนิค low-temperature differential scanning calorimetry พบว่าค่า T_g' มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงแบบแปรผันตรงกับน้ำหนักโมเลกุลโดยเฉลี่ย แต่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงแบบแปรผกผันกับค่า DE ของตัวอย่างในช่วง DE 0.3 - 64 (มีค่า T_g' ในช่วง -35 ถึง -4 °C) อย่างไรก็ดี ค่า T_g' ของตัวอย่างที่มีค่า DE ในช่วง 0.3 - 10 บางส่วนเบี่ยงเบนออกจากความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงดังกล่าว และพบความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงแบบแปรผกผันระหว่างค่า T_g' และค่า C_g' (ปริมาณ unfrozen water/ปริมาณตัวอย่าง) ของตัวอย่างน้ำเชื่อมกลูโคสที่ผลิตจากข้าวโพด (DE ในช่วง 26 - 95) หรือกล่าวได้ว่าเมื่อน้ำหนักโมเลกุลโดยเฉลี่ยเพิ่มขึ้น ปริมาณ unfrozen water ในสถานะคล้ายแก้วของตัวอย่างที่อุณหภูมิ T_g' จะลดลง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัตถุดิบ

- สตาร์ชมันสำปะหลังที่ผลิตจากหัวมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูแล้ง (ตุลาคม พ.ศ. 2556 และเมษายน พ.ศ. 2557) และฤดูฝน (มิถุนายน พ.ศ. 2556) คละสายพันธุ์จากจังหวัดนครราชสีมาและจังหวัดใกล้เคียง (ได้รับตัวอย่างดังกล่าวจากบริษัท เยนเนรัล สตาร์ช จำกัด)
- มอลโทเด็กซ์ทรินจากสตาร์ชมันสำปะหลังที่มีจำหน่ายทางการค้าที่มีค่า DE ต่ำและกลาง อย่างละ 2 ตัวอย่าง ได้แก่ CL1, CL2, CM1 และ CM2 มีค่า DE เป็น 3.50, 2.92, 9.22 และ 10.10 ตามลำดับ
- เอนไซม์ thermostable α-amylase ที่มีจำหน่ายทางการค้า ผลิตจาก *Bacillus licheniformis* ที่ผ่านการดัดแปรพันธุกรรม (ชนิด GMO) และไม่ผ่านการดัดแปรพันธุกรรม (non-GMO)
- เอนไซม์ glucoamylase ที่มีจำหน่ายทางการค้า ผลิตจาก *Aspergillus niger* ที่ผ่านการดัดแปรพันธุกรรม (ชนิด GMO) และไม่ผ่านการดัดแปรพันธุกรรม (non-GMO)

3.2 อุปกรณ์

3.2.1 เครื่องชั่งหยาบทศนิยม 2 ตำแหน่ง (Mettler-Toledo, NewClassic MF, Switzerland)

3.2.2 เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Sartorius, Extend, Germany)

3.2.3 เครื่องวัดค่า pH (Mettler-Toledo, SevenCompact, Switzerland)

3.2.4 เครื่องปั่นเหวี่ยง (centrifuge) (Hermle Labortechnik GmbH, Z 36 HK, Germany)

3.2.5 อ่างน้ำร้อนพร้อมเครื่องเขย่า (shaking water bath) (Julabo, SW23, Germany)

3.2.6 เครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย (spray dryer) (Buchi, mini spray dryer B-290, Switzerland)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.3 ขั้นตอนและวิธีการทดลอง

3.3.1 การศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผลิตจากหัวมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูแล้งและฤดูฝน

3.3.1.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

- วิเคราะห์ความชื้น ตามวิธีของ AOAC (2000) (รายละเอียดแสดงดังภาคผนวก ก.1)
- วิเคราะห์โปรตีน ตามวิธีของ AOAC (2000) (รายละเอียดแสดงดังภาคผนวก ก.2)
- วิเคราะห์ไขมัน ตามวิธีของ AOAC (2000) (รายละเอียดแสดงดังภาคผนวก ก.3)
- วิเคราะห์เถ้า ตามวิธีของ AOAC (2000) (รายละเอียดแสดงดังภาคผนวก ก.4)
- วิเคราะห์คาร์โบไฮเดรต โดยใช้สมการตามภาคผนวก ก.5

3.3.1.2 การวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลสด้วยวิธี amperometric titration technique (Gibson และคณะ, 1997; Takeda และ Hizukuri, 1987) ส่งตัวอย่างวิเคราะห์ที่หน่วยปฏิบัติการเทคโนโลยีแปรรูปมันสำปะหลังและแป้ง (CSTRU) สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร (Kasetsart agriculture and agro-industrial product improvement institute, KAPI)

3.3.1.3 การวิเคราะห์สมบัติของเพสต์ขณะร้อนและเย็นด้วย Rapid Visco-Analyser (RVA) (รายละเอียดแสดงดังภาคผนวก ข.1)

3.3.1.4 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง differential scanning calorimeter (DSC) (รายละเอียดแสดงดังภาคผนวก ข.2)

ข้อ 3.3.1.1 ถึง 3.3.1.4 วางแผนการทดลองแบบ Completely randomized design (CRD) ทดลอง 3 - 5 ซ้ำ วิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของข้อมูล (analysis of variance, ANOVA)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.3.2 การหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตมอลโทเด็กซ์ทรินจากสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผลิตจากหัวมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูแล้งและฤดูฝนโดยใช้ thermostable α-amylase

3.3.2.1 ผลิตมอลโทเด็กซ์ทรินที่มีค่า DE ต่ำและกลางจากสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผลิตจากหัวมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูแล้งและฤดูฝนโดยใช้ thermostable α-amylase ที่มีจำหน่ายทางการค้า 2 ชนิด คือ GMO และ non-GMO เตรียมตัวอย่างตามวิธีที่ดัดแปลงจากวิธีของ จิรารัตน์ ทัตติยกุล (2537) และ Lumdubwong และ Seib (2001) โดยใช้น้ำแป้งเข้มข้น 30% โดยน้ำหนักแห้ง ปรับ pH เริ่มต้นของน้ำแป้ง ควบคุมความเข้มข้นของเอนไซม์และแคลเซียมอิออนให้คงที่ค่าหนึ่งสำหรับเอนไซม์แต่ละชนิด ดังตารางที่ 3.1 ย่อยที่อุณหภูมิ 95 °C พร้อมเขย่าด้วยความเร็วรอบ 71 rpm แปรเวลาการย่อยตั้งแต่ 15 - 150 นาที ติดตามระดับการย่อยสตาร์ชที่เวลาต่าง ๆ โดยสุ่มตัวอย่างทุก 15 - 30 นาที หยุดการทำงานของเอนไซม์โดยปรับ pH ของสารละลายเป็น 3.0 - 4.0 ให้ความร้อนที่ 95 °C เป็นเวลา 20 นาที แล้วลดอุณหภูมิลงถึง 30 °C ปรับ pH ให้เป็น 6.0 - 7.0 นำสารละลายไปปั่นเหวี่ยงโดยใช้เครื่องปั่นเหวี่ยง (centrifuge) ที่ 15650×g เป็นเวลา 60 นาที นำส่วนใสไปวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์โดยวิธีมาตรฐาน เพื่อนำไปคำนวณค่า DE (Nelson, 1944) (รายละเอียดดังภาคผนวก ก.6) แผนผังการเตรียมตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 3.1 หาเวลาที่เหมาะสมในการเตรียมมอลโทเด็กซ์ทรินที่มีค่า DE ต่ำ (< 5) และกลาง (10 - 15) โดยใช้วัตถุดิบ 2 กลุ่ม และเอนไซม์ 2 ตัวอย่าง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 3.1 ภาวะที่ใช้ในการผลิตมอลโทเด็กซ์ทริน DE ต่ำและกลางสำหรับเอนไซม์แต่ละชนิด

ชนิดเอนไซม์	ชนิดของสารละลายด่างในการใช้ปรับ pH	pH เริ่มต้นของน้ำแป้ง	ความเข้มข้นของเอนไซม์ (%)	ปริมาณแคลเซียมอิออน (ppm)
GMO	0.1 M NaOH	5.6	0.05	4
Non-GMO	1% $Ca(OH)_2$	6.5	0.1	≥ 4

เอนไซม์ทั้งสองชนิดมีค่ากิจกรรมของเอนไซม์แตกต่างกัน ความเข้มข้นที่เหมาะสมของเอนไซม์แต่ละชนิดจึงแตกต่างกันด้วย

3.3.2.2 ผลิตมอลโทเด็กซ์ทรินที่มีค่า DE สูง (18 - 20) จากสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผลิตจากหัวมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูแล้งและฤดูฝนโดยใช้ thermostable α-amylase ที่มีจำหน่ายทางการค้า 2 ชนิด คือ GMO และ non-GMO ในการย่อยขั้นแรกโดยใช้วิธีเดียวกับการเตรียมมอลโทเด็กซ์ทรินในข้อ 3.3.2.1 ใช้เวลาในการย่อย 90 นาที จากนั้นนำไปย่อยในขั้นที่สองโดยใช้ glucoamylase ที่มีจำหน่ายทางการค้า 2 ชนิด ย่อยตัวอย่างที่ 60 °C พร้อมเขย่าด้วยความเร็วรอบ 71 rpm เป็นเวลา 15 - 30 นาที ภาวะที่ใช้ในการผลิตมอลโทเด็กซ์ทริน DE สูงของเอนไซม์แต่ละชนิด แสดงดังตารางที่ 3.2 หยุดการทำงานของเอนไซม์โดยให้ความร้อนที่ 95 °C เป็นเวลา 20 นาที แล้วลดอุณหภูมิลงถึง 30 °C ปรับ pH ให้เป็น 6.0 – 7.0 นำสารละลายไปปั่นเหวี่ยงโดยใช้เครื่องปั่นเหวี่ยง (centrifuge) ที่ 15650×g เป็นเวลา 60 นาที นำส่วนใสไปวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์โดยวิธีมาตรฐาน เพื่อนำไปคำนวณค่า DE (Nelson, 1944) (รายละเอียดดังภาคผนวก ก.6) แผนผังการเตรียมตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ภาวะที่ใช้ในการผลิตมอลโทเด็กซ์ทริน DE สูงสำหรับเอนไซม์แต่ละชนิด

ชนิดเอนไซม์	ภาวะการย่อยด้วย thermostable α-amylase				ภาวะการย่อยด้วย glucoamylase			
	ความเข้มข้นของเอนไซม์ (%)	pH	อุณหภูมิที่ใช้ (°C)	เวลาในการย่อย (นาที)	ความเข้มข้นของเอนไซม์ (%)	pH	อุณหภูมิที่ใช้ (°C)	เวลาในการย่อย (นาที)
GMO	0.05	5.6	95	90	0.1	3.0-4.0	60	30
Non-GMO	0.1	6.5	95	90	0.1	3.0-4.0	60	15

เอนไซม์แต่ละชนิดมีค่ากิจกรรมของเอนไซม์แตกต่างกัน ความเข้มข้นที่เหมาะสมของเอนไซม์แต่ละชนิดจึงแตกต่างกันด้วย

วางแผนการทดลองแบบ Factorial in completely randomized design (CRD) ชนิด 2x2 ทดลอง 3 ซ้ำ วิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของข้อมูล (analysis of variance, ANOVA) เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยด้วย Duncan’s new multiple range test (DNMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

เตรียมน้ำแป้งเข้มข้น 30% โดยน้ำหนักแห้ง

↓

ปรับ pH เริ่มต้นของน้ำแป้งให้เป็น 5.6 - 6.5

↓

เติมสารละลายเอนไซม์ thermostable α-amylase ที่มีแคลเซียมอิออนอยู่ในระดับความเข้มข้นคงที่ค่าหนึ่ง

↓

ย่อยที่อุณหภูมิ 95 °C พร้อมเขย่าด้วยความเร็วรอบ 71 rpm เป็นเวลา 15 - 150 นาที

↓

ปรับ pH ให้เป็น 3.0 - 4.0

↓

ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 20 นาที

↓

ลดอุณหภูมิลงถึง 30 °C อย่างรวดเร็ว

↓

ปรับ pH ให้เป็น 6.0 - 7.0

↓

ปั่นเหวี่ยงโดยใช้เครื่องปั่นเหวี่ยง (centrifuge) ที่ 15650×g เป็นเวลา 60 นาที

↓ ↓

ส่วนใส ตะกอน

↓

วิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์โดยวิธีมาตรฐาน

รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงการเตรียมตัวอย่างมอลโทเด็กซ์ทรินที่มีค่า DE ต่ำและกลาง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

เตรียมน้ำแป้งเข้มข้น 30% โดยน้ำหนักแห้ง

↓

ปรับ pH เริ่มต้นของน้ำแป้งให้เป็น 5.6 - 6.5

↓

เติมสารละลายเอนไซม์ thermostable α-amylase ที่มีแคลเซียมอิออนอยู่ในระดับความเข้มข้นคงที่ค่าหนึ่ง

↓

ย่อยที่อุณหภูมิ 95 °C พร้อมเขย่าด้วยความเร็วรอบ 71 rpm เป็นเวลา 90 นาที

↓

ปรับ pH ให้เป็น 3.0 - 4.0

↓

ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 20 นาที

↓

การย่อยขั้นแรก

ลดอุณหภูมิลงถึง 30 °C อย่างรวดเร็ว

- -

การย่อยขั้นที่สอง

↓

เติมสารละลายเอนไซม์ glucoamylase

↓

ย่อยที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 15 - 30 นาที พร้อมเขย่าด้วยความเร็วรอบ 71 rpm

↓

ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 20 นาที

↓

ลดอุณหภูมิลงถึง 30 °C อย่างรวดเร็ว

↓

ปรับ pH ให้เป็น 6.0 - 7.0

↓

ปั่นเหวี่ยงโดยใช้เครื่องปั่นเหวี่ยง (centrifuge) ที่ 15650×g เป็นเวลา 60 นาที

↓ ส่วนใส → ↓ วิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์โดยวิธีมาตรฐาน

↓ ตะกอน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 3.2 แผนผังแสดงการเตรียมตัวอย่างมอลโทเด็กซ์ทรินที่มีค่า DE สูง

3.3.3 การเตรียมมอลโทเด็กซ์ทรินผงและวิเคราะห์โครงสร้างของคาร์โบไฮเดรตและสมบัติของมอลโทเด็กซ์ทรินผงที่ผลิตได้และเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่มีจำหน่ายทางการค้า

3.3.3.1 เตรียมมอลโทเด็กซ์ทรินผงโดยผลิตมอลโทเด็กซ์ทรินจากสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผลิตจากหัวมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูแล้งและฤดูฝน โดยใช้เอนไซม์กลุ่ม thermostable α-amylase 2 ชนิด (GMO และ non-GMO) ตามวิธีที่ดัดแปลงจากวิธีของจิรารัตน์ ทัตติยกุล (2537) และ Lumdubwong และ Seib (2001) ใช้ภาวะที่ได้จากข้อ 3.3.2 ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ (36 ตัวอย่าง) แล้วนำไปทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย (spray dryer) ที่อุณหภูมิขาเข้า (inlet temperature) 160 °C และใช้อัตราป้อนของตัวอย่าง (feed flow rate) 10 ml/min

3.3.3.2 การวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์ผลผลิต โครงสร้างของคาร์โบไฮเดรตและสมบัติของมอลโทเด็กซ์ทรินผงที่ผลิตได้ ดังนี้

3.3.3.2.1 วิเคราะห์หาเปอร์เซ็นผลผลิตจากสมการ 3.1

$$\%yield = \frac{\text{น้ำหนักมอลโทเด็กซ์ทรินผงที่ได้}}{\text{น้ำหนักสตาร์ชเริ่มต้น}} \times 100 \quad \text{............3.1}$$

3.3.3.2.2 วิเคราะห์ปริมาณความชื้นตามวิธีของ AOAC (2000) (รายละเอียดแสดงดังภาคผนวก ก.1)

3.3.3.2.3 หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์โดยวิธีมาตรฐาน เพื่อนำไปคำนวณค่า DE (ดัดแปลงจากวิธีของ Nelson (1944)) (รายละเอียดแสดงดังภาคผนวก ก.6)

3.3.3.2.4 วิเคราะห์การกระจายของสายโซ่กิ่งก้านที่เป็นองค์ประกอบ (chain length distribution) ของมอลโทเด็กซ์ทรินโดยเทคนิค high-performance anion-exchange chromatography (HPAEC) (ดัดแปลงจากวิธีของ Kuakpetoon และ Wang (2007)) (รายละเอียดแสดงดังภาคผนวก ก.8)

3.3.3.2.5 วิเคราะห์สมบัติทางวิทยากระแส (rheological properties) นำข้อมูล shear rate - shear stress ในช่วง shear rate 80 - 200 s^{-1} มาพิจารณาพฤติกรรมการไหลตามแบบจำลองทาง

คณิตศาสตร์ ดังนี้ (ดัดแปลงจาก Khatoon และคณะ (2009)) (รายละเอียดแสดงดังภาคผนวก ข.4)

1) Linear model: $\sigma = \eta\dot{\gamma}$

σ คือ shear stress (mPa)

η คือค่าความหนืด (viscosity) (mPa.s)

$\dot{\gamma}$ คือ shear rate (1/s)

2) Power law model: $\sigma = K\dot{\gamma}^{n}$

σ คือ shear stress (mPa)

K คือ consistency index ($mPa.s^{n}$)

$\dot{\gamma}$ คือ shear rate (1/s)

n คือ flow behavior index

3.3.3.2.6 วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของสารละลายมอลโทเด็กซ์ทริน 30% โดย DSC ดังนี้ (Roos, 1993; Wang และ Wang, 2000) (รายละเอียดแสดงดังภาคผนวก ข.3)

- Glass transition temperature of maximally freeze-concentrated unfrozen phase ($T_{g,midpoint}'$)
- ปริมาณ Frozen/unfrozen water
- เอนทาลปีของการหลอมผลึกเนื่องจากรีโทรกราเดชัน (retrogradation) โดยนำ sample pan ไปเก็บไว้ที่ 4 °C เป็นเวลา 14 วันก่อนนำมาวัดค่า

3.3.3.2.7 ศึกษาความสามารถในการดูดความชื้น โดยสร้าง sorption isotherm (ดัดแปลงจาก Wang และ Wang (2000)) (รายละเอียดแสดงดังภาคผนวก ข.5)

ในการเปรียบเทียบผลของชนิดเอนไซม์และสตาร์ชต่อค่าที่ได้จากมอลโทเด็กซ์ทรินที่ผลิตได้ วางแผนการทดลองทางสถิติเดียวกันกับแผนการทดลองในข้อ 3.3.2 วิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของข้อมูลและเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธีที่ระบุในข้อ 3.3.2

ในการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากมอลโทเด็กซ์ทรินที่ผลิตได้และมอลโทเด็กซ์ทรินที่มีจำหน่ายทางการค้า วางแผนการทดลองแบบ completely randomized design (CRD) ทดลอง 2 - 3 ซ้ำ วิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของข้อมูล เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยใช้ Duncan’s new multiple range test (DNMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 4
ผลและวิจารณ์การทดลอง

4.1 สมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผลิตจากหัวมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูแล้งและฤดูฝน

องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผลิตจากหัวมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูแล้งและฤดูฝนแสดงดังตารางที่ 4.1 สตาร์ชมันสำปะหลังที่ผลิตจากหัวมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูแล้งมีปริมาณโปรตีนหยาบสูงกว่า แต่มีปริมาณแอมิโลสต่ำกว่าสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผลิตจากหัวมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูฝนอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) อย่างไรก็ตาม องค์ประกอบทางเคมีอื่น ๆ ของสตาร์ชทั้งสองไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

ตารางที่ 4.1 ผลของฤดูการเก็บเกี่ยวหัวมันสำปะหลังต่อองค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชมันสำปะหลัง

ฤดูการเก็บเกี่ยวหัวมันสำปะหลัง	องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชมันสำปะหลัง					
	ความชื้น^{ns} (%wb)	เถ้า^{ns} (%db)	ไขมัน^{ns} (%db)	โปรตีนหยาบ (%db)	คาร์โบไฮเดรต (%db)	แอมิโลส (%wt. starch)
ฤดูแล้ง	11.56±0.11	0.13±0.03	0.09±0.05	0.15^{a}±0.00	99.63	16.59^{b}±0.27
ฤดูฝน	11.58±0.11	0.17±0.05	0.24±0.17	0.08^{b}±0.03	99.51	17.44^{a}±0.08

รายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 - 5 ซ้ำ

a, b ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่กำกับด้วยอักษรยกต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ns ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

%wb, %db = %wet basis และ %dry basis ตามลำดับ

สมบัติของเพสต์ขณะร้อนและเย็นที่วัดด้วย RVA และสมบัติทางความร้อนที่วัดด้วยเครื่อง DSC ของตัวอย่างสตาร์ชมันสำปะหลังแสดงดังตารางที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ สตาร์ชมันสำปะหลังที่ผลิตจากหัวมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูแล้งมีค่า peak viscosity, breakdown และ setback สูงกว่า แต่มี pasting temperature ต่ำกว่าสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผลิตจากหัวมันสำปะหลังที่เก็บ

