การทำให้บริสุทธิ์ สมบัติทางเคมีกายภาพ และอิทธิพลของเฮมิเซลลูโลส

จากรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 ต่อการเกิดเจลาติไนเซชัน

และรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชข้าวโพด

นางสาวพรรณลดา ฉากทองคำ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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 Graduate School.

PURIFICATION AND PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES OF KHAO DAWK MALI 105 RICE BRAN HEMICELLULOSES AND THEIR INFLUENCE ON GELATINIZATION AND RETROGRADATION OF CORN STARCHES

MISS PHANLADA CHAKTHONGKAM

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science Program in Food Technology

Department of Food Technology

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การทำให้บริสุทธิ์ สมบัติทางเคมีกายภาพ และอิทธิพลของเฮ-มิเซลลูโลสจากรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 ต่อการเกิดเจลาติไน-เซชันและรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชข้าวโพด
โดย	นางสาวพรรณลดา ฉากทองคำ
สาขาวิชา	เทคโนโลยีทางอาหาร
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร.ดริษ กวักเพฑูรย์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พาสวดี ประทีปะเสน)

.... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์ ดร.ดริษ กวักเพฑูรย์)

.... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.ธนจันทร์ มหาวนิช)

.... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.ขนิษฐา ธนานุวงศ์)

.... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ศาสตราจารย์ ดร.วรรณา ตุลยธัญ)

พรรณลดา ฉากทองคำ : การทำให้บริสุทธิ์ สมบัติทางเคมีกายภาพ และอิทธิพลของเฮมิเซลลูโลสจากรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 ต่อการเกิดเจลาติไนเซชันและรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชข้าวโพด (PURIFICATION AND PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES OF KHAO DAWK MALI 105 RICE BRAN HEMICELLULOSES AND THEIR INFLUENCE ON GELATINIZATION AND RETROGRADATION OF CORN STARCHES) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : อ. ดร. ดริษ กวักเพฑูรย์, 120 หน้า

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิธีการทำให้เฮมิเซลลูโลสบริสุทธิ์ สมบัติทางเคมีกายภาพของเฮมิเซลลูโลสที่สกัดได้จากรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 ด้วยน้ำร้อนและสารละลายด่าง และอิทธิพลของเฮมิเซลลูโลสต่อการเกิดเจลาติไนเซชันและรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชข้าวโพดที่มีปริมาณอะมิโลสต่างกัน จากการศึกษาเปรียบเทียบวิธีแยกเฮมิเซลลูโลสให้บริสุทธิ์ด้วยวิธีตกตะกอนด้วยเอทานอลและไดอะไลซิส พบว่าการทำไดอะไลซิสจะได้เฮมิเซลลูโลสที่มีสมบัติด้านการละลายดีกว่าการตกตะกอนด้วยเอทานอล จึงเลือกใช้วิธีนี้ในการแยกเฮมิเซลลูโลสให้บริสุทธิ์ โดยเฮมิเซลลูโลสจะถูกสกัดด้วยน้ำร้อน (H1) จากรำข้าวเจ้าที่ผ่านการกำจัดไขมัน แป้งและโปรตีนออกแล้ว ส่วนรำข้าวที่เหลือนำมาสกัดด้วยสารละลาย 4M NaOH จากนั้นนำเฮมิเซลลูโลสที่สกัดได้จากสารละลายด่างมาแยกตามระดับความมีขั้วด้วย DEAE-cellulose-chromatography เป็นสองส่วนคือ เฮมิเซลลูโลสที่ชะด้วยสารละลาย 0.005 M formic acid (H2) และเฮมิเซลลูโลสที่ชะด้วยสารละลาย 1M formic acid (H3) โดยสารละลายเฮมิเซลลูโลสทั้งสามส่วนจะถูกทำให้เข้มข้นก่อนนำไปทำให้เป็นผงด้วยการทำแห้งแบบเยือกแข็ง ปริมาณเฮมิเซลลูโลส H1 H2 และ H3 ที่สกัดได้ คือ 5.30% 4.38% และ 12.28% โดยน้ำหนักแห้งของรำข้าวที่กำจัดไขมันแล้วตามลำดับ จากการศึกษาน้ำหนักโมเลกุลด้วย HPSEC พบว่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก ($\overline{M}_W$) ของ H1 H2 และ H3 คือ 35.10x10^4 82.32x10^4 และ 47.51x10^4 กรัมต่อโมล ตามลำดับ และจากการศึกษาชนิดและปริมาณของน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบด้วย HPAEC-PAD พบว่า H1 มีปริมาณน้ำตาลกลูโคสสูงที่สุด รองลงมาคือ กาแลกโตส อะราบิโนส และไซโลสตามลำดับ H2 และ H3 พบน้ำตาลอะราบิโนสและไซโลสเป็นหลัก แต่มีสัดส่วนของน้ำตาลอะราบิโนสต่อไซโลส (Ara/Xyl) ต่างกัน โดย H2 และ H3 มี Ara/Xyl คือ 1.00 และ 1.3 ตามลำดับ เมื่อศึกษาอิทธิพลของเฮมิเซลลูโลสต่อสมบัติทางความหนืดของสตาร์ชข้าวโพดด้วย rheometer (temperature test) พบว่าความหนืดเริ่มต้น (initial viscosity) และอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืด (pasting temperature) เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ แต่ความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ความหนืดที่ลดลง (breakdown) ความหนืดสุดท้าย (final viscosity) และค่าการคืนตัว (setback) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อมีการเติมเฮมิเซลลูโลส จากการศึกษาอิทธิพลของเฮมิเซลลูโลสต่อสมบัติทางวิสโคอีลาสติกของเจลสตาร์ชข้าวโพดด้วย rheometer (dynamic test) พบว่าค่า storage modulus (G') และ loss modulus (G'') ลดลง แต่ให้ค่า tan δ เพิ่มขึ้น และจากการศึกษาอิทธิพลของเฮมิเซลลูโลสต่อสมบัติทางความร้อนด้วย DSC พบว่าเมื่อมีการเติมเฮมิเซลลูโลส อุณหภูมิที่ใช้หลอมผลึกของแอมิโลเพคตินจะสูงขึ้น (To Tp Tc) แต่พลังงานที่ใช้ในการหลอมผลึก (ΔH1) ลดลง ภายหลังจากการเก็บเจลสตาร์ชที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 14 วันแล้วนำมาวิเคราะห์ด้วย DSC อีกครั้ง พบว่าการหลอมผลึกแอมิโลเพกตินที่จัดเรียงตัวใหม่จากกระบวนการรีโทรเกรเดชันจะเริ่มหลอมละลายที่อุณหภูมิสูงขึ้น (To Tp Tc) แต่พลังงานในการหลอมผลึก (ΔH2) ลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราส่วนการเกิดรีโทรเกรเดชันของแอมิโลเพกติน (ΔH2/ΔH1) ลดลง อิทธิพลเหล่านี้พบในสตาร์ชข้าวโพดมากกว่าสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียว และจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเฮมิเซลลูโลสในระบบเพิ่มขึ้น โดย H1 H2 และ H3 จะให้อิทธิพลต่อแต่ละสมบัติในระดับที่ต่างกัน งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าเฮมิเซลลูโลสจากรำข้าวเจ้าที่สกัดด้วยวิธีการต่างกันจะมีสมบัติทางเคมีกายภาพ ได้แก่ ขนาด รูปร่าง และชนิดของน้ำตาลที่ต่างกัน ซึ่งความแตกต่างนี้ จะมีอิทธิพลต่อการเกิดเจลาติไนเซชันและรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชข้าวโพดในระดับที่ต่างกัน นอกจากนี้ความเข้มข้นของเฮมิเซลลูโลสและสัดส่วนของแอมิโลส/แอมิโลเพกทินของสตาร์ชยังมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นด้วย

ภาควิชา ......เทคโนโลยีทางอาหาร...... ลายมือชื่อนิสิต ....

สาขาวิชา ......เทคโนโลยีทางอาหาร...... ลายมือชื่อ อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ....

ปีการศึกษา ......2554......

5272443823: MAJOR Food technology

KEYWORDS: rice bran hemicelluloses / corn starch / waxy corn starch / gelatinization / retrogradation

PHANLADA CHAKTHONGKAM: PURIFICATION AND PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES OF KHAO DAWK MALI 105 RICE BRAN HEMICELLULOSES AND THEIR INFLUENCE ON GELATINIZATION AND RETROGRADATION OF CORN STARCHES: ADVISOR: DARIS KUAKPETOON, Ph.D., 120 pp.

Purification and physicochemical properties and influence of hemicelluloses extracted from Khao Dawk Mali 105 rice bran and their influence on gelatinization and retrogradation of waxy corn starch (WCS) and normal corn starch (CS) were investigated. Dialysis was used to purify hemicelluloses rather than ethanol precipitation because it produced hemicelluloses with a high solubility. Hemicellulose was extracted by hot water (H1). The residue was extracted by 4M NaOH and fractionated by DEAE-cellulose-chromatography into two hemicellulosic sub-fractions. The first fraction (H2) was eluted with 0.005M formic acid and the second fraction (H3) was eluted with 1M formic acid. The yield based on defatted rice bran of H1, H2 and H3 is 5.30%, 4.38% and 12.28%, respectively. Average molecular weight ($\overline{M}_w$) analyze by HPSEC of H1, H2 and H3 were 35.10x10-4 g/mol, 82.32x10-4 g/mol and 47.51x10-4 g/mol, respectively. Sugar moieties of hemicelluloses were analyzed by HPAEC-PAD. Glucose was the major component and galactose, arabinose and xylose were the minor component of H1. H2 and H3 were rich in arabinose and xylose but H3 has higher arabinose to xylose ratio than H2. Effect of hemicelluloses on pasting properties of corn starch were analyzed by rotational rheometer. Addition of hemicellulose increased in initial viscosity (IV) and pasting temperature (PT) but decreased the peak viscosity (PV), breakdown (BD), final viscosity (FV) and setback (SB) of corn starch. The obtained gel mixture of corn starch and hemicelluloses were further studied their dynamic viscoelastic properties. Increasing in hemicelluloses in the gel mixture would decreased the storage (G') and loss (G'') modulus while increased phase shift (tan δ). Thermal properties of the mixture of corn starch and hemicelluloses were subjected to DSC. The gelatinization peak of amylopectin increased in its onset (To), peak (Tp), conclusion (Tc) temperatures and decreased in gelatinization enthalpy (ΔH1) with the increasing in the amount of hemicelluloses. After storing at 4°C for 14 days, the starch/hemicellulose gels were again subjected to DSC. The To, Tp, and Tc of the melting peak of retrograded amylopectin increased, while the melting enthalpy (ΔH2) and retrogradation ratio (ΔH2/ΔH1) decreased with the increasing in the amount of hemicelluloses. Theses effect of hemicelluloses on starch gelatinization and retrogradation were obviously found in CS than in WCS. Furthermore, H1, H2 and H3 expressed these effects at a different degree. The study showed that rice bran hemicelluloses extracted by different method were significantly different in their physicochemical properties such as size, shape and sugar composition. These differences made each hemicelluloses influenced the starch gelatinization and retrogradation at different level. Moreover, hemicelluloses concentration and ratio of amylose and amylopectin also involved with the degree of the hemicelluloses effects.

Department .... Food Technology .... Student's Signature ....

Fieid of Study .... Food Technology .... Advisor's Signature ....

Academic Year .... 2011 ....

กิตติกรรมประกาศ

ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณในความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากอาจารย์ ดร.ดริษ กวักเพฑูรย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาอันมีค่าเพื่อให้คำปรึกษา คำแนะนำ และแนวทางในการแก้ปัญหา ตลอดจนความเอาใจใส่ดูแลและให้ความช่วยเหลืออย่างใกล้ชิดมาโดยตลอด รวมถึงกรุณาช่วยตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พาสวดี ประทีปะเสน ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร.ธนจันทร์ มหาวนิช อาจารย์ ดร.ขนิษฐา ธนานุวงศ์ และศาสตราจารย์ ดร.วรรณา ตุลยธัญ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ เป็นอย่างสูงที่ได้สละเวลามาตรวจสอบ พร้อมทั้งชี้แนะแนวทางในการปรับปรุงวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณทุน 90 ปี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัยนี้

ขอขอบคุณศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี บริษัทเมทโธรห์ม สยาม จำกัด บริษัทเฟิร์ส สตาร์ช อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด และบริษัทเนชั่นแนล สตาร์ช แอนด์ เคมิเคิล (ไทยแลนด์) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์วัตถุดิบในการทำวิจัย

ขอขอบคุณพี่ น้องและเพื่อนๆ ปริญญาโท ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร ที่ให้ความช่วยเหลือและกำลังใจตลอดการวิจัย รวมถึงเจ้าหน้าที่ในภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหารทุกท่านสำหรับการอำนวยความสะดวกในงานวิจัย

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดา มารดา น้องสาว และครอบครัว ที่ได้ให้การสนับสนุนด้านการศึกษาและคอยให้ความช่วยเหลือในทุกๆ ด้าน ตลอดจนคอยให้กำลังเสมอมา จนผู้วิจัยสำเร็จการศึกษา หากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีข้อผิดพลาดประการใด ผู้วัยยินดีรับข้อเสนอแนะ และขออภัยมา ณ ที่นี้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ จ

กิตติกรรมประกาศ ฉ

สารบัญ ช

สารบัญตาราง ญ

สารบัญรูป ฐ

บทที่ 1 บทนำ 1

บทที่ 2 วารสารปริทัศน์ 3

2.1. ข้าว 3

2.2. รำข้าว 5

2.3. เฮมิเซลลูโลส 6

2.4. การศึกษาโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส 10

2.5. การสกัดเฮมิเซลลูโลส 11

2.6. เฮมิเซลลูโลสที่พบในรำข้าว 15

2.7. การใช้เฮมิเซลลูโลสในอาหาร 16

2.8. องค์ประกอบพื้นฐานและสมบัติพื้นฐานของสตาร์ช 18

2.9. อิทธิพลของไฮโดรคอลลอยด์ต่อสมบัติของสตาร์ช 27

บทที่ 3 วิธีการทดลอง 33

3.1. วัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัย 33

3.2. ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย 33

3.2.1. การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของรำข้าวขาวดอกมะลิ 33

3.2.2. การเตรียมตัวอย่างก่อนการสกัด 34

หน้า

3.2.3. การสกัดเฮมิเซลลูโลส ... 34

3.2.4. ศึกษาวิธีการทำให้เฮมิเซลลูโลสบริสุทธิ์ ... 36

3.2.5. การแยกส่วนเฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยสารละลายต่าง ตามระดับความมีขั้ว ... 37

3.2.6. ศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพของเฮมิเซลลูโลสที่สกัดได้ ... 37

3.2.7. ศึกษาอิทธิพลของเฮมิเซลลูโลสต่อสมบัติของสตาร์ช ... 38

บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง ... 40

4.1. องค์ประกอบทางเคมีของรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 ... 40

4.2. การเลือกวิธีและสภาวะที่เหมาะสมในการทำให้เฮมิเซลลูโลส จากรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 บริสุทธิ์ ... 42

4.3. ผลผลิตสุทธิของเฮมิเซลลูโลสที่สกัดได้จากรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 ... 44

4.4. การกระจายตัวตามขนาดและน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของเฮมิเซลลูโลส ที่สกัดได้จากรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 ... 46

4.5. ชนิดและปริมาณน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลสที่สกัดจากรำข้าว ขาวดอกมะลิ 105 ... 48

4.6. อิทธิพลของเฮมิเซลลูโลสจากรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 ต่อสมบัติทาง ความหนืดของสตาร์ชข้าวโพด ... 53

4.7. อิทธิพลของเฮมิเซลลูโลสจากรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 ต่อสมบัติทาง วิสโคอีลาสติกของเจลสตาร์ช ... 60

4.8. อิทธิพลของเฮมิเซลลูโลสจากรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 ต่อสมบัติทาง ความร้อนของสตาร์ชข้าวโพด ... 66

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง ... 74

รายการอ้างอิง ... 76

หน้า

ภาคผนวก 83
ภาคผนวก ก. วิธีการวิเคราะห์ 84
ภาคผนวก ข. รายละเอียดผลการทดลองเพิ่มเติม 103
ภาคผนวก ค. ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน 113
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 120

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

4.1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 41

4.2 ปริมาณใยอาหารของรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่สกัดไขมันออก 41

4.3 ลักษณะการละลายกลับของเฮมิเซลลูโลสที่ทำให้บริสุทธิ์ด้วยการตกตะกอนด้วยเอทานอลและการไดอะไลซิส 43

4.4 ผลผลิตสุทธิของเฮมิเซลลูโลสที่สกัดได้จากรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 45

4.5 การกระจายตัวตามขนาดและน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักของเฮมิเซลลูโลสที่สกัดได้จากรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 48

4.6 ชนิดและปริมาณน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลส 52

4.7 สมบัติทางความหนืดของสารผสมระหว่างสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียว (WCS) และเฮมิเซลลูโลส (H) ที่ได้จากรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในสัดส่วน WCS:H ที่ระดับต่างๆ 55

4.8 สมบัติทางความหนืดของสารผสมระหว่างสตาร์ชข้าวโพด (CS) และเฮมิเซลลูโลส (H) ที่ได้จากรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในสัดส่วน CS:H ที่ระดับต่างๆ 57

4.9 อิทธิพลของเฮมิเซลลูโลสต่อสมบัติทางความร้อนในการเกิดเจลาติไนเซชันของสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียว 67

4.10 อิทธิพลของเฮมิเซลลูโลสต่อสมบัติทางความร้อนในการเกิดเจลาติไนเซชันของสตาร์ชข้าวโพด 68

4.11 อิทธิพลของเฮมิเซลลูโลสต่อสมบัติทางความร้อนในการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียว 73

4.12 อิทธิพลของเฮมิเซลลูโลสต่อสมบัติทางความร้อนในการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชข้าวโพด 74

หน้า

ก.1 น้ำหนักโมเลกุลของพูลลูแลนที่นำมาใช้สร้างกราฟมาตรฐาน 93

ก.2 โปรแกรม Gradient ที่ใช้ในการวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณน้ำตาล 96

ก.3 วิธีการเตรียมตัวอย่างสารผสมระหว่างสตาร์ชและเฮมิเซลลูโลสในการวิเคราะห์ด้วย rheometer 99

ก.4 Temperature profile STD 1 100

ก.5 วิธีการเตรียมตัวอย่างสารผสมระหว่างสตาร์ชและเฮมิเซลลูโลสในการวิเคราะห์ด้วย DSC 102

ข.1 ปริมาณไขมันที่สกัดได้จากรำข้าวขาวดอกมะลิด้วยตัวทำละลายแต่ละชนิดตามลำดับ 104

ข.2 ค่า storage modulus (*G'*) และค่า loss modulus (*G''*) ของเจลผสมสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียวและเฮมิเซลลูโลสที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย rheometer แบบ frequency sweep test 105

ข.3 ค่า loss tangent, tan δ ของเจลสตาร์ชผสมข้าวโพดข้าวเหนียวและเฮมิเซลลูโลสที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย rheometer แบบ frequency sweep test 106

ข.4 ค่า storage modulus (*G'*) และค่า loss modulus (*G''*) ของเจลผสมสตาร์ชข้าวโพดและเฮมิเซลลูโลสที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย rheometer แบบ frequency sweep test 107

ข.5 ค่า loss tangent, tan δ ของเจลสตาร์ชผสมข้าวโพดและเฮมิเซลลูโลสที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย rheometer แบบ frequency sweep test 108

ค.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณของน้ำตาลแต่ละชนิดที่เป็นองค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลสที่ได้จากรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 113

ค.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมบัติทางความหนืดของสารผสมระหว่างสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียวและเฮมิเซลลูโลส 114

ค.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมบัติทางความหนืดของสารผสมระหว่างสตาร์ชข้าวโพดและเฮมิเซลลูโลส 115

หน้า

ค.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมบัติทางความร้อนในการเกิดเจลาติไนเซชัน ของสารผสมระหว่างสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียวและเฮมิเซลลูโลส 116
ค.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมบัติทางความร้อนในการเกิดเจลาติไนเซชัน ของสารผสมระหว่างสตาร์ชข้าวโพดและเฮมิเซลลูโลส 117
ค.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมบัติทางความร้อนในการเกิดรีโทรเกรเดชัน ของสารผสมระหว่างสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียวและเฮมิเซลลูโลส 118
ค.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมบัติทางความร้อนในการเกิดรีโทรเกรเดชัน ของสารผสมระหว่างสตาร์ชข้าวโพดและเฮมิเซลลูโลส 119

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	โครงสร้างของเมล็ดข้าว	3
2.2	แบบจำลองการเชื่อมต่อของเฮมิเซลลูโลสกับเซลลูโลส	6
2.3	แบบจำลองการเชื่อมข้าม (crosslink) ของเฮมิเซลลูโลสกับไมโครไฟบริล ของเซลลูโลส	7
2.4	ไซโลกลูแคน (xyloglucan)	7
2.5	อะราบิโนไซแลน (arabinoxylan)	8
2.6	เบต้ากลูแคน (β-glucan)	8
2.7	กลูโคแมนแนน (glucomannan)	9
2.8.	การทำไดอะไลซิส (dialysis)	15
2.9	โครงสร้างของแอมิโลส	18
2.10	โครงสร้างของแอมิโลเพกทิน	19
2.11	โครงสร้างผลึกในเม็ดสตาร์ช	20
2.12	ตัวอย่างกราฟการเปลี่ยนแปลงความหนืดของน้ำแป้งระหว่างถูกให้ความร้อนและค่าต่างๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย RVA	23
2.13	สมบัติทางวิสโคอีลาสติกของ Lambda carrageenan 5%	25
2.14	สมบัติทางวิสโคอีลาสติกของเดกซ์ทริน 5%	25
2.15	สมบัติทางวิสโคอีลาสติกของ Agar 5%	26
2.16	เทอร์โมแกรมที่ได้จากเครื่อง differential scanning calorimeter (DSC)	27
2.17	การพองตัวของสตาร์ชมันสำปะหลังที่มีประจุบวกที่มีการเติมและไม่มีการเติมกัม	28
3.1	วิธีการเตรียมตัวอย่าง การสกัด และการแยกเฮมิเซลลูโลสตามระดับความมีขั้วจากรำข้าวขาวดอกมะลิ 105	36
4.1	ปริมาณตะกอนของสารละลายเฮมิเซลลูโลสเมื่ออยู่ในระบบบัฟเฟอร์ต่างๆ เป็นเวลา 0 1 2 3 4 และ 5 วัน	44

หน้า

4.2 การกระจายตัวตามขนาดโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลสที่สกัดได้จากรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 47

4.3 โครมาโตแกรมของน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลสจากรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 51

4.4 สมบัติทางความหนืดของสารผสมระหว่างสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียว (WCS) และเฮมิเซลลูโลส (H) ที่ได้จากรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่สัดส่วน CS:H, 8:2 และ 6:4 54

4.5 สมบัติทางความหนืดของสารผสมระหว่างสตาร์ชข้าวโพด (CS) และเฮมิเซลลูโลส (H) ที่ได้จากรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่สัดส่วน CS:H, 8:2 และ 6:4 56