เกี่ยวในฤดูฝนอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) นอกจากนี้ยังพบว่าสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผลิตจากหัวมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูแล้งมีค่า onset (T_o) และ peak gelatinization temperature (T_p) ต่ำกว่าสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผลิตจากหัวมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูฝนอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับค่า pasting temperature ที่วิเคราะห์ได้จากเครื่อง RVA ส่วนค่า conclusion temperature (T_c) gelatinization temperature range (ΔT) และ enthalpy of gelatinization (ΔH) มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบระหว่างสตาร์ชมันสำปะหลังทั้งสอง ($p > 0.05$) จากข้อมูลที่ได้จากตารางที่ 4.1 - 4.3 พบว่าความแตกต่างของสมบัติทางความร้อนและสมบัติของเพสต์ระหว่างสตาร์ชมันสำปะหลังทั้ง 2 ชนิดอาจเกิดจากความแตกต่างของโครงสร้างเม็ดสตาร์ช (เช่น โครงสร้างของแอมิโลเพกทิน เป็นต้น) มากกว่าผลจากองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน มีรายงานว่าสภาพแวดล้อมระหว่างการปลูกและก่อนเก็บเกี่ยว เช่น ปริมาณน้ำฝน และเวลาในการเก็บเกี่ยว มีผลต่อคุณภาพของสตาร์ชมันสำปะหลัง เช่น การกระจายของขนาดของเม็ดสตาร์ช pasting temperature และความหนืดของเพสต์ที่ได้ (Sriroth และคณะ, 2000) อย่างไรก็ตาม Asaoka และคณะ (1991) พบว่าฤดูเก็บเกี่ยวมีผลเพียงเล็กน้อยต่อองค์ประกอบทางเคมี ความเป็นผลึก (crystallinity) รูปแบบการกระจายตามขนาดของสายโซ่แอมิโลเพกทินที่ได้จากการย่อยด้วย isoamylase และเวลาในการย่อยโดยเอนไซม์ glucoamylase และเนื่องจากสตาร์ชที่ใช้เป็นวัตถุดิบที่ผลิตจากมันสำปะหลังหลายสายพันธุ์ผสมกัน องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติต่าง ๆ อาจมีความแปรปรวนเนื่องจากความแตกต่างของสายพันธุ์ได้ จึงควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับโครงสร้างและสมบัติของสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผลิตจากหัวมันสำปะหลังสายพันธุ์จำเพาะที่เก็บเกี่ยวในฤดูต่างกัน เพื่อให้ได้ข้อสรุปเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ดังกล่าวที่ชัดเจนมากขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.2 ผลของฤดูการเก็บเกี่ยวหัวมันสำปะหลังต่อสมบัติของเพสต์ขณะร้อนและเย็นของสตาร์ชมันสำปะหลัง

ฤดูการเก็บเกี่ยวหัวมันสำปะหลัง	Pasting Temperature (˚C)	Peak Viscosity (cP)	Breakdown (cP)	Setback (cP)
ฤดูแล้ง	$69.57^{b}\pm0.03$	$2851^{a}\pm14$	$1570^{a}\pm18$	$786^{a}\pm13$
ฤดูฝน	$71.20^{a}\pm0.05$	$2761^{b}\pm3$	$1531^{b}\pm4$	$620^{b}\pm27$

รายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 ซ้ำ

a, b ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่กำกับด้วยอักษรยกต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 4.3 ผลของฤดูการเก็บเกี่ยวหัวมันสำปะหลังต่อสมบัติทางความร้อนของสตาร์ชมันสำปะหลัง

ฤดูการเก็บเกี่ยวหัวมันสำปะหลัง	T_o (˚C)	T_p (˚C)	T_c^{ns} (˚C)	ΔT^{ns} (˚C)	ΔH^{ns} (J/g dry starch)
ฤดูแล้ง	$63.68^{b}\pm0.41$	$68.66^{b}\pm0.29$	77.44±0.95	13.75±0.65	15.16±1.11
ฤดูฝน	$64.59^{a}\pm0.33$	$70.61^{a}\pm0.19$	78.16±0.42	13.57±0.54	14.52±1.05

รายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 ซ้ำ

a, b ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่กำกับด้วยอักษรยกต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

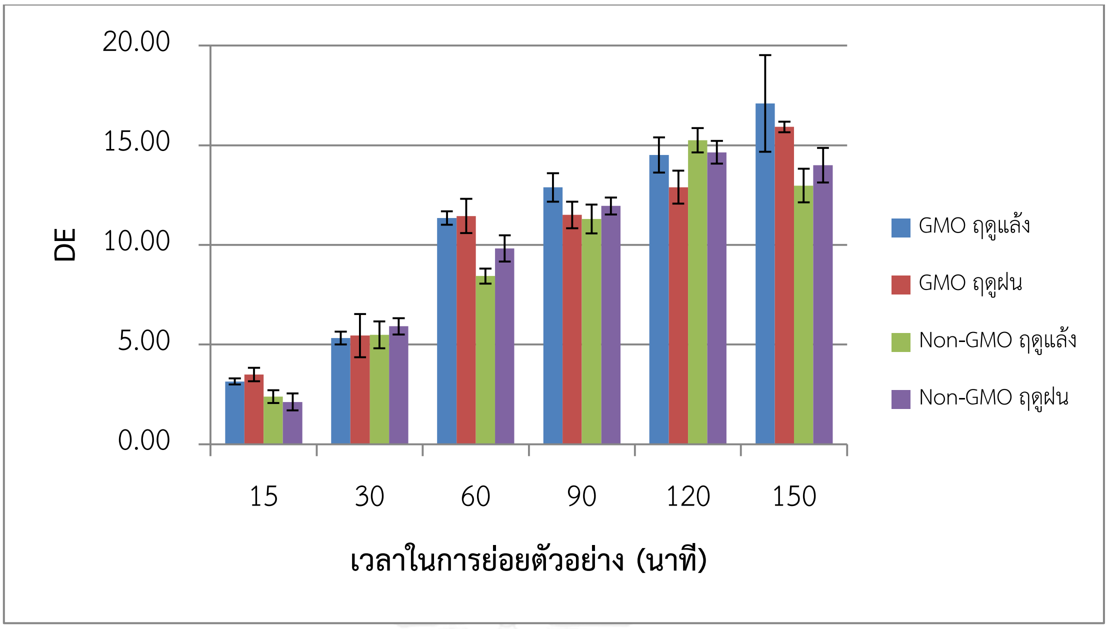
ns ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

4.2 การผลิตมอลโทเด็กซ์ทรินจากสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผลิตจากหัวมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูแล้งและฤดูฝนโดยใช้ thermostable α-amylase

เมื่อศึกษาการผลิตมอลโทเด็กซ์ทรินโดยใช้เอนไซม์ที่มีจำหน่ายทางการค้า 2 ชนิด (GMO และ non-GMO) ในการผลิตมอลโทเด็กซ์ทรินจากสตาร์ชมันสำปะหลังผลิตจากมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูแล้งและฤดูฝน ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.1 พบว่าค่า DE มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามเวลาการย่อยตัวอย่างยกเว้นตัวอย่างที่ย่อยด้วยเอนไซม์ชนิด non-GMO ที่เวลามากกว่า 120 นาที และมีค่า

DE สูงสุดไม่เกิน 16 แม้จะย่อยตัวอย่างนานถึง 150 นาที เนื่องจากเอนไซม์กลุ่ม thermostable α-amylase ซึ่งจัดเป็น endo-enzyme จะตัดพันธะ α-(1,4) กลูโคซิดิกของแอมิโลสและแอมิโลเพกทินได้เป็นอนุพันธ์ของสตาร์ชที่มีขนาดเล็กลง แต่ไม่สามารถตัดพันธะ α-(1,6) กลูโคซิดิก ที่เป็นขั้วกิ่งของแอมิโลเพกทินได้ (จิรารัตน์ ทัตติยกุล, 2537) ทำให้มีขีดจำกัดในการย่อยตัวอย่าง และเอนไซม์ α-amylase ที่ผลิตจาก *Bacillus licheniformis* จะจับกับสายโซ่ตรงที่ประกอบด้วยกลูโคส 6 - 9 หน่วยและเกิดไฮโดรไลซิสอย่างรวดเร็ว (Lumdubwong และ Seib, 2001) เมื่อย่อยไปในระยะเวลาหนึ่ง อาจมีส่วนของสายโซ่ตรงที่สั้นกว่า 6 หน่วย (ที่ต่อกับขั้วกิ่ง) ในสัดส่วนเพิ่มขึ้น ทำให้การจับกันระหว่างเอนไซม์และซับสเตรทเป็นไปได้ยากขึ้น ประสิทธิภาพในการไฮโดรไลซิสโดยรวมอาจลดลงเป็นผลให้ค่า DE ของตัวอย่างไม่เพิ่มขึ้น ซึ่งผลสอดคล้องกับงานวิจัยของ Khatoon และคณะ (2009) ซึ่งศึกษาการดัดแปรสตาร์ชข้าวโพด ข้าวเจ้า และมันสำปะหลังโดยใช้เอนไซม์ thermostable α-amylase พบว่าค่า DE ของสตาร์ชดัดแปรทั้งสามเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาจนถึง 30 นาที และไม่เพิ่มขึ้นแม้ใช้เวลาในการย่อย 40 นาที นอกจากนี้ในรูปที่ 4.1 ยังพบว่าที่เอนไซม์ชนิดเดียวกัน สตาร์ชทั้ง 2 ตัวอย่างให้มอลโทเด็กซ์ทรินที่มีค่า DE ค่อนข้างใกล้เคียงกันที่เวลาในการย่อยเท่ากัน

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (factorial design) พบว่าที่เวลาในการย่อยตัวอย่างเท่ากัน ชนิดของสตาร์ช (ผลิตจากหัวมันที่เก็บเกี่ยวในฤดูแล้งและฤดูฝน) ไม่มีผลต่อค่า DE ของมอลโทเด็กซ์ทรินอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ยกเว้นที่เวลาในการย่อย 120 นาที แต่ชนิดเอนไซม์มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่า DE ($p \leq 0.05$) และไม่พบอิทธิพลร่วมระหว่างชนิดสตาร์ชและเอนไซม์อย่างมีนัยสำคัญต่อค่า DE ($p > 0.05$) ยกเว้นที่เวลาในการย่อย 90 นาที ดังนั้น จึงแสดงผลการวิเคราะห์ทางสถิติเฉพาะปัจจัยหลัก คือ ชนิดของเอนไซม์ ดังตารางที่ 4.4 ซึ่งพบว่ามอลโทเด็กซ์ทรินจากสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผลิตโดยใช้เอนไซม์ชนิด GMO ที่เวลาในการย่อย 15, 60 และ 150 นาทีมีค่า DE สูงกว่าเอนไซม์ชนิด non-GMO อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ในขณะที่เอนไซม์ชนิด non-GMO ให้ผลิตภัณฑ์ที่มีค่า DE สูงกว่า ที่เวลาในการย่อย 120 นาที ($p \leq 0.05$)



รูปที่ 4.1 ค่า DE ของมอลโทเด็กซ์ทรินจากสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผลิตจากมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูแล้งและฤดูฝน และผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์ thermostable α-amylase ที่มีจำหน่ายทางการค้า 2 ชนิดเป็นเวลาต่าง ๆ

ตารางที่ 4.4 ผลของชนิดเอนไซม์ต่อค่า DE ของมอลโทเด็กซ์ทรินจากสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผลิตจากมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูแล้งและฤดูฝน

ชนิดเอนไซม์	ค่า DE ของมอลโทเด็กซ์ทรินที่เวลาในการย่อยต่าง ๆ					
	15 นาที	30 นาที^{ns}	60 นาที	90 นาที^{ns}	120 นาที	150 นาที
GMO	3.33^{a}±0.13	5.39±0.28	11.40^{a}±0.25	12.19±0.26	13.71^{b}±0.30	16.51^{a}±0.56
Non-GMO	2.26^{b}±0.13	5.71±0.28	9.13^{b}±0.25	11.63±0.26	14.95^{a}±0.30	13.49^{b}±0.56

a, b ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่กำกับด้วยอักษรยกต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ns ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

เมื่อพิจารณาข้อมูลจากรูปที่ 4.1 และตารางที่ 4.4 จึงอาจสรุปได้ว่า เวลาในการย่อยที่เหมาะสมสำหรับผลิตมอลโทเด็กซ์ทรินที่มีค่า DE ต่ำ (< 5) และกลาง (10 - 15) ได้แก่ 15 นาที และ 90 นาที ตามลำดับ นอกจากนี้ค่า DE ของมอลโทเด็กซ์ทรินที่ย่อยในช่วงเวลา 120 - 150 นาทีมีค่าใกล้เคียงกัน จึงอาจสรุปได้ว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการย่อยให้นานกว่า 120 นาที จะไม่สามารถทำให้ค่า DE

ของมอลโทเด็กซ์ทรินเพิ่มขึ้นได้ และเมื่อทดลองเพิ่มความเข้มข้นของเอนไซม์ทั้ง 2 ชนิดเป็น 4 เท่าในการผลิตมอลโทเด็กซ์ทรินจากสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผลิตจากมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูแล้งโดยใช้เวลาในการย่อย 120 นาที พบว่ามอลโทเด็กซ์ทรินที่ผลิตจากเอนไซม์ชนิด GMO และ non-GMO มีค่า DE 17.34 ± 4.91 และ 14.37 ± 0.01 ตามลำดับ ซึ่งค่า DE ที่ได้ยังน้อยกว่าค่า DE ที่ต้องการ (18 - 20) ดังนั้น thermostable α-amylase ทั้ง 2 ชนิดอาจไม่เหมาะสมที่จะใช้ในการผลิตมอลโทเด็กซ์ทรินที่มีค่า DE $>$ 18 ในการผลิตมอลโทเด็กซ์ทรินที่มีค่า DE สูงจึงใช้ thermostable α-amylase ย่อยตัวอย่างเป็นเวลา 90 นาที แล้วจึงย่อยตัวอย่างต่อโดยใช้ glucoamylase เป็นเวลา 15 - 30 นาที ดังตารางที่ 3.2 เพื่อเพิ่มค่า DE ให้สูงถึง 18 - 20 อนึ่ง glucoamylase เป็น exo-enzyme สามารถตัดพันธะ α-(1,4) และ α-(1,6) กลูโคซิดิก ให้ผลิตภัณฑ์เป็นกลูโคสและนิยมใช้ในการผลิตน้ำเชื่อมที่มีความบริสุทธิ์สูง (DE $>$ 95) เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่อเนื่องต่อไป เช่น น้ำตาลฟรักโทส ซอร์บิทอล เป็นต้น (Marchal และคณะ, 1999; กล้าณรงค์ ศรีรอต และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2546)

4.3 การเตรียมมอลโทเด็กซ์ทรินผง วิเคราะห์โครงสร้างและสมบัติของมอลโทเด็กซ์ทรินผงที่ผลิตได้

ในการเตรียมมอลโทเด็กซ์ทรินผงโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยนั้น ได้ทดลองเบื้องต้นโดยแปรอุณหภูมิขาเข้าเป็น 160 °C และ 180 °C พบว่ามอลโทเด็กซ์ทรินผง DE ต่ำที่ได้มีความชื้นใกล้เคียงกัน (5.04% และ 4.08% ตามลำดับ) จึงเลือกใช้อุณหภูมิ 160 °C เพื่อลดพลังงานที่ต้องใช้และใช้อัตราการไหลเป็น 10 ml/min พบว่าอุณหภูมิขาออกของตัวอย่างมอลโทเด็กซ์ทรินที่มีค่า DE ต่ำ กลาง และสูงเป็น 98.5±3.5 °C, 95±5 °C และ 90±8 °C ตามลำดับ มอลโทเด็กซ์ทรินผงที่มีค่า DE ต่ำ กลาง และสูงที่ได้มีค่าผลผลิต ความชื้น และค่า DE ดังตารางที่ 4.5 - 4.7

ตารางที่ 4.5 ร้อยละผลผลิต ความชื้น และค่า DE ของมอลโทเด็กซ์ทรินผงที่มี DE ต่ำ

มอลโทเด็กซ์ทริน	ชนิดเอนไซม์	ชนิดสตาร์ช	ผลผลิต^{ns} (%wt. starch)	ความชื้น^{ns} (%wb)	DE^{ns}
LDL	GMO	ฤดูแล้ง	32.41±1.64	3.18±0.29	4.18±0.27
LRL		ฤดูฝน	32.11±2.17	4.30±1.04	4.11±0.63
KDL	Non-GMO	ฤดูแล้ง	33.03±2.10	3.09±0.60	3.47±0.44
KRL		ฤดูฝน	37.53±3.74	2.93±0.33	3.94±0.51

รายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 ซ้ำ

ns ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

ตารางที่ 4.6 ร้อยละผลผลิต ความชื้น และค่า DE ของมอลโทเด็กซ์ทรินผงที่มี DE กลาง

มอลโทเด็กซ์ทริน	ชนิดเอนไซม์	ชนิดสตาร์ช	ผลผลิต^{ns} (%wt. starch)	ความชื้น^{ns} (%wb)	DE
LDM	GMO	ฤดูแล้ง	40.72±3.78	2.65±0.28	11.36^{b}±1.25
LRM		ฤดูฝน	39.62±4.31	2.74±0.48	11.59^{b}±0.97
KDM	Non-GMO	ฤดูแล้ง	38.55±3.18	2.78±0.07	13.34^{a}±0.92
KRM		ฤดูฝน	36.15±3.74	2.68±0.18	13.23^{a}±0.63

รายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 ซ้ำ

a, b ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่กำกับด้วยอักษรยกต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ns ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.7 ร้อยละผลผลิต ความชื้น และค่า DE ของมอลโทเด็กซ์ทรินผงที่มี DE สูง

มอลโทเด็กซ์ทริน	ชนิดเอนไซม์	ชนิดสตาร์ช	ผลผลิต (%wt. starch)	ความชื้น^{ns} (%wb)	DE^{ns}
LDH	GMO	ฤดูแล้ง	21.98^{b}±3.54	2.50±0.05	21.85±2.49
LRH		ฤดูฝน	35.03^{a}±2.39	2.69±0.08	18.96±1.64
KDH	Non-GMO	ฤดูแล้ง	38.32^{a}±0.94	2.42±0.45	21.45±1.01
KRH		ฤดูฝน	37.59^{a}±2.30	2.11±0.17	21.32±1.87

รายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 ซ้ำ

a, b ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่กำกับด้วยอักษรยกต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ns ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

จากตารางที่ 4.5 พบว่าชนิดของเอนไซม์และสตาร์ชไม่มีผลต่อค่าผลผลิต ความชื้นและค่า DE ของมอลโทเด็กซ์ทรินผง DE ต่ำ ($p > 0.05$) ส่วนกรณีของมอลโทเด็กซ์ทรินผง DE กลาง (ตารางที่ 4.6) พบว่าชนิดของเอนไซม์มีผลต่อค่า DE โดยตัวอย่างที่ผลิตโดยใช้เอนไซม์ชนิด non-GMO มีค่า DE สูงกว่าตัวอย่างที่ผลิตโดยใช้เอนไซม์ชนิด GMO ($p \leq 0.05$) ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์ผลผลิตและความชื้นของแต่ละตัวอย่างไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) จากตารางที่ 4.7 พบว่าค่าความชื้นและ DE ของแต่ละตัวอย่างไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) แต่พบอิทธิพลร่วมระหว่างชนิดเอนไซม์และสตาร์ชต่อค่าผลผลิตของมอลโทเด็กซ์ทรินผงที่มีค่า DE สูงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

โครงสร้างของมอลโทเด็กซ์ทรินสามารถพิจารณาได้จากการกระจายของสายโซ่กิ่งก้านที่เป็นองค์ประกอบ (chain length distribution) ซึ่งวิเคราะห์โดยเทคนิค High Performance Anion Exchange Chromatography (HPAEC) ข้อมูลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.8 - 4.10 รูปแบบการกระจายของสายโซ่กิ่งก้านที่เป็นองค์ประกอบของมอลโทเด็กซ์ทริน DE ต่ำ กลาง และสูงที่ผลิตโดยใช้เอนไซม์และสตาร์ชชนิดเดียวกัน เปรียบเทียบดังรูปที่ ค.1 - ค.4 ในภาคผนวก ค

ตารางที่ 4.8 รูปแบบการกระจายของสายโซ่กิ่งก้านที่เป็นองค์ประกอบของมอลโทเด็กซ์ทริน DE ต่ำ

	การกระจายของสายโซ่กิ่งก้าน (%) ของมอลโทเด็กซ์ทรินแต่ละตัวอย่าง					
	LDL	LRL	KDL	KRL	CL1	CL2
DP	(DE 4.18)	(DE 4.11)	(DE 3.47)	(DE 3.94)	(DE 3.50)	(DE 2.92)
1	4.76±0.26	4.57±0.46	5.39±0.05	5.20±0.07	6.21±0.55	6.11±0.29
2	8.08±0.32	10.75±0.26	9.19±1.31	11.14±0.27	6.95±0.04	7.85±0.05
3	11.05±0.20	12.81±0.13	11.07±0.17	12.93±0.24	9.74±0.27	11.45±0.04
4	6.92±0.11	7.27±0.07	7.60±0.21	8.08±0.09	7.72±0.09	7.35±0.03
5	6.33±0.16	6.16±0.16	7.35±0.13	7.32±0.10	6.26±0.15	7.75±0.02
6	9.65±0.16	9.02±0.26	8.28±0.51	8.23±0.24	8.60±0.02	8.69±0.05
7	9.67±0.14	9.16±0.20	8.13±0.31	7.75±0.05	9.31±0.04	8.13±0.18
8	7.67±0.06	7.05±0.01	6.97±0.09	6.67±0.02	7.93±0.24	7.00±0.02
9	6.75±0.19	6.26±0.04	6.51±0.16	6.19±0.14	7.24±0.31	6.67±0.24
10	5.76±0.03	5.71±0.31	5.60±0.04	5.31±0.28	6.12±0.17	5.80±0.07
11	5.04±0.02	4.81±0.08	5.14±0.07	4.74±0.14	5.57±0.05	5.07±0.17
12	4.30±0.17	4.04±0.07	4.26±0.21	4.06±0.10	4.58±0.05	4.53±0.02
13	3.51±0.16	3.29±0.29	3.78±0.10	3.32±0.10	3.85±0.26	3.71±0.22
14	2.92±0.09	2.83±0.09	3.17±0.07	2.69±0.22	3.15±0.66	3.48±0.03
15	2.40±0.09	2.36±0.13	2.66±0.12	2.34±0.21	3.43±0.67	2.83±0.01
16	1.90±0.14	1.50±0.26	2.01±0.08	1.59±0.24	0.48±0.05	2.03±0.06
17	1.60±0.05	1.30±0.08	1.40±0.03	1.17±0.11	1.43±0.41	0.23±0.04
18	1.70±0.10	1.10±0.18	1.49±0.02	1.27±0.17	1.44±0.41	1.33±0.04
10-18	29.12±0.86	26.95±1.49	29.51±0.76	26.48±1.57	30.05±2.72	29.01±0.66

รายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพื้นที่ใต้กราฟสัมพัทธ์ (relative peak area) จากการทดลอง 2 - 3 ซ้ำ; LDL และ LRL คือมอลโทเด็กซ์ทริน DE ต่ำจากสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผลิตจากมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูแล้งและฤดูฝน ตามลำดับ โดยใช้เอนไซม์ชนิด GMO; KDL และ KRL คือมอลโทเด็กซ์ทริน DE ต่ำจากสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผลิตจากมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูแล้งและฤดูฝน ตามลำดับ โดยใช้เอนไซม์ชนิด non-GMO; CL1 และ CL2 คือตัวอย่างมอลโทเด็กซ์ทรินทางการค้า DE ต่ำจากบริษัทที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.9 รูปแบบการกระจายของสายโซ่กิ่งก้านที่เป็นองค์ประกอบของมอลโทเด็กซ์ทริน DE กลาง