4.6 สมบัติทางวิสโคอีลาสติก (*G''* และ *G'*) ของเจลของสารผสมระหว่างสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียว (WCS) กับเฮมิเซลลูโลส (H) ที่ได้จากรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในสัดส่วน WCS:H ที่ระดับ 8:2 และ 6:4 62

4.7 สมบัติทางวิสโคอีลาสติก (tan δ) ของเจลของสารผสมระหว่างสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียว (WCS) กับเฮมิเซลลูโลส (H) ที่ได้จากรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในสัดส่วน WCS:H ที่ระดับ 8:2 และ 6:4 63

4.8 สมบัติทางวิสโคอีลาสติก (*G''* และ *G'*) ของเจลผสมระหว่างสตาร์ชข้าวโพด (CS) กับเฮมิเซลลูโลส (H) ที่ได้จากรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในสัดส่วน CS:H ที่ระดับ 8:2 และ 6:4 64

4.9 สมบัติทางวิสโคอีลาสติก (tan δ) ของเจลของสารผสมระหว่างสตาร์ชข้าวโพด (CS) กับเฮมิเซลลูโลส (H) ที่ได้จากรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในสัดส่วน CS:H ที่ระดับ 8:2 และ 6:4 65

ก.1 กราฟแสดงปริมาณคาร์โบไฮเดรตทั้งหมดด้วยวิธี Phenol-Sulfuric method ของสารละลายเฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยสารละลายด่างแล้วแยกด้วย DEAE-52-Cellulose Chromatography 92

		หน้า
ก.2	กราฟมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของเฮมิเซลลูโลส	94
ก.3	Chromatogram ของน้ำตาลมาตรฐานความเข้มข้น 0.0045 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย HPAEC-PAD	97
ก.4	กราฟน้ำตาลมาตรฐานที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย HPSEC	98
ข.1	thermogram จาก DSC ของสารผสมระหว่างสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียวและเฮมิเซลลูโลสที่ระดับต่างๆ ในการเกิดเจลาติไนเซชัน	109
ข.2	thermogram จาก DSC ของสารผสมระหว่างสตาร์ชข้าวโพดและเฮมิเซลลูโลสที่ระดับต่างๆ ในการเกิดเจลาติไนเซชัน	110
ข.3	thermogram จาก DSC ของสารผสมระหว่างสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียวและเฮมิเซลลูโลสที่ระดับต่างๆ ในการเกิดรีโทรเกรเดชัน	111
ข.4	thermogram จาก DSC ของสารผสมระหว่างสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียวและเฮมิเซลลูโลสที่ระดับต่างๆ ในการเกิดรีโทรเกรเดชัน	112

บทที่ 1

บทนำ

ในอุตสาหกรรมอาหารมีการใช้สตาร์ชอย่างกว้างขวาง ทั้งที่ใช้เป็นวัตถุดิบหลักหรือใช้เป็นวัตถุเจือปนในอาหาร (food additive) เช่น สารให้ความข้นหนืด สารเพิ่มความคงตัวเพื่อปรับปรุงลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหาร อย่างไรก็ตามการใช้สตาร์ชในอาหารยังมีข้อจำกัดบางประการอันเนื่องมาจากสมบัติทางกายภาพของสตาร์ช จึงมีการนำไฮโดรคอลลอยด์มาใช้เพื่อลดข้อจำกัดของสตาร์ชที่เกิดขึ้น ทั้งในขั้นตอนของกระบวนการผลิต และลักษณะของผลิตภัณฑ์สุดท้าย (Ren and Sun, 2010)

เฮมิเซลลูโลส คือ พอลิแซกคาไรด์ที่เป็นองค์ประกอบในผนังเซลล์พืช ประกอบไปด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว 2 ชนิดขึ้นไป มีโครงสร้างที่หลากหลาย เฮมิเซลลูโลสพบได้ในไม้เนื้อแข็ง ไม้เนื้ออ่อน พืชตระกูลหญ้า และธัญพืช เฮมิเซลลูโลสที่พบในแต่ละแหล่งจะมีความแตกต่างกันทั้งทางโครงสร้าง และชนิดของน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบ เฮมิเซลลูโลสมีสมบัติเป็นไฮโดรคอลลอยด์ จึงมีการนำมาใช้เป็นสารให้ความข้นหนืด (thickener) อิมัลซิไฟเออร์ (emulsifier) และสารเพิ่มความคงตัวในอาหาร (stabilizer) (Popa and Spiridon, 1998) นอกจากจะช่วยปรับปรุงลักษณะของผลิตภัณฑ์อาหารแล้ว เฮมิเซลลูโลสยังมีบทบาททางโภชนาการในด้านการเป็นใยอาหาร (dietary fiber) และเป็นอาหารของจุลินทรีย์ที่อยู่ในลำไส้ (prebiotic) จึงมีประโยชน์ต่อร่างกาย (Ren and Sun, 2010)

โครงสร้างที่มีความหลากหลายของเฮมิเซลลูโลส ทำให้การสกัดเฮมิเซลลูโลสสามารถทำได้หลายวิธี วิธีที่ใช้โดยทั่วไป คือ การสกัดด้วยน้ำร้อน และการสกัดด้วยสารละลายด่าง เฮมิเซลลูโลสที่ได้จากวิธีการสกัดที่ต่างกัน จะมีความแตกต่างกันทั้งทางโครงสร้าง ความมีกิ่งก้าน น้ำหนักโมเลกุล ระดับการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชัน เหล่านี้ล้วนส่งผลต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของเฮมิเซลลูโลสนั้น นอกจากนี้เฮมิเซลลูโลสที่สกัดจากแต่ละวิธีการ ก็ยังสามารถแยกออกเป็นกลุ่มย่อยได้อีก โดยมีการนำวิธีการอื่นๆ เข้ามาช่วยในการแยก เช่น การใช้เทคนิคโครมาโตกราฟี ซึ่งจะช่วยให้สามารถแยกกลุ่มตามสมบัติของเฮมิเซลลูโลสได้ดีขึ้น (Ren and Sun, 2010)

การเติมไฮโดรคอลลอยด์ในระบบของสตาร์ช สามารถช่วยปรับปรุงและควบคุมลักษณะเนื้อสัมผัส ช่วยรักษาความชื้นในผลิตภัณฑ์ ควบคุมการเคลื่อนที่ของน้ำและคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหาร อิทธิพลของไฮโดรคอลลอยด์ต่อสตาร์ชมีปัจจัยหลายอย่างเข้ามาเกี่ยวข้อง ทั้งชนิดของสตาร์ชที่ใช้ ชนิดและสมบัติของไฮโดรคอลลอยด์ และปริมาณที่เติมเข้าไป (BeMiller, 2011)

รำข้าวเป็นอีกแหล่งหนึ่งที่พบเฮมิเซลลูโลส (Mod *et al*., 1978; Mod *et al*., 1979; Shibuya and Iwasaki, 1984) ภายหลังจากถูกนำไปใช้ผลิตเป็นน้ำมันรำข้าวบริโภคแล้ว ยังคงเหลือส่วนของรำข้าวสกัดน้ำมันที่มีเฮมิเซลลูโลสอยู่ งานวิจัยนี้จึงมีเป้าประสงค์ที่จะสกัดเฮมิเซลลูโลสจากรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 ด้วยน้ำร้อนและสารละลายด่างเพื่อให้ได้เฮมิเซลลูโลสที่มีสมบัติที่ต่างกัน แล้วศึกษาถึงอิทธิพลของเฮมิเซลลูโลสต่อการเกิดเจลาติไนเซชันและรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชข้าวโพดและข้าวโพดข้าวเหนียว ซึ่งมีปริมาณแอมิโลสที่ต่างกัน ข้อมูลที่ได้นี้จะสามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการนำเฮมิเซลลูโลสไปประยุกต์ใช้ทั้งในอุตสาหกรรมอาหารและอุตสาหกรรมอื่นๆ ได้ตามวัตถุประสงค์ต่อไป

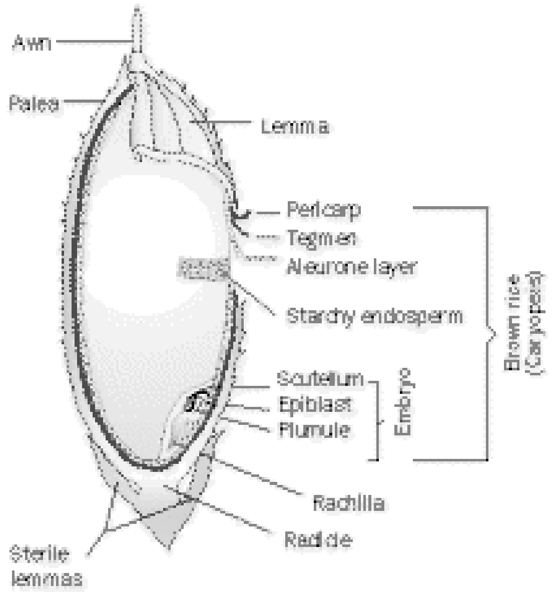
บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

2.1 ข้าว

ข้าวมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ คือ *Oryza sativa* L. นิยมปลูกกันมากในประเทศเขตร้อน ข้าวเป็นพืชอาหารหลักที่สำคัญของคนไทยและคนทั่วโลก นอกจากนี้ข้าวยังเป็นพืชเศรษฐกิจของไทยที่ส่งออกเป็นอันดับหนึ่งของโลกติดต่อกันมาหลายปี (กรมการข้าว, 2554)

โครงสร้างของเมล็ดข้าวแสดงดัง**รูปที่** 2.1 โดยเมล็ดข้าวประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนที่ห่อหุ้มเมล็ดข้าว เรียกว่า แกลบ (husk) และส่วนเนื้อผล หรือผลแท้ (caryopsis grain) หรือข้าวกล้อง (brown rice) โดยมีรายละเอียดแต่ละส่วน ดังนี้ (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547)



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเมล็ดข้าว

ที่มา: http://www.n2n-inter.com/education/rice.htm

2.1.1 แกลบ ประกอบด้วย เปลือกใหญ่ (lemma) เปลือกเล็ก (palea) ขน หาง ขั้วเมล็ด (rachilla) และกลีบรองเมล็ด (sterile lemmas) ซึ่งเชื่อมต่อกับก้าน (pedicel)

2.1.1.1 เปลือกใหญ่ เป็นเปลือกหุ้มเนื้อผลด้านท้อง มีขนาดใหญ่อาจมีหางหรือไม่มีก็ได้ ลักษณะของเปลือกใหญ่จะเป็นรอบเส้น (nerves) ตามความยาวของเปลือกประมาณ 5 เส้น เปลือกใหญ่จะห่อหุ้มเปลือกเล็กไว้ทั้ง 2 ด้านในลักษณะขบอยู่ข้างบนอย่างแน่นสนิท ประมาณ 2/3 ของเปลือกทั้งหมดตามแนวยาวของเมล็ด

2.1.1.2 เปลือกเล็ก เป็นเปลือกหุ้มเนื้อผลด้านหลัง ที่มีขนาดเล็กกว่าเปลือกใหญ่ประมาณ 1/3 ของเปลือกทั้งหมด จะขบอยู่ใต้เปลือกใหญ่ตามแนวยาว ทำให้เปลือกทั้ง 2 ติดกันสนิท บนผิวเปลือกเล็กจะเป็นรอบเส้นตามความยาวของเปลือกประมาณ 3 เส้น

2.1.1.3 ขน จะขึ้นบนเปลือกใหญ่ และเปลือกเล็กเป็นส่วนใหญ่ อาจมีบางพันธุ์ที่ไม่มีขนแต่เป็นส่วนน้อย ขนนี้คือ ส่วนของเซลล์ผิวนอก (epidermal cell) ที่เจริญกลายเป็นขน เพื่อทำหน้าที่ลดการระเหยน้ำ ป้องกันอันตรายต่อเมล็ดจากภาวะภายนอกเมล็ด และเพื่อการกระจายพันธุ์ตามธรรมชาติ

2.1.1.4 หาง เป็นส่วนปลายของเปลือกใหญ่ที่ยาวออกมาเกิดตำแหน่งยอดดอก

2.1.1.5 ขั้วเมล็ด เป็นก้านสั้น อยู่ระหว่างกลีบรองเมล็ดกับเปลือกใหญ่ และยังติดอยู่กับเมล็ดข้าวเปลือก

2.1.1.6 กลีบรองเมล็ด เป็นกลีบเล็ก 2 กลีบ อยู่ตรงข้ามกัน ใต้สุดของเมล็ด

2.1.2 ข้าวกล้องหรือเนื้อผล ประกอบด้วย

2.1.2.1 เยื่อหุ้มผล (pericarp) เป็นเนื้อเยื่อชั้นนอก มีความหนาประมาณ 10 ไมโครเมตร ห่อหุ้มผลอยู่ภายใน มีลักษณะเป็นเซลล์ที่มีผนังเซลล์เส้นใย 6 ชั้น มีสารสีหรือรงควัตถุปนอยู่ ทำให้ข้าวกล้องมีสีต่างๆ นอกจากนี้ยังมีโปรตีน เฮมิเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบสำคัญ ในชั้นเยื่อหุ้มผลนี้แบ่งย่อยได้เป็น 3 ชั้นย่อย คือ

2.1.2.1.1 เอพิคาร์พ หรือ เอกโซคาร์พ (epicarp หรือ exocarp) เป็นผิวหรือผนังหรือเปลือกที่อยู่นอกสุด มีลักษณะเรียบ เหนียว และเป็นมัน ประกอบด้วยเซลล์ชั้นเดียว

2.1.2.1.2 เมโซคาร์พ หรือ ไฮพอเดิร์ม (mesocarp หรือ hypoderm) เป็นผนังผลชั้นกลาง

2.1.2.1.3 เอนโดคาร์พ (endocarp) เป็นเยื่อชั้นใน

2.1.3 เยื่อหุ้มเมล็ด (seed coat) อยู่ถัดจากเยื่อหุ้มผลเข้ามา ประกอบด้วยเซลล์ 2 ชั้น และมีผนังบางกั้น ภายในเซลล์มีไขมันและสารสี เช่นเดียวกับเยื่อหุ้มผล ทำให้ข้าวกล้องมีสี

2.1.4 นิวเซลลัส (nucellus) เป็นเซลล์ชั้นที่ติดกับเยื่อหุ้มเมล็ด แต่พันธะระหว่างนิวเซลลัสกับเยื่อหุ้มเมล็ดไม่ติดแน่น จึงแยกจากกันได้ง่าย

2.1.5 เยื่อชั้นแอลิวโรน (aleurone layer) เป็นเยื่อชั้นถัดจากเยื่อหุ้มเมล็ด มีลักษณะของเยื่อหุ้มด้านหลังของเมล็ดจะหนากว่าเยื่อหุ้มด้านท้อง ซึ่งความหนานี้จะแตกต่างไปตามพันธุ์ข้าว เซลล์แอลิวโรนจะไม่เชื่อมติดกับคัพภะในส่วนของใบเลี้ยงด้านท้องของเมล็ดลงมาถึงจุดเชื่อมระหว่างใบเลี้ยงกับเยื่อหุ้มรากอ่อน ซึ่งอยู่ข้างในของเมล็ด

2.1.5.1 คัพภะ (embryo) จะอยู่ที่โคนเมล็ดด้านเปลือกใหญ่ ส่วนท้องของเมล็ดเป็นแหล่งสะสมอาหารสำหรับการเจริญเติบโตของต้นอ่อน จึงอุดมไปด้วยโปรตีน ไขมันในส่วนต่างๆ

2.1.5.2 เนื้อเมล็ดหรือเนื้อข้าว (endosperm) มีมากที่สุดในเมล็ดข้าว (ประมาณ 80% ของน้ำหนักเมล็ดทั้งหมด) (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547)

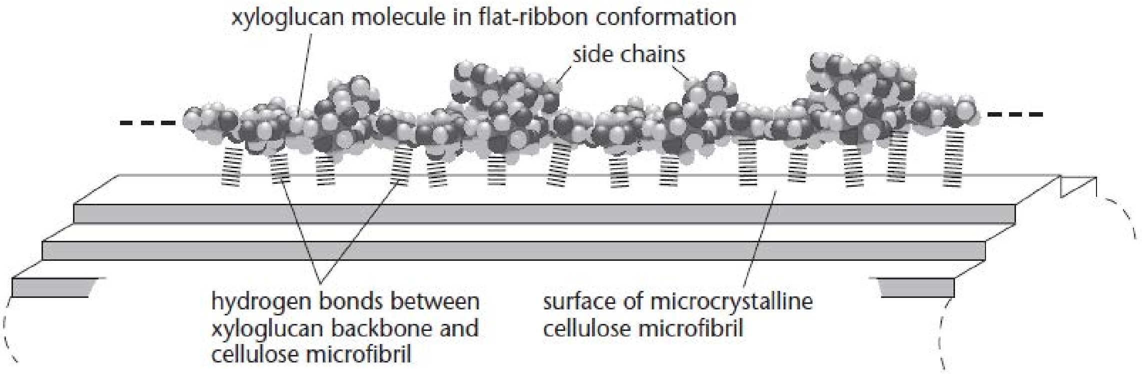
2.2 รำข้าว

เมื่อกะเทาะเปลือกของข้าวเปลือกออกแล้วจะได้แกลบ และข้าวกล้อง ในการขัดสีผิวข้าวกล้องด้วยเครื่องขัดขาว จะได้เป็นรำหลุดออกมา ซึ่งประกอบด้วยเยื่อหุ้มผล เยื่อหุ้มเมล็ด นิว-เซลลัส ชั้นแอลิวโรนและคัพภะ รวมเป็นน้ำหนักประมาณ 10% ของน้ำหนักข้าวกล้องก่อนขัดสี ดังนั้นปริมาณ ชนิดของโครงสร้าง และองค์ประกอบทางเคมีของรำข้าวที่ได้จากกระบวนการขัดสีข้าว นับจากการกะเทาะเปลือกหุ้มแข็ง (แกลบ) ออกไปแล้ว ขึ้นอยู่กับพันธุ์ข้าว และสภาวะแวดล้อมที่ปลูกจนถึงกรรมวิธีในการขัดผิวเมล็ดข้าวกล้อง การขัดขาว และการขัดมันเพื่อให้ได้ข้าวสารขาว และมันวาว องค์ประกอบทางเคมีของรำข้าว ขึ้นอยู่กับส่วนของรำที่ได้จากกระบวนการสีข้าว ซึ่งโดยทั่วไปจะแบ่งเป็น 2 ลักษณะ คือ รำหยาบ (bran) รำนี้จะมีสีน้ำตาลเข้มซึ่งได้จากการขัดผิวเมล็ดข้าวกล้อง และรำละเอียด (polish bran) ได้จากการขัดขาวและขัดมัน จึงทำให้มีองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกันบ้าง โดยรำหยาบจะมีโปรตีน ไขมัน เส้นใยหยาบ เถ้า แร่ธาตุ และวิตามินบางชนิดมากกว่ารำละเอียด ยกเว้นคาร์โบไฮเดรต ดังนั้นจึงมีการนำรำข้าวไป

สกัดน้ำมัน โปรตีน และสารอาหารอื่นเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าสูงขึ้นได้จากเดิมที่ใช้เป็นอาหารสัตว์เท่านั้น (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547)

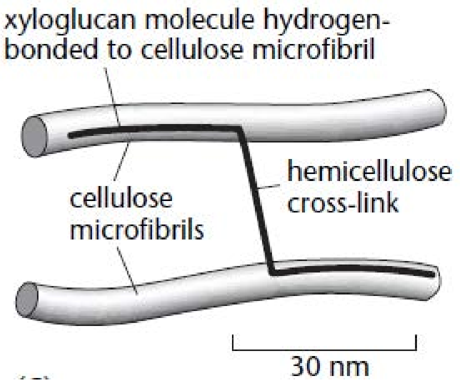
2.3 เฮมิเซลลูโลส

เฮมิเซลลูโลสเป็นเฮเทอโรพอลิแซกคาไรด์ (heteropolysaccharide) ที่พบได้ในผนังเซลล์พืช อยู่ร่วมกับเซลลูโลส (cellulose) เพกทิน (pectin) และลิกนิน (lignin) ประกอบกันเป็นโครงสร้างของผนังเซลล์ พบได้ในไม้เนื้อแข็ง (hard wood) ไม้เนื้ออ่อน (soft wood) และพืชล้มลุก (annual plants) (Popa and Spiridon, 1998) เฮมิเซลลูโลสเชื่อมต่อกับเซลลูโลสหรือไมโครไฟ-บริลของเซลลูโลสด้วยพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) ที่แข็งแรง (**รูปที่** 2.2) และยังสามารถเกิดการเชื่อมข้าม (crosslinked) ระหว่างไมโครไฟบริล 2 สายของเซลลูโลสด้วย (**รูปที่** 2.3)



รูปที่ 2.2 แบบจำลองการเชื่อมต่อของเฮมิเซลลูโลสกับเซลลูโลส
ที่มา: Albersheim *et al*., 2010

นอกจากเกิดพันธะไฮโดรเจนในโครงสร้างกับเซลลูโลสแล้ว เฮมิเซลลูโลสยังเกิดพันธะโควาเลนต์กับลิกนิน และเพกทินในผนังเซลล์พืช ทำให้ผนังเซลล์พืชมีความแข็งแรงและคงรูป



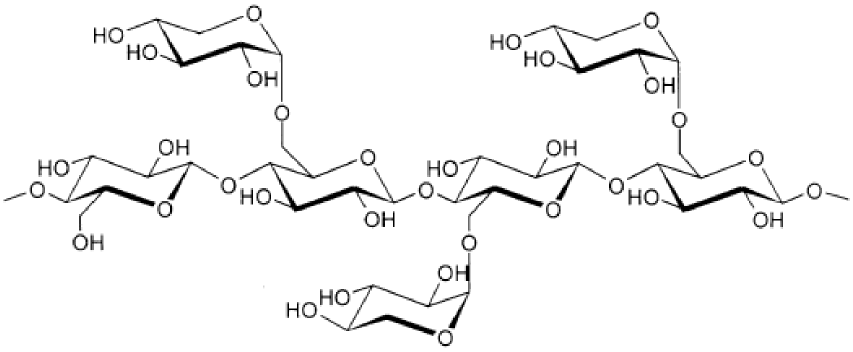
รูปที่ 2.3 แบบจำลองการเชื่อมข้าม (crosslink) ของเฮมิเซลลูโลสกับไมโครไฟบริลของเซลลูโลส

ที่มา: Albersheim *et al*., 2010

เฮมิเซลลูโลสที่พบในธรรมชาติมีความหลากหลายทางโครงสร้าง โดยทั่วไปที่พบจะมีโครงสร้าง ดังนี้

2.3.1. ไซโลกลูแคน (xyloglucan)

ไซโลกลูแคนมีโครงสร้างสายหลักเป็นกลูโคสต่อกันด้วยพันธะ β-1,4 เช่นเดียวกับเซลลูโลส มีสายกิ่งเชื่อมต่อที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 6 ของหน่วยย่อยกลูโคสในสายหลัก โดยมีสายกิ่งเป็นโมเลกุลเดี่ยวของไซโลส (α-D-xylose) (**รูปที่** 2.4) หรือไซโลสที่ถูกเชื่อมต่อด้วยกาแลกโตส (β-D-galactose) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 (galactoxyloglucan) นอกจากนี้ยังอาจพบอะราบิโนส (α-L-arabinose) เชื่อมต่อที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 ของหน่วยย่อยกลูโคสในสายหลัก หรือเชื่อมต่อที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 3 ของไซโลสที่เป็นสายกิ่ง (Albersheim *et al*., 2010)

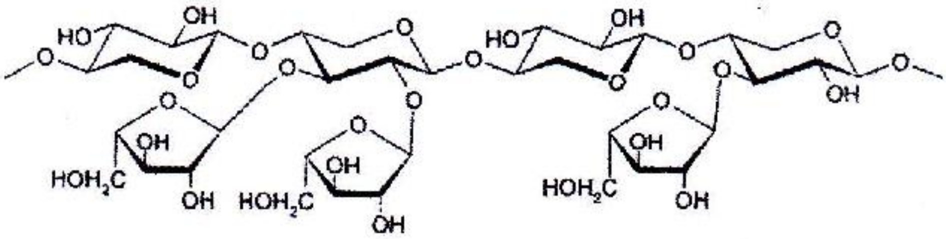


รูปที่ 2.4 ไซโลกลูแคน (xyloglucan)

ที่มา: Wright (2008)

2.3.2. อะราบิโนไซแลน (arabinoxylan)

อะราบิโนไซแลนมีโครงสร้างสายหลักเป็นไซโลสต่อกันด้วยพันธะ β-1,4 มีสายกิ่งเป็นอะราบิโนส (α-L-arabinose) กาแลกโตส (galactose) กรดกลูโคโรนิก (glucosyluronic acid) และ 4-*O*-methyl glucosyluronic acid เชื่อมต่อที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 และ/หรือตำแหน่งที่ 3 ของหน่วยย่อยไซโลสขึ้นอยู่กับชนิดของพืช ซึ่งโครงสร้างอาจเป็นอะราบิโนไซแลน (**รูปที่** 2.5) อะราบิโนกลูคูโรโนไซแลน (arabino-glucuronoxylan) หรือสารประกอบเชิงซ้อนของไซแลน (complex heteroxylan) (Ren and Sun, 2010)

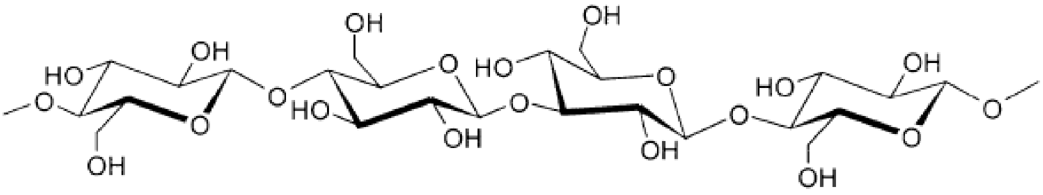


รูปที่ 2.5 อะราบิโนไซแลน (arabinoxylan)

ที่มา: Wright (2008)

2.3.3. เบต้ากลูแคน (β-glucan)

เบต้ากลูแคนมีโครงสร้างเป็นกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ β-1,3 และ β-1,4 มีโครงสร้างเป็นพอลิแซกคาไรด์สายตรง (**รูปที่** 2.6) (Albersheim *et al*., 2010)

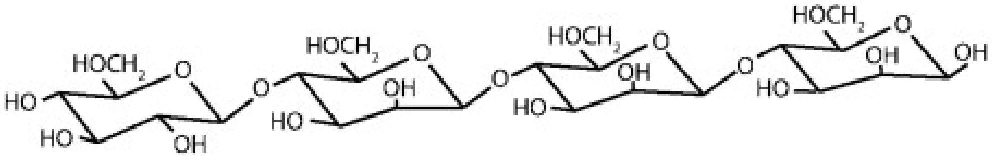


รูปที่ 2.6 เบต้ากลูแคน (β-glucan)

ที่มา: Wright (2008)

2.3.4. กลูโคแมนแนน (glucomannan)

กลูโคแมนแนนมีโครงสร้างหลักเป็นหน่วยย่อยของไดแซกคาไรด์ที่เชื่อมต่อกันระหว่างกลูโคส (β-D-glucose) กับแมนโนส (β-D-mannose) ด้วยพันธะ β-1,4 มีสายกิ่งต่อด้วยโมเลกุลเดี่ยวของกาแลกโตส หรือกาแลกโตสมากกว่า 2 โมเลกุลเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ β-1,4 (galactoglucomannan) เชื่อมต่อกับคาร์บอนตำแหน่งที่ 6 ของหน่วยย่อยแมนโนสในสายหลัก (Albersheim *et al.*, 2010)



รูปที่ 2.7 กลูโคแมนแนน (glucomannan)
ที่มา: Wright (2008)

โดยเฮมิเซลลูโลสที่พบในพืชแต่ละชนิดจะมีความแตกต่างกัน ทั้งทางโครงสร้าง ระดับความเป็นกิ่งก้าน และน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบ เฮมิเซลลูโลสที่พบในธรรมชาติแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่ม ตามแหล่งที่มาคือ

1. *กลุ่มที่ได้จากไม้เนื้ออ่อน (softwood)*

เฮมิเซลลูโลสที่ได้จากไม้เนื้ออ่อนมีโครงสร้างเป็นกลูโคแมนแนน (glucomannan) กาแลกโตกลูโคแมนแนน (galactoglucomanan) อะราบิแนน (arabinan) และส่วนน้อยเป็นอะราบิโนไซแลน (arabinoxylan)

2. *กลุ่มที่ได้จากไม้เนื้อแข็ง(hard wood)*

เฮมิเซลลูโลสที่ได้จากไม้เนื้อแข็งมีโครงสร้างหลักเป็นไซแลน (xylan) ทุกๆ 10 หน่วยย่อยของไซโลสจะเชื่อมต่อกับ 4-*O*-methyl-D-gluconic acid ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 ได้เป็นโครงสร้างของ กลูคูโรโนไซแลน (glucuronoxylan) และมีส่วนน้อยที่เป็นกลูโคแมนแนน (glucomannan)

3. *กลุ่มที่ได้จากพืชใบเลี้ยงเดี่ยว(annual plant)*

พืชใบเลี้ยงเดี่ยว ได้แก่ พืชตระกูลหญ้า และธัญพืช (ธัญพืชทั้งเมล็ดและฟางของธัญพืช) เฮมิเซลลูโลสที่พบในกลุ่มนี้มีโครงสร้างเป็นอะราบิโนไซแลน (arabinoxylan) อะราบิโนกลูคูโรโนไซแลน (arabino-glucuronoxylan) หรือสารประกอบเชิงซ้อนของไซแลน (complex heteroxylan) (Popa and Spiridon, 1998)

2.4 การศึกษาโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส

การจะศึกษาโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส จำเป็นต้องทราบชนิดและ configuration (D/L form) ของน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบ ตำแหน่งและ configuration (α/β) ของพันธะกลูโคซิดิกและการจัดลำดับของน้ำตาลในโครงสร้าง (Albersheim *et al.*, 2010) จึงมีการนำเทคนิคต่างๆ มาใช้เพื่อศึกษาโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส (Ren and Sun, 2010) โดยเทคนิคที่มีการนำมาใช้ศึกษาได้แก่

2.4.1. การศึกษาด้วยเทคนิค spectroscopy ได้แก่ การวิเคราะห์ด้วย fourier transforms infared (FTIR) และการวิเคราะห์ด้วย nuclear magnetic resonance (NMR) เป็นวิธีที่ใช้วิเคราะห์หาโครงรูป (conformation) ของหมู่ที่เป็นองค์ประกอบในโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสโดยเทียบกับสารอ้างอิง

2.4.2. การศึกษาด้วยเทคนิคโครมาโตกราฟี ได้แก่ gas-liquid chromatography (GLC), high performance liquid chromatography (HPLC) และ high performance anion exchange chromatography (HPLC) ที่ต่อด้วย pulsed amperometric detector (HPAEC-PAD) เป็นวิธีที่ใช้วิเคราะห์หาชนิดและปริมาณของน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลส

HPAEC-PAD เป็นเทคนิคของโครมาโตกราฟีแบบแลกเปลี่ยนแอนไอออนที่มีการนำมาใช้วิเคราะห์หาชนิดของน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบในพอลิแซ็กคาไรด์ เดิมใช้ในการวิเคราะห์น้ำตาลที่เป็นกรด ไม่นิยมใช้กับน้ำตาลที่เป็นกลาง แต่เมื่อพิจารณาจากค่า pKa ของน้ำตาล พบว่าจะมีค่าความเป็นกรดอย่างอ่อน ซึ่งในภาวะด่างของเฟสเคลื่อนที่ (mobile phase) ที่ใช้ในระบบนี้หมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group, OH) ของโพลีแซ็กคาไรด์จะถูกไอออไนซ์เป็นออกซีแอนไอออน (oxyanion, O^-) ที่สามารถทำปฏิกิริยากับเฟสอยู่กับที่ (stationary phase) ในคอลัมน์ จึงสามารถ

ใช้เทคนิคนี้ในการวิเคราะห์ทั้งน้ำตาลที่เป็นกลางและน้ำตาลที่เป็นกรดได้ การตรวจวัดโดย PAD จะมีการให้ค่าศักย์ไฟฟ้าหลายค่าในระหว่างการทำงาน โดยอาศัยการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันของสารกับขั้วอิเล็กโทรดของ PAD ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าที่สามารถตรวจวัดสัญญาณได้ เทคนิค HPAEC-PAD นี้เป็นที่นิยมใช้มากในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นวิธีที่รวดเร็ว และมีประสิทธิภาพในการแยกสารที่วิเคราะห์ได้อย่างชัดเจน (high resolution) (วันเพ็ญ แสงทองพินิจ, 2544)

2.4.3. การศึกษาด้วยเทคนิค mass spectrometry ได้แก่ การวิเคราะห์ด้วย matrix assisted laser desorption/ionization time of flight (MALDI-TOF) เป็นวิธีที่มีความแม่นยำและมีประสิทธิภาพสูง ใช้ในการวิเคราะห์จำนวนของโครงสร้างพื้นฐานในโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส

2.4.4. การศึกษาด้วยเทคนิคอื่นๆ ได้แก่ การทำ methylation เป็นการตัดโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสด้วยเอนไซม์ที่มีความจำเพาะ แล้วเติมหมู่เมทิล (methyl group; CH_3) เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างพื้นฐานของเฮมิเซลลูโลส

การศึกษาโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสอาจใช้เพียงเทคนิคเดียว หรือใช้หลายเทคนิคร่วมกันเพื่อใช้เป็นแนวทางให้ทราบถึงโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส เนื่องจากโครงสร้างที่ต่างกันจะส่งผลต่อสมบัติทางเคมีและกายภาพให้มีความแตกต่างกันด้วย อย่างไรก็ตามการศึกษาสมบัติและองค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลสยังคงเป็นปัญหาและยากต่อการวิเคราะห์ เนื่องจากเฮมิเซลลูโลสมีความสามารถในการละลายน้ำต่ำ ถึงแม้เฮมิเซลลูโลสนั้นจะถูกสกัดด้วยน้ำก็ตาม จึงเป็นปัญหาต่อการวิเคราะห์ที่ต้องใช้เฮมิเซลลูโลสในรูปสารละลาย ซึ่งความสามารถในการละลายของเฮมิ-เซลลูโลสขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ลักษณะโครงสร้าง ระดับการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชัน ระดับการแทนที่ และรูปแบบการกระจายตัวของเฮมิเซลลูโลส เป็นต้น นอกจากจะพบว่าความสามารถในการละลายขึ้นอยู่กับลักษณะของโครงสร้างแล้ว ยังพบว่าขึ้นอยู่กับวิธีการและขั้นตอนที่ใช้ในการสกัดเฮมิเซลลูโลสด้วย (Ren and Sun, 2010)

2.5 การสกัดเฮมิเซลลูโลส

เฮมิเซลลูโลสเป็นพอลิแซกคาไรด์ที่มีความหลากหลาย ปริมาณและองค์ประกอบของเฮมิ-เซลลูโลสขึ้นอยู่กับวิธีการสกัด (Xu *et al.*, 2007) การสกัดเฮมิเซลลูโลสโดยทั่วไปจำเป็นต้องกำจัดองค์ประกอบอื่นออก เพื่อให้ได้เฮมิเซลลูโลสที่มีความบริสุทธิ์ หรือมีการปนเปื้อนของสารอื่นใน

ปริมาณน้อย เริ่มต้นจึงมีการสกัดเอาส่วนของสารที่ละลายได้ในไขมัน (lipophilic) ทั้งหมดออกโดยใช้ตัวทำละลายไม่มีขั้ว (Ren and Sun, 2010) ในการสกัดบางครั้งจะมีการใช้เอนไซม์เข้ามาช่วยในการกำจัดองค์ประกอบอื่นออกด้วย เช่น การใช้เอนไซม์กลุ่มแอมิเลสเพื่อกำจัดสตาร์ช และเอนไซม์กลุ่มโปรตีเอสเพื่อกำจัดโปรตีน เป็นต้น (Albersheim *et al.*, 2010) เพื่อให้การสกัดเฮมิเซลลูโลสมีประสิทธิภาพมากขึ้น

การสกัดเฮมิเซลลูโลสสามารถทำได้หลายวิธี แต่ที่นิยมใช้ คือ

2.5.1. การสกัดด้วยน้ำร้อน

น้ำร้อนสามารถใช้ในการแยกเฮมิเซลลูโลสที่ละลายน้ำได้ออกจากผนังเซลล์พืช จากงานวิจัยที่ผ่านมาเฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยน้ำจะมีน้ำหนักโมเลกุลน้อย มีสายกิ่งมาก และจับกับเซลลูโลสแบบหลวมๆ จากสมบัติเหล่านี้ทำให้เฮมิเซลลูโลสกลุ่มนี้มีความสามารถในการละลายน้ำ จึงถูกสกัดออกมาได้ด้วยน้ำร้อน แต่การสกัดด้วยวิธีนี้ก็อาจมีการปนออกมาของเพกทินด้วย (Xu *et al*. 2007; Peng *et al*., 2010; Ren and Sun, 2010)

2.5.2. การสกัดด้วยสารละลายด่าง

ในผนังเซลล์พืชเฮมิเซลลูโลสจะจับกับไมโครไฟบริลของเซลลูโลสด้วยพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรง จับกับลิกนินด้วยพันธะโควาเลนต์ และพันธะเอสเทอร์กับหมู่อะซิทิล การใช้สารละลายด่างที่มีหมู่ไฮดรอกซิลส่งผลให้เซลลูโลสเกิดการบวม เกิดการทำลายพันธะเอสเทอร์ และทำลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ทำให้สามารถสกัดแยกเฮมิเซลลูโลสออกมาได้ เฮมิเซลลูโลสที่สกัดได้ด้วยวิธีนี้จะมีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีความเป็นกิ่งก้านน้อย และจับกับเซลลูโลสค่อนข้างแข็งแรงกว่า เฮมิเซลลูโลสกลุ่มนี้จึงไม่ละลายน้ำ (Xu *et al.* 2007; Peng *et al*., 2010; Ren and Sun, 2010)

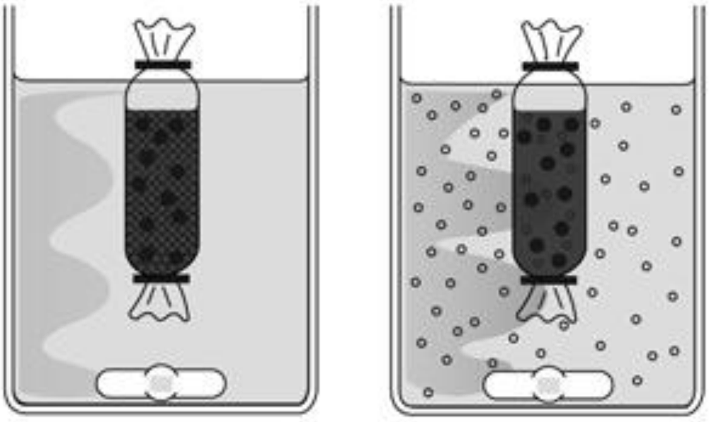
จากงานวิจัยของ Sun และคณะ (2004) ได้ศึกษาเปรียบเทียบวิธีการสกัดเฮมิเซลลูโลสด้วยน้ำและสารละลายด่างจากชานอ้อย พบว่าเฮมิเซลลูโลสที่สกัดได้ด้วยน้ำจะมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่าที่สกัดด้วยสารละลายด่าง และจากน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบ พบว่าเฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยน้ำมีน้ำตาลกลูโคสเป็นองค์ประกอบหลัก จึงน่าจะมีโครงสร้างหลักเป็นกลูแคนที่ต่อกันด้วยพันธะชนิดอัลฟา (α-glucan) หรือเบต้า (β-glucan) และยังพบน้ำตาลอะราบิโนส ไซโลส และกาแลกโตส จึงเป็นไปได้ที่จะมีโครงสร้างเป็นกาแลกโตอะราบิโนไซแลน (galactoarabinoxylan)

นอกจากนี้ยังมีปริมาณน้ำตาลแรมโนสและกรดยูโรนิก (uronic acid) สูงกว่าการสกัดด้วยสารละลายด่าง ซึ่งอาจมีการปนออกมาของเพกทินด้วย เฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยสารละลายด่างมีน้ำตาลอะราบิโนสและไซโลสเป็นองค์ประกอบหลัก จึงน่าจะมีโครงสร้างเป็นอะราบิโนไซแลน และจากอัตราส่วนของไซโลสต่ออะราบิโนส ซึ่งสามารถใช้บอกถึงความเป็นกิ่งก้านของโครงสร้าง พบว่าการสกัดด้วยน้ำจะมีอัตราส่วนที่สูงกว่าการสกัดด้วยสารละลายด่าง เฮมิเซลลูโลสที่ได้จากการสกัดด้วยน้ำจึงมีความเป็นกิ่งก้านที่สูงกว่าการสกัดด้วยสารละลายด่างซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Xu และคณะ (2007) ที่ได้ศึกษาเปรียบเทียบการสกัดเฮมิเซลลูโลสด้วยน้ำและสารละลายด่างจากหญ้า perennial ryegrass

เฮมิเซลลูโลสถึงแม้จะมาจากแหล่งเดียวกัน และใช้วิธีการสกัดเดียวกัน แต่ก็พบว่ายังมีความหลากหลายทางโครงสร้าง จึงมีการศึกษาโดยแยกส่วนเฮมิเซลลูโลสเพื่อให้ได้เฮมิเซลลูโลสตามสมบัติที่ต้องการศึกษา วิธีการแยกส่วนนั้นสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การตกตะกอนเฮมิ-เซลลูโลสด้วยเอทานอลที่ความเข้มข้นต่าง ๆ การใช้เทคนิคโครมาโตกราฟี เป็นต้น (Ren and Sun, 2010) ในงานวิจัยของ Peng และคณะ (2010) ได้ศึกษาการแยกส่วนเฮมิเซลลูโลสที่สกัดได้ด้วยน้ำและสารละลายด่างจากชานอ้อย โดยใช้ anion exchange chromatography แยกเฮมิ-เซลลูโลสที่สกัดด้วยน้ำและสารละลายด่างที่ได้ออกเป็น 3 ส่วน สารที่ใช้ในการชะคือ น้ำ สารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.1M และ 0.3M ตามลำดับ พบว่าเฮมิเซลลูโลสที่สกัดได้ด้วยน้ำร้อนทั้ง 3 ส่วนมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า แต่มีความเป็นกิ่งก้านมากกว่าที่สกัดได้ด้วยสารละลายด่างทั้ง 3 ส่วน เฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยน้ำแล้วชะด้วยน้ำจะมีปริมาณกลูโคสสูงกว่าที่ชะด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ทั้ง 2 ความเข้มข้น และพบว่าเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ใช้ ปริมาณน้ำตาลกาแลกโตส ไซโลส และกรดยูโรนิกเพิ่มขึ้น ส่วนเฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยสารละลายด่าง พบว่าปริมาณน้ำตาลไซโลสลดลง ในขณะที่น้ำตาลอะราบิโนส และอัตราส่วนของอะราบิโนสต่อไซโลสเพิ่มสูงขึ้น เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ใช้ และยังพบว่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของเฮมิเซลลูโลสเพิ่มขึ้น เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ใช้ ซึ่งพบในเฮมิเซลลูโลสที่สกัดได้ทั้งสองวิธี

จากงานวิจัยที่ผ่านมาจึงสรุปได้ว่าเฮมิเซลลูโลสที่ได้จากวิธีการสกัดที่ต่างกัน จะมีโครงสร้าง ความเป็นกิ่งก้าน และน้ำหนักโมเลกุลต่างกัน ซึ่งเหล่านี้ส่งผลต่อสมบัติทางเคมีกายภาพให้มีความแตกต่างกัน

ภายหลังจากการสกัด เฮมิเซลลูโลสจะเข้าสู่ขั้นตอนของการทำให้บริสุทธิ์ โดยทั่วไปจะใช้วิธีการตกตะกอนด้วยตัวทำละลายที่มีขั้ว ซึ่งเอทานอลเป็นตัวทำละลายที่นิยมใช้มากที่สุด การตกตะกอนด้วยเอทานอลในช่วงแรกจะสังเกตไม่เห็นตะกอนด้วยตาเปล่า แต่เมื่อตั้งทิ้งไว้หรือเมื่อมีการเติมสารที่มีประจุจะเห็นตะกอนตกลงมา การตกตะกอนซ้ำจะช่วยให้ได้ปริมาณเฮมิเซลลูโลสมากขึ้น แต่ก็อาจมีพอลิแซกคาไรด์อื่นที่ไม่ใช่เฮมิเซลลูโลสตกตะกอนปะปนมาด้วย การตกตะกอนด้วยเอทานอลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงรูป (conformation) ของเฮมิเซลลูโลส ทำให้เกิดการสูญเสียสมบัติบางประการ รวมถึงสมบัติในด้านการละลาย (Ren and Sun, 2010) นอกจากนี้ยังมีการใช้วิธีไดอะไลซิสในการทำเฮมิเซลลูโลสให้บริสุทธิ์ โดยการไดอะไลซิสอาศัยหลักการแพร่ผ่านเมมเบรนซึ่งเป็นตัวกลางกั้นระหว่างของเหลวสองส่วน และทำหน้าที่จำกัดการผ่านของส่วนประกอบในของเหลวนั้น โดยอาศัยแรงขับดันที่ทำให้สารไหลผ่านเมมเบรนและเกิดการแยกในที่นี้คือผลต่างของความเข้มข้น จากของเหลวที่มีความเข้มข้นสูงกว่า (สารในถุงเมมเบรน) ไปยังของเหลวที่มีมีความเข้มข้นต่ำกว่า (สารละลายที่ใช้แช่) ดังแสดงใน**รูปที่** 2.8