DP	การกระจายของสายโซ่กิ่งก้าน (%) ของมอลโทเด็กซ์ทรินแต่ละตัวอย่าง					
	LDM (DE 11.36)	LRM (DE 11.59)	KDM (DE 13.34)	KRM (DE 13.23)	CM1 (DE 9.22)	CM2 (DE 10.10)
1	8.22±0.49	8.48±0.34	9.36±0.27	10.08±0.13	7.70±0.13	6.13±0.20
2	17.78±0.23	22.27±0.65	20.32±0.19	24.22±0.11	13.51±0.16	14.37±0.33
3	16.70±0.05	18.00±0.23	17.68±0.18	18.37±0.18	14.08±0.05	16.70±0.57
4	9.86±0.11	9.62±0.07	11.39±0.20	11.00±0.04	10.30±0.04	8.31±0.25
5	10.63±0.19	9.49±0.24	11.85±0.21	11.03±0.10	8.69±0.06	10.14±0.12
6	13.21±0.11	11.98±0.14	10.86±0.07	9.82±0.17	11.80±0.27	13.84±0.27
7	9.39±0.14	8.39±0.19	6.68±0.03	5.86±0.09	9.91±0.33	10.41±0.33
8	4.69±0.14	3.85±0.09	3.87±0.07	3.22±0.09	5.99±0.02	5.58±0.09
9	2.93±0.01	2.39±0.07	2.55±0.01	2.08±0.01	4.80±0.06	3.76±0.27
10	1.89±0.07	1.60±0.06	1.73±0.04	1.38±0.03	3.75±0.05	2.80±0.17
11	1.48±0.16	1.27±0.04	1.32±0.07	1.11±0.05	3.09±0.02	2.34±0.13
12	1.20±0.02	0.98±0.03	1.00±0.04	0.76±0.04	2.12±0.06	1.80±0.07
13	0.95±0.04	0.76±0.03	0.75±0.04	0.59±0.05	1.96±0.23	1.87±0.81
14	0.72±0.00	0.54±0.07	0.53±0.04	0.47±0.05	1.35±0.10	1.95±1.37
15	0.35±0.01	0.39±0.05	0.12±0.00	0.00±0.00	0.95±0.11	0.00±0.00
10-15	6.59±0.31	5.54±0.29	5.45±0.23	4.31±0.22	13.22±0.57	10.75±2.54

รายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพื้นที่ใต้กราฟสัมพัทธ์ (relative peak area) จากการทดลอง 2 - 3 ซ้ำ; LDM และ LRM คือมอลโทเด็กซ์ทริน DE กลางจากสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผลิตจากมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูแล้งและฤดูฝน ตามลำดับ โดยใช้เอนไซม์ชนิด GMO; KDM และ KRM คือมอลโทเด็กซ์ทริน DE กลางจากสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผลิตจากมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูแล้งและฤดูฝน ตามลำดับ โดยใช้เอนไซม์ชนิด non-GMO; CM1 และ CM2 คือตัวอย่างมอลโทเด็กซ์ทรินทางการค้า DE กลางจากบริษัทที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.10 รูปแบบการกระจายของสายโซ่กิ่งก้านที่เป็นองค์ประกอบของมอลโทเด็กซ์ทริน DE สูง

DP	การกระจายของสายโซ่กิ่งก้าน (%) ของมอลโทเด็กซ์ทรินแต่ละตัวอย่าง			
	LDH (DE 21.85)	LRH (DE 18.96)	KDH (DE 21.45)	KRH (DE 21.32)
1	41.07±0.53	45.28±1.84	36.62±0.75	40.98±0.44
2	16.55±0.28	20.20±1.38	18.66±0.45	21.74±0.94
3	13.99±0.23	14.05±0.45	14.92±0.20	14.58±0.40
4	7.41±0.10	5.94±0.09	8.27±0.12	7.04±0.32
5	6.14±0.01	4.42±0.17	7.00±0.01	5.49±0.35
6	4.75±0.05	3.21±1.22	5.03±0.03	3.71±0.38
7	3.16±0.02	2.34±0.45	3.14±0.04	2.26±0.11
8	2.15±0.11	1.41±0.28	2.11±0.01	1.37±0.19
9	1.55±0.01	1.07±0.14	1.41±0.03	0.93±0.15
10	1.08±0.01	0.74±0.19	0.97±0.04	0.65±0.10
11	0.82±0.02	0.54±0.09	0.73±0.01	0.47±0.07
12	0.55±0.03	0.40±0.11	0.55±0.03	0.34±0.04
13	0.47±0.02	0.22±0.16	0.36±0.01	0.25±0.05
14	0.31±0.06	0.18±0.13	0.23±0.10	0.19±0.02
10-14	3.23±0.14	2.08±0.69	2.84±0.19	1.91±0.28

รายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพื้นที่ใต้กราฟสัมพัทธ์ (relative peak area) จากการทดลอง 3 ซ้ำ; LDH และ LRH คือมอลโทเด็กซ์ทริน DE สูงจากสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผลิตจากมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูแล้งและฤดูฝน ตามลำดับ โดยใช้เอนไซม์ชนิด GMO; KDH และ KRH คือมอลโทเด็กซ์ทริน DE สูงจากสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผลิตจากมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูแล้งและฤดูฝน ตามลำดับ โดยใช้เอนไซม์ชนิด non-GMO

จากตารางที่ 4.8 พบว่ามอลโทเด็กซ์ทริน DE ต่ำมีสายโซ่กิ่งที่มีค่า DP 3 ในสัดส่วนสูงที่สุด (11.05 – 12.93%) เมื่อพิจารณาผลของชนิดสตาร์ชต่อการกระจายของสายโซ่กิ่งก้าน พบว่ามอลโท-เด็กซ์ทรินจากมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูฝน (LRL และ KRL) มีสัดส่วนของสายโซ่กิ่งในช่วง DP 2 - 4 มากกว่า แต่มีสัดส่วนของสายโซ่กิ่งที่มี DP 10 - 18 น้อยกว่าตัวอย่างจากมันสำปะหลังฤดูแล้ง (LDL และ KDL) ซึ่งอาจเนื่องมาจากความแตกต่างด้านโครงสร้างแอมิโลเพกทินในสตาร์ช และเมื่อ

เปรียบเทียบกับมอลโทเด็กซ์ทรินทางการค้า (CL1 และ CL2) พบว่าตัวอย่างที่เตรียมได้จากงานวิจัยนี้มีสายโซ่กิ่งสายสั้น โดยเฉพาะโมเลกุลที่มีค่า DP 2 - 3 ในสัดส่วนสูงกว่าตัวอย่างทางการค้า ทั้งนี้ค่า DE ของตัวอย่างที่เตรียมได้มีค่าสูงกว่า DE ของตัวอย่างทางการค้าเล็กน้อย ค่า DE ที่เพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับระดับการเกิดไฮโดรไลซิสที่สูงขึ้น สายโซ่กิ่งที่มีค่า DP ต่ำจึงมีสัดส่วนเพิ่มขึ้นด้วย

จากตารางที่ 4.9 พบว่ามอลโทเด็กซ์ทริน DE กลางมีสายโซ่กิ่งที่มีค่า DP 2 ในสัดส่วนสูงที่สุด (17.78 - 24.22%) เมื่อพิจารณาผลของชนิดสตาร์ชและเอนไซม์ต่อการกระจายของสายโซ่กิ่งก้าน พบว่ามอลโทเด็กซ์ทรินจากมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูฝน (LRM และ KRM) มีสัดส่วนของสายโซ่กิ่งที่มีค่า DP 2 มากกว่าตัวอย่างจากมันสำปะหลังฤดูแล้ง (LDM และ KDM) และมอลโทเด็กซ์ทรินที่ผลิตจากเอนไซม์ชนิด non-GMO (KDM และ KRM) มีสัดส่วนของสายโซ่กิ่งที่มีค่า DP 4 มากกว่า แต่มีสัดส่วนของสายโซ่กิ่งในช่วง DP 6 - 7 น้อยกว่าตัวอย่างที่ผลิตโดยใช้เอนไซม์ชนิด GMO (LDM และ LRM) และเมื่อเปรียบเทียบกับมอลโทเด็กซ์ทรินทางการค้า (CM1 และ CM2) พบว่าตัวอย่างที่เตรียมได้จากงานวิจัยนี้มีสายโซ่กิ่งสายสั้นในช่วง DP 1 - 5 ในสัดส่วนสูงกว่า แต่มีสายโซ่กิ่งก้านในช่วง 6 - 15 ในสัดส่วนต่ำกว่าตัวอย่างทางการค้า ทั้งนี้ ตัวอย่างที่เตรียมได้มีค่า DE สูงกว่าตัวอย่างทางการค้า ค่า DE ที่เพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับระดับการเกิดไฮโดรไลซิสที่สูงขึ้น สายโซ่กิ่งที่มีค่า DP ต่ำจึงมีสัดส่วนเพิ่มขึ้น

จากตารางที่ 4.10 พบว่ามอลโทเด็กซ์ทริน DE สูงมีสายโซ่กิ่งที่มีค่า DP 1 ในสัดส่วนสูงที่สุด (36.62 - 45.28%) เนื่องจากมอลโทเด็กซ์ทริน DE สูงผลิตจากการใช้เอนไซม์กลุ่ม thermostable α-amylase และ glucoamylase ซึ่งเอนไซม์ glucoamylase ตัดพันธะ α-(1,4) และ α-(1,6) กลูโคซิดิกทีละ 1 หน่วยกลูโคส จึงได้ผลิตภัณฑ์หลักเป็นกลูโคส (Marchal และคณะ, 1999) เมื่อนำมาวิเคราะห์รูปแบบการกระจายของของสายโซ่กิ่งก้าน จึงพบกลูโคส (DP 1) ในสัดส่วนที่สูงที่สุด เมื่อพิจารณาผลของชนิดสตาร์ชและเอนไซม์ต่อการกระจายของสายโซ่กิ่งก้าน พบว่ามอลโทเด็กซ์ทรินจากมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูฝน (LRH และ KRH) มีสัดส่วนของสายโซ่กิ่งในช่วง DP 1 - 2 มากกว่า แต่มีสัดส่วนของผลรวมสายโซ่กิ่งสายยาว (DP 10 - 14) น้อยกว่าตัวอย่างจากมันสำปะหลังฤดูแล้ง (LDH และ KDH) และมอลโทเด็กซ์ทรินที่ผลิตจากเอนไซม์ชนิด GMO (LDH และ LRH) มีสัดส่วนของสายโซ่กิ่งที่มีค่า DP 1 มากกว่า แต่มีสัดส่วนของสายโซ่กิ่งที่มีค่า DP 2 น้อยกว่าตัวอย่างที่เตรียมจากเอนไซม์ชนิด non-GMO (KDH และ KRH)

ผลของชนิดสตาร์ชต่อการกระจายตัวของสายโซ่กิ่งก้านของมอลโทเด็กซ์ทริน DE ต่ำ กลาง และสูง (ตารางที่ 4.8 - 4.10) สอดคล้องกับปริมาณแอมิโลสของสตาร์ช โดยมอลโทเด็กซ์ทรินจากสตาร์ชฤดูแล้งมีสายโซ่กิ่งโมเลกุลเล็ก (DP 2 - 4, 1 - 3 และ 1 - 2 สำหรับมอลโทเด็กซ์ทริน DE ต่ำ กลางและสูง ตามลำดับ) น้อยกว่า แต่มีสายโซ่กิ่งโมเลกุลใหญ่ (DP $\geq$ 10 สำหรับตัวอย่างทุกช่วง DE) มากกว่าสตาร์ชฤดูฝน เนื่องจากสตาร์ชฤดูแล้งที่มีแอมิโลสน้อยกว่า จะมีปริมาณแอมิโลเพกทินซึ่งมีพันธะ α-(1,6) ในโมเลกุลมากกว่า ทำให้เอนไซม์ย่อยสตาร์ชได้ยากกว่า ส่งผลให้มอลโทเด็กซ์ทรินจากสตาร์ชฤดูแล้งมีสายโซ่กิ่งโมเลกุลใหญ่มากกว่าตัวอย่างจากสตาร์ชฤดูฝน

อนึ่ง สายโซ่กิ่งสายยาว (DP $\geq$ 10) ที่พบในมอลโทเด็กซ์ทรินมีผลต่อการนำไปใช้ในอาหาร เนื่องจากสายโซ่กิ่งที่มีค่า DP 10 ขึ้นไปสามารถเกิดรีโทรกราเดชันได้ (Luckett และ Wang, 2012) ซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของอาหารระหว่างการเก็บรักษา สัดส่วนของสายโซ่กลุ่มดังกล่าวพบมากที่สุดในมอลโทเด็กซ์ทริน DE ต่ำ และพบน้อยที่สุดในตัวอย่างกลุ่ม DE สูง ความแตกต่างดังกล่าวจะส่งผลต่อความสามารถในการเกิดรีโทรกราเดชันของมอลโทเด็กซ์ทริน นอกจากนี้ ความแตกต่างของรูปแบบการกระจายของสายโซ่กิ่งก้านของตัวอย่างในแต่ละกลุ่ม DE อาจส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพของมอลโทเด็กซ์ทรินด้วย ดังจะกล่าวเพิ่มเติมในส่วนต่อไป

สมบัติทางกระแสวิทยาของสารละลายมอลโทเด็กซ์ทรินความเข้มข้น 20% และ 30% ที่เตรียมจากมอลโทเด็กซ์ทริน DE ต่ำ กลาง และสูง แสดงดังตารางที่ 4.11 - 4.13 ตามลำดับ

สารละลายมอลโทเด็กซ์ทรินความเข้มข้น 20% และ 30% แสดงพฤติกรรมการไหลแบบ Newtonian ยกเว้นสารละลายมอลโทเด็กซ์ทริน DE ต่ำ ความเข้มข้น 30% แสดงพฤติกรรมการไหลเป็น pseudoplastic (ตารางที่ 4.11) Dokic และคณะ (1998) ศึกษาพฤติกรรมการไหล (rheological behaviour) ของสารละลายมอลโทเด็กซ์ทรินที่มีค่า DE 10.0 และ 19.87 - 21.77 ความเข้มข้น 10 - 50% (w/v) โดยใช้วิธี rotational viscometry พบว่าสารละลายที่ได้แสดงลักษณะเป็น Newtonian และที่ความเข้มข้น 20% สารละลายมอลโทเด็กซ์ทรินที่ค่า DE 10.0 และ 19.87 - 21.77 มีค่าความหนืดประมาณ 6.25 mPa.s และ 4 – 5 mPa.s ตามลำดับ ส่วนที่ความเข้มข้น 30% สารละลายมอลโทเด็กซ์ทรินที่ค่า DE 10.0 และ 19.87 - 21.77 มีค่าความหนืดประมาณ 12.5 mPa.s และ 6 - 9 mPa.s ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับความหนืดของมอลโทเด็กซ์ทริน DE กลางและสูงที่เตรียมได้ และงานวิจัยของจิรารัตน์ ทัตติยกุล (2537) พบว่ามอลโทเด็กซ์ทรินที่มีค่า

DE 10.06 และ 14.11 มีพฤติกรรมการไหลเป็น Newtonian flow และมอลโทเด็กซ์ทรินที่มีค่า DE สูงกว่าจะมีความหนืดต่ำกว่า เนื่องจากมีพอลิแซคคาไรด์สายสั้นมากกว่า เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบตัวอย่างในกลุ่ม DE เดียวกัน พบว่าที่ความเข้มข้นเดียวกัน สารละลายมอลโทเด็กซ์ทรินทางการค้าที่มีค่า DE ต่ำกว่า (CL2, CM1 และ CM2) จะมีค่า η หรือ K สูงกว่ามอลโทเด็กซ์ทรินที่เตรียมได้จากการทดลอง เนื่องจากมอลโทเด็กซ์ทรินที่มีค่า DE ต่ำกว่าจะมีสายโซ่กิ่งสายยาวมากกว่า ซึ่งสัมพันธ์กับรูปแบบการกระจายของสายโซ่กิ่งก้านที่เป็นองค์ประกอบของมอลโทเด็กซ์ทริน ดังตารางที่ 4.8 - 4.9 Dokic และคณะ (1998) รายงานว่าเมื่อมอลโทเด็กซ์ทรินมีค่า DE เพิ่มขึ้น น้ำหนักโมเลกุลมีค่าลดลง และพบความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงแบบแปรผกผันระหว่างค่า intrinsic viscosity ([η]) และค่า DE หรือกล่าวได้ว่าน้ำหนักโมเลกุลแปรผันตรงกับค่า [η]

เมื่อนำผลไปวิเคราะห์ทางสถิติแบบ factorial design ของตัวอย่างมอลโทเด็กซ์ทรินที่เตรียมได้จากการทดลองนี้ภายในกลุ่ม DE เดียวกัน พบว่าในกรณีของมอลโทเด็กซ์ทริน DE ต่ำ พบอิทธิพลของปัจจัยหลัก (เอนไซม์และสตาร์ช) อย่างมีนัยสำคัญต่อค่า η ของสารละลายมอลโทเด็กซ์ทรินความเข้มข้น 20% โดยสารละลายที่ประกอบด้วยมอลโทเด็กซ์ทรินที่ผลิตโดยใช้เอนไซม์ชนิด GMO มีค่า η ต่ำกว่าสารละลายที่เตรียมจากตัวอย่างที่ผลิตโดยเอนไซม์ชนิด non-GMO ($p \leq 0.05$) (ภาคผนวก ค ตารางที่ ค.1) และสารละลายของมอลโทเด็กซ์ทรินที่ผลิตจากมันสำปะหลังฤดูแล้งมีค่า η สูงกว่าสารละลายมอลโทเด็กซ์ทรินที่ผลิตจากมันสำปะหลังฤดูฝน ($p \leq 0.05$) (ภาคผนวก ค ตารางที่ ค.2) แต่ไม่มีอิทธิพลร่วมอย่างมีนัยสำคัญของชนิดสตาร์ชและเอนไซม์ต่อค่า η ที่ได้ ($p > 0.05$) ในกรณีของสารละลายมอลโทเด็กซ์ทริน DE ต่ำ ความเข้มข้น 30% พบอิทธิพลร่วมอย่างมีนัยสำคัญของชนิดสตาร์ชและเอนไซม์ต่อค่า K และ n ($p \leq 0.05$) ดังตารางที่ ค.3 ในภาคผนวก ค สำหรับสารละลายมอลโทเด็กซ์ทริน DE กลาง ความเข้มข้น 20% และ 30% และสารละลายมอลโท-เด็กซ์ทริน DE สูง ความเข้มข้น 20% ไม่พบอิทธิพลของแต่ละปัจจัยหลักและอิทธิพลร่วมของปัจจัยหลักต่อค่า η อย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) และสำหรับสารละลายมอลโทเด็กซ์ทริน DE สูง ความเข้มข้น 30% พบอิทธิพลร่วมระหว่างชนิดสตาร์ชและเอนไซม์ต่อค่า η อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ดังตารางที่ 4.12 และ 4.13 อย่างไรก็ตาม แม้ความหนืดที่ได้จะมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 4.11 - 4.13) แต่เมื่อพิจารณาจากค่าตัวเลขแล้วมีความใกล้เคียงกัน เช่น สารละลาย

มอลโทเด็กซ์ทรินความเข้มข้น 20% มีความหนืดต่างกันไม่เกิน 1 mPa.s จึงอาจสรุปได้ว่าชนิดสตาร์ชและเอนไซม์ส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อพฤติกรรมการไหลของมอลโทเด็กซ์ทริน

ตารางที่ 4.11 ค่า η, K และ n ของสารละลายมอลโทเด็กซ์ทริน DE ต่ำ ความเข้มข้น 20% และ 30%

มอลโทเด็กซ์ทริน	20%		30%		
	η (mPa.s)	R^2	K ($mPa.s^n$)	n	R^2
LDL (DE 4.18)	13.9^{bc} ±0.4	0.97-0.98	113.8^{e} ±14.6	0.77^{a} ±0.01	0.97-0.99
LRL (DE 4.11)	13.3^{d} ±0.2	0.97-0.98	125.8^{de} ±17.7	0.76^{ab} ±0.02	0.98
KDL (DE 3.47)	14.3^{b} ±0.2	0.96-0.98	186.8^{b} ± 7.4	0.69^{c} ±0.00	0.98
KRL (DE 3.94)	13.6^{cd} ±0.2	0.96-0.97	154.4^{c} ±18.4	0.73^{b} ±0.02	0.97-0.98
CL1 (DE 3.50)	14.1^{bc} ±0.1	0.97	145.9^{cd} ±15.7	0.74^{b} ±0.02	0.98
CL2 (DE 2.92)	16.8^{a} ±0.6	0.98	350.3^{a} ± 9.4	0.60^{d} ±0.00	0.95-0.97

รายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 ซ้ำ; a, b, c, d, e ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่กำกับด้วยอักษรยกต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$); ns ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$); ใช้ linear model และ power law model ในการจำลองพฤติกรรมการไหลของสารละลายมอลโทเด็กซ์ทริน 20% และ 30% ตามลำดับ; LDL และ LRL คือมอลโทเด็กซ์ทริน DE ต่ำจากสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผลิตจากมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูแล้งและฤดูฝน ตามลำดับ โดยใช้เอนไซม์ชนิด GMO; KDL และ KRL คือมอลโทเด็กซ์ทริน DE ต่ำจากสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผลิตจากมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูแล้งและฤดูฝน ตามลำดับ โดยใช้เอนไซม์ชนิด non-GMO; CL1 และ CL2 คือตัวอย่างมอลโทเด็กซ์ทรินทางการค้า DE ต่ำจากบริษัทที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.12 ค่า η ของสารละลายมอลโทเด็กซ์ทริน DE กลาง ความเข้มข้น 20% และ 30%

มอลโทเด็กซ์ทริน	η (mPa.s)			
	20%	R^2	30%	R^2
LDM (DE 11.36)	$7.8^b±0.2$	0.89-0.94	$12.7^c±1.2$	0.94-0.97
LRM (DE 11.59)	$7.6^b±0.1$	0.87-0.92	$12.5^c±0.4$	0.96-0.97
KDM (DE 13.34)	$7.9^b±0.1$	0.89-0.92	$11.8^c±0.2$	0.96
KRM (DE 13.23)	$7.8^b±0.6$	0.86-0.95	$12.0^c±0.5$	0.94-0.96
CM1 (DE 9.22)	$9.3^a±0.1$	0.92-0.93	$17.5^a±0.3$	0.98
CM2 (DE 10.10)	$9.3^a±0.2$	0.93-0.95	$16.1^b±0.4$	0.98-0.99

รายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 ซ้ำ; a, b, c ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่กำกับด้วยอักษรยกต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$); ns ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$); ใช้ linear model ในการจำลองพฤติกรรมการไหล; LDM และ LRM คือมอลโทเด็กซ์ทริน DE กลางจากสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผลิตจากมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูแล้งและฤดูฝน ตามลำดับ โดยใช้เอนไซม์ชนิด GMO; KDM และ KRM คือมอลโทเด็กซ์ทริน DE กลางจากสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผลิตจากมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูแล้งและฤดูฝน ตามลำดับ โดยใช้เอนไซม์ชนิด non-GMO; CM1 และ CM2 คือตัวอย่างมอลโทเด็กซ์-ทรินทางการค้า DE กลางจากบริษัทที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.13 ค่า η ของสารละลายมอลโทเด็กซ์ทริน DE สูง ความเข้มข้น 20% และ 30%

มอลโทเด็กซ์ทริน	η (mPa.s)			
	20%^{ns}	R^2	30%	R^2
LDH (DE 21.85)	7.0±0.4	0.89-0.90	11.5^{ab}±0.2	0.95-0.96
LRH (DE 18.96)	7.7±0.2	0.91	11.8^{a} ±0.3	0.94-0.95
KDH (DE 21.45)	7.8±0.3	0.87-0.90	11.2^{b} ±0.4	0.94-0.96
KRH (DE 21.32)	7.9±0.4	0.85-0.92	10.0^{c} ±0.0	0.92-0.96

รายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 ซ้ำ; a, b, c ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่กำกับด้วยอักษรยกต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$); ns ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$); ใช้ linear model ในการจำลองพฤติกรรมการไหล; LDH และ LRH คือมอลโทเด็กซ์ทริน DE สูงจากสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผลิตจากมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูแล้งและฤดูฝน ตามลำดับ โดยใช้เอนไซม์ชนิด GMO; KDH และ KRH คือมอลโทเด็กซ์ทริน DE สูงจากสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผลิตจากมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูแล้งและฤดูฝน ตามลำดับ โดยใช้เอนไซม์ชนิด non-GMO

สมบัติทางความร้อนของสารละลายมอลโทเด็กซ์ทรินความเข้มข้น 30% ที่เตรียมจากมอลโท-เด็กซ์ทริน DE ต่ำ กลาง และสูง แสดงดังตารางที่ 4.14 - 4.16 ตามลำดับ

ค่า glass transition temperature of maximally freeze-concentrated unfrozen phase (T_g') เป็นค่าที่บ่งบอกอุณหภูมิการเกิด glass transition ของสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงสุดในการแช่แข็ง (สงวนศรี เจริญเหรียญ, 2558) จากข้อมูลค่า T_g' ในตารางที่ 4.14 - 4.16 พบว่าเมื่อค่า DE เพิ่มขึ้น ค่า T_g' จะลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wang และ Wang (2000) ที่พบค่า T_g' ของสารละลายเข้มข้น 30% ที่เตรียมจากมอลโทเด็กซ์ทรินจากสตาร์ชมันฝรั่ง (DE 5.9) จากสตาร์ชข้าวโพด (DE 8.2) และจากสตาร์ชข้าวเจ้า (DE 14.2) เป็น -9.21 °C -10.12 °C และ -14.71°C ตามลำดับ Levine และ Slade (1986) รายงานว่าค่า T_g' ของสารละลายมอลโทเด็กซ์ทรินทางการค้าความเข้มข้น 20% ที่มีค่า DE ต่ำ (<5) กลาง (10 - 15) และสูง (18 - 20) อยู่ในช่วง -11 ถึง -4 °C -15.5 ถึง -7.5 °C และ -15.5 ถึง -14 °C ตามลำดับ และพบว่าค่า T_g' มีความสัมพันธ์เชิง

เส้นตรงแบบแปรผกผันกับค่า DE แต่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงแบบแปรผันตรงกับค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของมอลโทเด็กซ์ทริน นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบตัวอย่างในกลุ่ม DE เดียวกัน พบว่าสารละลายมอลโทเด็กซ์ทรินทางการค้าที่มีค่า DE ต่ำและกลางมีค่า T_g' สูงกว่ามอลโทเด็กซ์ทรินที่เตรียมได้จากการทดลอง เนื่องจากมอลโทเด็กซ์ทรินทางการค้ามีค่า DE ต่ำกว่ามอลโทเด็กซ์ทรินที่เตรียมได้ในกลุ่ม DE เดียวกัน ซึ่งสัมพันธ์กับรูปแบบการกระจายของสายโซ่กิ่งก้านที่เป็นองค์ประกอบของมอลโทเด็กซ์ทริน (ตารางที่ 4.8 - 4.9)

ตารางที่ 4.14 สมบัติทางความร้อนของสารละลายมอลโทเด็กซ์ทริน DE ต่ำ ความเข้มข้น 30%

มอลโทเด็กซ์ทริน	T_g' (°C)	Frozen water^{ns} (g water/g dried MD)	Unfrozen water (g water/g dried MD)	ΔH_r (J/g dried MD)
LDL (DE 4.18)	$-8.23^{d} \pm 0.15$	2.11±0.01	$0.36^{b} \pm 0.02$	$4.17^{d} \pm 0.33$
LRL (DE 4.11)	$-7.98^{c} \pm 0.03$	2.14±0.03	$0.36^{ab} \pm 0.01$	$5.12^{c} \pm 0.41$
KDL (DE 3.47)	$-8.21^{cd} \pm 0.12$	2.05±0.03	$0.41^{a} \pm 0.03$	$5.16^{c} \pm 0.65$
KRL (DE 3.94)	$-8.01^{cd} \pm 0.17$	2.06±0.04	$0.38^{ab} \pm 0.05$	$5.88^{ab} \pm 0.24$
CL1 (DE 3.50)	$-7.39^{b} \pm 0.05$	2.13±0.12	$0.35^{b} \pm 0.02$	$6.14^{a} \pm 0.06$
CL2 (DE 2.92)	$-7.12^{a} \pm 0.17$	2.13±0.00	$0.39^{ab} \pm 0.02$	$5.38^{bc} \pm 0.09$

รายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 ซ้ำ; a, b, c, d ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่กำกับด้วยอักษรยกต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$); ns ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$); LDL และ LRL คือมอลโทเด็กซ์ทริน DE ต่ำจากสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผลิตจากมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูแล้งและฤดูฝน ตามลำดับ โดยใช้เอนไซม์ชนิด GMO; KDL และ KRL คือมอลโท-เด็กซ์ทริน DE ต่ำจากสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผลิตจากมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูแล้งและฤดูฝน ตามลำดับ โดยใช้เอนไซม์ชนิด non-GMO; CL1 และ CL2 คือตัวอย่างมอลโทเด็กซ์ทรินทางการค้า DE ต่ำจากบริษัทที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.15 สมบัติทางความร้อนของสารละลายมอลโทเด็กซ์ทริน DE กลาง ความเข้มข้น 30%

มอลโทเด็กซ์ทริน	T_g' (°C)	Frozen water^{ns} (g water/g dried MD)	Unfrozen water^{ns} (g water/g dried MD)
LDM (DE 11.36)	-15.45^{c}±0.14	2.10±0.06	0.39±0.01
LRM (DE 11.59)	-15.52^{c}±0.07	2.18±0.14	0.38±0.04
KDM (DE 13.34)	-16.91^{d}±0.14	2.04±0.05	0.40±0.03
KRM (DE 13.23)	-17.11^{e}±0.07	2.09±0.04	0.43±0.02
CM1 (DE 9.22)	-12.69^{a}±0.06	2.13±0.08	0.38±0.03
CM2 (DE 10.10)	-13.34^{b}±0.10	2.11±0.01	0.38±0.01

รายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 ซ้ำ; a, b, c, d, e ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่กำกับด้วยอักษรยกต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$); ns ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$); LDM และ LRM คือมอลโทเด็กซ์ทริน DE กลางจากสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผลิตจากมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูแล้งและฤดูฝน ตามลำดับ โดยใช้เอนไซม์ชนิด GMO; KDM และ KRM คือมอลโทเด็กซ์ทริน DE กลางจากสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผลิตจากมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูแล้งและฤดูฝน ตามลำดับ โดยใช้เอนไซม์ชนิด non-GMO; CM1 และ CM2 คือตัวอย่างมอลโทเด็กซ์ทรินทางการค้า DE กลางจากบริษัทที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4.16 สมบัติทางความร้อนของสารละลายมอลโทเด็กซ์ทริน DE สูง ความเข้มข้น 30%

มอลโทเด็กซ์ทริน	T_g' (°C)	Frozen water^{ns} (g water/g dried MD)	Unfrozen water^{ns} (g water/g dried MD)
LDH (DE 21.85)	-23.97^{b}±0.25	1.95±0.06	0.48±0.05
LRH (DE 18.96)	-23.84^{b}±0.18	2.01±0.02	0.43±0.01
KDH (DE 21.45)	-23.45^{a}±0.06	1.98±0.03	0.44±0.01
KRH (DE 21.32)	-23.87^{b}±0.18	1.97±0.01	0.46±0.03

รายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 ซ้ำ; a, b ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่กำกับด้วยอักษรยกต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$); ns ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$); LDH และ LRH คือมอลโทเด็กซ์ทริน DE สูงจากสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผลิตจากมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูแล้งและฤดูฝน ตามลำดับ โดยใช้เอนไซม์ชนิด GMO; KDH และ KRH คือมอลโทเด็กซ์-ทริน DE สูงจากสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผลิตจากมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูแล้งและฤดูฝน ตามลำดับ โดยใช้เอนไซม์ชนิด non-GMO

จากผลวิเคราะห์ทางสถิติแบบ factorial design ของตัวอย่างมอลโทเด็กซ์ทรินที่เตรียมได้จากการทดลองนี้ภายในกลุ่ม DE เดียวกัน พบว่าในกลุ่มมอลโทเด็กซ์ทริน DE ต่ำ สารละลายของมอลโทเด็กซ์ทรินที่ผลิตจากมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูฝนมีค่า T_g' สูงกว่าสารละลายของมอลโทเด็กซ์ทรินจากมันสำปะหลังฤดูแล้งอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ดังตารางที่ ค.4 ในภาคผนวก ค ส่วนในกลุ่มมอลโทเด็กซ์ทริน DE กลาง สารละลายของมอลโทเด็กซ์ทรินที่ผลิตโดยใช้เอนไซม์ชนิด GMO มีค่า T_g' สูงกว่าสารละลายจากตัวอย่างที่เตรียมจากเอนไซม์ชนิด non-GMO อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ดังตารางที่ ค.5 ในภาคผนวก ค ซึ่งสอดคล้องกับค่า DE ของมอลโทเด็กซ์ทรินจากสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผลิตโดยใช้เอนไซม์ชนิด GMO ที่มีค่า DE ต่ำกว่าเอนไซม์ชนิด non-GMO อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) (ตารางที่ 4.6) แต่ไม่พบอิทธิพลร่วมอย่างมีนัยสำคัญของชนิดสตาร์ชและเอนไซม์ต่อค่า T_g' ของมอลโทเด็กซ์ทรินที่มค่า DE ต่ำและกลาง ($p > 0.05$) และในกลุ่มมอลโทเด็กซ์ทริน DE สูง พบอิทธิพลร่วมระหว่างชนิดสตาร์ชและเอนไซม์อย่างมีนัยสำคัญต่อค่า T_g' ($p \leq 0.05$) ดังตารางที่ ค.6 ในภาคผนวก ค อย่างไรก็ตาม แม้จะพบอิทธิพลหลักและ/หรืออิทธิพลร่วมของชนิดสตาร์ชและเอนไซม์ต่อค่า T_g' อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 4.14 - 4.16) แต่ค่า T_g ของแต่ละตัวอย่างที่เตรียมได้ในการทดลองนี้ยังคงใกล้เคียงกัน (ต่างกันไม่เกิน 1 °C ในแต่ละกลุ่ม DE) ที่อุณหภูมิการเก็บเดียวกัน อาหารที่มีค่า T_g' สูงกว่าอุณหภูมิการเก็บ ส่วนอสัณฐานจะอยู่ในสถานะคล้ายแก้ว โมเลกุลต่าง ๆ จะเคลื่อนที่ช้ามาก อัตราการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ จึงลดลงอย่างมาก ทำให้อาหารมีความคงตัวและมีอายุการเก็บที่นานขึ้น ดังนั้น อาหารที่มีค่า T_g' สูงกว่าจึงมีโอกาสที่จะคงตัวมากกว่าอาหารที่มีค่า T_g' ต่ำกว่าที่อุณหภูมิการเก็บรักษาเท่ากัน (สงวนศรี เจริญเหรียญ, 2558) จึงอาจสรุปได้ว่ามอลโทเด็กซ์ทรินที่เตรยมได้ในกลุ่ม DE เดียวกัน เมื่อนำไปประยุกต์ใช้ในอาหารแช่แข็งจะส่งผลต่อเสถียรภาพของอาหารแช่แข็งใกล้เคียงกัน

ค่า frozen water เป็นปริมาณน้ำในตัวอย่างที่สามารถแข็งตัวได้ และ unfrozen water เป็นน้ำส่วนที่ไม่สามารถแข็งตัวได้แม้อยู่ในอุณหภูมิแช่แข็ง และจะอยู่ภายในส่วนอสัณฐานของอาหาร (สงวนศรี เจริญเหรียญ, 2558) ซึ่ง unfrozen water เป็นกลุ่มของโมเลกุลน้ำที่ถูกตรึงหรือเคลื่อนที่ได้ยากเนื่องจากเกิดอันตรกิริยากับโมเลกุลของตัวถูกละลายหรือพอลิเมอร์ในอาหาร เมื่อพิจารณาค่า frozen และ unfrozen water ของสารละลายมอลโทเด็กซ์ทรินความเข้มข้น 30% พบว่าเมื่อค่า DE เพิ่มขึ้น ค่า frozen water มีแนวโน้มลดลง แต่ค่า unfrozen water มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณา

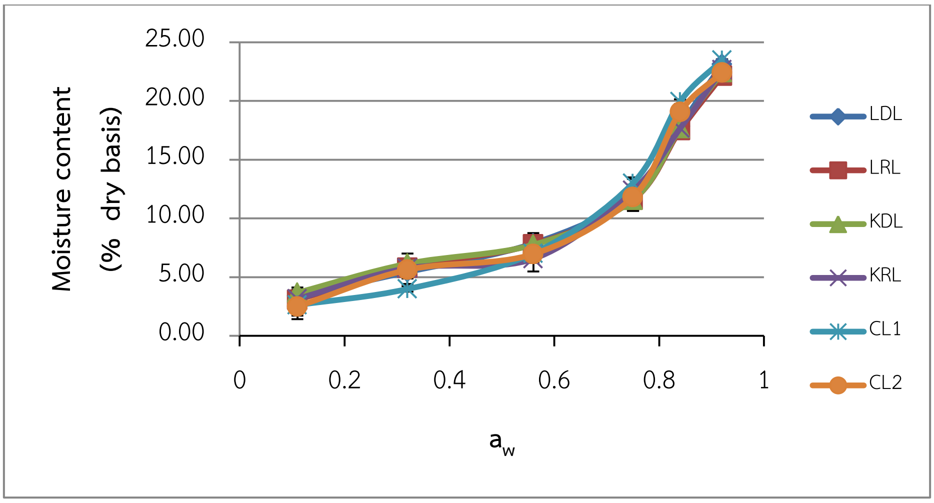
เปรียบเทียบตัวอย่างในกลุ่ม DE เดียวกัน พบว่าค่า frozen water และ unfrozen water ของสารละลายมอลโทเด็กซ์ทรินในแต่ละกลุ่ม DE ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ยกเว้นค่า unfrozen water ของสารละลายมอลโทเด็กซ์ทริน DE ต่ำ และเมื่อวิเคราะห์ค่าทางสถิติแบบ factorial design ของข้อมูลจากมอลโทเด็กซ์ทรินที่เตรียมได้จากงานวิจัยนี้แยกตามกลุ่ม DE พบว่ามีอิทธิพลของชนิดเอนไซม์ต่อค่า frozen water ของสารละลายมอลโทเด็กซ์ทริน DE ต่ำอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ดังตารางที่ ค.7 ในภาคผนวก ค แต่ไม่พบอิทธิพลหลักและ/หรืออิทธิพลร่วมของชนิดเอนไซม์และสตาร์ชต่อค่า frozen water ของสารละลายมอลโทเด็กซ์ทริน DE กลางและสูง และค่า unfrozen water ของสารละลายมอลโทเด็กซ์ทรินในทุกกลุ่ม DE ($p > 0.05$) อย่างไรก็ตาม แม้พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของค่า frozen water และ unfrozen water ของบางชุดข้อมูล แต่ค่าที่ได้ยังคงใกล้เคียงกัน (ค่าต่างกันไม่เกิน 0.1 g water/g dried MD)

เมื่อนำสารละลายมอลโทเด็กซ์ทรินไปเก็บที่อุณหภูมิ 4 °C เป็นเวลา 2 สัปดาห์ พบว่าไม่เกิดรีโทรกราเดชันในสารละลายมอลโทเด็กซ์ทริน DE กลางและสูง แต่พบการเกิดรีโทรกราเดชันในสารละลายมอลโทเด็กซ์ทริน DE ต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wang และ Wang (2000) ที่วิเคราะห์การเกิดรีโทรกราเดชันของสารละลายมอลโทเด็กซ์ทรินจากสตาร์ช 3 ชนิด ที่ความเข้มข้น 30% โดยเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 °C เป็นเวลา 2 สัปดาห์ พบว่ามอลโทเด็กซ์ทรินจากสตาร์ชมันฝรั่งที่มีค่า DE 5.9 มี ΔH_r เป็น 3.04 J/g ขณะที่มอลโทเด็กซ์ทรินจากสตาร์ชข้าวโพดและข้าวเจ้าที่มีค่า DE 8.2 และ 14.2 ตามลำดับ ไม่พบการเกิดรีโทรกราเดชัน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะมอลโทเด็กซ์ทริน DE ต่ำ มีแซคคาไรด์สายยาว (DP $\geq$ 10) มากกว่ามอลโทเด็กซ์ทริน DE กลางและสูง (ตารางที่ 4.8 - 4.10) เมื่อค่า DE เพิ่มขึ้นเนื่องจากระดับการย่อยเพิ่มขึ้น จะพบโอลิโกแซคคาไรด์และน้ำตาลโมเลกุลเล็กเพิ่มขึ้นและสัดส่วนของโอลิโกแซคคาไรด์ที่มีค่า DP $\geq$ 10 ลดลง Luckett และ Wang (2012) รายงานว่าสายกิ่งของสตาร์ชที่จะเกิดรีโทรกราเดชันได้ควรมี DP $\geq$ 10 เมื่อพิจารณาค่า ΔH_r (ตารางที่ 4.14) พบว่ามอลโทเด็กซ์ทรินทางการค้าชนิด CL1 มีค่า ΔH_r สูงที่สุดซึ่งสัมพันธ์กับสัดส่วนของผลรวมของสายโซ่กิ่งก้านที่มีค่า DP $\geq$ 10 ที่มีค่าสูงที่สุด ดังตารางที่ 4.8 และเมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ทางสถิติแบบ factorial design ของข้อมูลจากมอลโทเด็กซ์ทรินที่เตรียมได้จากการทดลองนี้ ไม่พบอิทธิพลร่วมของชนิดสตาร์ชและเอนไซม์ต่อค่า ΔH_r ของมอลโทเด็กซ์ทริน ($p > 0.05$) แต่พบอิทธิพลหลักของชนิดเอนไซม์และสตาร์ชต่อค่า ΔH_r โดยสารละลายมอลโทเด็กซ์ทรินจาก

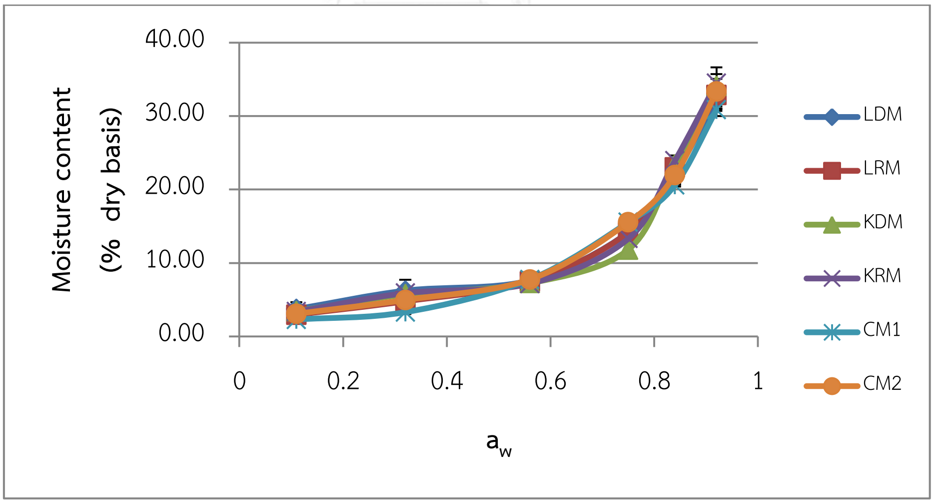
สตาร์ชมันสำปะหลังที่ผลิตโดยใช้เอนไซม์ชนิด non-GMO มีค่า ΔH_r สูงกว่าสารละลายจากตัวอย่างที่ผลิตโดยใช้เอนไซม์ชนิด GMO อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ดังตารางที่ ค.8 ในภาคผนวก ค และสารละลายมอลโทเด็กซ์ทรินที่ผลิตจากมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูฝนมีค่า ΔH_r สูงกว่าสารละลายมอลโทเด็กซ์ทรินที่ผลิตจากหัวมันฤดูแล้งอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ดังตารางที่ ค.9 ในภาคผนวก ค อย่างไรก็ดี ค่า ΔH_r อาจถือได้ว่าใกล้เคียงกัน (ต่างกันไม่เกิน 2 J/g dried MD)

กราฟ sorption isotherm ของมอลโทเด็กซ์ทรินผงที่ผลิตจากสตาร์ช 2 ชนิดและเอนไซม์ 2 ชนิด และมอลโทเด็กซ์ทรินทางการค้าที่มีค่า DE ต่ำ กลาง และสูง แสดงดังรูปที่ 4.2 - 4.4 ตามลำดับ พบว่าตัวอย่างมอลโทเด็กซ์ทรินใน กลุ่ม DE เดียวกันที่ผลิตจากสตาร์ชและเอนไซม์ต่างชนิด รวมถึงตัวอย่างทางการค้า มีพฤติกรรมการดูดความชื้นคล้ายกัน และเมื่อพิจารณาจากกราฟ sorption isotherm ของมอลโทเด็กซ์ทรินที่มีค่า DE ต่างกันดังรูปที่ 4.5 พบว่าที่ a_w 0.11 - 0.56 มอลโทเด็กซ์ทรินผงมีพฤติกรรมการดูดความชื้นคล้ายกันในทุกตัวอย่าง แต่มอลโทเด็กซ์ทรินผงที่มีค่า DE สูงขึ้นมีแนวโน้มในการดูดความชื้นได้ดีขึ้น (ค่าความชื้นที่สมดุลมากกว่า 8%) เมื่อเก็บไว้ภายใต้ภาวะแวดล้อมที่มีความชื้นสัมพัทธ์มากกว่า 56% ที่ 30 °C ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Wang และ Wang (2000) โดยตัวอย่างมอลโทเด็กซ์ทรินจากสตาร์ชข้าวโพด สตาร์ชมันฝรั่ง และสตาร์ชข้าวเจ้ามีแนวโน้มในการดูดความชื้นได้ดีขึ้นเมื่อความชื้นสัมพัทธ์มากกว่า 76% เนื่องจากเมื่อค่า DE สูงขึ้นมอลโทเด็กซ์ทรินมีแซคคาไรด์โมเลกุลเล็กมากขึ้น (ตารางที่ 4.8 - 4.10) จึงดูดความชื้นได้ดีขึ้นด้วย

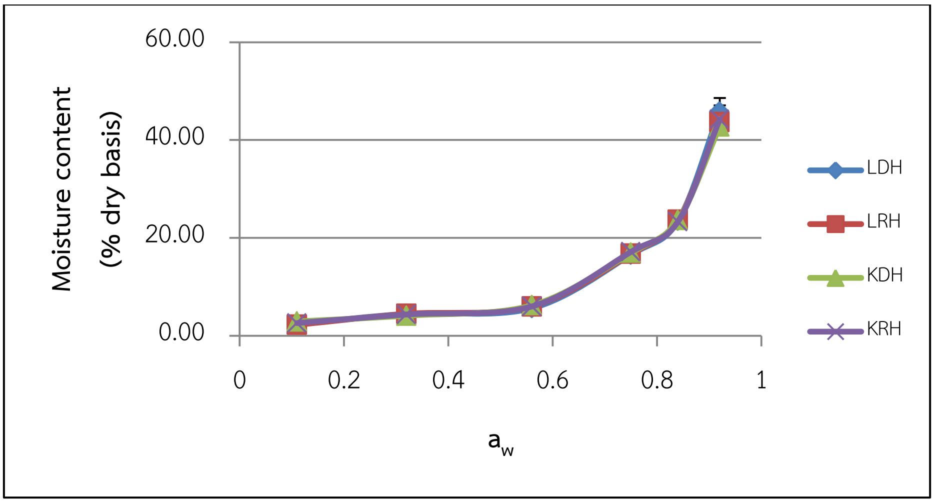
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4.2 sorption isotherm ที่ 30 °C ของมอลโทเด็กซ์ทรินผงที่มีค่า DE ต่ำ; error bar แสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 ซ้ำ; LDL และ LRL คือมอลโทเด็กซ์ทริน DE ต่ำจากสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผลิตจากมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูแล้งและฤดูฝน ตามลำดับ โดยใช้เอนไซม์ชนิด GMO; KDL และ KRL คือมอลโทเด็กซ์ทริน DE ต่ำจากสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผลิตจากมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูแล้งและฤดูฝน ตามลำดับ โดยใช้เอนไซม์ชนิด non-GMO; CL1 และ CL2 คือตัวอย่างมอลโทเด็กซ์ทรินทางการค้า DE ต่ำจากบริษัทที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

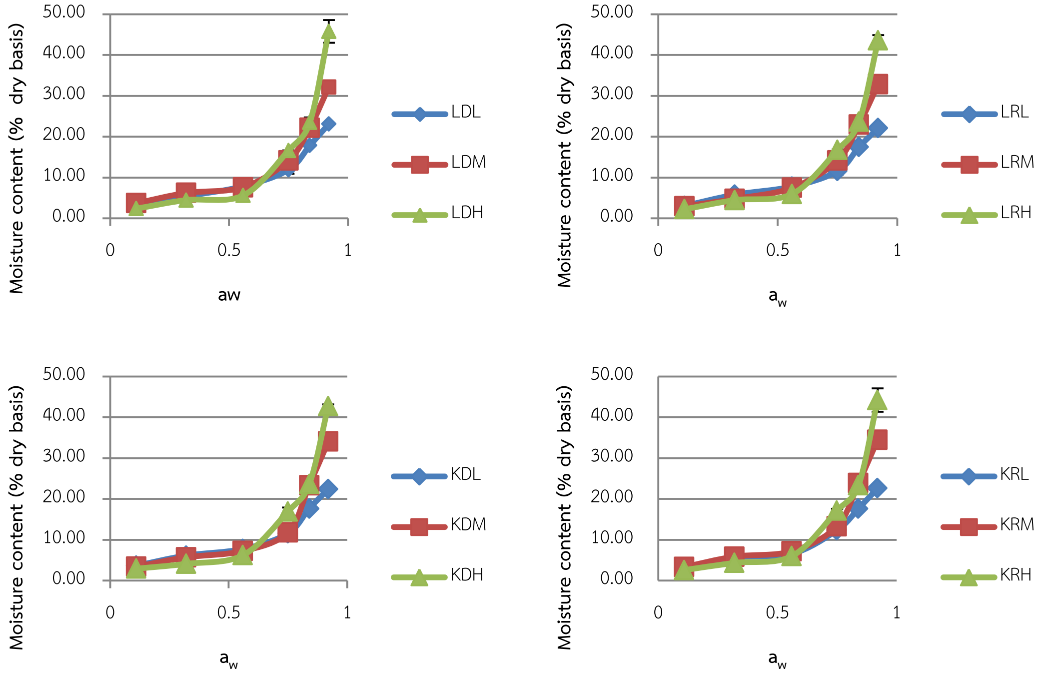


รูปที่ 4.3 sorption isotherm ที่ 30 °C ของมอลโทเด็กซ์ทรินผงที่มีค่า DE กลาง; error bar แสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 ซ้ำ; LDM และ LRM คือมอลโทเด็กซ์ทริน DE กลางจากสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผลิตจากมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูแล้งและฤดูฝน ตามลำดับ โดยใช้เอนไซม์ชนิด GMO; KDM และ KRM คือมอลโท-เด็กซ์ทริน DE กลางจากสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผลิตจากมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูแล้งและฤดูฝน ตามลำดับ โดยใช้เอนไซม์ชนิด non-GMO; CM1 และ CM2 คือตัวอย่างมอลโทเด็กซ์ทรินทางการค้า DE กลางจากบริษัทที่ 1 และ 2 ตามลำดับ



รูปที่ 4.4 sorption isotherm ที่ 30 °C ของมอลโทเด็กซ์ทรินผงที่มีค่า DE สูง; error bar แสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 ซ้ำ; LDH และ LRH คือมอลโทเด็กซ์ทริน DE สูงจากสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผลิตจากมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูแล้งและฤดูฝน ตามลำดับ โดยใช้เอนไซม์ชนิด GMO; KDH และ KRH คือมอลโทเด็กซ์-ทริน DE สูงจากสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผลิตจากมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูแล้งและฤดูฝน ตามลำดับ โดยใช้เอนไซม์ชนิด non-GMO

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4.5 sorption isotherm ที่ 30 °C ของมอลโทเด็กซ์ทรินผงที่มีค่า DE ต่ำ กลาง และสูง; error bar แสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 ซ้ำ; LDL, LDM และ LDH คือมอลโทเด็กซ์ทรินจากสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผลิตจากมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูแล้งโดยใช้เอนไซม์ชนิด GMO ที่มีค่า DE ต่ำ กลาง และสูง ตามลำดับ; LRL, LRM และ LRH คือมอลโทเด็กซ์ทรินจากสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผลิตจากมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูฝนโดยใช้เอนไซม์ชนิด GMO ที่มีค่า DE ต่ำ กลาง และสูง ตามลำดับ; KDL, KDM และ KDH คือมอลโทเด็กซ์ทรินจากสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผลิตจากมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูแล้งโดยใช้เอนไซม์ชนิด non-GMO ที่มีค่า DE ต่ำ กลาง และสูง ตามลำดับ; KRL, KRM และ KRH คือมอลโทเด็กซ์ทรินจากสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผลิตจากมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูฝนโดยใช้เอนไซม์ชนิด non-GMO ที่มีค่า DE ต่ำ กลาง และสูง ตามลำดับ

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

สตาร์ชมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูแล้งและฤดูฝนมีสมบัติด้านการเกิดเพสต์ขณะร้อนและเย็น และสมบัติทางความร้อนที่ต่างกัน แต่สมบัติที่ต่างกันนี้ไม่มีผลต่อระดับการย่อยแป้งให้เป็นมอล-โทเด็กซ์ทรินที่ DE ต่าง ๆ โดยใช้ thermostable α-amylase อย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ยกเว้นที่เวลาในการย่อย 120 นาที ส่วนชนิดของเอนไซม์ thermostable α-amylase ที่ใช้ในการทดลองนี้มีผลต่อค่า DE ของมอลโทเด็กซ์ทรินที่เตรียมได้ ($p \leq 0.05$) เวลาในการย่อยที่เหมาะสมสำหรับผลิตมอลโทเด็กซ์ทรินที่มีค่า DE ต่ำ (< 5) และกลาง (10 - 15) ได้แก่ 15 นาที และ 90 นาที ตามลำดับ สำหรับการเตรียมตัวอย่างมอลโทเด็กซ์ทรินที่มีค่า DE สูง ใช้เอนไซม์ 2 ชนิดในการย่อย 2 ขั้นตอน โดยในขั้นแรก ย่อยสตาร์ชโดยใช้ thermostable α-amylase เป็นเวลา 90 นาที จากนั้นใช้ glucoamylase ในการย่อยขั้นที่สองเป็นเวลา 15 - 30 นาที ให้ได้ค่า DE ตามต้องการ เมื่อนำมอล-โทเด็กซ์ทรินไปทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย พบว่ามอลโทเด็กซ์ทรินผงที่ได้มีความชื้นและค่าผลผลิตอยู่ในช่วง 2.11 - 4.30% และ 21.98 - 40.72% ตามลำดับ

จากรูปแบบการกระจายของสายโซ่กิ่งก้านที่เป็นองค์ประกอบของมอลโทเด็กซ์ทริน พบว่าเมื่อค่า DE เพิ่มขึ้นเนื่องจากระดับการเกิดไฮโดรไลซิสที่สูงขึ้น สายโซ่กิ่งที่มีค่า DP ต่ำจึงมีสัดส่วนเพิ่มขึ้นและโอลิโกแซคคาไรด์สายยาวมีสัดส่วนลดลง เมื่อพิจารณามอลโทเด็กซ์ทรินในแต่ละกลุ่ม DE ที่ผลิตจากสตาร์ชและเอนไซม์ต่างชนิดกัน พบว่าในกลุ่มมอลโทเด็กซ์ทริน DE ต่ำ ชนิดของสตาร์ชมีผลต่อสายโซ่กิ่งในช่วง DP 2 - 4 และ 10 - 18 ในกลุ่มมอลโทเด็กซ์ทริน DE กลาง พบอิทธิพลของชนิดสตาร์ชต่อสายโซ่กิ่งที่มีค่า DP 2 และพบอิทธิพลของชนิดเอนไซม์ต่อสายโซ่กิ่งในช่วง DP 6 - 7 และในกลุ่มมอลโทเด็กซ์ทริน DE สูง พบอิทธิพลของชนิดสตาร์ชต่อสายโซ่กิ่งในช่วง DP 1 - 2 และ DP 10 - 14 และพบอิทธิพลของชนิดเอนไซม์ต่อสายโซ่กิ่งในช่วง DP 1 - 2

เมื่อพิจารณาสมบัติทางกายภาพของมอลโทเด็กซ์ทรินที่เตรียมได้และมอลโทเด็กซ์ทรินทางการค้า พบว่าเมื่อค่า DE สูงขึ้น สารละลายมอลโทเด็กซ์ทรินความเข้มข้น 20% และ 30% ที่มีพฤติกรรมการไหลแบบ Newtonian มีความหนืดต่ำลง สารละลายมอลโทเด็กซ์ทรินความเข้มข้น 30% มีค่า T_g' ลดลง แต่ค่า unfrozen water เพิ่มขึ้น ส่วนเอนทาลปีของการหลอมผลึกเนื่องจาก

รีโทรกราเดชันพบในมอลโทเด็กซ์ทรินที่มีค่า DE ต่ำเท่านั้น และในกลุ่ม DE เดียวกัน แม้พบอิทธิพลของปัจจัยหลัก (เอนไซม์และสตาร์ช) และอิทธิพลร่วมของปัจจัยหลักต่อสมบัติทางการไหลและสมบัติทางความร้อนในมอลโทเด็กซ์ทรินบางตัวอย่าง แต่เมื่อพิจารณาจากค่าตัวเลขพบว่ามีความใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณา sorption isotherm พบว่าที่ a_w 0.11 - 0.56 มอลโทเด็กซ์ทรินผงทุกตัวอย่างมีพฤติกรรมการดูดความชื้นคล้ายกัน แต่เมื่อ a_w สูงขึ้น มอลโทเด็กซ์ทรินผงที่มีค่า DE สูงขึ้นมีแนวโน้มในการดูดความชื้นได้ดีขึ้น ซึ่งสมบัติทางกายภาพดังที่กล่าวนี้สัมพันธ์กับข้อมูลการกระจายของสายโซ่กิ่งก้านที่เป็นองค์ประกอบของมอลโทเด็กซ์ทริน โดยรวมแล้วอาจสรุปได้ว่าชนิดสตาร์ชและเอนไซม์ไม่มีผลหรือส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อสมบัติทางกายภาพของมอลโทเด็กซ์ทริน

ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาผลของฤดูการเก็บเกี่ยวต่อโครงสร้างของสตาร์ชเพิ่มเติมเพื่อให้ได้ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างฤดูการเก็บเกี่ยวหัวมันสำปะหลังและสมบัติของมอลโทเด็กซ์ทรินที่ชัดเจนยิ่งขึ้น
2. ควรศึกษาการผลิตมอลโทเด็กซ์ทรินในสายการผลิตจำลองเพื่อนำวิธีการผลิตไปประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รายการอ้างอิง

AACC. (2000). General pasting method for wheat or rye flour or starch using the rapid visco analyser *Approved Methods of the American Association of Cereal Chemists* (10th ed.). St. Paul, Minnesota: American Association of Cereal Chemists.

AOAC. (2000). *Official Methods of Analysis* (Vol. 16th). Maryland: Association of Official Analytical Chemists.

Asaoka, M., Blanshard, J. M. V., & Rickard, J. E. (1991). Seasonal effects on the physico-chemical properties of starch from four cultivars of cassava. *Starch/Stärke, 43*(12), 455-459.

Breuninger, W. F., Piyachomkwan, K., & Sriroth, K. (2009). Tapioca/Cassava starch: production and use. In J. BeMiller & R. Whistler (Eds.), *Starch: Chemistry and Technology* (third ed., pp. 541-568). New York: Academic Press.

Chronakis, I. S. (1998). On the Molecular Characteristics, Compositional Properties, and Structural-Functional Mechanisms of Maltodextrins: A Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 38*(7), 599-637.

Dokic, P., Jakovljevic, J., & Dokic-Baucal, L. (1998). Molecular characteristics of maltodextrins and rheological behaviour of diluted and concentrated solutions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 141*, 435-440.

Gibson, T. S., Solah, V. A., & McClearyt, B. V. (1997). A procedure to measure amylose in cereal starches and flours with Concanavalin A. *Cereal Science, 25*, 111-229.

Greenspan, L. (1977). Humidity fixed points of binary saturated aqueous solution. *Journal of Research of National Bureau of Standards-A. Physics and Chemistry, 81A*(1), 89-96.

Khatoon, S., Sreerama, Y. N., Raghavendra, D., Bhattacharya, S., & Bhat, K. K. (2009). Properties of enzyme modified corn, rice and tapioca starches. *Food Research International, 42*(10), 1426-1433.

Kuakpetoon, D. & Wang, Y.-J. (2007). Internal structure and physicochemical properties of corn starches as revealed by chemical surface gelatinization. *Carbohydrate Research, 342*(15), 2253–2263.

Levine, H. & Slade, L. (1986). A polymer physico-chemical approach to the study of commercial starch hydrolysis products (SHPs). *Carbohydrate Polymers, 6*, 213-244.

Luckett, C. R. & Wang, Y.-J. (2012). Effect of β-amylolysis on the resistant starch formation of debranched corn starches. *Journal of Agricultural and Food Chemistry, 60*, 4751-4757.

Lumdubwong, N. & Seib, P. A. (2001). Low- and medium-DE maltodextrins from waxy wheat starch: preparation and properties. *Starch/Stärke, 53*, 605-615.

Marchal, L. M., Beeftink, H. H., & Tramper, A. J. (1999). Towards a rational design of commercial maltodextrins. *Trends in Food Science & Technology, 10*, 345-355.

Nelson, N. (1944). A photometric adaptation of the Somogyi method for the determination of glucose. *Biological Chemistry, 153*, 375-380.

Roos, Y. (1993). Melting and glass transitions of low molecular weight carbohydrate. *Carbohydrate Research, 238*, 39-48.

Slominska, L., Wisniewska, D., & Grzeskowiak, A. (2003). Liquefaction of starch by thermostable alpha-amylase. *ACTA Technologia Alimentaria, 2*(2), 17-26.

Sriroth, K., Piyachomkwan, K., Wanlapatit, S., & Oates, C. G. (2000). Cassava starch technology: the Thai experience. *Starch/Stärke, 52*, 439-449.

Sriroth, K., Santisopasri, V., Petchalanuwat, C., Kurotjanawong, K., Piyachomkwan, K., & Oates, C. G. (1999). Cassava starch granule structure-function properties:

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

infuence of time and conditions at harvest on four cultivars of cassava starch. *Carbohydrate Polymers, 38*, 161-170.

Takeda, Y. & Hizukuri, S. (1987). Structures of rice amylopectins with low and high affinities for iodine. *Carbohydrate Research, 168*, 79-88.

Wang, Y.-J. & Wang, L. (2000). Structures and properties of commercial maltodextrins from corn, potato, and rice starches. *Starch/Stärke, 52*, 296–304.

กล้าณรงค์ ศรีรอต และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ. (2546). เทคโนโลยีของแป้ง. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

จิรารัตน์ ทัตติยกุล. (2537). การผลิตมอลโตเดกซ์ทรินจากแป้งมันสำปะหลังโดยใช้เอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสที่ทนความร้อน. (วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.

เป็นธิดา มณีโชติ, พรพรรณ หอมขจร และ พรพิมล ทองปลอด. (2500). เส้นความชื้นซอร์พชันไอโซเทอมของถั่วแมคคาเดเมียที่ปลูกในประเทศไทย. (โครงการการเรียนกาสอนเพื่อเสริมประสบการณ์), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย., กรุงเทพฯ.

มูลนิธิสถาบันพัฒนามันสำปะหลังแห่งประเทศไทย. (2543). องค์ประกอบหัวมันสำปะหลัง.[ออนไลน์] แหล่งที่มา: *http://www.tapiocathai.org/D.html* [22 มกราคม 2558].

สงวนศรี เจริญเหรียญ. (2558). ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการแช่แข็ง. ใน สงวนศรี เจริญเหรียญ, เทคโนโลยีการแช่แข็งอาหาร (หน้า 29-33). กรุงเทพฯ: เอเชีย ดิจิตอลการพิมพ์ จำกัด.

สมาคมการค้ามันสำปะหลังไทย. (2559ก). การสำรวจผลผลิตมันสำปะหลังในปี 2555 – 2559. [ออนไลน์] แหล่งที่มา: *http://ttta-tapioca.org/การสำรวจผลผลิต/* [13 เมษายน 2559].

สมาคมการค้ามันสำปะหลังไทย. (2559ข). ปริมาณการส่งออกผลิตภัณฑ์มันสำปะหลัง ปี 2549 – 2558. [ออนไลน์] แหล่งที่มา: *http://ttta-tapioca.org/การส่งออก/* [13 เมษายน 2559].