เริ่มต้นการทำไดอะไลซิส จุดสมดุล

รูปที่ 2.8 การทำไดอะไลซิส (dialysis)

ที่มา: http://eu.spectrumlabs.com/dialysis/Fund.html

2.6 เฮมิเซลลูโลสที่พบในรำข้าว

รำข้าวอุดมไปด้วยสารอาหารต่างๆ จึงมีการนำไปสกัดน้ำมัน โปรตีน และสารอาหารอื่นเพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับรำข้าวนอกเหนือจากการที่ใช้เป็นอาหารสัตว์ นอกจากนี้รำข้าวยังคงมีใยอาหารอยู่ในปริมาณมาก ซึ่งน่าจะรวมถึงเฮมิเซลลูโลสด้วย จึงเป็นที่สนใจและมีความพยายามที่จะศึกษาโครงสร้าง ชนิดของน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบ สมบัติในด้านต่างๆ ของเฮมิเซลลูโลสที่มีอยู่ในรำข้าวเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ต่อไป

ในงานวิจัยของ Mod และคณะ (1978) ได้ศึกษาชนิดและปริมาณน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลสที่สกัดจากรำข้าวด้วยสารละลายด่าง โดยศึกษาในรำข้าวจากข้าวต่างสายพันธุ์ที่ปลูกในประเทศสหรัฐอเมริกา พบว่าเฮมิเซลลูโลสที่สกัดได้ด้วยสารละลายด่างพบน้ำตาล อะราบิโนสและไซโลสเป็นหลัก จึงน่าจะมีโครงสร้างเป็นอะราบิโนไซแลน นอกจากนี้ยังพบว่าเฮมิเซลลูโลสที่สกัดจากรำข้าวต่างสายพันธุ์จะมีชนิดของน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบเหมือนกัน แต่ในปริมาณที่ต่างกัน รวมถึงมีอัตราส่วนระหว่างอะราบิโนสและไซโลสแตกต่างกันด้วย ซึ่งแสดงถึงโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสที่ได้มีความแตกต่างกันในแต่ละสายพันธุ์ของรำข้าว สอดคล้องกับงานวิจัยของ Shibuya และ Iwasaki (1985) ที่ได้ศึกษาเฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยสารละลายด่างในรำข้าวจากข้าวพันธุ์ที่ปลูกในประเทศญี่ปุ่น โดยศึกษาชนิดและปริมาณน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบร่วมกับการใช้เทคนิค methylation analysis พบว่าเฮมิเซลลูโลสมีโครงสร้างหลักเป็นอะราบิโนไซแลนที่มีสายกิ่งมาก (highly branched arabinoxylan) ไซโลกลูแคน และเบต้า-กลูแคน

นอกจากการสกัดด้วยสารละลายด่างแล้ว ในงานวิจัยของ Mod และคณะ (1979) ได้ศึกษาชนิดและปริมาณน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยน้ำจากรำข้าวต่างสายพันธุ์ พบว่ามีปริมาณน้ำตาลอะราบิโนและกาแลกโตสเป็นหลัก รองลงมาคือ ไซโลส กลูโคส แมนโนส และแรมโนสตามลำดับ เฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยน้ำจากรำข้าวต่างสายพันธุ์จะมีชนิดของน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบเหมือนกัน แต่ในปริมาณที่ต่างกัน รวมถึงมีอัตราส่วนระหว่างอะราบิโนสและไซโลสแตกต่างกันเช่นเดียวกับที่พบในการสกัดด้วยสารละลายด่าง (Mod *et al.*, 1978)

ในงานวิจัยของ Lai และคณะ (2007) ได้ศึกษาพอลิแซกคาไรด์ที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำในผนังเซลล์พืช โดยศึกษาพอลิแซกคาไรด์ในผนังเซลล์ของเมล็ดข้าวต่างสายพันธุ์ และระดับ

การขัดสี (degree of milling) ต่างกัน พบว่าพอลิแซกคาไรด์ที่ได้จากเมล็ดข้าวต่างสายพันธุ์จะมีชนิดน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบเหมือนกัน แต่มีอยู่ในปริมาณที่ต่างกัน เช่นเดียวกับในงานวิจัยที่ผ่านมา (Mod *et al*., 1978; Mod *et al*., 1979) และพบว่าระดับการขัดสีส่งผลต่อปริมาณพอลิ-แซกคาไรด์ที่สกัดได้ และปริมาณน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบในโครงสร้างของพอลิแซกคาไรด์

เฮมิเซลลูโลสที่สกัดได้จากรำข้าวจึงมีความแตกต่างกันในแต่ละพันธุ์ของรำข้าว ระดับของการขัดสี และวิธีที่ใช้ในการสกัด ซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติทางเคมีกายภาพให้มีความแตกต่างกันด้วย

2.7 การใช้เฮมิเซลลูโลสในอาหาร

ไฮโดรคอลลอยด์ หมายถึง โพลิเมอร์ชนิดชอบน้ำ (hydrophilic) ที่ได้จากพืช สัตว์ จุลินทรีย์ รวมถึงโพลิเมอร์ดัดแปรจากธรรมชาติหรือสังเคราะห์ โดยทั่วไปจะเป็นโมเลกุลที่มีสายยาวและมีน้ำหนักโมเลกุลสูง ประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซี่ (-OH) และอาจจะเป็น polyelectrolyte อื่นๆ (Phillips and Williams, 2000) เมื่อละลายหรือกระจายตัวอยู่ในน้ำจะช่วยทำให้น้ำมีความหนืดเพิ่มขึ้น หรือมีลักษณะเป็นเจล (นิธิยา รัตนาปนนท์, 2545) เฮมิเซลลูโลสจัดเป็นไฮโดรคอลลอยด์ โดยอะราบิโนไซแลนซึ่งเป็นเฮมิเซลลูโลสที่พบในรำข้าว สามารถใช้เป็นอิมัลซิไฟเออร์ (emulsifier) สารให้ความข้นหนืด (thickener) และสารให้ความคงตัว (stabilizer) ในผลิตภัณฑ์อาหารได้ เป็นต้น (Popa and Spiridon, 1998)

การศึกษาวิจัยที่เกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ไฮโดรคอลลอยด์ในผลิตภัณฑ์อาหารแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

2.7.1. การใช้ไฮโดรคอลลอยด์ในผลิตภัณฑ์อาหารประเภทอิมัลชันที่มีปริมาณไขมันสูง

โดยไฮโดรคอลลอยด์จะทำหน้าที่เพิ่มความเสถียรให้กับผลิตภัณฑ์ทำให้มีอายุการเก็บนานขึ้นโดยไม่เกิดการแยกตัวของไขมัน และเป็นสารทดแทนไขมันเพื่อลดปริมาณไขมันที่ใช้ทำให้ค่าพลังงานของผลิตภัณฑ์ลดลง จัดเป็นอาหารเพื่อสุขภาพ โดย Choi และคณะ (2010) ได้ศึกษาการใช้เฮมิเซลลูโลสจากรำข้าวที่สกัดด้วยน้ำร่วมกับน้ำมันเมล็ดองุ่นแทนที่ไขมันจากสัตว์ในการทำผลิตภัณฑ์เนื้อบดละเอียดแบบอิมัลชัน (meat batter) พบว่าทำให้ค่าความเกาะติดกัน (cohesiveness) ค่าความเหนียว (gumminess) ค่าการเคี้ยว (chewiness) และปริมาณโปรตีนที่ละลายออกมาสูงกว่าที่ใช้ไขมันสัตว์ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Choi และคณะ (2009) ซึ่งพบว่า

การใช้เฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยน้ำจากรำข้าวร่วมกับน้ำมันพืชสามารถใช้แทนไขมันสัตว์ได้ และยังช่วยปรับปรุงลักษณะบางประการของผลิตภัณฑ์ได้อีกด้วย.

2.7.2. การใช้ไฮโดรคอลลอยด์ในผลิตภัณฑ์อาหารที่มีแป้งหรือสตาร์ชเป็นองค์ประกอบ

โดยใช้เพื่อปรับปรุงเนื้อสัมผัสและยืดอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์ ในผลิตภัณฑ์อาหารที่มีแป้งหรือสตาร์ชเป็นองค์ประกอบหลัก ในบางกรณีอาจจะมีเนื้อสัมผัสที่ไม่เป็นที่ต้องการของผู้บริโภค ทั้งนี้เกิดจากสมบัติทางเคมีกายภาพที่จำกัดของสตาร์ช จึงมีการนำไฮโดรคอลลอยด์จากธรรมชาติเข้ามาช่วยปรับปรุงเนื้อสัมผัสตลอดจนเพื่อเป็นการเสริมใยอาหารลงในผลิตภัณฑ์ ในงานวิจัยของ Hamid และ Luan (2000) ได้ศึกษาการเติมเฮมิเซลลูโลสจากรำข้าวที่ละลายน้ำได้ในผลิตภัณฑ์ขนมปัง พบว่าเฮมิเซลลูโลสมีความสามารถในการจับน้ำ (water-binding capacity) ใกล้เคียงกับ FIBREX ซึ่งเป็นใยอาหารที่ถูกใช้ทางการค้า แต่มีความสามารถในการจับกับไขมัน (fat binding capacity) และความสามารถในการเป็นอิมัลซิไฟเออร์ (emulsifying capacity)สูงกว่า เมื่อเติมเฮมิเซลลูโลส 5 และ 10% ลงในขนมปัง พบว่าปริมาตรของขนมปัง (loaf volume) ลดลง และมีความแน่นเนื้อ (firmness) สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และจากการประเมินทางประสาทสัมผัส การเติมเฮมิเซลลูโลสจากรำข้าวให้ผลที่ใกล้เคียงกับขนมปังที่มีใยอาหารสูงที่มีขายในท้องตลาด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hu และคณะ (2009) ที่ได้ศึกษาการเติมเฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยสารละลายด่างจากรำข้าวในผลิตภัณฑ์ขนมปัง

จากงานวิจัยที่ผ่านมาจึงยืนยันได้ว่าเฮมิเซลลูโลสที่ได้จากรำข้าว สามารถนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารได้ ซึ่งนอกจากจะช่วยปรับปรุงสมบัติด้านต่างๆ แล้ว ยังช่วยเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการให้กับผลิตภัณฑ์อีกด้วย

นอกจากการศึกษาผลของการเติมไฮโดรคอลลอยด์ลงในผลิตภัณฑ์แล้ว ยังมีการศึกษาผลของการเติมไฮโดรคอลลอยด์ต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ช ด้วยหวังว่าจะช่วยลดข้อจำกัดด้านสมบัติทางกายภาพของสตาร์ชที่เกิดขึ้น ทั้งในขั้นตอนของกระบวนการผลิต และลักษณะของผลิตภัณฑ์สุดท้าย จากงานวิจัยที่ผ่านมามีการศึกษาอิทธิพลนี้ในเฮมิเซลลูโลสที่ได้จากแหล่งอื่นอย่างกว้างขวาง (Yoshimura, Takaya and Nishinari, 1999; Temsiripong *et al.*, 2005; Banchathanakij and Suphantharika, 2009) และพบว่ามีอิทธิพลต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ช แต่การศึกษาในเฮมิเซลลูโลสที่ได้จากรำข้าวยังมีอยู่จำกัด หากมีการศึกษาและพบว่าเฮมิ

เซลลูโลสที่ได้จากรำข้าวมีอิทธิพลต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชอย่างไรแล้ว ก็น่าจะใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการนำเฮมิเซลลูโลสจากรำข้าวไปใช้ประโยชน์ต่อไปในอุตสาหกรรมอาหาร โดยเฉพาะกับผลิตภัณฑ์ที่มีสตาร์ชและฟลาวร์เป็นองค์ประกอบหลัก

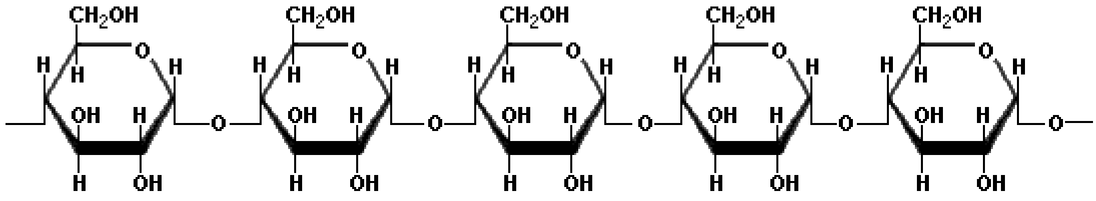
2.8 องค์ประกอบและสมบัติพื้นฐานของสตาร์ช

2.8.1. องค์ประกอบของสตาร์ช

เม็ดสตาร์ชประกอบด้วยพอลิเมอร์ 2 ชนิด คือ แอมิโลสและแอมิโลเพกทิน สตาร์ชโดยทั่วไป (normal starch) จะมีแอมิโลเพกทินประมาณ 75% และแอมิโลสประมาณ 25% สตาร์ชที่มีแอมิโลสต่ำ (waxy starch) มีแอมิโลเพกทินเป็นหลัก และมีแอมิโลสเพียง 0-8% นอกจากนี้ยังมีสตาร์ชที่มีแอมิโลสสูง (high amylose starch) ซึ่งมีแอมิโลสประมาณ 40-70% (Jane, 2003) โดยอัตราส่วนของแอมิโลสและแอมิโลเพกทินของสตาร์ชจะแตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับแหล่งและชนิดของสตาร์ช ซึ่งปริมาณและโครงสร้างของโมเลกุลทั้ง 2 ชนิดนี้เป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อสมบัติของสตาร์ช

2.8.1.1. แอมิโลส (amylose)

แอมิโลสเป็นพอลิเมอร์สายตรงที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 1,000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (glucosidic linkage) ชนิด α-1,4 ดังแสดงใน**รูปที่** 2.9 แอมิโลสยังประกอบด้วยพอลิเมอร์ที่เป็นกิ่งแขนงที่เชื่อมต่อด้วยพันธะกลูโคซิดิก α-1,6 บ้างเล็กน้อย โดยจำนวนกิ่งแขนงซึ่งมีความยาวประมาณ 2-11 หน่วยกลูโคสจะแตกต่างกันไปตามชนิด และแหล่งที่มาของสตาร์ช



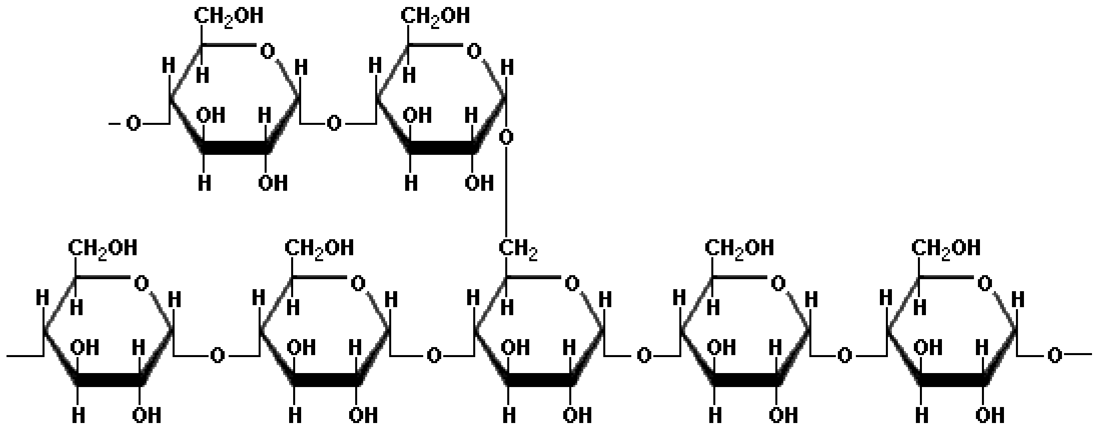
รูปที่ 2.9 โครงสร้างของแอมิโลส

ที่มา: Jane (2003)

โครงสร้างของแอมิโลสเมื่ออยู่ในสารละลายจะมีหลายรูปแบบ คือ ลักษณะที่เป็นเกลียวม้วน (helix) เกลียวที่คลายตัว (interrupted helix) หรือเกลียวม้วนอิสระ (random coil)

2.8.1.2. แอมิโลเพกทิน

แอมิโลเพกทินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 100,000 หน่วย โดยส่วนที่เป็นกิ่งจะมีความยาวประมาณ 20-25 หน่วยกลูโคส เชื่อมต่อด้วยพันธะกลูโคซิดิกชนิด α-1,4 และแต่ละกิ่งจะเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิกชนิด α-1,6 ซึ่งมีอยู่ประมาณ 5-6% ของปริมาณกลูโคสที่มีอยู่ในแอมิโลเพกทินทั้งหมด ดังแสดงใน**รูปที่** 2.10

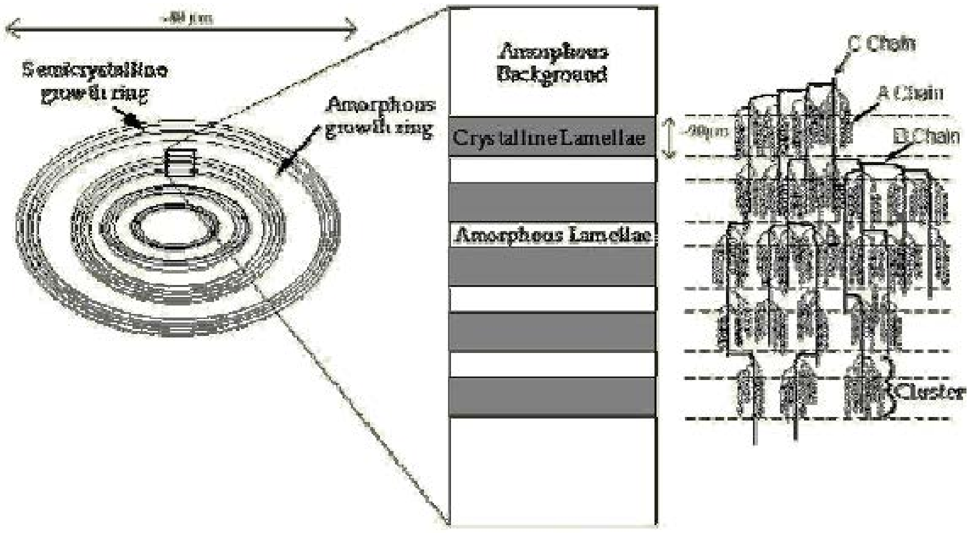


รูปที่ 2.10 โครงสร้างของแอมิโลเพกทิน

ที่มา: Jane (2003)

2.8.2. โครงสร้างผลึกของเม็ดสตาร์ช

เม็ดสตาร์ชประกอบด้วยโมเลกุลของแอมิโลสและแอมิโลเพกทินมาจัดเรียงตัวกันเกิดเป็นโครงสร้าง 2 ส่วน คือ ส่วนผลึก (crystallite) และส่วนอสัณฐาน (amorphose) เม็ดสตาร์ชจึงมีโครงสร้างแบบกึ่งผลึก (semi-crystalline) โครงสร้างผลึกของเม็ดสตาร์ชแสดงใน**รูป** 2.11 โดยสายโซ่สั้นของแอมิโลเพกทินจะเรียงตัวในลักษณะเกลียวคู่ (double helices) ซึ่งบางส่วนจะเกิดเป็นโครงสร้างที่เป็นผลึก ส่วนอสัณฐานจะประกอบด้วยโมเลกุลของแอมิโลสและบริเวณขั้วกิ่งของแอมิโลเพกทิน ทั้งนี้ทำให้เม็ดสตาร์ชมีสมบัติในการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ หรือมีลักษณะ birefringence (กล้าณรงค์ ศรีรอต และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2550)



รูปที่ 2.11 โครงสร้างผลึกในเม็ดสตาร์ช

ที่มา: Jenkins และคณะ (1994)

2.8.3. สมบัติพื้นฐานของสตาร์ช

2.8.3.1. การพองตัวและการละลาย (swelling and solubility)

สตาร์ชไม่สามารถละลายได้ในน้ำเย็น แต่สามารถดูดซึมน้ำและพองตัวได้เล็กน้อย เนื่องจากเม็ดสตาร์ชมีส่วนอสัณฐานซึ่งประกอบด้วยโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบมีความหนาแน่นน้อย จึงทำให้น้ำสามารถแทรกตัวเข้าไปได้ กระบวนการนี้สามารถผันกลับได้ (reversible process) ซึ่งน้ำสามารถระเหยออกไปได้ในกระบวนการทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาติไนเซชัน (Jane, 2009) แต่เมื่อให้ความร้อนกับเม็ดสตาร์ชที่มีน้ำล้อมรอบจนถึงอุณหภูมิเจลาติไนเซชัน พันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลสตาร์ชจะถูกทำลาย ส่งผลให้สายโซ่เกลียวคู่ของโมเลกุลสตาร์ชในส่วนผลึกคลายตัวออกจากกัน จึงทำให้โมเลกุลน้ำสามารถแทรกตัวเข้าไปเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลของสตาร์ช ทำให้เม็ดสตาร์ชพองตัวมากขึ้น และส่งผลให้แอมิโลสที่อยู่ภายในเม็ดสตาร์ชสามารถละลายออกมาภายนอกเม็ดสตาร์ชได้มากขึ้นด้วย (กล้าณรงค์ ศรีรอต และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2550)

2.8.3.2.การเกิดเจลาติไนเซชัน (gelatinization)

เมื่อให้ความร้อนกับน้ำแป้งจนถึงอุณหภูมิหนึ่ง จะมีผลทำให้การจับยึดกันด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของแป้งในชั้นของผลึกคลายตัวลง เกิดการดูดน้ำและพองตัวของเม็ดสตาร์ช แอมิโลสที่อยู่ภายในเม็ดสตาร์ชสามารถละลายออกมา ทำให้สารละลายมีความหนืดและความใสเพิ่มขึ้น กระบวนการนี้เรียกว่า เจลาติไนเซชัน (gelatinization) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ไม่สามารถผันกลับได้ (irreversible process) โดยอุณหภูมิที่เม็ดสตาร์ชสูญเสียความเป็นผลึก และสมบัติในการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ (birefringence) เรียกว่า อุณหภูมิเจลา-ติไนเซชัน (gelatinization temperature) การเกิดเจลาติไนเซชันของสตาร์ชจะส่งผลให้เม็ดสตาร์ชมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง สูญเสียโครงสร้างที่เป็นระเบียบและความสามารถในการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ (birefringence) นอกจากนี้ยังส่งผลให้สารละลายสตาร์ชมีการเปลี่ยนแปลงความหนืดเกิดขึ้น (กล้าณรงค์ ศรีรอต และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2550)

2.8.3.3. การเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation)