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ก
วิธีวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

ก.1 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น (AOAC, 2000)

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ถ้วยอลูมิเนียมสำหรับหาความชื้น (moisture pan)
2. โถดูดความชื้น (desiccator)
3. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Sartorius, Extend, Germany)
4. ตู้อบลมร้อน (Memmert, UF110, Germany)

วิธีการวิเคราะห์

1. อบถ้วยอลูมิเนียมสำหรับหาความชื้นพร้อมฝาปิดที่อุณหภูมิ 100 - 105 °C จนน้ำหนักคงที่ ทิ้งให้เย็นใน โถดูดความชื้นประมาณ 30 นาที ชั่งน้ำหนักที่แน่นอน
2. ชั่งตัวอย่างประมาณ 2 g ใส่ในถ้วยอลูมิเนียมจากข้อ 1. บันทึกน้ำหนักที่แน่นอน
3. นำถ้วยอลูมิเนียมพร้อมตัวอย่างเข้าอบแห้งในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100 - 105 °C โดยเปิดฝาถ้วยอลูมิเนียมไว้ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
4. ปิดฝาอลูมิเนียม นำถ้วยออกจากตู้อบ ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้นปรมาณ 30 นาที แล้วชั่งน้ำหนักพร้อมบันทึกไว้
5. นำถ้วยอลูมิเนียมพร้อมตัวอย่างไปอบซ้ำอีกเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วทำซ้ำข้อ 4. จดบันทึกน้ำหนักสุดท้าย (น้ำหนักในข้อ 4. และข้อ 5. ต่างกัน ไม่เกิน 0.005 g)

คำนวณปริมาณความชื้น ดังแสดงในสมการ ก.1

$$\text{ปริมาณความชื้น (\%)} = \frac{[\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ}]}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ}} \times 100 \quad \text{.....ก.1}$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ก.2 การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนหยาบ โดยวิธี Kjeldahl (AOAC, 2000)

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องย่อยโปรตีน (Buchi, K-424, Switzerland)
2. เครื่องกลั่นไนโตรเจน (Buchi, K-355, Switzerland)
3. เครื่องดักไอกรด (Buchi, B-414, Switzerland)
4. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Mettler-Toledo, AB204, Switzerland)
5. หลอดย่อยตัวอย่าง (Kjeldahl tube) (Buchi, Switzerland)

สารเคมี

1. สารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น (J.T. Baker®, Avantor Performance Materials, USA)
2. สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (QReC®, Qrec Chemical, New Zealand) ความเข้มข้น 0.1 M
3. สารละลายกรดบอริก (QReC®, Qrec Chemical, New Zealand) ความเข้มข้น 4% โดยปริมาตร
4. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (QReC®, Qrec Chemical, New Zealand) ความเข้มข้น 50% โดยปริมาตร
5. สารเร่งปฏิกิริยา (selenium reagent mixture) (Merck®, Merck KGaA, Germany)
6. Methyl red-methylene blue indicator

วิธีการวิเคราะห์

1. เปิดเครื่องย่อยโปรตีนเพื่ออุ่นเตาให้ร้อนโดยปรับระดับความร้อนไปที่เบอร์ 10 และเปิดเครื่องทำน้ำเย็นที่ต่อกับเครื่องดูดไอกรด (scrubber) เป็นเวลาอย่างน้อย 10 นาทีก่อนการย่อยตัวอย่าง
2. ชั่งตัวอย่างที่ทราบน้ำหนักแน่นอนประมาณ 1 g ลงบนกระดาษกรอง Whatman no. 41 ห่อกระดาษกรองแล้วใส่ลงในหลอดย่อยตัวอย่าง สำหรับ blank ใช้น้ำกลั่น 1 ml แทนตัวอย่าง
3. เติมสารเร่งปฏิกิริยา 5 g และสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 20 ml ลงในหลอดย่อยแต่ละหลอด
4. ต่อหลอดย่อยเข้ากับเครื่องย่อยโปรตีน เปิดเครื่องดูดไอกรด ปรับระดับความร้อนเป็นเบอร์ 8 ย่อยตัวอย่างจนกระทั่งได้สารละลายใสสีน้ำตาลแดง ใช้เวลาประมาณ 20 - 40 นาที โดยตรวจลักษณะสารในหลอดย่อยเป็นระยะ
5. ปิดเตาย่อย ยกหลอดย่อยออกจากเตาแล้วพักไว้จนหมดควัน แยกชุดหลอดย่อยออกจากเครื่องย่อย และทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องในตู้ดูดควัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

6. เติมสารละลายกรดบอริก 50 ml ลงในขวดรูปกรวยขนาด 500 ml และเติม Methyl red-methylene blue indicator 3 หยด สำหรับเก็บสารที่ได้จากชุดกลั่นที่ปลายเครื่องกลั่นไนโตรเจน โดยให้ปลายท่อจุ่มอยู่ในสารละลายกรดบอริก
7. ต่อตัวอย่างที่ย่อยได้เข้ากับเครื่องกลั่นไนโตรเจน แล้วกลั่นโดยใช้ภาวะการกลั่น ดังนี้
   - น้ำกลั่น: 50 ml
   - สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 50%: 60 ml
   - เวลาในการกลั่น: 5 นาที (ไม่มี delay time)
   - Steam 100%
   - Aspiration: SAM
8. ในการกลั่นจะเกิดแก๊สแอมโมเนียซึ่งจะถูกจับไว้ด้วยสารละลายกรดบอริก ทำให้สารละลายในขวดรูปกรวยเป็นสีเขียวเมื่อกลั่นจนครบเวลาที่กำหนดจะได้สารละลายทั้งหมดประมาณ 200 ml
9. นำสารละลายที่ได้จากการกลั่นทั้งหมดมาไทเทรตด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (ทราบความเข้มข้นแน่นอน) ที่จุดยุติจะได้สารละลายสีม่วงแดง จดปริมาตรสารละลายไฮโดรคลอริกที่ใช้

คำนวณปริมาณไนโตรเจนและโปรตีนหยาบ ดังแสดงในสมการ ก.2 และ ก.3

$$\text{ปริมาณไนโตรเจน (\%dry basis)} = \frac{(V_a - V_b) \times N \times 1.4}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้งเริ่มต้น}} \quad \text{......ก.2}$$

เมื่อ V_a คือ ปริมาตรของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ในการไทเทรตตัวอย่าง

V_b คือ ปริมาตรของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ในการไทเทรต blank

N คือ ความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก

ปริมาณโปรตีนหยาบ (%dry basis) = ปริมาณไนโตรเจน (%dry basis) x 6.25.............ก.3

เมื่อ 6.25 คือแฟกเตอร์การคูณเป็นร้อยละของโปรตีนในอาหาร

ก.3 การวิเคราะห์ปริมาณไขมัน (AOAC, 2000)

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ชุดเครื่องแก้วสำหรับสกัดไขมัน (soxhlet apparatus) พร้อมเตาหลุมให้ความร้อน (Gerhardt, HC61, Germany)
2. เครื่องระเหยแบบสุญญากาศ (rotary vacuum evaporator) (Eyela, N-N series, Japan)
3. ตู้อบลมร้อน (Memmert, UF110, Germany)
4. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Mettler-Toledo, AB204, Switzerland)
5. โถดูดความชื้น (desiccator)

สารเคมี

1. Petroleum ether (QReC®, Qrec Chemical, New Zealand)

วิธีการวิเคราะห์

1. อบขวดก้นแบนที่อุณหภูมิ 100 - 105 °C ประมาณ 1 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้นแล้วนำมาชั่งน้ำหนักที่แน่นอนและบันทึก
2. ชั่งตัวอย่างที่อบแห้งแล้วซึ่งทราบน้ำหนักแน่นอน 2 g ห่อด้วยกระดาษกรอง Whatman no. 1
3. นำห่อตัวอย่างใส่ใน thimble คลุมด้วยสำลี แล้วนำไปใส่ในชุดสกัดไขมัน
4. เติมปิโตรเลียมอีเทอร์ประมาณ 250 ml ลงในขวดก้นแบนซึ่งบันทึกน้ำหนักที่แน่นอน นำไปต่อเข้ากับชุดสกัดไขมัน นำไปสกัดไขมันเป็นเวลา 3 ชั่วโมง เมื่อครบเวลานำขวดก้นแบนไประเหยปิโตรเลียมอีเทอร์จนแห้งด้วยเครื่องระเหยแบบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 40 °C
5. นำขวดก้นแบนไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100 - 105 °C ประมาณ 1 ชั่วโมง จากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วชั่งน้ำหนักขวดก้นแบนที่มีไขมัน

คำนวณปริมาณไขมัน ดังแสดงในสมการ ก.4

$$\text{ปริมาณไขมัน (\%dry basis)} = \frac{\text{ปริมาณไขมันที่สกัดได้}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง}} \times 100 \qquad \text{ก.4}$$

ก.4 การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า (AOAC, 2000)

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เตาเผา (furnace) (Carbolite, Control 201, UK)
2. ถ้วยกระเบื้องเคลือบ (crucible)
3. เตาให้ความร้อน (hot plate)
4. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Mettler-Toledo, MS304S, Switzerland)
5. โถดูดความชื้น (desiccator)

วิธีการวิเคราะห์

1. เผาถ้วยกระเบื้องเคลือบในเตาเผาที่อุณหภูมิ 550 °C จนน้ำหนักคงที่ นำออกมาทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักและบันทึกน้ำหนักที่ได้
2. ชั่งตัวอย่างให้ได้น้ำหนักแน่นอน 2 g ใส่ถ้วยกระเบื้องเคลือบที่ทราบน้ำหนักแน่นอน นำตัวอย่างไปเผาบนเตาให้ความร้อนในตู้ดูดควันจนได้เถ้าสีดำและหมดควัน
3. นำไปเผาต่อในเตาเผาที่อุณหภูมิ 550 °C จนได้เถ้าสีขาวหรือสีเทาอ่อน
4. ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้นและชั่งน้ำหนักที่แน่นอน

คำนวณปริมาณเถ้า ดังแสดงในสมการ ก.5

$$\text{ปริมาณเถ้า (\%dry basis)} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างหลังเผา}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้งเริ่มต้น}} \times 100 \qquad \text{...ก.5}$$

ก.5 การคำนวณปริมาณคาร์โบไฮเดรต ดังแสดงในสาการ ก.6

ปริมาณคาร์โบไฮเดรต (%db) = 100 - (ไขมัน (%db) + โปรตีน (%db) + เถ้า (%db))...ก.6

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ก.6 การวิเคราะห์ค่าสมมูลเด็กซ์โทรส (DE) (ดัดแปลงจากวิธีของ Nelson (1944))

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (Spectrophotometer) (Thermo Fisher Scientific, Genesys20, USA)
2. เตาให้ความร้อน (hot plate)
3. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Sartorius, Extend, Germany)

สารเคมี

1. Ammonium molybdate tetrahydrate (Macron®, Avantor Performance Materials, USA)
2. Copper (II) sulfate (Univar, Ajax Finechem, Australia)
3. D-glucose (QReC®, Qrec Chemical, New Zealand)
4. Disodium arsenate heptahydrate (Sigma®, Sigma-Aldrich, USA)
5. Potassium sodium tartrate tetrahydrate (Univar, Ajax Finechem, Australia)
6. Sodium carbonate (anhydrous) (SD®, S D Fine-Chem Limited, India)
7. Sodium hydrogen carbonate (Univar, Ajax Finechem, Australia)
8. Sodium sulfate (anhydrous) (Univar, Ajax Finechem, Australia)
9. สารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น (J.T. Baker®, Avantor Performance Materials, USA)

การเตรียมสารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์

1. Copper reagent A: ชั่งสารเคมีต่าง ๆ ดังนี้
   - Sodium carbonate 25 g
   - Potassium sodium tartrate tetrahydrate 25 g
   - Sodium hydrogen carbonate 20 g
   - Sodium sulfate 200 g

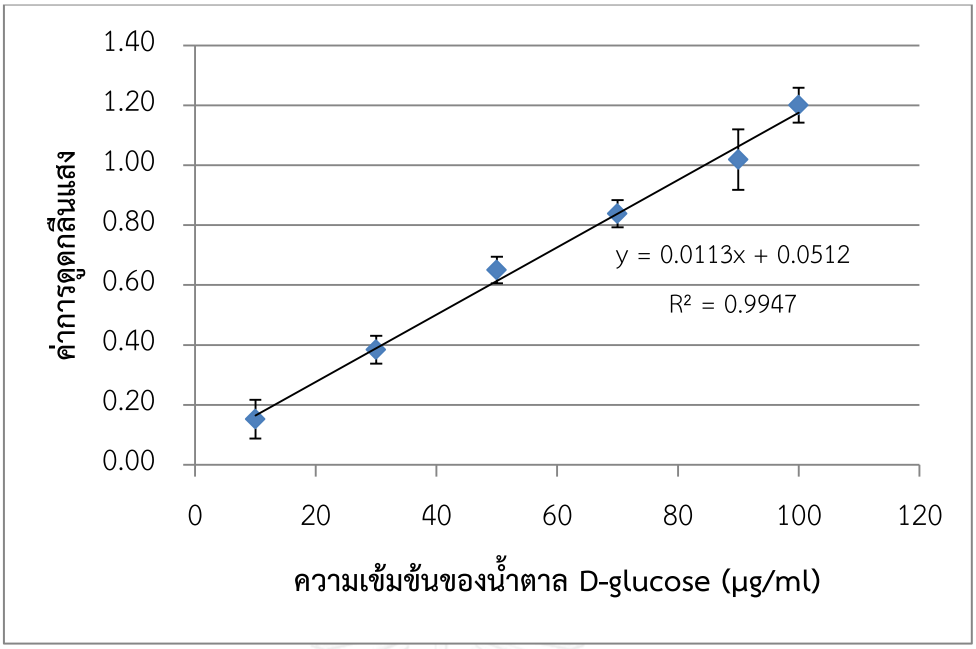
   ผสมสารเคมีที่ชั่งในน้ำกลั่น 800 ml คนให้สารเคมีละลายจนหมด แล้วปรับปริมาตรให้เป็น 1000 ml กรองด้วยกระดาษกรอง กระดาษกรอง Whatman no. 1 เก็บในขวดสีชาที่อุณหภูมิต่ำกว่า 20 °C

2. Copper reagent B: ละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 9.6 g ลงในน้ำกลั่น 100 ml เติมสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 - 2 หยด
3. Arsenomolybdate color reagent: ละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต 25 g ลงในน้ำกลั่น 450 ml เติมสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 21 ml ผสมให้เข้ากัน แล้วเติมสารละลายของ Disodium arsenate heptahydrate 3 g ในน้ำกลั่น 25 g เขย่าให้เข้ากัน เก็บที่อุณหภูมิ 37 °C เป็นเวลา 24 - 48 ชั่วโมง เก็บในขวดสีชาที่มีฝาปิดแน่น reagent นี้ใช้ได้นานประมาณ 6 เดือน

การเตรียมกราฟมาตรฐานในการวิเคราะห์

1. เตรียมสารละลายน้ำตาลกลูโคส ความเข้มข้น 10, 30, 50, 70, 90 และ 100 μg/ml
2. ปิเปตสารละลายน้ำตาลกลูโคสความเข้มข้นละ 1 ml ลงในขวดกำหนดปริมาตรขนาด 25 ml แต่ละขวด
3. เติมสารละลาย Copper reagent A ต่อ Copper reagent B ในอัตราส่วน 25:1 ลงในสารละลายตัวอย่าง 1 ml เขย่าให้เข้ากัน
4. ต้มในอ่างน้ำเดือดเป็นเวลา 20 นาที
5. แช่ในน้ำเย็น 3 - 5 นาที เพื่อให้สารละลายเย็นลงทันที
6. เติม Arsenomolybdate color reagent 1 ml เขย่าให้เข้ากัน
7. ปรับปริมาตรเป็น 25 ml ด้วยน้ำกลั่น เขย่าให้เข้ากัน
8. นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 745 nm โดยวัดหลังจากเติม Arsenomolybdate color reagent ไปแล้วเป็นเวลา 2 นาที ใช้ blank เป็นน้ำกลั่น
9. สร้างกราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสกับค่าการดูดกลืนแสงที่ 745 นาโนเมตรได้ดังรูปที่ ก.1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ ก.1 กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสกับค่าการดูดกลืนแสงที่ 745 nm

วิธีการวิเคราะห์

1. สำหรับตัวอย่างที่เป็นสารละลายมอลโทเด็กซ์ทริน ให้นำไปวิเคราะห์ปริมาณของแข็งในตัวอย่างตามข้อ ก.7 (ปริมาณของแข็งในตัวอย่างควรมีค่าอยู่ระหว่าง 30 - 35%) หากตัวอย่างเป็นมอลโท-เด็กซ์ทรินผง ให้เตรียมตัวอย่างเป็นสารละลายที่มีปริมาณของแข็ง 30% จดน้ำหนักที่แน่นอนของมอลโทเด็กซ์ทรินผงที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างเตรียมตัวอย่าง
2. เจือจางตัวอย่าง 500 เท่า สำหรับตัวอย่างที่มีค่า DE ต่ำ และ 1000 เท่า สำหรับตัวอย่างที่มีค่า DE กลางและสูง
3. ปิเปตสารละลายตัวอย่างเจือจาง 1 ml ลงในขวดกำหนดปริมาตรขนาด 25 ml
4. วิเคราะห์เหมือนข้อ 3. - 8. ในการเตรียมกราฟมาตรฐาน
5. เปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้กับกราฟมาตรฐานดังรูปที่ ค.1 อ่านค่าความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคส (ค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ควรอยู่ในช่วง 0.2 - 0.8)

คำนวณค่า DE ดังแสดงในสมการ ก.7

$$DE = \frac{A \times dilution \times \text{ปริมาตรของสารละลายตัวอย่าง}}{10^{6} \times B} \times 100 \quad \text{...ก.7}$$

เมื่อ A คือความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสที่อ่านได้จากกราฟ

B คือปริมาณของแข็งในตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์

ก.7 การวิเคราะห์ปริมาณของแข็งในตัวอย่าง

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ถ้วยอลูมิเนียมสำหรับหาความชื้น (moisture pan)
2. โถดูดความชื้น (desiccator)
3. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Sartorius, Extend, Germany)
4. ตู้อบลมร้อน (Memmert, UF110, Germany)

วิธีการวิเคราะห์

วิเคราะห์เช่นเดียวกับการวิเคราะห์ปริมาณความชื้นใน ก.1 โดยตัวอย่างที่ใช้เป็นสารละลายปริมาตร 3 ml และเพิ่มเวลาในการอบแห้งเป็น 5 ชั่วโมง

คำนวณปริมาณของแข็งในตัวอย่าง ดังแสดงในสมการ ก.8

$$\text{ปริมาณของแข็ง (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (g)}}{\text{ปริมาตรตัวอย่างก่อนอบ (ml)}} \times 100 \quad \text{..ก.8}$$

ก.8 การวิเคราะห์การกระจายของสายโซ่กิ่งก้านที่เป็นองค์ประกอบ (chain length distribution) ด้วยเครื่อง high performance anion exchange chromatography ที่ต่อกับ pulsed amperometric detector (HPAEC-PAD) (ดัดแปลงจากวิธีของ Kuakpetoon และ Wang (2007))

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่อง HPAEC-PAD (Dionex, ICS-5000, USA) ประกอบด้วย
    - คอลัมน์ Carbopac PA-1 250 x 4 mm
    - Pulsed amperometric detector (Dionew, ED40)
    - Autosampler (Dionex, AS40)
    - Column oven (Dionex, ICS-3000 SP)
2. อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิพร้อมเขย่า (water bath shaker) (Memmert, ONE 7, Germany)

สารเคมี

1. Sodium hydroxide
2. Sodium acetate
3. เอนไซม์ isoamylase (60000 units/ml)
4. น้ำ ultrapure

วิธีการวิเคราะห์

1. ชั่งตัวอย่าง 5 mg ลงในหลอดทดลอง เติมสารละลาย 20 mM acetate buffer 4.79 ml และเอนไซม์ isoamylase 10 µl (600 units)
2. บ่มหลอดตัวอย่างที่ 45 °C ข้ามคืนในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิพร้อมเขย่าตลอดเวลา
3. หยุดปฏิกิริยาโดยเติมสารละลาย 0.1 M sodium hydroxide 0.2 ml
4. เติมน้ำ ultrapure 5 ml ลงในหลอดทดลอง เขย่าให้เข้ากัน แล้วกรองผ่าน membrane filter ขนาด 0.45 µm
5. นำตัวอย่างไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPAEC-PAD และแสดงผลด้วยโปรแกรม Chromeleon ใช้คอลัมน์ Carbopac PA-1 (250 x 4 mm) เฟสเคลื่อนที่ที่ใช้มีดังนี้
    - 150 mM Sodium hydroxide
    - 600 mM sodium acetate in 150 mM Sodium hydroxide

- 500 mM Sodium hydroxide

โดยควบคุมโปรแกรมให้เป็นแบบ gradient ดังตารางที่ ก.1 และมีอัตราการไหล 1 ml/min

ตารางที่ ก.1 การปรับ gradient ของ sodium acetate สำหรับคอลัมน์ PA-1

Sodium acetate (%)	เวลา (นาที)
0 – 20	0 – 5
20 – 45	6 – 30
45 – 55	31 – 60
56 – 60	61 – 80
61 – 65	81 – 90
66 – 80	91 – 95
81 – 100	96 – 100

6. วิเคราะห์ผลการทดลองด้วย software Chromeleon version 6.80 ระบุชนิดของโมเลกุลสายโซ่ที่มี degree of polymeriztion (DP) ค่าต่าง ๆ โดยพิจารณาจากค่า retention time ของแต่ละพีคเทียบกับค่าที่ได้จากสารมาตรฐานที่ประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคสเชื่อมต่อกันไม่เกิน 7 หน่วย (DP 1 - DP 7) และหาค่าพื้นที่ใต้กราฟของแต่ละพีคแล้วนำมาคำนวณค่าพื้นที่ใต้กราฟสัมพัทธ์ (relative peak area, %) ตามสมการที่ ก.9 เพื่อพิจารณารูปแบบการกระจายของสายโซ่กิ่งก้าน

คำนวณ relative peak area ดังแสดงในสมการที่ ก.9

$$\text{Relative peak area (\%)} = \frac{\text{peak area ของโมเลกุลที่มีค่า DP หนึ่ง ๆ} \times 100}{\text{ผลรวมของ peak area ของโมเลกุลทั้งหมดที่พบในตัวอย่าง}} \quad ..ก.9$$

ภาคผนวก ข
วิธีวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ

ข.1 สมบัติของเพสต์ขณะร้อนและเย็นด้วยเครื่อง Rapid Visco-Analyzer (RVA) ตามวิธี AACC (2000) method 76-21

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่อง Rapid Visco-Analyzer (Newport Scientific, RVA-4, Australia) พร้อมถ้วยบรรจุตัวอย่าง (can) และใบพัด (paddle)
2. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 3 ตำแหน่ง (OHAUS, Pioneer^{TM}, Switzerland)

วิธีการวิเคราะห์

1. ชั่งตัวอย่าง 2.43 ± 0.01 g (ความชื้นของตัวอย่างสตาร์ชมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูแล้งและฤดูฝนเป็น 11.56% และ 11.58% ตามลำดับ) ลงบนกระดาษชั่งสาร แล้วชั่งน้ำ reverse osmosis (RO) 25.00 ± 0.1 g ลงในถ้วยบรรจุตัวอย่าง
2. เมื่อพร้อมวัด เทตัวอย่างที่ชั่งไว้ลงในถ้วยบรรจุตัวอย่างที่มีน้ำ RO อยู่ ใช้ใบพัดกวนตัวอย่างโดยจุ่มใบพัดลงในถ้วยแล้วหมุนไปมาและดึงขึ้นเพื่อให้ตัวอย่างและน้ำเป็นสารแขวนลอยเนื้อเดียวกัน (หากยังไม่วัดทันที ควรเก็บตัวอย่างและน้ำแยกกันจนกว่าจะเริ่มการทดลอง)
3. นำถ้วยบรรจุตัวอย่างพร้อมใบพัดเสียบเข้ากับแท่นกวนของเครื่อง RVA เลือกใช้วิธีวิเคราะห์ตาม AACC method 76-21 ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความเร็วรอบในการกวนดังตารางที่ ข.1
4. วิเคราะห์ผลการทดลองโดยอ่านค่า pasting temperature, peak viscosity, breakdown และ setback โดยใช้ *ThermoCline* for Windows version 3 (TCW3) software