เมื่อสตาร์ชเกิดเจลาติไนเซชันอย่างสมบูรณ์แล้ว โมเลกุลสตาร์ชจะแขวนลอยอยู่อย่างอิสระในน้ำ และเมื่อปล่อยให้เย็นตัวลงโมเลกุลของสตาร์ชจะจัดเรียงตัวใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจน เกิดเป็นโครงร่างตาข่ายสามมิติที่สามารถอุ้มน้ำไว้ได้ ทำให้สารละลายสตาร์ชมีความหนืดเพิ่มขึ้น และเกิดเป็นเจลเหนียว เรียกกระบวนการนี้ว่า รีโทรเกรเดชัน (retrogradation) และเมื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำลงไปอีก หรือเก็บเจลสตาร์ชไว้ในระยะเวลาที่นานขึ้น การจัดเรียงตัวของโครงสร้างจะแน่นมากขึ้น โมเลกุลของน้ำที่อยู่ภายในโครงสร้างจะถูกบีบออกมา ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า syneresis โดยทั่วไปแล้วโมเลกุลของสตาร์ชทั้งแอมิโลสและแอมิโลเพกทินสามารถเกิดรีโทรเกรเดชันได้ โดยแอมิโลสสามารถเกิดรีโทรเกรเดชันได้อย่างรวดเร็ว และมักจะเกิดในระยะแรกของการเก็บรักษา เนื่องจากโมเลกุลของแอมิโลสมีลักษณะเป็นสายตรง โมเลกุลจึงสามารถรวมตัวกันใหม่ได้อย่างรวดเร็ว ส่วนแอมิโลเพกทินจะเกิดรีโทรเกรเดชันได้ช้ากว่า เนื่องจากโครงสร้างมีลักษณะเป็นกิ่งก้าน การรวมตัวจึงเกิดได้ยากกว่า ทำให้แอมิโลเพกทินมีความสำคัญต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันในระหว่างการเก็บเจลเป็นระยะเวลานาน (Jane, 2009)

อย่างไรก็ตามสมบัติพื้นฐานของสตาร์ช ทั้งกำลังการพองตัว ความสามารถในการละลาย การเกิดเจลาติไนเซชัน และรีโทรเกรเดชันของสตาร์ช ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ แหล่ง

ของสตาร์ช ปริมาณและโครงสร้างของแอมิโลสและแอมิโลเพกทินของสตาร์ช ความแข็งแรงของพันธะภายในเม็ดสตาร์ช และสิ่งเจือปนในเม็ดสตาร์ช

2.8.4. เครื่องมือที่ใช้ศึกษาสมบัติของสตาร์ช

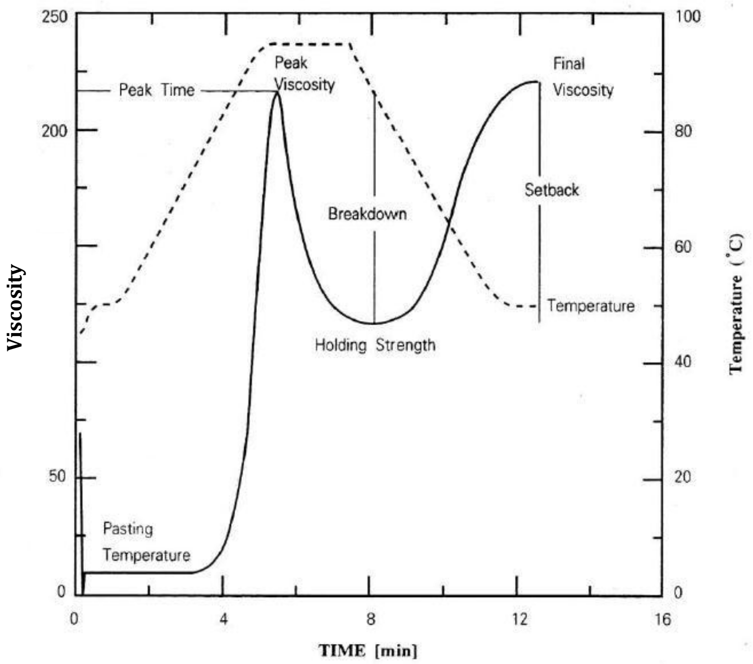
ในระหว่างที่สตาร์ชเกิดเจลาติไนเซชันและรีโทรเกรเดชันนั้น สมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชจะเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งสามารถติดตามได้ด้วยเครื่องมือต่างๆ ได้แก่

2.8.4.1.การติดตามการเปลี่ยนแปลงความหนืดขณะร้อนของสตาร์ชด้วยเครื่อง rapid visco analyzer (RVA) และ rotational rheometer

การเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชสามารถติดตามได้ด้วยเครื่อง RVA และ rotational rheometer ซึ่งจะทำโดยการให้ความร้อนกับน้ำแป้งพร้อมกับใช้ใบพัดหรือหัววัดกวนเพื่อเพิ่มแรงเฉือน โดยเครื่องจะเริ่มให้ความร้อนกับน้ำแป้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส แล้วจะค่อยๆ เพิ่มอุณหภูมิขึ้นเป็น 95 องศาเซลเซียส และคงไว้ที่อุณหภูมินี้ประมาณ 3 นาที หลังจากนั้นจะค่อยๆ ลดอุณหภูมิลงเป็น 50 องศาเซลเซียส (Newport scientific, 2007) ซึ่งการติดตามการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชโดยใช้เครื่อง RVA จะแสดงผลออกมาในรูปของกราฟการเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting curve) ดังแสดงใ**นรูปที่** 2.12

ระยะแรกของการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เม็ดสตาร์ชจะพองตัวได้เพียงเล็กน้อย จึงยังไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนืดขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจนถึงอุณหภูมิเจลาติไนเซชัน ความหนืดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและเห็นได้ชัดเจน เรียกอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดนี้ว่า pasting temperature และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิต่อไปอีกจนถึงอุณหภูมิที่เกิดความหนืดสูงสุด (peak temperature) ที่อุณหภูมินี้ สตาร์ชจะมีค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity; PV) ค่า PV สามารถบอกถึงความสามารถในการพองตัวอย่างอิสระของเม็ดสตาร์ชก่อนที่เม็ดสตาร์ชจะแตกออก และเมื่อให้ความร้อนต่อไป เม็ดสตาร์ชจะแตกออก โมเลกุลแอมิโลสและแอมิโลเพกทินจะแขวนลอยอย่างอิสระในน้ำซึ่งเรียกของผสมนี้ว่า สารละลายสตาร์ช ระหว่างที่สารละลายสตาร์ชถูกใบพัดกวนผสมอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิคงที่ที่ 95 องศาเซลเซียส ความหนืดของสารละลายจะลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงจุดที่มีความหนืดต่ำสุด (trough) ซึ่งการลดลงของความหนืดเกิดขึ้นจากแรงเฉือน (shear thinning) และเมื่อค่อยๆ ลดอุณหภูมิลง ความหนืดของสารละลายสตาร์ชจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนถึงความหนืดสุดท้าย (final viscosity; FV) ซึ่งการที่

สารละลายสตาร์ชสามารถกลับมามีความหนืดเพิ่มขึ้นอีกครั้งได้นั้น เนื่องจากโมเลกุลแอมิโลสและแอมิโลเพกทินที่แขวนลอยอยู่ในสารละลายสตาร์ชสามารถกลับมาจัดเรียงตัวใหม่เกิดเป็นโครงร่างตาข่ายที่สามารถอุ้มน้ำได้ (กล้าณรงค์ ศรีรอต และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2550) นอกจากนี้ยังมีค่าที่สามารถพิจารณาได้จากกราฟการเปลี่ยนแปลงความหนืด คือ ค่าความหนืดลดลง (breakdown; BD) และค่าการคืนตัว (setback: SB) โดย BD เป็นค่าที่ได้จากผลต่างของค่าความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุดเป็นค่าที่ใช้บ่งบอกความทนต่อแรงเฉือน และความร้อนของเม็ดสตาร์ช ส่วนค่า SB เป็นค่าที่ได้จากผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดต่ำสุดซึ่งเป็นค่าที่บอกถึงแนวโน้มในการเกิดรีโทรเกร-เดชันของสตาร์ช



รูปที่ 2.12 ตัวอย่างกราฟการเปลี่ยนแปลงความหนืดของน้ำแป้งระหว่างถูกให้ความร้อนและค่าต่างๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์

ที่มา: Newport scientific (2007)

ความหนืดของสตาร์ชขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสตาร์ช สมบัติเคมีและกายภาพของเม็ดสตาร์ช เช่น ขนาดเม็ดสตาร์ช การกระจายตัวตามขนาด

ของเม็ดสตาร์ช อัตราส่วนระหว่างแอมิโลสและแอมิโลเพกทิน และองค์ประกอบอื่นๆ ในเม็ดสตาร์ช (กล้าณรงค์ ศรีรอต และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2550) ซึ่งการวิเคราะห์สมบัติทางความหนืดของสตาร์ชด้วย rotational rheometer จะมีข้อดีกว่า RVA คือ ปริมาณตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์น้อยกว่า จึงเหมาะสมกับงานวิจัยที่มีข้อจำกัดในด้านปริมาณของตัวอย่าง (Zhong *et al.*, 2009; Rosell, Yokoyama and Shoemaker, 2011)

2.8.4.2. การติดตามการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางวิสโคอีลาสติกของเจลสตาร์ชด้วยเครื่อง rheometer

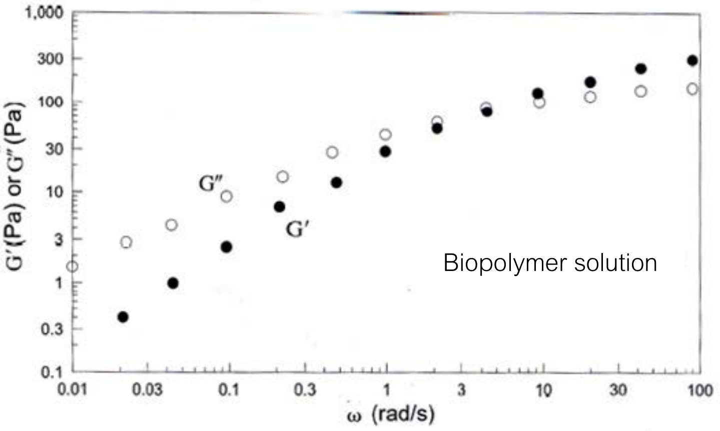
การทดสอบโดยการใช้ dynamic (oscillatory) rheological test มีการใช้ในการศึกษาโครงสร้างของอาหารที่มีลักษณะเป็นเจล ในระบบของสารละลายพอลิแซกคาไรด์จะมีพฤติกรรมอยู่ระหว่างการเป็นของแข็งที่ยืดหยุ่นและของเหลวที่ไหลได้ การให้ความเครียด (strain) ในรูปของความถี่รูปไซน์ (sinusoidally) จะเกิดความเค้นใน 2 รูปแบบ คือ in-phase stress พลังงานที่ใช้ในการทำให้ของแข็งยืดหยุ่นเกิดการเสียรูป (deformation) จะกลับคืนเมื่อของแข็งนั้นสปริงตัวกลับมายังภาวะเริ่มต้น นั่นคือพลังงานถูกเก็บไว้ ซึ่งแสดงสมบัติความเป็นของแข็งยืดหยุ่นของสาร (elastic หรือ storage modulus, G') และ out-of-phase stress พลังงานที่ใช้ในการทำให้ของเหลวเกิดการไหล พลังงานจะไม่มีการกลับคืน ทำให้พลังงานเกิดการสูญเสีย ซึ่งแสดงสมบัติการเป็นของไหล (viscous หรือ loss modulus, G'') นอกจากนี้ G''/G' หรือ phase shift (loss tangent, tan δ) จะเป็นค่าที่บ่งบอกสมบัติความเป็นวิสโคอิลาสติกของสาร ว่ามีสมบัติเป็นของแข็งยืดหยุ่นได้หรือมีสมบัติเป็นของเหลวที่ไหลได้ (Okechukwu and Rao, 1998)

ค่า G' และ G'' ขึ้นอยู่กับความถี่ ความเข้มข้น อุณหภูมิ และความเครียดที่ให้กับระบบ การทดสอบในช่วงความถี่ของวิสโคอิลาสติกเชิงเสน (linear viscoelastic) โดยทั่วไป สามารถจำแนกรูปแบบการเปลี่ยนแปลง G' และ G'' ของตัวอย่างได้เป็น 3 กลุ่ม (Okechukwu and Rao, 1998) คือ

– กลุ่มที่ 1 Biopolymer solution

การทดสอบที่ความถี่ต่ำ ค่า G'' จะสูงกว่าค่า G' แต่เมื่อความถี่หรือความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ค่า G' จะเพิ่มขึ้นเร็วกว่าค่า G'' และเกิดการตัดกัน (crossover) กล่าวคือที่

ความถี่ต่ำสารจะแสดงสมบัติคล้ายของเหลวแล้วเปลี่ยนเป็นสมบัติคล้ายของแข็งยืดหยุ่นได้ที่ความถี่ต่ำ ดังแสดงใน**รูปที่** 2.13

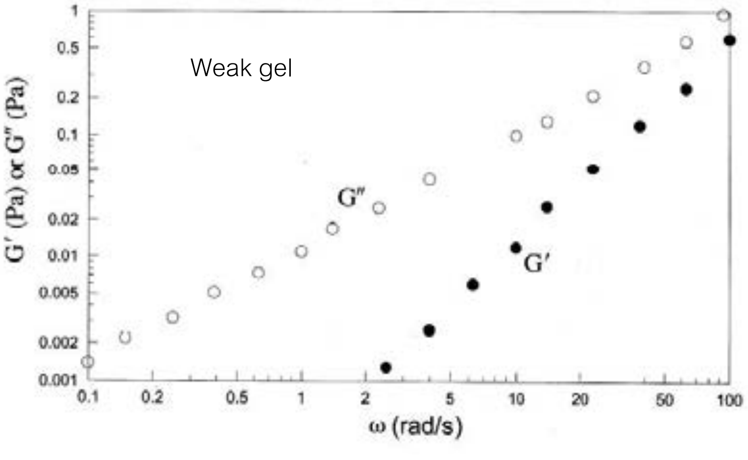


รูปที่ 2.13 สมบัติทางวิสโคอีลาสติกของ lambda carrageenan 5%

ที่มา: จิรารัตน์ ทัตติยกุล (2554)

– กลุ่มที่ 2 Weak gel

ค่า *G'* และ *G''* ขึ้นกับความถี่ที่ใช้ทดสอบ โดย *G''* มีค่ามากกว่า *G'* ตลอดช่วงการทดสอบ แต่ทั้ง *G'* และ *G''* มีค่าเข้าใกล้กันที่ความถี่สูง โดยค่า tan δ จะมีค่าประมาณ 0.1 แสดงว่าตัวอย่างมีความเป็นของเหลวที่สามารถเปลี่ยนรูปร่างได้มากกว่าความเป็นของแข็งยืดหยุ่น ดังแสดงใน**รูปที่** 2.14

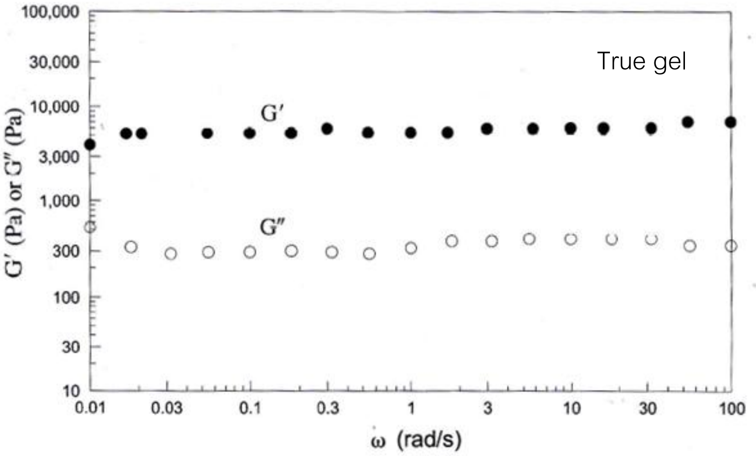


รูปที่ 2.14 สมบัติทางวิสโคอีลาสติกของ dextrin 5%

ที่มา: จิรารัตน์ ทัตติยกุล (2554

— กลุ่มที่ 3 True gel

ค่า *G′* มีค่ามากกว่า *G″* มากตลอดช่วงความถี่ของการทดสอบ และค่าทั้งสองมีค่าค่อนข้างคงที่ โดยค่า tan δ จะมีค่าประมาณ 0.01 แสดงว่าตัวอย่างมีลักษณะเป็นเจลที่แท้จริง ดัง**รูปที่** 2.15



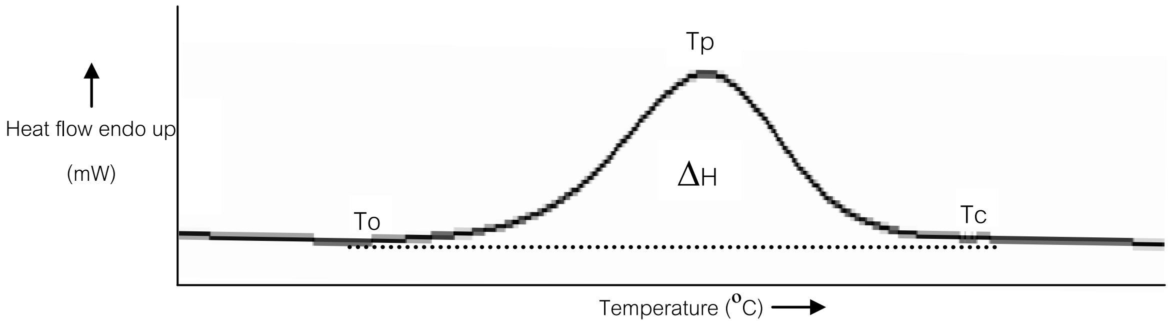
รูปที่ 2.15 สมบัติทางวิสโคอีลาสติกของ agar 5%

ที่มา: จิรารัตน์ ทัตติยกุล (2554)

2.8.4.3. การติดตามการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนของสตาร์ชด้วยเครื่อง differential scanning calorimeter (DSC)

สมบัติทางความร้อนของสตาร์ช สามารถตรวจสอบได้ด้วยเครื่อง DSC ซึ่งเป็นเครื่องมือที่วัดและบันทึกปริมาณความร้อนที่เปลี่ยนแปลงระหว่างการเกิดเจลาติไนเซชัน หรือรีโทรเกรเดชัน โดยจะวัดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนของวัตถุในรูปของฟังก์ชันกับอุณหภูมิเปรียบเทียบกับตัวอย่างอ้างอิง (reference) ซึ่งตัวอย่างอ้างอิงจะเป็นภาชนะที่ไม่ใส่ตัวอย่าง เมื่อถึงอุณหภูมิที่ตัวอย่างเปลี่ยนสถานะ ตัวอย่างจะมีการดูดหรือคายพลังงานเพื่อใช้ในการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว ซึ่งเครื่องจะวัดพลังงานที่ตัวอย่างดูดหรือคายออกมา (enthalpy; ΔH) ในรูปของเทอร์โมแกรม (thermogram) ซึ่งลักษณะเทอร์โมแกรมนั้นสามารถใช้บ่งบอกได้ว่าการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนั้นเป็นปฏิกิริยาดูด (endothermic) หรือคายความร้อน (exothermic) ตัวอย่างเทอร์โมแกรมที่ได้จาก DSC แสดงดัง**รูปที่** 2.16 สำหรับการเกิดเจลาติไนเซชันเป็น

ปฏิกิริยาดูดความร้อน ค่าที่ได้จากเทอร์โมแกรมมีดังนี้ อุณหภูมิเริ่มต้น (onset temperature; To) อุณหภูมิที่จุดสูงสุดของพีค (peak temperature; Tp) อุณหภูมิสุดท้าย (conclusion temperature; Tc) และพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาติไนเซชันของสตาร์ช (ΔH_1) ส่วนการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชสามารถวิเคราะห์ได้โดยนำสตาร์ชที่ผ่านการเจลาติไนเซชันแล้วด้วย DSC ไปบ่มไว้ในภาวะที่กำหนดเพื่อให้เกิดรีโทรเกรเดชัน แล้วนำไปวิเคราะห์ซ้ำอีกครั้งด้วย DSC โดยพิจารณาจากอัตราส่วนของพลังงานที่ใช้ในการทำลายโครงสร้างผลึกใหม่ (ΔH_2) ต่อพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาติไนเซชันของสตาร์ช (ΔH_1) ($\Delta H_2/\Delta H_1$)



รูปที่ 2.16 เทอร์โมแกรมของสตาร์ชข้าวโพดที่ได้จากเครื่อง differential scanning calorimeter (DSC)

2.9 อิทธิพลของไฮโดรคอลลอยด์ต่อสมบัติของสตาร์ช

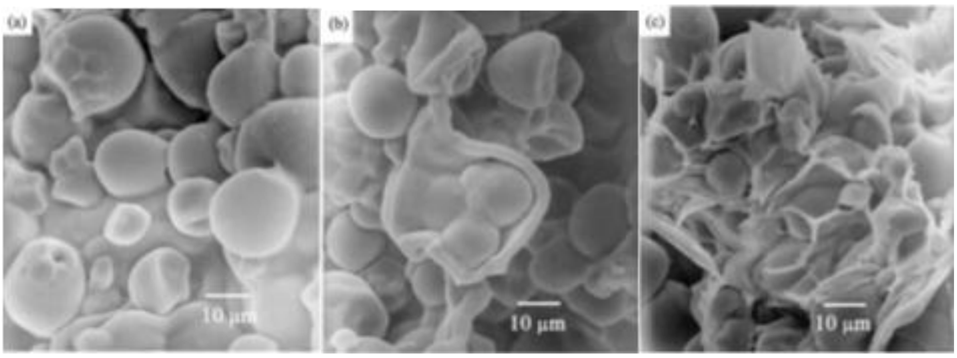
2.9.1. อิทธิพลต่อการพองตัวและการละลาย

จากการศึกษาอิทธิพลของไฮโดรคอลลอยด์ต่อการพองตัวของสตาร์ช ในหลายงานวิจัยพบว่าเม็ดสตาร์ชพองตัวลดลง หรือการพองตัวของเม็ดสตาร์ชถูกจำกัดมากขึ้น เมื่อมีไฮโดรคอลลอยด์ในระบบ (Tester and Sommerville, 2003; Funami *et al*., 2005a; Temsiripong *et al*., 2005; Achayuthakan and Suphantharika, 2008) ซึ่งนักวิจัยกลุ่มนี้ให้เหตุผลว่าการมีไฮโดรคอลลอยด์ในระบบจะทำให้การเคลื่อนที่ของโมเลกุลน้ำเข้าสู่เม็ดสตาร์ชน้อยลง เนื่องจากระบบมีความหนืดสูงขึ้น และน้ำอิสระบางส่วนจะถูกจับไว้กับไฮโดรคอลลอยด์

Christianson (1982) กล่าวว่าไฮโดรคอลลอยด์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงไม่สามารถแทรกซึมเข้าสู่เม็ดสตาร์ชได้ แต่เมื่อมีการให้ความร้อน เม็ดสตาร์ชจะเกิดการพองตัว ทำให้บริเวณ

ผิวของเม็ดสตาร์ชเกิดการขยายออก (surface expansion) ซึ่งโมเลกุลของไฮโดรคอลลอยด์สามารถแทรกซึม (sorb) เข้าสู่เม็ดสตาร์ชได้ ส่งผลต่อการพองตัวและการละลายของสตาร์ช หรือไฮโดรคอลลอยด์อาจเกิดการเคลือบหรือเกิดอันตรกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุลของสตาร์ชได้