ตารางที่ ข.1 Temperature profile

ระยะเวลา (นาที:วินาที)	อุณหภูมิ (°C)	ความเร็วรอบ (rpm)
0:00	50	960
0:10	50	160
1:00	50	160
4:42	95	160
7:12	95	160
11:00	50	160
13:00	50	160

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ข.2 สมบัติทางความร้อนของสตาร์ชที่เกี่ยวข้องกับการเกิดเจลาติไนเซชัน

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่อง differential scanning calorimeter (Perkin-Elmer, Diamond DSC, USA)
2. เครื่อง intracooler (Perkin-Elmer, 2P, USA)
3. DSC aluminium pan (product no. 02190062)
4. เครื่องมือสำหรับปิดผนึก DSC pan
5. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง (OHAUS, Explorer, Switzerland)

วิธีการวิเคราะห์

1. ชั่งตัวอย่างสตาร์ชที่ทราบความชื้นแน่นอน ในอัตราส่วนของสตาร์ชต่อน้ำเป็น 1:3 โดยชั่งน้ำหนักสตาร์ชที่แน่นอน 3 mg ลงใน DSC pan และปิเปตน้ำ RO 9 µl ด้วยไมโครปิเปต
2. ปิดผนึกฝา pan ให้สนิท บ่มตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้องข้ามคืน แล้ววิเคราะห์การเกิดเจลาติไนเซชัน โดยกำหนดอุณหภูมิในการให้ความร้อนที่ 30 ถึง 95 °C ใช้อัตราเร็วในการเพิ่มอุณหภูมิ 10 °C/min และใช้ pan เปล่าเป็นตัวอ้างอิง
3. บันทึกค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากเครื่อง DSC ได้แก่ อุณหภูมิเริ่มต้น (onset temperature, T_o) อุณหภูมิที่จุดสูงสุด (peak temperature, T_p) อุณหภูมิที่จุดสิ้นสุด (conclusion temperature, T_c) ในการเกิดเจลาติไนเซชัน และค่าเอนทาลปีที่ใช้ในการเกิดเจลาติไนเซชัน (enthalpy of gelatinization, ∆H หน่วย J/g dry starch) โดยใช้ Pyris software version 11
4. คำนวณช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนเซชัน ดังสมการ ข.1

$$\Delta T = T_c - T_o \qquad \text{ข.1}$$

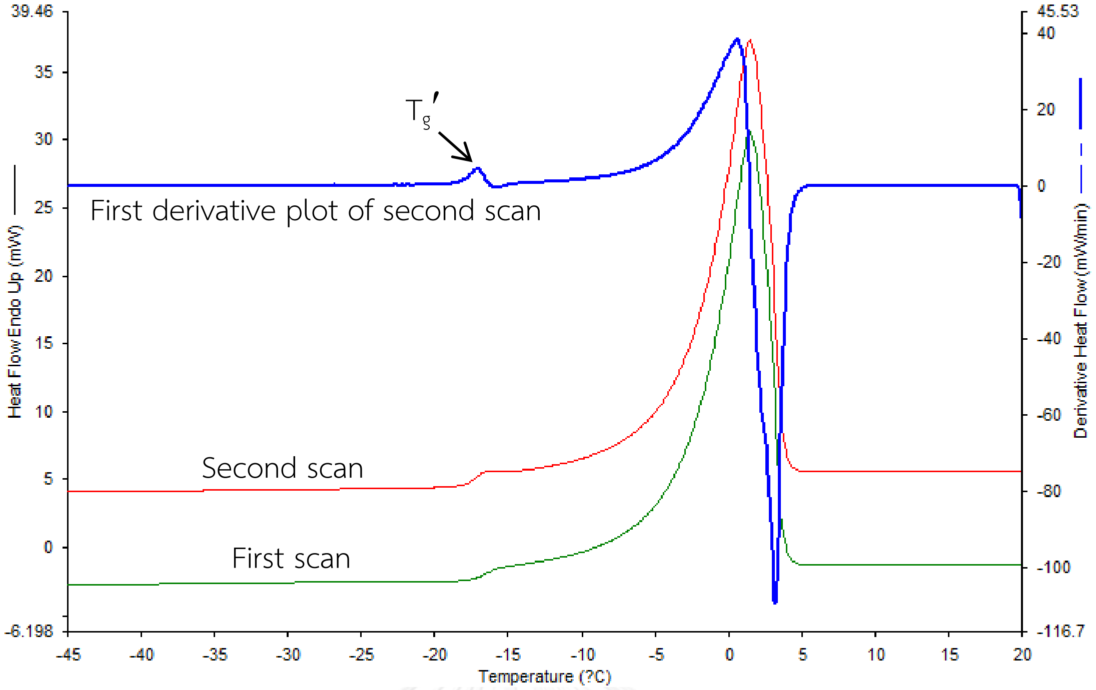
ข.3 สมบัติทางความร้อนของสารละลายมอลโทเด็กซ์ทริน (ดัดแปลงจากวิธีของ Roos (1993) และ Wang และ Wang (2000))

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่อง differential scanning calorimeter (Perkin-Elmer, Diamond DSC, USA)
2. เครื่อง intracooler (Perkin-Elmer, 2P, USA)
3. DSC aluminium pan (product no. 02190062)
4. เครื่องมือสำหรับปิดผนึก DSC pan
5. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 5 ตำแหน่ง (Mettler-Toledo, MS105DU, Switzerland)

วิธีการวิเคราะห์

1. เตรียมตัวอย่างสารละลายมอลโทเด็กซ์ทริน ความเข้มข้น 30% โดยน้ำหนัก ปิเปตสารละลาย 10 µl ลงใน DSC pan ด้วยไมโครปิเปต
2. ปิดผนึกฝา pan ให้สนิท ใช้ pan เปล่าเป็นตัวอ้างอิง กำหนดช่วงอุณหภูมิในการวิเคราะห์ ดังนี้
   2.1 เพิ่มอุณหภูมิจาก -50 °C ถึง 20 °C โดยใช้อัตราเร็วในการเพิ่มอุณหภูมิ 5 °C/min เพื่อหา onset temperature ของพีคการหลอมผลึกน้ำแข็ง (first scan)
   2.2 ลดอุณหภูมิลงไปที่ 50 °C โดยใช้อัตราเร็วในการลดอุณหภูมิ 30 °C/min
   2.3 ทำ annealing โดยเพิ่มอุณหภูมิจาก -50 °C ถึงอุณหภูมิที่ต่ำกว่า onset temperature ที่ได้จากข้อ 2.1 ลง 1 °C (onset temperature – 1 °C) โดยใช้อัตราเร็วในการเพิ่มอุณหภูมิ 10 °C/min คงไว้ที่อุณหภูมินี้ 15 นาที เพื่อให้ตัวอย่างเกิดผลึกน้ำแข็งมากที่สุด
   2.4 ลดอุณหภูมิลงไปที่ -50 °C โดยใช้อัตราเร็วในการลดอุณหภูมิ 30 °C/min
   2.5 ทำซ้ำข้อ 2.1 (second scan)
   2.6 ผลการทดลอง first scan และ second scan แสดงดังรูปที่ ข.1



รูปที่ ข.1 DSC thermogram ของสารละลายมอลโทเด็กซ์ทริน DE กลางความเข้มข้น 30% จากมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูฝนที่ผลิตโดยเอนไซม์ชนิด non-GMO

3. วิเคราะห์ค่าต่อไปนี้โดยใช้ Pyris software ดังตัวอย่างในรูปที่ ข.1

   3.1 หาค่า T_g' จาก first derivative plot ของ second scan ($T_{g,midpoint}'$)

   3.2 คำนวณค่า frozen/unfrozen water จาก ΔH ของการหลอมผลึกน้ำแข็งจาก second scan ตามสมการที่ ข.2 และ ข.3

$$\text{Frozen water (g water/g dried MD)} = \frac{\Delta H\ (J)}{\text{Latent heat x น้ำหนักตัวอย่างแห้ง (g)}} \quad .....ข.2$$

เมื่อ Latent heat of ice melting = 333.55 J/g water

Unfrozen water (g water/g dried MD) = Total water - Frozen water.................ข.3

4. เก็บตัวอย่างที่ผ่านการวิเคราะห์ไว้ที่อุณหภูมิ 4 °C เป็นเวลา 14 วัน แล้วนำมาวิเคราะห์การเกิดรีโทรกราเดชัน โดยกำหนดอุณหภูมิในการให้ความร้อนที่ 30 ถึง 80 °C ใช้อัตราเร็วในการเพิ่มอุณหภูมิ 10 °C/min ใช้ pan เปล่าเป็นตัวอ้างอิง

5. บันทึกค่าเอนทาลปีของการหลอมผลึกเนื่องจากรีโทรกราเดชัน (ΔH_r) โดยใช้ Pyris software

ข.4 สมบัติทางวิทยากระแส (rheological properties) ของสารละลายมอลโทเด็กซ์ทริน (ดัดแปลงจาก Khatoon และคณะ (2009))

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่อง rheometer (Bohlin Instruments, C-VOR, UK)
2. หัววัดชนิด cone and plate ขนาด 40 mm มุม 4°

วิธีการวิเคราะห์

1. เตรียมสารละลายมอลโทเด็กซ์ทริน ความเข้มข้น 20% และ 30% โดยน้ำหนัก ประมาณ 5 ml ในหลอดทดลอง ตั้งทิ้งไว้ให้เข้าสู่สมดุลที่อุณหภูมิ 25 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
2. นำมาวิเคราะห์พฤติกรรมการไหล (flow behavior) โดยเขย่าแล้วเทตัวอย่างประมาณ 2 ml ลงบน plate วิเคราะห์โดยแปร shear rate เป็น 0.1 - 200 s^{-1} แบบไปและกลับ ที่อุณหภูมิ 25 ± 1 °C เก็บค่า shear stress ทั้งหมด 120 จุด
3. นำค่า stress ที่ได้จาก shear rate ในช่วงกลับ (200 – 80 s^{-1}) มาพิจารณาพฤติกรรมการไหลตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังสมการที่ ข.4 และ ข.5

   1) Linear model: $\sigma = \eta\dot{\gamma}$ ข.4

      σ คือ shear stress (mPa)

      η คือค่าความหนืด (viscosity) (mPa.s)

      $\dot{\gamma}$ คือ shear rate (1/s)

   2) Power law model: $\sigma = K\dot{\gamma}^n$ ข.5

      σ คือ shear stress (mPa)

      K คือ consistency index (mPa.s^n)

      $\dot{\gamma}$ คือ shear rate (1/s)

      n คือ flow behavior index

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ข.5 ความสามารถในการดูดความชื้น โดยสร้าง sorption isotherm (ดัดแปลงจาก Wang และ Wang (2000))

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ตู้อบลมร้อน (Memmert, UF110, Germany)
2. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Mettler-Toledo, AB204, Germany)
3. Plate แก้วสำหรับใส่ตัวอย่าง เส้นผ่านศูนย์กลาง 6 cm
4. กล่องเก็บตัวอย่างพร้อมฝาปิดสนิท
5. โถดูดความชื้น (desiccator)

สารเคมี

1. LiCl (Unilab, Ajax Finechem, Australia)
2. $MgCl_2$ (QReC®, Qrec Chemical, New Zealand)
3. NaBr (QReC®, Qrec Chemical, New Zealand)
4. NaCl (J.T. Baker®, Avantor Performance Materials, USA)
5. KCl (QReC®, Qrec Chemical, New Zealand)
6. KNO_3 (Univar, Ajax Finechem, Australia)

วิธีการวิเคราะห์

1. เตรียมสารละลายเกลืออิ่มตัวในภาชนะที่มีฝาปิดโดยผสมเกลือกับน้ำในอัตราส่วนดังตารางที่ ข.2 คนให้ละลายจนไม่สามารถละลายได้อีกที่อุณหภูมิห้อง ปิดฝา ตั้งทิ้งไว้ให้ระบบเข้าสู่สมดุล ประมาณ 1 สัปดาห์ (สารละลายเกลืออิ่มตัวสมบูรณ์) สังเกตได้จากผลึกเกลือที่เหลืออยู่ไม่สามารถละลายเพิ่มได้อีก
2. ชั่งตัวอย่าง 0.5 ± 0.1 g ลงใน plate แก้วที่อบแห้งและทราบน้ำหนักแน่นอน นำไปวางในภาชนะที่บรรจุสารละลายเกลืออิ่มตัว
3. เก็บตัวอย่างในตู้ควบคุมอุณหภูมิที่ 30 ± 1 °C จนระบบเข้าสู่สมดุล (ไม่เกิน 3 สัปดาห์)
4. หาความชื้นของตัวอย่างตามวิธีในภาคผนวก ก.1

ตารางที่ ข.2 อัตราส่วนเกลือต่อน้ำที่ใช้ในการเตรียมสารละลายเกลืออิ่มตัวชนิดต่าง ๆ

เกลือ	อัตราส่วนเกลือ (g):น้ำ (ml)[1]	a_w ที่ 30 °C[2]
LiCl	1.5:1.1	0.11
$MgCl_2$	2.0:0.6	0.32
NaBr	2.0:1.3	0.56
NaCl	2.0:1.5	0.75
KCl	2.0:1.7	0.84
KNO_3	2.0:1.0	0.92

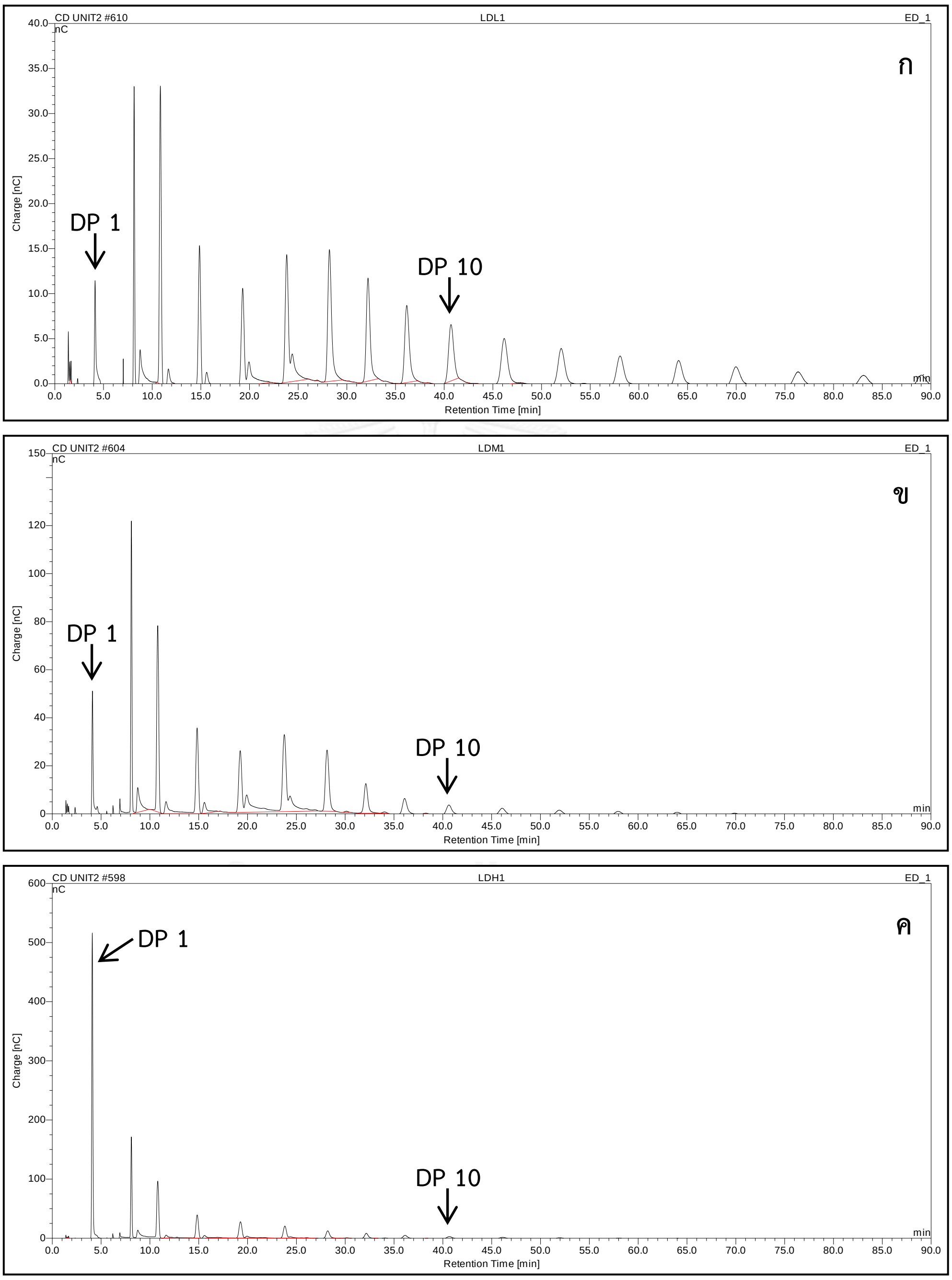
[1] ดัดแปลงจาก เป็นธิดา มณีโชติ และคณะ (2500)

[2] Greenspan (1977)

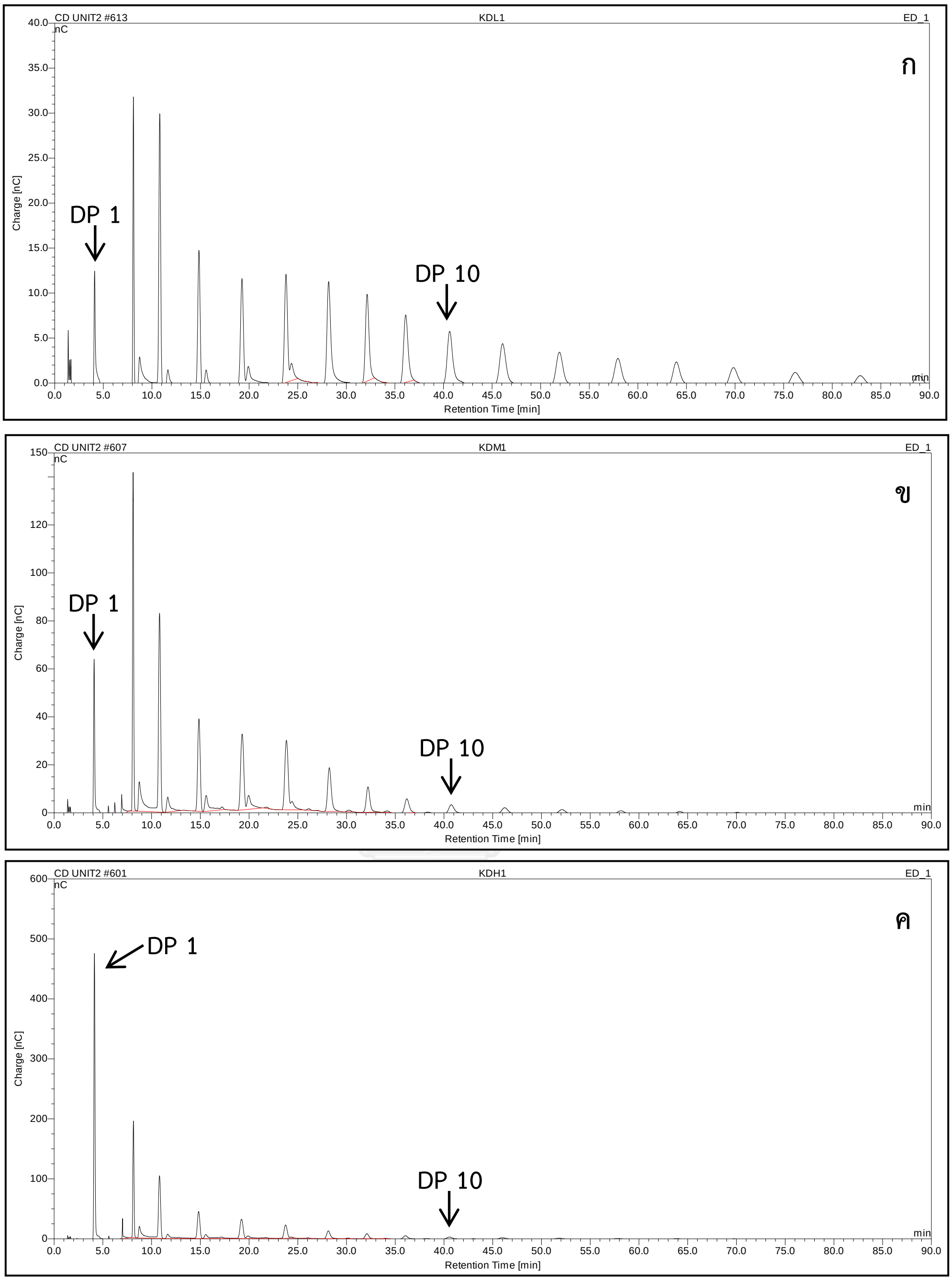
หมายเหตุ ในสารละลายเกลืออิ่มตัวที่มีค่า $a_w > 0.6$ ควรใส่สำลีชุบ toluene ไว้ในภาชนะให้มีไอระเหยของ toluene ป้องกันการเจริญของจุลินทรีย์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