Chaisawang และ Suphantharika (2005) ได้ศึกษาอิทธิพลของแซนแทนกัม (xanthan gum) และกัวร์กัม (guar gum) ต่อสมบัติของสตาร์ชมันสำปะหลังที่มีประจุบวก (cationic tapioca starch) พบว่าประจุของไฮโดรคอลลอยด์มีอิทธิพลต่อการพองตัวของสตาร์ชต่างกัน ในการเติมแซนแทนกัมซึ่งเป็นโมเลกุลที่มีประจุลบทำให้การพองตัวของเม็ดสตาร์ชถูกจำกัดการพองตัวมากกว่าที่พบจากการเติมกัวร์กัม เนื่องจากแซนแทนกัมที่มีประจุลบอาจเกิดอันตรกิริยากับประจุบวกบนผิวของสตาร์ชมันสำปะหลังที่มีประจุบวกได้ ทำให้โมเลกุลน้ำแทรกซึมเข้าไปในเม็ดสตาร์ชได้ยากขึ้น และเกิดการยับยั้งการพองตัวของเม็ดสตาร์ช ดังผลที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (**รูปที่** 2.17)



รูปที่ 2.17 การพองตัวของสตาร์ชมันสำปะหลังที่มีประจุบวกที่มีการเติมและไม่มีการเติมกัม (a) สตาร์ชมันสำปะหลังที่มีประจุบวก (b) สตาร์ชมันสำปะหลังที่มีประจุบวกที่มีการเติมกัวร์กัม (c) สตาร์ชมันสำปะหลังที่มีประจุบวกที่มีการเติมแซนแทนกัม

ที่มา: Chaisawang และ Suphantharika (2005)

อย่างไรก็ตามมีงานวิจัยที่รายงานว่าการพองตัวของสตาร์ชเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ (Rojas *et al*., 1999; Song *et al*., 2006; Techawipharat, Suphantharika and BeMiller, 2008) โดยให้เหตุผลว่าในการเกิดเจลาติไนเซชัน ความหนืดในระบบของสตาร์ชที่มีการ

เติมไฮโดรคอลลอยด์สูงกว่าในระบบที่ไม่มีการเติม ความหนืดที่เพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับการพองตัวของเม็ดสตาร์ช ซึ่งการที่ความหนืดในระบบสูงขึ้นก็น่าจะหมายถึงการพองตัวของสตาร์ชเพิ่มขึ้นด้วย

2.9.2. อิทธิพลต่อสมบัติทางความหนืด

ในการศึกษาอิทธิพลของไฮโดรคอลลอยด์ต่อสมบัติทางความหนืดของสตาร์ชโดยใช้เครื่อง RVA สามารถเกิดขึ้นได้หลายทิศทางทั้งนี้ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของไฮโดรคอลลอยด์ ได้แก่ ขนาดโมเลกุล ประจุ ความเป็นกิ่งก้าน และยังขึ้นกับปริมาณของไฮโดร-คอลลอยด์ในระบบ

การเติมไฮโดรคอลลอยด์ส่งผลให้อุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืด (pasting temperature; PT) สูงขึ้น เนื่องจากไฮโดรคอลลอยด์ในระบบจะจับโมเลกุลน้ำบางส่วนไว้ ส่งผลให้มีปริมาณน้ำอิสระในระบบลดลง โมเลกุลของน้ำอิสระจึงเคลื่อนตัวเข้าสู่เม็ดสตาร์ชได้ยากขึ้น และต้องการอุณหภูมิที่สูงขึ้นเพื่อทำให้สตาร์ชเกิดการพองตัวหรือเกิดเจลาติไนเซชัน (Aguirre-Cruz *et al*., 2005; Chaisawang and Suphantharika, 2005; Temsiripong *et al*., 2005; Techawipharat *et al*., 2008) และการเติมไฮโดรคอลลอยด์พบว่าทำให้ค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity; PV) ลดลง ซึ่งค่าความหนืดสูงสุดจะสัมพันธ์กับการพองตัวของสตาร์ช ดังที่กล่าวแล้วให้หัวข้อ 2.9.1

งานวิจัยของ Funami และคณะ (2008a) ได้ศึกษาอิทธิพลของพอลิแซกคาไรด์ที่มีประจุลบ 2 ชนิด คือ gum arabic และ soy bean soluble polysaccharide ต่อสมบัติของสตาร์ชข้าวสาลี พบว่าการเติมพอลิแซกคาไรด์ทั้งสองทำให้ค่า PT เพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบความสัมพันธ์ระหว่างค่า PV กับปริมาณแอมิโลสที่หลุดออกมา (leached amylose) ในสารละลาย โดยปริมาณแอมิโลสที่หลุดออกมา (leached amylose) จะแปรผันตรงกับค่า PV จากความสัมพันธ์นี้ การเติมพอลิแซกคาไรด์ทั้งสองทำให้ค่า PV ลดลง หมายถึงโมเลกุลภายในเม็ดสตาร์ชหลุดออกมาภายนอกได้น้อยลงทำให้ความสามารถในการละลายของสตาร์ช และความหนืดของระบบลดลง แต่ก็มีงานวิจัยที่พบว่าเมื่อมีการเติมไฮโดรคอลลอยด์แล้วทำให้ค่า PV เพิ่มสูงขึ้น ดังเช่นที่พบในงานวิจัยของ Funami และคณะ (2008b) ได้ศึกษาอิทธิพลของฟีนูกรีกกัม (fenugreek gum) ที่น้ำหนักโมเลกุลต่างๆ ต่อสมบัติของสตาร์ชข้าวโพด พบว่า การเติมฟีนูกรีกกัมทำให้ค่า PT และ PV เพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของค่า PV สามารถอธิบายได้ 2 ทิศทาง คือต้องใช้แรงเฉือนมากขึ้นในการเคลื่อนเม็ดสตาร์ชที่พองตัวในระบบที่ไฮโดรคอลลอยด์มีความหนืดสูง หรือ

โมเลกุลไฮโดรคอลลอยด์เกิดอันตรกิริยากับโมเลกุลของสตาร์ช นอกจากนี้ยังพบว่าค่า PT และ PV เพิ่มสูงขึ้นเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของฟีนูกรีกกัมสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของฟีนูกรีกกัมมากขึ้น จะทำให้ปริมาณแอมิโลสที่หลุดออกมาในสารละลายลดลง (Funami *et al.*, 2008c)

ค่าความหนืดสุดท้าย (final viscosity; FV) และค่าการคืนตัว (setback; SB) เมื่อมีการเติมไฮโดรคอลลอยด์จะเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากเกิดอันตรกิริยาระหว่างกันของไฮโดรคอลลอยด์กับโมเลกุลของสตาร์ช ซึ่งในที่นี้คือแอมิโลส ทำให้ความหนืดของระบบสูงขึ้น (Yohimura *et al.*, 1999; Temsiripong *et al.*, 2005; Satrapai and Suphantharika, 2007) อย่างไรก็ตามมีงานวิจัยที่พบว่าค่า FV และ SB ลดลงเมื่อมีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ (Shi and BeMiller, 2002) ซึ่งอาจเกิดจากการขัดขวางการจัดเรียงตัวใหม่ของแอมิโลสในระหว่างการเกิดรีโทรเกรเดชัน

2.9.3. อิทธิพลต่อสมบัติทางวิสโคอีลาสติก

อิทธิพลของไฮโดรคอลลอยด์ต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติวิสโคอีลาสติกของเจลสตาร์ช เมื่อมีแรงเฉือนในรูปของความถี่มากระทำในช่วงความถี่ต่างๆ (frequency sweep test) จะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ทั้งชนิดของสตาร์ช ชนิดของไฮโดรคอลลอยด์ และปริมาณของไฮโดรคอลลอยด์ที่เติมให้กับระบบ

ในงานวิจัยของ Aguirre-Cruz และคณะ (2005) ได้ศึกษาอิทธิพลของการเติมแซนแทนกัม และคาร์บอกซีเมททิลเซลลูโลส (CMC) ลงในเจลสตาร์ชข้าวโพดดัดแปร (nixtamalised maize masa) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยเติมแซนแทนกัมและ CMC ที่ 2 ระดับความเข้มข้น คือ 0.2% และ 0.5% พบว่าเมื่อเติมแซนแทนกัมและ CMC ที่ระดับความเข้มข้น 0.2% จะทำให้ค่า G' เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อมีการลดอุณหภูมิลงจะทำให้การเคลื่อนที่ของโมเลกุลน้อยลงในระหว่างการเกิดเจล ระบบมีลักษณะคล้ายของแข็งมากขึ้น โดยที่ความเข้มข้นนี้การเคลื่อนที่ของโมเลกุลถูกจำกัดมาก ทำให้ความเป็นของแข็งของระบบสูงขึ้น แต่ที่ความเข้มข้น 0.5% พบว่าค่า G' ลดลง เพราะการเกิดเจลของโมเลกุลน้ำ โมเลกุลสตาร์ชและโมเลกุลไฮโดรคอลลอยด์ในระบบที่ความเข้มข้นนี้ เจลที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะโครงสร้างที่สม่ำเสมอ (smoother structure) โดยพบอิทธิพลนี้ในแซนแทนกัมมากกว่า CMC เนื่องจากแซนเทนกัมสามารถเกิด

อันตรกิริยากับองค์ประกอบของสตาร์ชได้ด้วยพันธะไฮโดรเจน พันธะไอออนิก และเกิดการเชื่อมไขว้ (crosslinked) ทำให้เจลมีโครงสร้างที่ยืดหยุ่นขึ้น

2.9.4. อิทธิพลต่อสมบัติทางความร้อน

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนในการเกิดเจลาติไนเซชันของสตาร์ชที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ด้วย differential scanning calorimeter (DSC) พบว่าอุณหภูมิเริ่มต้น (onset temperature; To) อุณหภูมิที่จุดสูงสุด (peak temperature; Tp) อุณหภูมิสุดท้าย (conclusion temperature; Tc) ของการเกิดเจลาติไนเซชันเพิ่มสูงขึ้น แต่พลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาติไนเซชัน (enthalpy of gelatinization, ΔH_1) ลดลงเนื่องจากเมื่อมีไฮโดรคอลลอยด์ในระบบ จะทำให้ระบบมีความหนืดสูงขึ้น ส่งผลให้การเคลื่อนที่อย่างอิสระของโมเลกุลน้ำลดลง การเคลื่อนที่ของโมเลกุลน้ำเข้าสู่เม็ดสตาร์ชทำได้ยากขึ้น อีกทั้งยังทำให้การส่งผ่านความร้อนเกิดได้ช้าลง จากปัจจัยเหล่านี้จึงทำให้การทำลายโครงสร้างผลึกแอมิโลเพกทินเกิดได้ยากกว่าในระบบที่ไม่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ ทำให้การทำลายผลึกแอมิโลเพกทินเกิดยากขึ้นและน้อยลง หรือการเกิดเจลาติไนเซชันเกิดได้ไม่สมบูรณ์ (Satrapai and Suphantharika, 2007; Aguirre-Cruz *et al*., 2005; Chaisawang and Suphantharika, 2005; Temsiripong, Pongsawatmanit, Ikeda and Nishinari, 2005)

Khanna และ Tester (2006) ศึกษาอิทธิพลของคอนแจกกลูโคแมนแนน (purified konjac glucomannan; PKG) ต่อการเกิดเจลาติไนเซชันของสตาร์ชข้าวโพดที่มีปริมาณแอมิ- โลสต่างกัน พบว่าไฮโดรคอลลอยด์มีอิทธิพลต่อสตาร์ชที่มีปริมาณแอมิโลสต่างกันด้วยอิทธิพลที่ต่างกัน โดยเมื่อมีการเติมคอนแจกกลูโคแมนแนน จะทำให้ ΔH_1 ลดลง โดยการลดลงของค่า ΔH_1 จะมากขึ้นเมื่อสตาร์ชข้าวโพดมีแอมิโลสเพิ่มขึ้น (ΔH_1 ของสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียว > ΔH_1 ของสตาร์ชข้าวโพด > ΔH_1 ของสตาร์ชข้าวโพดที่มีแอมิโลสสูง)

การศึกษาอิทธิพลทางความร้อนในการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ด้วย differential scanning calorimeter (DSC) พบว่าการเติมไฮโดรคอลลอยด์ ทำให้ค่า To Tp และ Tc เพิ่มขึ้นแสดงว่าในระบบที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ การทำลายโครงสร้างที่จัดเรียงตัวใหม่ของสตาร์ชภายหลังการเกิดเจลาติไนเซชันจะต้องใช้อุณหภูมิสูง

กว่าไม่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ และทำให้ $\Delta H_2/\Delta H_1$ ลดลง แสดงให้เห็นว่าแอมิโลเพกทินเกิดรีโทรเกร-เดชันได้น้อยลง หรือไฮโดรคอลลอยด์ขัดขวางการเกิดรีโทรเกรเดชันของแอมิโลเพกทิน เนื่องจากไฮโดรคอลลอยด์สามารถดูดจับน้ำ และลดการเคลื่อนที่ของโมเลกุลสตาร์ชในระบบ (Yoshimura *et al.*, 1999; Satrapai and Suphantharika, 2007; Banchathanakij and Suphantharika, 2009)

จากงานวิจัยที่ผ่านมา อิทธิพลของไฮโดรคอลลอยด์ต่อสมบัติของสตาร์ชจะมีความแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ชนิดของไฮโดรคอลลอยด์ (น้ำหนักโมเลกุล ความมีกิ่งก้าน ประจุของโมเลกุล) ชนิดของสตาร์ช (ปริมาณแอมิโลสและแอมิโลเพกทินในระบบ) และความเข้มข้นของไฮโดรคอลลอยด์ที่ใช้ นอกจากนี้ยังพบว่าไฮโดรคอลลอยด์แต่ละชนิดมีความจำเพาะในระบบของสตาร์ชนั้นๆ หรืออาจเกิดกลไกที่มีอิทธิพลต่อสตาร์ชที่ต่างกันในแต่ละระบบ (BeMiller, 2011)

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

3.1 วัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัย

รำข้าวขาวดอกมะลิ 105 (*Oryza sativa* L.) ได้รับความอนุเคราะห์จากศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี นำมาร่อนผ่านตะแกรงขนาด 40 mesh เพื่อแยกแกลบและเศษข้าวหัก เก็บในถุงลามิเนตปิดผนึกแบบสุญญากาศ เก็บที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส

สตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียว (waxy corn starch) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท เนชั่นแนล สตาร์ช แอนด์ เคมิเคิล (ไทยแลนด์) จำกัด และสตาร์ชข้าวโพด (normal corn starch) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท เฟิร์ส สตาร์ช อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด

3.2 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

3.2.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของรำข้าวขาวดอกมะลิ

3.2.1.1 ปริมาณความชื้น ตามวิธี AOAC (2005) section 32.1.03 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.1)

3.2.1.2 ปริมาณโปรตีน ตามวิธี AOAC (2005) section 32.1.22 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.2)

3.2.1.3 ปริมาณไขมัน ตามวิธี AOAC (2005) section 32.1.13 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.3)

3.2.1.4 ปริมาณเถ้า ตามวิธี AOAC (2005) section 32.1.05 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.4)

3.2.1.5 ปริมาณเส้นใยหยาบ ตามวิธี AOAC (2005) section 32.1.15 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.5)

3.2.1.6 คำนวณปริมาณคาร์โบไฮเดรต (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.6)

3.2.1.7 ปริมาณใยอาหาร ตามวิธี AOAC (2005) section 32.1.05 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.7)

ทำการทดลอง 3 ซ้ำ รายงานปริมาณขององค์ประกอบในรูปเปอร์เซ็นโดยน้ำหนัก

3.2.2 การเตรียมตัวอย่างก่อนการสกัด ดัดแปลงจากวิธีของ Mod และคณะ (1978)

นำรำข้าวที่ไล่ความชื้นออกแล้วมาสกัดแยกไขมันออกด้วยการผสมกับปิโตรเลียมอีเธอร์ ในสัดส่วนรำข้าวต่อปิโตรเลียมอีเธอร์เท่ากับ 1:3 กวนผสมข้ามคืน แยกไขมันออกด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง นำมาสกัดไขมันออกซ้ำเป็นครั้งที่ 2 จากนั้นเปลี่ยนตัวทำละลายจากปิโตรเลียมอีเธอร์เป็นอะซีโตนและเมทานอลตามลำดับ นำรำข้าวที่ผ่านการสกัดแยกไขมันออกแล้วระเหยเอาตัวทำละลายออกจนหมด

3.2.3 การสกัดเฮมิเซลลูโลส

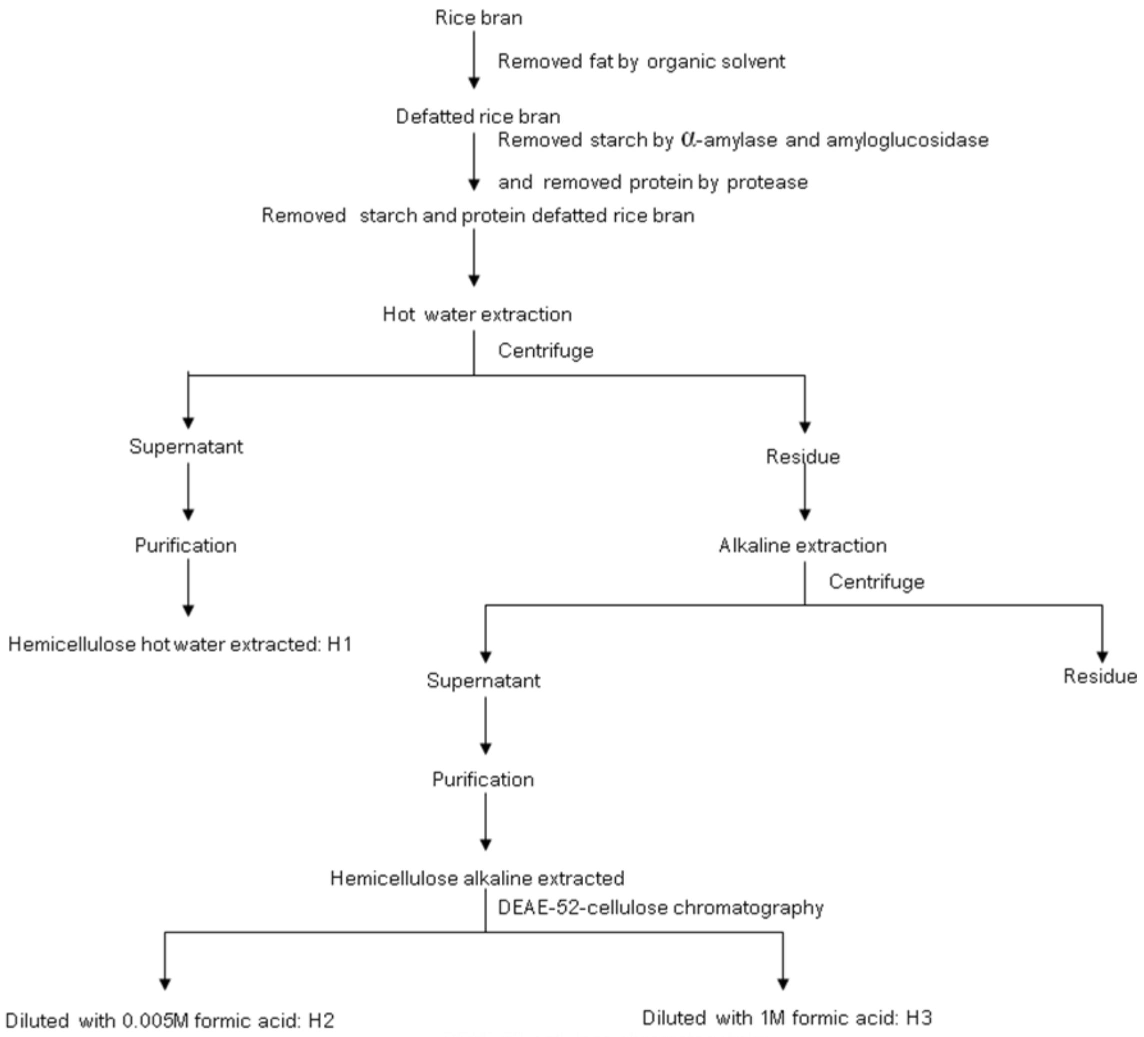
3.2.3.1 การสกัดเฮมิเซลลูโลสด้วยน้ำร้อน ดัดแปลงจากวิธีของ Mod และคณะ (1978)

นำรำข้าวผ่านการสกัดไขมันแล้ว 15 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ที่มีฝาปิดขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำร้อน 100 มิลลิลิตร ต้มจนเดือด แล้วลดอุณหภูมิลงมาที่ 75 องศาเซลเซียส เติม KH_2PO_4 0.1 กรัม แล้วนำขวดรูปชมพู่ใส่ลงในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิพร้อมเขย่าระบบน้ำวน (water bath shaker 1092, GFL,) เขย่าที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ด้วยความเร็วรอบ 150 rpm เป็นเวลา 15 นาที เติม α-amylase (Liquozyme® SC DS, Novozyme) 20 ไมโครลิตร เขย่าต่อเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นทำการปรับ pH เป็น 4.2 – 4.3 ด้วย 2M HCl แล้วนำขวดรูปชมพู่เขย่าที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ด้วยความเร็วรอบ 150 rpm เป็นเวลา 15 นาที เติม amyloglucosidase (Spirizyme® Fuel, Novozyme) 100 ไมโครลิตร เขย่าต่อเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นปรับ pH เป็น 6 ด้วย 2M NaOH แล้วนำขวดรูปชมพู่ไปเขย่าที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 150 rpm เป็นเวลา 15 นาที เติม protease (Neutrase®, Novozyme) 100 ไมโครลิตร เขย่าต่อเป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นทำให้เป็นกลางด้วย 2M NaOH ต้มจนเดือดเป็น

เวลา 30 นาที เพื่อยับยั้งการทำงานของเอนไซม์แล้วทำให้เย็นทันที เติมโซเดียมเอไซด์จนมีความเข้มข้นเป็น 0.02% เพื่อป้องกันการเจริญของจุลินทรีย์ จากนั้นนำตัวอย่างในขวดรูปชมพู่ปั่นเหวี่ยงแยกตะกอนที่ความเร็วรอบ 5000 rpm เป็นเวลา 5 นาที แยกส่วนใสเก็บไว้ เติมน้ำร้อน 30 มิลลิลิตร ลงในส่วนตะกอนที่ได้จากการปั่นเหวี่ยง นำไปวางบนเครื่องให้ความร้อนและกวนสารแบบแม่เหล็ก กวนผสมด้วยแท่งแม่เหล็กเป็นเวลา 20 นาที นำไปปั่นเหวี่ยงแยกตะกอนที่ความเร็วรอบ 5000 rpm เป็นเวลา 5 นาที แยกส่วนใสเก็บไว้ แล้วนำส่วนใสทั้งหมดที่ได้ไปเข้าสู่ขั้นตอนการทำเฮมิเซลลูโลสให้บริสุทธิ์ จากนั้นนำไปทำแห้งแบบเยือกแข็ง จะได้เฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยน้ำร้อน (hemicellulose hot water extracted: H1)