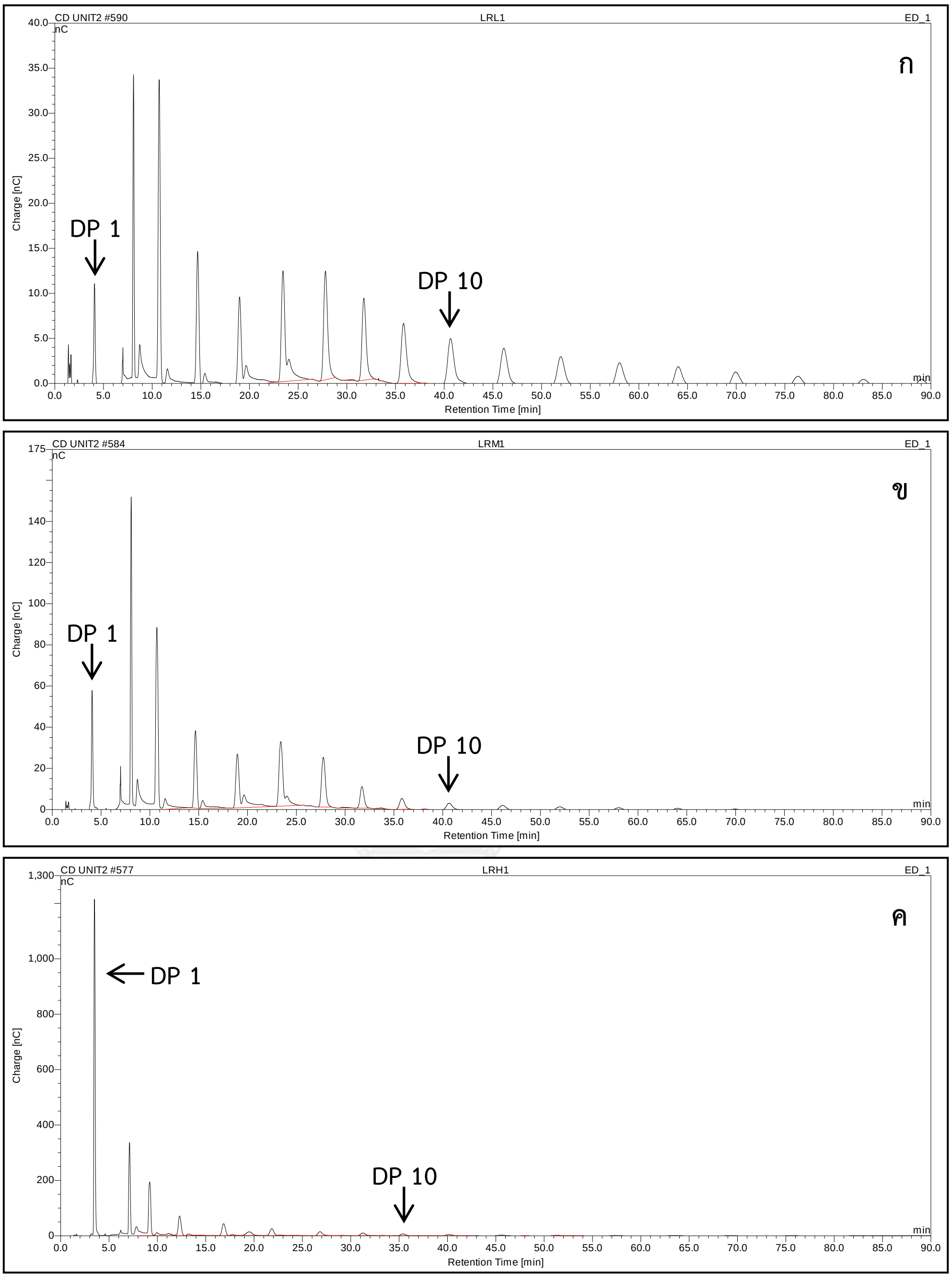
ภาคผนวก ค
ข้อมูลผลการทดลองเพิ่มเติม



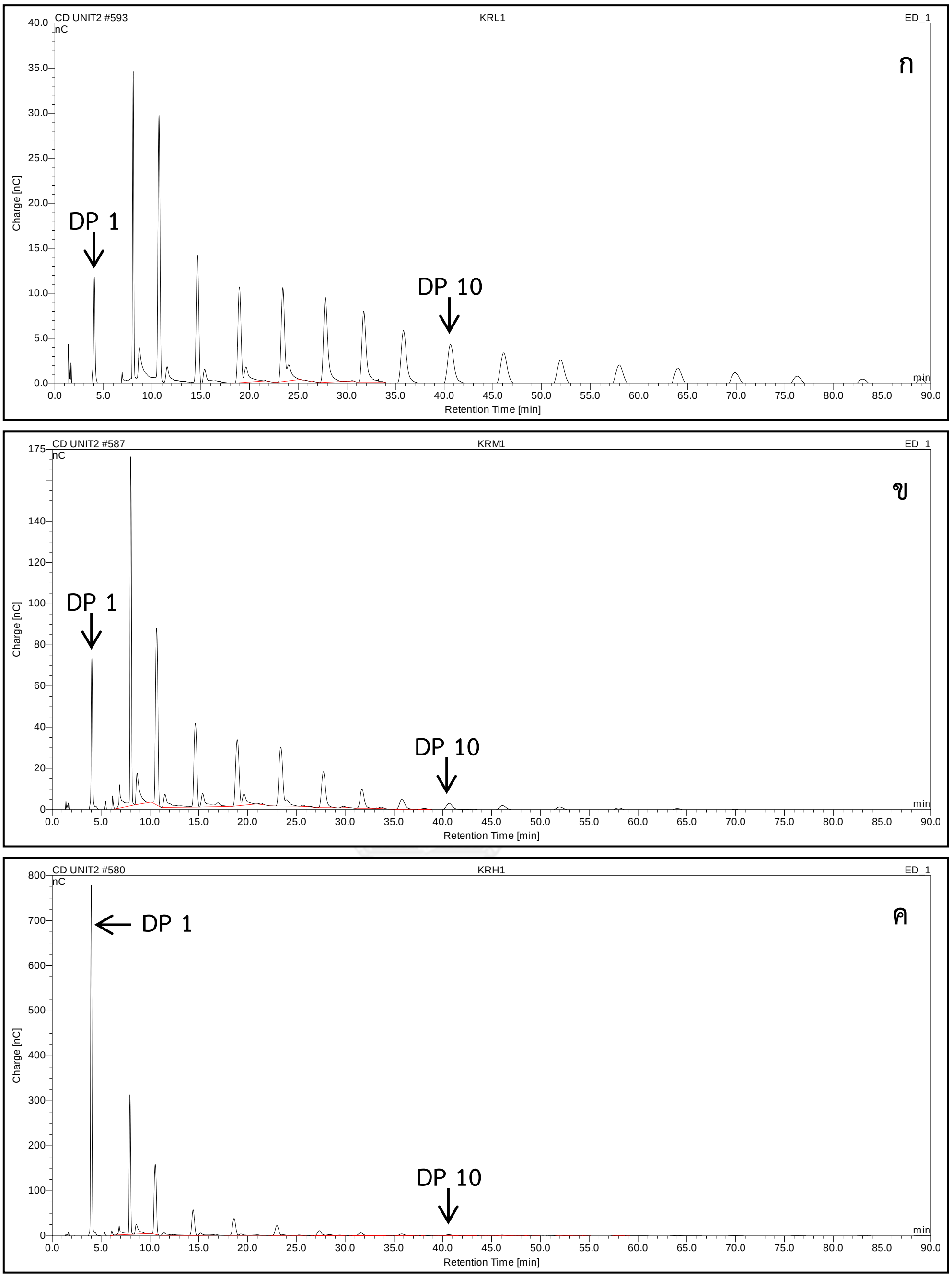
รูปที่ ค.1 รูปแบบการกระจายของสายโซ่กิ่งก้านที่เป็นองค์ประกอบของมอลโทเด็กซ์ทริน DE ต่ำ (ก) กลาง (ข) และสูง (ค) จากมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูแล้งที่ผลิตโดยเอนไซม์ชนิด GMO



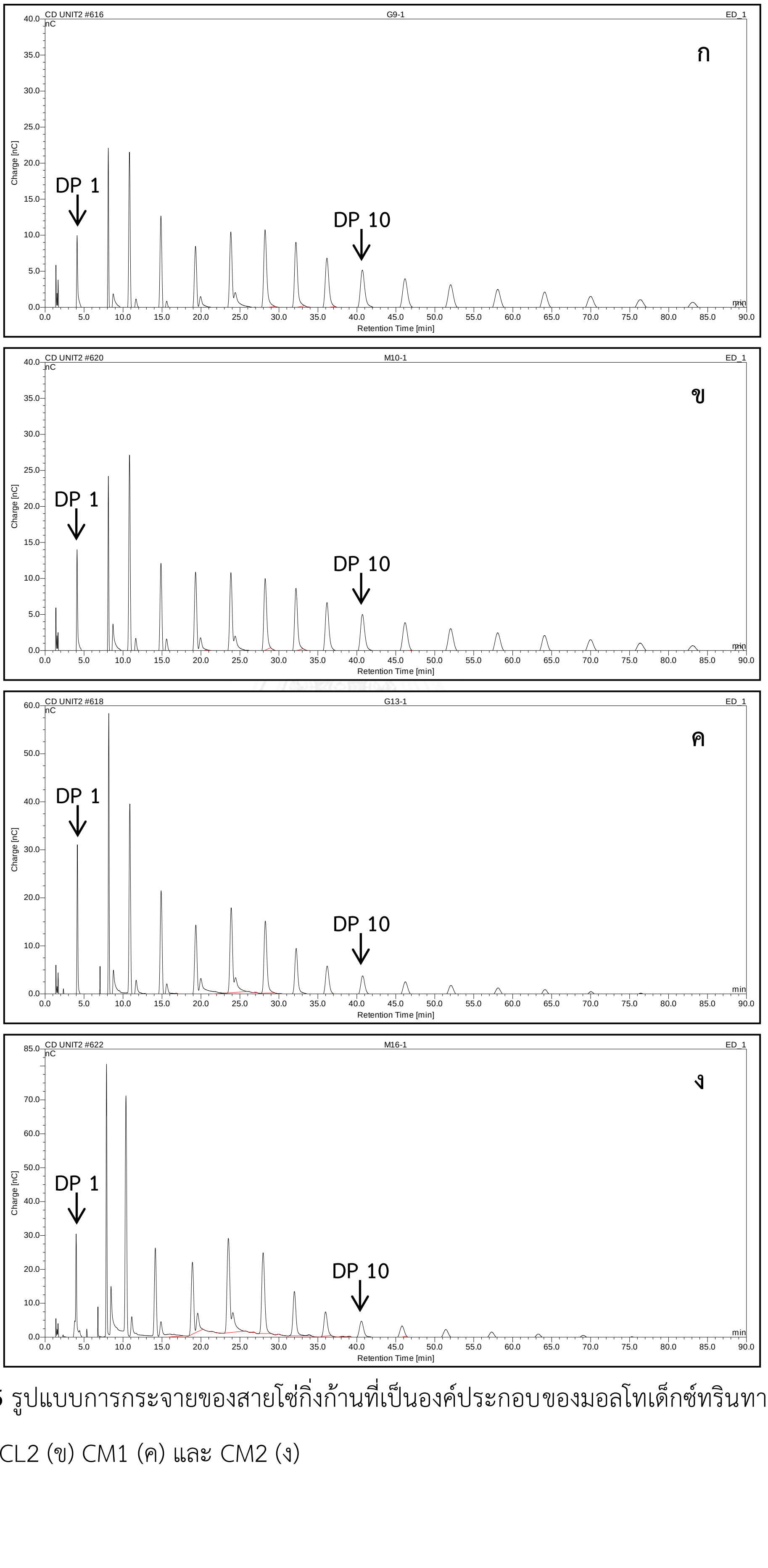
รูปที่ ค.2 รูปแบบการกระจายของสายโซ่กิ่งก้านที่เป็นองค์ประกอบของมอลโทเด็กซ์ทริน DE ต่ำ (ก) กลาง (ข) และสูง (ค) จากมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูแล้งที่ผลิตโดยเอนไซม์ชนิด non-GMO



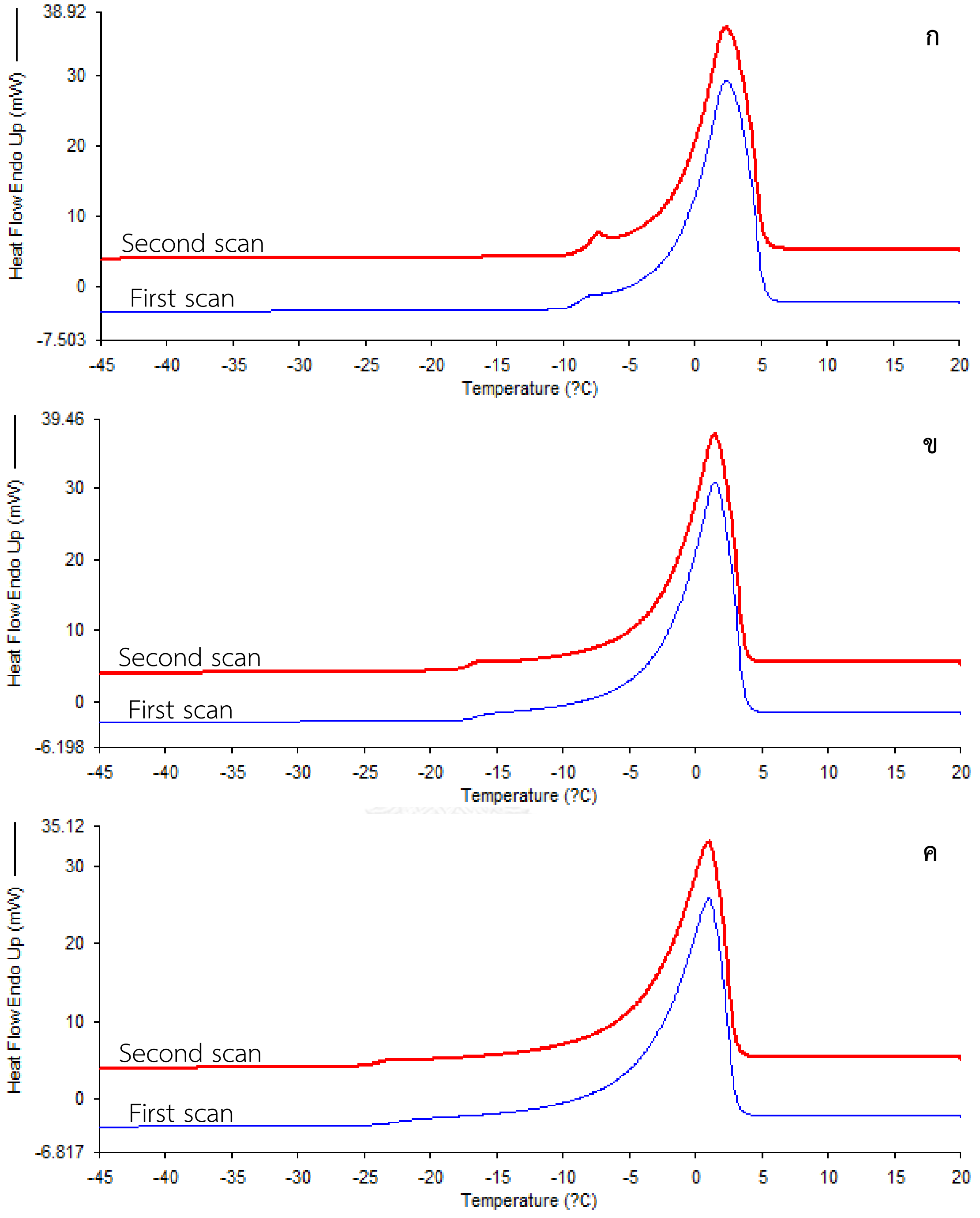
รูปที่ ค.3 รูปแบบการกระจายของสายโซ่กิ่งก้านที่เป็นองค์ประกอบของมอลโทเด็กซ์ทริน DE ต่ำ (ก) กลาง (ข) และสูง (ค) จากมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูฝนที่ผลิตโดยเอนไซม์ชนิด GMO



รูปที่ ค.4 รูปแบบการกระจายของสายโซ่กิ่งก้านที่เป็นองค์ประกอบของมอลโทเด็กซ์ทริน DE ต่ำ (ก) กลาง (ข) และสูง (ค) จากมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูฝนที่ผลิตโดยเอนไซม์ชนิด non-GMO



รูปที่ ค.5 รูปแบบการกระจายของสายโซ่กิ่งก้านที่เป็นองค์ประกอบของมอลโทเด็กซ์ทรินทางการค้า; CL1 (ก) CL2 (ข) CM1 (ค) และ CM2 (ง)



รูปที่ ค.6 DSC thermogram ของสารละลายมอลโทเด็กซ์ทริน DE ต่ำ (ก) กลาง (ข) และสูง (ค) ความเข้มข้น 30% จากมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในฤดูฝนที่ผลิตโดยเอนไซม์ชนิด non-GMO

ตารางที่ ค.1 ค่า η ของสารละลายมอลโทเด็กซ์ทริน DE ต่ำและกลาง ความเข้มข้น 20% ที่ผลิตจากเอนไซม์ต่างชนิด

ชนิดเอนไซม์	η (mPa.s)	
	Low	Mid^{ns}
GMO	13.6^{b}±0.4	7.7±0.2
Non-GMO	14.0^{a}±0.4	7.9±0.4

a, b ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่กำกับด้วยอักษรยกต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq$ 0.05)

ns ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p >$ 0.05)

ใช้ linear model ในการจำลองพฤติกรรมการไหล

ตารางที่ ค.2 ค่า η ของสารละลายมอลโทเด็กซ์ทริน DE ต่ำและกลาง ความเข้มข้น 20% ที่ผลิตจากสตาร์ชต่างชนิด

ชนิดสตาร์ช	η (mPa.s)	
	Low	Mid^{ns}
ฤดูแล้ง	14.1^{a}±0.4	7.9±0.1
ฤดูฝน	13.4^{b}±0.3	7.7±0.4

a, b ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่กำกับด้วยอักษรยกต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq$ 0.05)

ns ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p >$ 0.05)

ใช้ linear model ในการจำลองพฤติกรรมการไหล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ค.3 ค่า K และ n ของสารละลายมอลโทเด็กซ์ทริน DE ต่ำ ความเข้มข้น 30% ที่ผลิตจากเอนไซม์และสตาร์ชต่างชนิด

ชนิดเอนไซม์	ชนิดสตาร์ช	K (mPa.s^{n})	n
GMO	ฤดูแล้ง	113.8^{c}±14.6	0.77^{a} ±0.01
	ฤดูฝน	125.8^{c}±17.7	0.76^{ab}±0.02
Non-GMO	ฤดูแล้ง	186.8^{a}± 7.4	0.69^{c} ±0.00
	ฤดูฝน	154.4^{b}±18.4	0.73^{b} ±0.02

a, b, c ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่กำกับด้วยอักษรยกต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ใช้ power law model ในการจำลองพฤติกรรมการไหล

ตารางที่ ค.4 ค่า T_g' ของสารละลายมอลโทเด็กซ์ทริน DE ต่ำและกลาง ความเข้มข้น 30% ที่ผลิตจากสตาร์ชต่างชนิด

ชนิดสตาร์ช	T_g' (°C)	
	Low DE	Mid DE^{ns}
ฤดูแล้ง	-8.22^{b}±0.12	-16.18±0.81
ฤดูฝน	-8.00^{a}±0.11	-16.32±0.87

a, b ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่กำกับด้วยอักษรยกต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ns ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ค.5 ค่า T_g' ของสารละลายมอลโทเด็กซ์ทริน DE ต่ำและกลาง ความเข้มข้น 30% ที่ผลิตจากเอนไซม์ต่างชนิด

ชนิดเอนไซม์	T_g' (°C)	
	Low DE^{ns}	Mid DE
GMO	-8.11±0.17	-15.49^{a}±0.11
Non-GMO	-8.11±0.17	-17.01^{b}±0.15

a, b ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่กำกับด้วยอักษรยกต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ns ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

ตารางที่ ค.6 ค่า T_g' ของสารละลายมอลโทเด็กซ์ทริน DE สูง ความเข้มข้น 30% ที่ผลิตจากเอนไซม์และสตาร์ชต่างชนิด

ชนิดเอนไซม์	ชนิดสตาร์ช	T_g' (°C)
GMO	ฤดูแล้ง	-23.97^{b}±0.25
	ฤดูฝน	-23.84^{b}±0.18
Non-GMO	ฤดูแล้ง	-23.45^{a}±0.06
	ฤดูฝน	-23.87^{b}±0.18

a, b ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่กำกับด้วยอักษรยกต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ค.7 ค่า frozen water ของสารละลายมอลโทเด็กซ์ทริน DE ต่ำ กลาง และสูง ความเข้มข้น 30% ที่ผลิตจากเอนไซม์ต่างชนิด

ชนิดเอนไซม์	Frozen water (g water/g dried MD)		
	Low	Mid[ns]	High[ns]
GMO	2.12[a]±0.02	2.14±0.10	1.98±0.05
Non-GMO	2.06[b]±0.03	2.07±0.05	1.98±0.02

a, b ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่กำกับด้วยอักษรยกต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ns ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

ตารางที่ ค.8 ค่า ΔH_r ของสารละลายมอลโทเด็กซ์ทริน DE ต่ำ ความเข้มข้น 30% ที่ผลิตจากเอนไซม์ต่างชนิด

ชนิดเอนไซม์	ΔH_r (J/g dried MD)
GMO	4.65[b]±0.62
Non-GMO	5.52[a]±0.59

a, b ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่กำกับด้วยอักษรยกต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ค.9 ค่า ΔH_r ของสารละลายมอลโทเด็กซ์ทริน DE ต่ำ ความเข้มข้น 30% ที่ผลิตจากสตาร์ชต่างชนิด

ชนิดสตาร์ช	ΔH_r (J/g dried MD)
ฤดูแล้ง	4.66[b]±0.71
ฤดูฝน	5.50[a]±0.51

a, b ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่กำกับด้วยอักษรยกต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวรุ่งนภา ศรีวิกุล เกิดวันที่ 11 พฤศจิกายน พ.ศ. 2535 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตรบัณฑิต (เกียรตินิยมอันดับสอง) สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาหาร จากภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2556 และศึกษาต่อในระดับปริญญาโท วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2557 จากนั้นได้เข้าร่วมงานประชุมวิชาการนานาชาติ Starch Update 2015: The 8th International Conference on Starch Technology ในระหว่างวันที่ 3 - 4 ธันวาคม 2558 ณ โรงแรมเดอะ สุโกศล กรุงเทพมหานคร จัดโดยศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ (ไบโอเทค) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ร่วมกับสถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร (KAPI) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เครือข่ายองค์กรบริหารงานวิจัยแห่งชาติ (คอบช.) และศูนย์ความร่วมมือระหว่างประเทศด้านการวิจัยเกษตรกรรมเพื่อการพัฒนา (CIRAD) และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2558

ผลงานที่ตีพิมพ์และเผยแพร่

Sriwikul, R., Tananuwong, K., & Anuntagool, J. (2015). Properties of starch from cassava with different harvesting seasons and their utilization in maltodextrin production. Proceedings of the Starch Update 2015: The 8th International Conference on Starch Technology, The Sukosol Bangkok hotel, Thailand.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University