3.2.3.2 การสกัดเฮมิเซลลูโลสด้วยสารละลายด่าง ดัดแปลงจากวิธีของ Mod และคณะ (1979)

ตะกอนที่เหลือจากการสกัดเฮมิเซลลูโลสด้วยน้ำร้อน นำมาเติม 4M NaOH 30 มิลลิลิตร กวนผสมด้วยแท่งแม่เหล็กข้ามคืน แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงที่ 5000 rpm เป็นเวลา 5 นาที แยกส่วนใสเก็บไว้ จากนั้นเติม 4M NaOH 20 มิลลิลิตร ลงในส่วนตะกอน กวนผสมด้วยแท่งแม่เหล็กข้ามคืน นำไปปั่นเหวี่ยงที่ 5000 rpm เป็นเวลา 5 นาที แยกส่วนใสเก็บไว้ แล้วจึงเติม 1M NaOH 20 มิลลิลิตร ลงในส่วนตะกอน กวนผสมด้วยแท่งแม่เหล็ก 1 ชั่วโมง นำไปปั่นเหวี่ยงแยกตะกอนที่ความเร็วรอบ 5000 rpm เป็นเวลา 5 นาที แยกส่วนใสเก็บไว้ นำส่วนใสที่ได้ทั้งหมดไปปรับ pH เป็น 8 ด้วย 2M HCl แล้วจึงเติม Tris-HCl buffer pH 8 ให้มีความเข้มข้นเป็น 0.005M แล้วนำไปเข้าสู่ขั้นตอนการทำเฮมิเซลลูโลสให้บริสุทธิ์ จากนั้นนำไปทำแห้งแบบเยือกแข็ง จะได้เฮมิเซลลูโลสที่สกัดได้ด้วยสารละลายด่าง (hemicellulose alkaline extracted) โดยวิธีการเตรียมตัวอย่าง การสกัด และการแยกส่วนเฮมิเซลลูโลสตามระดับความมีขั้ว แสดงดัง**รูปที่** 3.1



รูปที่ 3.1 วิธีการเตรียมตัวอย่าง การสกัด และการแยกเฮมิเซลลูโลสตามระดับความมีขั้ว จากรำข้าวขาวดอกมะลิ 105

3.2.4 ศึกษาวิธีการทำให้เฮมิเซลลูโลสบริสุทธิ์

โดยจะทำการศึกษาเปรียบเทียบวิธีการทำเฮมิเซลลูโลสให้บริสุทธิ์ระหว่างวิธีการตกตะกอนด้วยเอทานอลกับการไดอะไลซิส แล้วเลือกวิธีที่ดีที่สุดมาใช้ในงานวิจัยนี้ โดยพิจารณาจากความสามารถในการละลายกลับของเฮมิเซลลูโลสเป็นเกณฑ์

3.2.4.1 การตกตะกอนด้วยเอทานอล ดัดแปลงจากวิธีของ Mod และคณะ (1979)

นำส่วนใสที่ได้จากการสกัดด้วยน้ำร้อน (จากข้อ 3.2.3.1) และส่วนใสที่ได้จากการสกัดด้วยสารละลายด่าง (จากข้อ 3.2.3.2) มาตกตะกอนด้วย 98% เอทานอล โดยใช้

ปริมาตรส่วนใสต่อเอทานอลในสัดส่วน 1 ต่อ 3 ทำซ้ำ 2 ครั้ง ตั้งทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงแยกตะกอนที่ความเร็วรอบ 5000 rpm เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นนำตะกอนที่ได้ไปทำให้แห้งแบบเยือกแข็ง จะได้เป็นเฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยน้ำร้อนและสารละลายด่าง แล้วสังเกตลักษณะการละลายกลับของเฮมิเซลลูโลสที่ได้

3.2.4.2 การไดอะไลซิส (dialysis)

เตรียมถุงไดอะไลซิส (Spectra/Por® Biotech RC Membranes MWCO 3.5kDa) โดยแช่ในน้ำกลั่นเป็นเวลา 30 นาที แล้วล้างผ่านอีกครั้งด้วยน้ำกลั่น มัดถุงไดอะไลซิสด้านหนึ่งด้วยเชือก เติมส่วนใสที่ได้จากการสกัดด้วยน้ำร้อน (จากข้อ 3.2.3.1) และส่วนใสที่ได้จากการสกัดด้วยสารละลายด่าง (จากข้อ 3.2.3.2) ใส่ลงไปประมาณครึ่งหนึ่งของถุง มัดปากถุงอีกด้านด้วยเชือก แล้วนำถุงไดอะไลซิสไปแช่ในสารละลาย 0.005M Tris-HCl buffer pH 8 ใน 0.02% NaN_3 (สารละลายเป็น 100 เท่าของปริมาตรสารในถุงไดอะไลซิส) เปลี่ยนสารละลายที่ใช้แช่ทุกๆ 2 ชั่วโมง จนครบ 4 ชั่วโมง จากนั้นเปลี่ยนสารละลายที่ใช้แช่ทุกๆ 3 ชั่วโมง จนครบ 12 ชั่วโมง (รวมเวลาที่ใช้แช่ทั้งสิ้น 16 ชั่วโมง) นำสารที่อยู่ในถุงไปทำให้แห้งแบบเยือกแข็ง จะได้เป็นเฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยน้ำร้อนและสารละลายด่าง แล้วสังเกตลักษณะการละลายกลับของเฮมิเซลลูโลสที่ได้

3.2.5 การแยกส่วนเฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยสารละลายด่างตามระดับความมีขั้ว

แยกเฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยสารละลายด่างตามระดับความมีขั้วเป็น 2 ระดับ ด้วย anion exchange chromatography (diethyaminoethyl-52-cellulose chromatography) โดยใช้สารละลาย 0.005M formic acid (H2) และ 1M formic acid (H3) เป็นสารชะ ตามรายละเอียดที่แสดงไว้ในภาคผนวก ก.8

3.2.6 ศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพของเฮมิเซลลูโลสที่สกัดได้

3.2.6.1 ศึกษาการกระจายตัวตามน้ำหนักโมเลกุลและน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักเทียบกับ pullulan มาตรฐาน (weight average molecular weight: MW) โดยใช้ high performance size exclusion chromatography (HPSEC) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.9)

3.2.6.2 ศึกษาชนิดและปริมาณของน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบหลังจากทำ acid hydrolysis โดยใช้ระบบ high Performance anion exchange chromatography ที่ต่อกับ pulsed amperometric detector (HPAEC-PAD) ดัดแปลงจากวิธีของ Heather and Carole (2006) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.10)

ทำการทดลอง 2 ซ้ำ วิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติโดยใช้ ANOVA เปรียบเทียบคาเฉลี่ยโดยวิธี Duncan’s new multiple range test ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS version 16 ในการวิเคราะห์ข้อมูล

3.2.7 ศึกษาอิทธิพลของเฮมิเซลลูโลสต่อสมบัติของสตาร์ช

3.2.7.1 ศึกษาอิทธิพลต่อสมบัติทางความหนืดขณะร้อนโดยใช้เครื่อง rheometer ดัดแปลงจากวิธีของ Rosell, Yokoyama และ Shoemaker (2011) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.11) โดยศึกษาอิทธิพลจากการเติมเฮมิเซลลูโลสทั้งสาม (H1 H2 และ H3) ในสัดส่วนสตาร์ชต่อเฮมิเซลลูโลสที่ใช้ในการศึกษา (w/w) คือ 10:0 8:2 และ 6:4 เปรียบเทียบกับสตาร์ชที่ไม่มีการเติมเฮมิเซลลูโลส วางแผนการทดลองแบบ 2x3 factorial experimental design with control in CRD

3.2.7.2 อิทธิพลต่อสมบัติทางวิสโคอีลาสติกโดยใช้ rheometer ดัดแปลงจากวิธีของ Rosell, Yokoyama และ Shoemaker (2011) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.12) โดยศึกษาอิทธิพลจากการเติมเฮมิเซลลูโลสทั้งสาม (H1 H2 และ H3) ในสัดส่วนสตาร์ชต่อเฮมิเซลลูโลสที่ใช้ในการศึกษา (w/w) คือ 10:0 8:2 และ 6:4 เปรียบเทียบกับสตาร์ชที่ไม่มีการเติมเฮมิเซลลูโลส วางแผนการทดลองแบบ 2x3 factorial experimental design with control in CRD

3.2.7.3 อิทธิพลต่อสมบัติทางความร้อนโดยใช้เครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC) ดัดแปลงจากวิธีของ Temsiripong และคณะ (2005) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.13) 3.2.1.1 โดยศึกษาอิทธิพลจากการเติมเฮมิเซลลูโลสทั้งสาม (H1 H2 และ H3) ในสัดส่วนสตาร์ชต่อเฮมิเซลลูโลสที่ใช้ในการศึกษา (w/w) คือ 10:0, 9:1, 8:2, 7:3 และ 6:4 เปรียบเทียบกับสตาร์ชที่ไม่มีการเติมเฮมิเซลลูโลส วางแผนการทดลองแบบ 2x5 factorial experimental design with control in CRD

ทำการทดลอง 2 ซ้ำ วิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติโดยใช้ ANOVA เปรียบเทียบคาเฉลี่ยโดยวิธี Duncan’s new multiple range test ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS version 16 ในการวิเคราะห์ข้อมูล

บทที่ 4

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 องค์ประกอบทางเคมีของรำข้าวขาวดอกมะลิ 105

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของรำข้าวให้ผลดัง**ตารางที่** 4.1 พบว่ารำข้าวมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตสูงที่สุด รองลงมาคือ ไขมัน โปรตีน เถ้าและเส้นใยหยาบ ตามลำดับ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วรำข้าวจะประกอบด้วยส่วนต่างๆ ของเมล็ดข้าวที่หลุดออกมาระหว่างขบวนการขัดสี ได้แก่ จมูกข้าวหรือคัพภะ เยื่อหุ้มเมล็ด และผิวรอบนอกของเอนโดสเปิร์ม โดยส่วนต่างๆ เหล่านี้จะเป็นแหล่งขององค์ประกอบทางเคมีชนิดต่างๆ ที่พบในรำข้าว โดยจมูกข้าวจะเป็นแหล่งของไขมันและโปรตีน เอนโดสเปิร์มจะเป็นแหล่งของคาร์โบไฮเดรตที่อยู่ในรูปของสตาร์ชเป็นส่วนใหญ่ ส่วนเยื่อหุ้มเมล็ดนั้น จะเป็นแหล่งของเส้นใยหยาบ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าองค์ประกอบทางเคมีของรำข้าวนั้น นอกจากจะขึ้นอยู่กับชนิดและสายพันธุ์ของข้าวแล้ว ปัจจัยที่มีผลต่อองค์ประกอบทางเคมีของรำข้าว คือ วิธีหรือระดับของการขัดสีข้าวอีกด้วย เช่น หากเมล็ดข้าวถูกขัดสีมาก รำที่ได้ก็จะมีสตาร์ชปนมามาก

เฮมิเซลลูโลสจัดเป็นใยอาหาร (dietary fiber) ที่ไม่ถูกย่อยโดยเอนไซม์ในระบบทางเดินอาหาร ให้เป็นสารโมเลกุลเล็กที่สามารถถูกดูดซึมในบริเวณส่วนต้นของระบบดูดซึมของร่างกายได้ เฮมิเซลลูโลสที่พบมีทั้งที่เป็นใยอาหารที่ละลายน้ำ (soluble dietary fiber) และใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำ (insoluble dietary fiber) แต่ส่วนใหญ่ที่พบในธัญพืชจะเป็นชนิดที่ไม่ละลายน้ำ (วิวัฒน์ หวังเจริญ, 2546) ปริมาณใยอาหารที่พบในรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่สกัดไขมันออก แสดงใน**ตารางที่** 4.2 ซึ่งจะเห็นได้ว่ารำข้าวมีใยอาหารกลุ่มที่ไม่ละลายน้ำในปริมาณที่สูงกว่าใยอาหารกลุ่มที่ละลายน้ำ ดังนั้นจึงอาจจะกล่าวได้ว่าในรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 จะมีเฮมิเซลลูโลสที่ไม่ละลายน้ำที่จับแน่นอยู่กับเซลลูโลสมากกว่าเฮมิเซลลูโลสที่ละลายน้ำซึ่งไม่ได้จับแน่นอยู่กับเซลลูโลส

ตารางที่ 4.1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของรำข้าวขาวดอกมะลิ 105

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ (% โดยน้ำหนักแห้ง)
ความชื้น	9.25 ± 0.15
ไขมัน	18.57 ± 0.29
โปรตีน	12.23 ± 0.58
เถ้า	10.20 ± 0.52
เส้นใยหยาบ	9.16 ± 0.07
คาร์โบไฮเดรต (คำนวณ)	62.07 ± 0.32

ตารางที่ 4.2 ปริมาณใยอาหารของรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่สกัดไขมันออก

ประเภทของใยอาหาร	ปริมาณ (% โดยน้ำหนักแห้งรำข้าวสกัดไขมัน)
ใยอาหารทั้งหมด (total dietary fiber)	39.98 ± 0.32
ใยอาหารละลายน้ำ (soluble dietary fiber)	2.48 ± 0.33
ใยอาหารไม่ละลายน้ำ (insoluble dietary fiber)	37.50 ± 0.25

การสกัดเฮมิเซลลูโลสโดยทั่วไปจำเป็นต้องกำจัดองค์ประกอบอื่นออก เพื่อให้ได้เฮมิเซลลูโลสที่มีความบริสุทธิ์ หรือมีการปนเปื้อนของสารอื่นในปริมาณน้อย ในงานวิจัยนี้ทำการกำจัดไขมันออกจากรำข้าว โดยใช้ตัวทำละลาย 3 ชนิด คือ ปิโตรเลียมอีเทอร์ อะซีโตน และเมทา-นอล ตามระดับความมีขั้วของตัวทำลาย เพื่อกำจัดไขมันออกจากรำข้าวให้ได้ทั้งหมด เนื่องจากการมีไขมันหลงเหลืออยู่ในรำข้าวจะขัดขวางการสกัดเฮมิเซลลูโลสด้วยน้ำร้อนได้ หลังจากนั้นกำจัดแป้งและโปรตีนออกจากรำข้าวที่สกัดไขมันแล้วโดยใช้เอนไซม์ การสกัดเฮมิเซลลูโลสจากกลุ่มของธัญพืชทำได้ง่ายกว่าการสกัดจากไม้เนื้อแข็งและไม้เนื้ออ่อนเพราะมีปริมาณลิกนินอยู่น้อย (Ren and Sun, 2010) ในงานวิจัยนี้จึงไม่มีขั้นตอนของการกำจัดลิกนินออกไป

4.2 การเลือกวิธีและภาวะที่เหมาะสมในการทำให้เฮมิเซลลูโลสจากรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 บริสุทธิ์

เฮมิเซลลูโลสที่จะนำมาวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพและนำมาใช้ศึกษาอิทธิพลต่อการเกิดเจลาติไนเซชันและรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชจะต้องสามารถละลายกลับได้ดีในน้ำ เพราะผลที่วิเคราะห์ได้ควรจะเป็นผลจากประชากรทั้งหมดของเฮมิเซลลูโลสที่สกัดได้ โดยความสามารถในการละลายของเฮมิเซลลูโลสขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ชนิดของน้ำตาล ระดับการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชัน (degree of polymerization) ระดับการแทนที่ (degree of substitution) เป็นต้น (Ren and Sun, 2010) ซึ่งหากระหว่างการสกัดและการทำให้บริสุทธิ์มีการทำให้โครงสร้างเฮมิเซลลูโลสเกิดการเปลี่ยนแปลง หรือเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลขึ้น ก็อาจส่งผลต่อการละลายกลับได้

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาเปรียบเทียบวิธีการทำให้เฮมิเซลลูโลสที่อยู่ในสารละลายให้บริสุทธิ์ปราศจากสารอื่นๆ เช่น น้ำตาล กรดอะมิโน เกลือ เป็นต้น โดยศึกษาด้วยกัน 2 วิธี คือ การตกตะกอนด้วยเอทานอล และการไดอะไลซิส (dialysis) การตกตะกอนด้วยเอทานอลในช่วงแรกจะสังเกตไม่เห็นตะกอนด้วยตาเปล่า แต่เมื่อตั้งทิ้งไว้จะเห็นตะกอนตกลงมา การตกตะกอนซ้ำจะช่วยให้ได้ปริมาณเฮมิเซลลูโลสมากขึ้น แต่ก็อาจมีพอลิแซกคาไรด์อื่นที่ไม่ใช่เฮมิเซลลูโลสตกตะกอนปะปนมาด้วย การตกตะกอนด้วยเอทานอลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง (conformation) ของเฮมิเซลลูโลส ทำให้เกิดการสูญเสียสมบัติบางประการ รวมถึงสมบัติในด้านการละลาย (Ren and Sun, 2010) ผลการละลายกลับของเฮมิเซลลูโลสที่ได้จึงละลายกลับได้ไม่ดีและเกิดตะกอนเมื่อตั้งทิ้งไว้ ดังแสดงใน**ตารางที่** 4.3 งานวิจัยที่ใช้การแยกเฮมิเซลลูโลสออกจากสารสกัดด้วยวิธีนี้ จึงจำเป็นต้องมีขั้นตอนของการปั่นเหวี่ยงแยกเอาส่วนที่ไม่ละลายออกก่อนนำไปใช้ในการวิเคราะห์ในรูปของสารละลาย ซึ่งหมายถึงว่าประชากรบางส่วนของเฮมิเซลลูโลสจะไม่ได้ถูกนำมาใช้ศึกษา

ตารางที่ 4.3 ลักษณะการละลายกลับของเฮมิเซลลูโลสที่ทำให้บริสุทธิ์ด้วยการตกตะกอนด้วยเอทานอลและการไดอะไลซิส

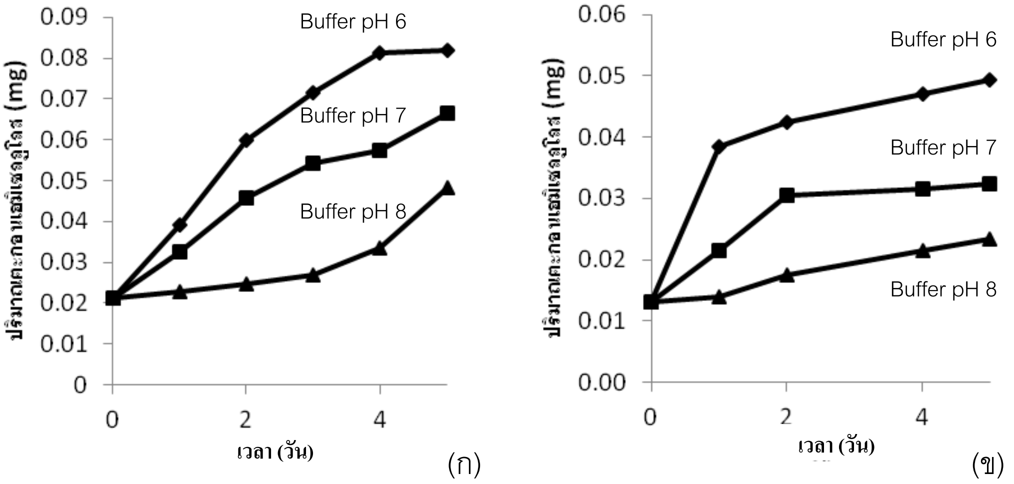
วิธีการทำเฮมิเซลลูโลสให้บริสุทธิ์	ลักษณะการละลายกลับของเฮมิเซลลูโลส
การตกตะกอนด้วยเอทานอล	• สารละลายขุ่น มองเห็นอนุภาคของสารแขวนลอย • เกิดตะกอนเมื่อตั้งทิ้งไว้ (1 ชั่วโมง)
การไดอะไลซิส	• สารละลายใส • ไม่เกิดตะกอนเมื่อตั้งทิ้งไว้ (1 ชั่วโมง)

การไดอะไลซิสจัดเป็นวิธีทางกายภาพ ทำให้สมบัติของเฮมิเซลลูโลสที่ได้ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อย เฮมิเซลลูโลสที่ได้จากวิธีนี้หลังจากทำแห้งแบบเยือกแข็งแล้วนำมาละลายกลับ จึงพบว่าสารละลายที่ได้มีลักษณะใส และไม่พบตะกอนเมื่อตั้งทิ้งไว้ (**ตารางที่** 4.3) จึงไม่จำเป็นต้องมีขั้นตอนการปั่นเหวี่ยงแยกส่วนที่ไม่ละลายออกไปก่อนการวิเคราะห์ตัวอย่างในรูปสารละลาย การไดอะไลซิสถูกนำมาใช้ในการสกัดเฮมิเซลลูโลสจากแกลบของข้าวบาร์เลย์ และจากรำของข้าวสาลี (Ren and Sun, 2010; Krawczyk *et al*., 2008 and Roos *et al*., 2009) ในงานวิจัยนี้เมมเบรนที่ใช้มีขนาดของรูที่ให้สารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า 3.5kDa เท่านั้นที่จะแพร่ผ่านเยื่อออกไปได้ (MWCO 3.5kDa) เช่น น้ำตาล กรดอะมิโน เป็นต้น

เมื่อใช้ความสามารถในการละลายน้ำเป็นเกณฑ์ในการพิจารณาเลือกวิธีการแยกเฮมิเซลลูโลสให้บริสุทธิ์ งานวิจัยนี้จึงใช้วิธีไดอะไลซิสเป็นวิธีที่ใช้ในการแยกเฮมิเซลลูโลสให้บริสุทธิ์ออกจากสารสกัด

การแยกเฮมิเซลลูโลสให้บริสุทธิ์ด้วยวิธีไดอะไลซิส จะต้องมีขั้นตอนของการกรองเอาสารอนุภาคใหญ่ออกจากสารสกัด การทำให้สารสกัดเข้มข้น จึงจะเข้าสู่การไดอะไลซิสเพื่อกำจัดอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า MWCO ของเมมเบรนออกไป ในขั้นตอนของการทำให้สารละลายสกัดเข้มข้น พบว่าค่า pH ของสารละลายมีค่าลดลงและเกิดตะกอนของเฮมิเซลลูโลสขึ้น ผู้วิจัยจึงได้ใช้ระบบบัฟเฟอร์เข้ามาช่วยในการรักษาสภาพของเฮมิเซลลูโลสในสารละลาย โดยศึกษาในระบบ

phosphate buffer pH 6 phosphate buffer pH 7 และ Tris-HCl buffer pH 8 โดยเก็บไว้เป็นเวลา 0 1 2 3 4 และ 5 วัน นำไปปั่นเหวี่ยง แล้วชั่งน้ำหนักตะกอน ได้ผลดัง**รูปที่ 4.1** พบว่าสารละลายเฮมิเซลลูโลสจะเกิดการตกตะกอนน้อยที่สุดในระบบ Tris-HCl buffer pH 8 ซึ่งมีความเป็นด่าง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการที่เฮมิเซลลูโลสมีโครงสร้างที่มีกิ่งก้านมาก และมีหมู่ไฮดรอก-ซิลมาก จึงสามารถละลายได้ดีในระบบที่เป็นด่าง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้ระบบ Tris-HCl buffer pH 8 สำหรับป้องกันการตกตะกอนของเฮมิเซลลูโลสของเฮมิเซลลูโลสในสารละลายระหว่างการทำให้เข้มข้น และการทำให้บริสุทธิ์ด้วยวิธีไดอะไลซิส



รูปที่ 4.1 ปริมาณตะกอนของสารละลายเฮมิเซลลูโลสเมื่ออยู่ในระบบบัฟเฟอร์ต่างๆ เป็นเวลา 0 1 2 3 4 และ 5 วัน (ก) สารละลายเฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยน้ำร้อน และ (ข) คือสารละลายเฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยสารละลายด่าง

4.3 **ผลผลิตสุทธิของเฮมิเซลลูโลสที่สกัดได้จากรำข้าวขาวดอกมะลิ** 105

เฮมิเซลลูโลสเป็นพอลิแซกคาไรด์ที่มีความหลากหลาย ปริมาณและองค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลสขึ้นอยู่กับวิธีการสกัด (Xu *et al*. 2007; Morrison, 1974) ปริมาณเฮมิเซลลูโลสที่สกัดได้จากรำข้าวขาวดอกมะลิ105 ด้วยน้ำร้อน และสารละลายด่าง แสดงใน**ตารางที่** 4.4 พบว่าเฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยน้ำร้อนมีปริมาณน้อยกว่าที่สกัดด้วยสารละลายด่าง เช่นเดียวกับที่พบใน

งานวิจัยที่ศึกษาเฮมิเซลลูโลสจากชานอ้อย (Peng *et al.*, 2010) และจากหญ้า perennial ryegrass (Xu *et al*. 2007) ด้วยวิธีการสกัดทั้งสองวิธี

การสกัดด้วยสารละลายด่างเป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากในผนังเซลล์พืชเฮมิเซลลูโลสจะจับกับไมโครไฟบริลของเซลลูโลสด้วยพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรง จับกับลิกนินด้วยพันธะโควาเลนต์ และพันธะเอสเทอร์กับหมู่อะซิทิล การใช้สารละลายด่างที่มีหมู่ไฮดรอกซิลส่งผลให้เซลลูโลสเกิดการพองตัว เกิดการทำลายพันธะเอสเทอร์ และทำลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ทำให้สามารถสกัดแยกเฮมิเซลลูโลสออกมาได้ (Xu *et al*., 2007; Peng *et al*., 2010; Ren and Sun, 2010) ปริมาณเฮมิเซลลูโลสที่สกัดได้จากรำข้าวด้วยสารละลายด่างในงานวิจัยนี้มีปริมาณ 17.07% ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Sun และคณะ (2000) ที่สกัดเฮมิเซลลูโลสที่จากรำข้าวด้วย 1M NaOH และพบเฮมิเซลลูโลสในปริมาณ 18.6% เทียบจากน้ำหนักแห้งของรำข้าว

ตารางที่ 4.4 ผลผลิตสุทธิของเฮมิเซลลูโลสที่สกัดได้จากรำข้าวขาวดอกมะลิ 105*

เฮมิเซลลูโลสที่สกัดและแยกได้จากวิธีต่างๆ	% ผลผลิตสุทธิ (น้ำหนักแห้ง)	
	เทียบจากรำข้าว	เทียบจากรำข้าวปราศจากไขมัน
เฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยน้ำร้อน (H1)	3.85 ± 0.11	5.30 ± 0.20
เฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยสารละลายด่าง	17.07 ± 0.08	23.53 ± 0.10
• แยกด้วย 0.005M Formic acid (H2)	3.26 ± 0.01	4.38 ± 0.32
• แยกด้วย 1M Formic acid (H3)	8.98 ± 0.02	12.28 ± 0.24
กากที่เหลือจากการสกัด	20.34 ± 0.99	28.04 ± 1.62

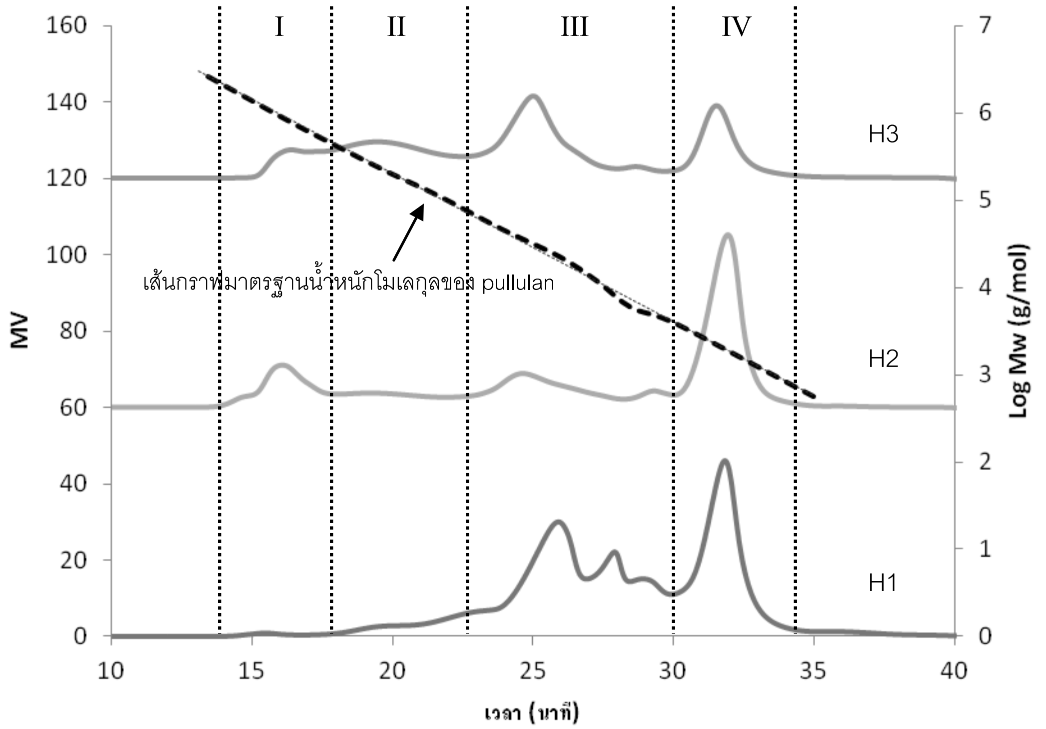
* ค่าเฉลี่ยจากการสกัดซ้ำ 2 ครั้ง ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

การใช้ anion exchange chromatography สามารถแยกเฮมิเซลลูโลสออกตามปริมาณหมู่อะซิเตท (acetate) หรือตามระดับความมีขั้วได้ (Ren and Sun, 2010) เมื่อนำเฮมิ-เซลลูโลสที่สกัดได้ด้วยสารละลายด่างมาแยกด้วย DEAE-52-Cellulose chromatography โดยใช้

0.005M formic acid เป็นสารชะ จะได้เฮมิเซลลูโลส (H2) ที่มีหมู่อะซิเตทต่ำหรือมีขั้วต่ำ และการใช้ 1M formic acid เป็นสารชะ (H3) จะได้เฮมิเซลลูโลสที่มีหมู่อะซิเตทสูงหรือมีขั้วสูง จาก**ตารางที่** 4.4 พบว่า H3 มีปริมาณมากกว่า H2 จึงกล่าวได้ว่าเฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยสารละลายด่างจากรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 มีปริมาณเฮมิเซลลูโลสที่มีขั้วสูงมากกว่าเฮมิเซลลูโลสที่มีขั้วต่ำ

4.4 การกระจายตัวตามขนาดและน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของเฮมิเซลลูโลสที่สกัดได้จากรำข้าวขาวดอกมะลิ 105

จากการวิเคราะห์การกระจายตัวตามขนาดโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลสจากรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่สกัดด้วยน้ำร้อนและสารละลายด่างด้วยเทคนิค high performance size exclusion chromatography (HPSEC) ดังแสดงในโครมาโตแกรม (**รูปที่** 4.2) จะเห็นได้ว่าเมื่อเทียบกับน้ำหนักโมเลกุลของ pullulan มาตรฐาน เฮมิเซลลูโลสทั้งสามส่วนมีขนาดโมเลกุลที่สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ช่วง ตามน้ำหนักโมเลกุล ($x10^4$ g/mol) คือ 48.71-300.97 (I), 7.36-48.71 (II), 0.39-7.36 (III) และ 0.20-0.39 (IV) โดยเฮมิเซลลูโลสทั้งสามส่วนมีการกระจายตัวในแต่ละช่วงน้ำหนัก ดังแสดงใน**ตารางที่ 4.5** โดยจะเห็นว่าเฮมิเซลลูโลสทั้งสามส่วนมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 0.39-7.36 ($x10^4$ g/mol) มากที่สุด และเฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยน้ำร้อน (H1) นั้น จะมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก ($\overline{M}_w$) ที่ต่ำกว่าเฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยสารละลายด่าง (H2 และ H3) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาที่พบว่าเฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยน้ำร้อนจะมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ จึงสามารถละลายได้ในน้ำร้อน ส่วนเฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยสารละลายด่างจะมีน้ำหนักโมเลกุลสูง และมีการจับกับเซลลูโลสด้วยพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรง จึงต้องใช้สารละลายด่างในการทำลายพันธะเพื่อสกัดแยกเฮมิเซลลูโลสออกจากผนังเซลล์พืช (Xu *et al.*, 2007; Peng *et al.*, 2010; Ren and Sun, 2010) เมื่อพิจารณาเฉพาะเฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยสารละลายด่างพบว่าเฮมิเซลลูโลสส่วน H2 มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักสูงกว่า H3 เกือบเท่าตัว แสดงว่าเฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยสารละลายด่างที่มีขั้วต่ำจะมีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า เฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยสารละลายด่างที่มีขั้วสูง



รูปที่ 4.2 การกระจายตัวตามขนาดโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลสที่สกัดได้จากรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่สกัดด้วยน้ำร้อน (H1) สกัดด้วยสารละลายด่างแล้วแยกด้วย DEAE-52-cellulose chromatography โดยใช้ 0.005M formic acid เป็นสารชะ (H2) และสกัดด้วยสารละลายด่างแล้วแยกด้วย DEAE-52-cellulose chromatography โดยใช้ 1M formic acid เป็นสารชะ (H3)

ตารางที่ 4.5 การกระจายตัวตามขนาดและน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักของเฮมิเซลลูโลสที่สกัดได้จากรำข้าวขาวดอกมะลิ 105

เฮมิเซลลูโลส*	% ของเฮมิเซลลูโลสในแต่ละส่วน				น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย** ($x10^4$g/mol)
	I 48.71-300.97 ($x10^4$ g/mol)	II 7.36-48.71 ($x10^4$ g/mol)	III 0.39-7.36 ($x10^4$ g/mol)	IV 0.20-0.39 ($x10^4$ g/mol)	
H1	0.40	5.48	57.36	36.76	35.1
H2	16.03	19.10	53.88	31.91	82.32
H3	10.98	27.04	41.52	20.46	47.51

* H1 คือ เฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยน้ำร้อน

H2 คือ เฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยสารละลายด่างแล้วแยกด้วย DEAE-52-cellulose chromatography โดยใช้ 0.005M formic acid เป็นสารชะ

H3 คือ เฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยสารละลายด่างแล้วแยกด้วย DEAE-52-cellulose chromatography โดยใช้ 1 M formic acid เป็นสารชะ

**คำนวณจากการเทียบกับโมเลกุลของ pullulan มาตรฐาน (ภาคผนวก ก.9)

4.5 ชนิดและปริมาณน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลสที่สกัดจากรำข้าวขาวดอกมะลิ 105

เฮมิเซลลูโลสที่พบในพืชมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด โดยแต่ละชนิดจะแตกต่างกันในชนิดของน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบของโครงสร้าง ดังนั้นการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของน้ำตาลจะทำให้ทราบถึงชนิดของเฮมิเซลลูโลสที่พบในรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 นอกจากนี้อัตราส่วนระหว่างน้ำตาลชนิดต่างๆ ยังสามารถสะท้อนถึงลักษณะโครงสร้าง ทั้งความเป็นกิ่งก้าน และความเป็นสายโซ่ตรงของเฮมิเซลลูโลสได้อีกด้วย

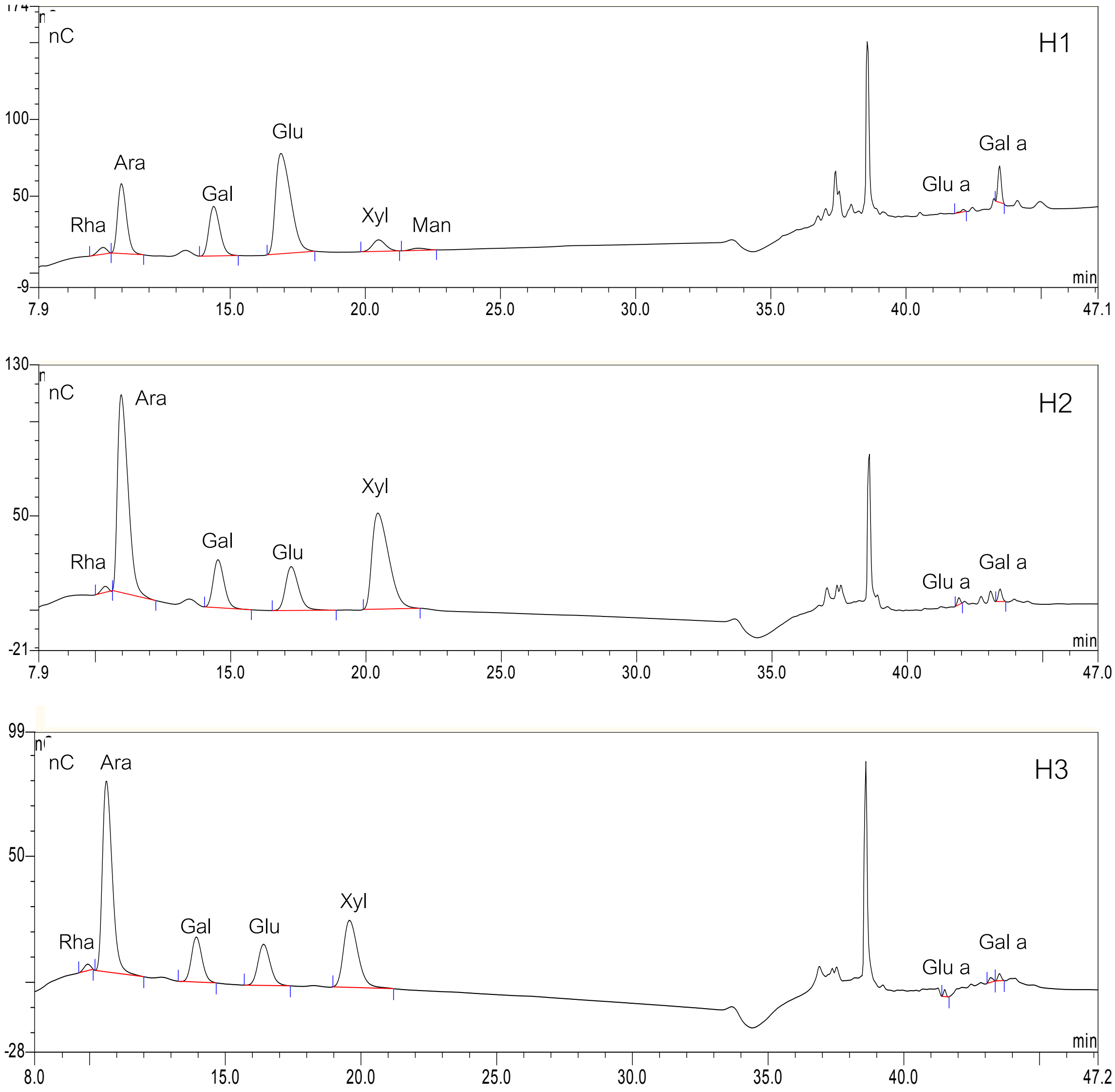
จากการศึกษาชนิดและปริมาณน้ำตาลที่พบเป็นองค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลสทั้งสามส่วนที่สกัดจากรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 ด้วย HPAEC-PAD ได้ผลดังแสดงใน**รูปที่ 4.3** และ**ตารางที่ 4.6** จากผลการวิเคราะห์พบว่าเฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยน้ำร้อน (H1) มีปริมาณและชนิดของน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบแตกต่างจากเฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยสารละลายด่าง (H2 และ H3) โดย H1 จะมีน้ำตาลกลูโคสมากที่สุด รองลงมา คือ อะราบิโนส กาแลกโตส ไซโลส ตามลำดับ เมื่อ

เปรียบเทียบข้อมูลที่ได้กับงานวิจัยที่ผ่านมานั้น เฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยน้ำร้อนน่าจะมีโครงสร้างเป็นกาแลกโตอะราบิโนไซแลนที่มีกิ่งมาก ซึ่งจะเห็นได้จากอัตราส่วนระหว่างอะราบิโนสต่อไซโลส (Ara/Xyl) ค่อนข้างสูง (3.29) นอกจากนี้แล้ว H1 ยังน่าจะมีกลูแคนที่ต่อกันด้วยพันธะ α หรือพันธะ β-1,4 และ β-1,3 (Xu *et al*., 2007; Peng *et al*., 2010; Ren and Sun, 2010) และอาจมีความเป็นไปได้ที่ H1 จะมีแมนแนน (mannan) กาแลกโตแมนแนน (galactomannan) และกาแลกโตกลูโคแมนแนน (galactoglucomannan) อยู่ในปริมาณที่ไม่สูงมากนัก ซึ่งโดยปกติสามารถพบโครงสร้างเหล่านี้ได้ในเฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยน้ำจากรำข้าว (Mod *et al*., 1978; Mod *et al*., 1979) เมื่อพิจารณาน้ำตาลชนิดที่เป็นกรดจะพบว่า H1 มีน้ำตาลในกลุ่มนี้อยู่สูงกว่าที่พบใน H2 และ H3 โดยเฉพาะกรดกาแลกตูโรนิก ซึ่งผลที่ได้นี้สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาที่ได้รายงานว่าเฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยน้ำจะมีเพกตินปนอยู่ด้วยแต่ในปริมาณที่ไม่สูงมากนัก (Sun *et al*., 2004; Xu *et al*., 2007; Peng *et al*., 2010; Ren and Sun, 2010)

เฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยสารละลายด่างจากรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 (H2 และ H3) มีน้ำตาลอะราบิโนสและไซโลสเป็นองค์ประกอบหลัก รองลงมาคือ กลูโคส กาแลกโตส และแรมโนส แต่ไม่พบแมนโนส (**ตารางที่ 4.6**) จากข้อมูลที่ได้และงานวิจัยที่ผ่านมานั้น (Sun *et al*., 2004; Xu *et al*., 2007; Peng *et al*., 2010) เฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยสารละลายด่างน่าจะมีโครงสร้างเป็นอะราบิโนกลูคูโรโนไซแลน (arabino-glucuronoxylan) กลูคูโรโนอะราบิโนไซแลน (glucurono-arabinoxylan) อะราบิโนไซแลน (arabinoxylan) และสารประกอบเชิงซ้อนของไซแลน (complex heteroxylan) (Peng *et al*., 2010; Ren and Sun, 2010) เมื่อพิจารณาองค์ประกอบน้ำตาลของเฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยด่างแล้วแยกด้วย DEAE-cellulose chromatography โดยการชะด้วย formic acid ที่ 2 ระดับความเข้มข้น พบว่าเฮมิเซลลูโลสที่มีความมีขั้วต่ำหรือมีปริมาณกรดกาแลกตูโรนิกและกลูโคนิกที่ต่ำ (H2) จะมีอัตราส่วนระหว่างอะราบิโนสต่อไซโลส (Ara/Xyl) ที่ต่ำกว่าเฮมิเซลลูโลสที่มีความมีขั้วสูงกว่า (H3) อัตราส่วนระหว่างอะราบิโนสต่อไซโลสสามารถบอกถึงความเป็นสายตรงและสายกิ่งของโครงสร้างเฮมิ-เซลลูโลสได้ ถ้าโครงสร้างมี Ara/Xyl ต่ำ จะบอกถึงความเป็นพอลิเมอร์สายยาวที่มีสายกิ่งน้อย ในทางตรงกันข้ามหากโครงสร้างมี Ara/Xyl สูง จะเป็นพอลิเมอร์สายสั้น ที่มีกิ่งมาก (Peng *et al*., 2010; Ren and Sun, 2010) จากผลวิเคราะห์ที่ได้จึงกล่าวได้ว่า H2 มีโครงสร้างที่เป็นพอลิเมอร์สายยาว ที่มีสายกิ่งน้อยกว่า H3 หรือกล่าวได้อีกนัย

หนึ่งว่าเฮมิเซลลูโลสที่มีขั้วสูงกว่าจะมีความเป็นกิ่งก้านมากกว่า อย่างไรก็ตามเฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยสารละลายด่างจะมี Ara/Xyl ต่ำกว่าที่สกัดด้วยน้ำร้อน จึงมีความเป็นกิ่งก้านน้อยกว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลที่มีการรายงานไว้ก่อนหน้านี้ (Mod *et al*., 1978; Xu *et al*., 2007: Peng *et al*., 2010)

เมื่อพิจารณาน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก ($\overline{M}_w$) ร่วมกับชนิดของน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบ จะพบว่าเฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยน้ำร้อน จะมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักต่ำ มีความเป็นกิ่งก้านมาก มีความมีขั้วสูง จากสมบัติเหล่านี้ทำให้เฮมิเซลลูโลสกลุ่มนี้มีความสามารถในการละลายน้ำ จึงถูกสกัดออกมาได้ด้วยน้ำร้อน ส่วนเฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยสารละลายด่าง จะมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักที่สูงกว่า มีความเป็นกิ่งก้านน้อยกว่า เฮมิเซลลูโลสกลุ่มนี้จึงไม่ละลายน้ำ และต้องสกัดด้วยสารละลายด่าง (Peng *et al*., 2010; Ren and Sun, 2010) จะเห็นได้ว่าเฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยวิธีที่ต่างกัน จะมีน้ำหนักโมเลกุล น้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบ โครงสร้างระดับการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชัน ความมีกิ่งก้าน ที่แตกต่างกัน เหล่านี้ล้วนส่งผลและมีความสัมพันธ์ต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของเฮมิเซลลูโลสให้แตกต่างกันออกไป



รูปที่ 4.3 โครมาโตแกรมของน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลสจากรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 สกัดด้วยน้ำร้อน (H1) สกัดด้วยสารละลายด่างแล้วแยกด้วย DEAE-52-cellulose chromatography โดยใช้ 0.005M formic acid เป็นสารชะ (H2) และสกัดด้วยสารละลายด่างแล้วแยกด้วย DEAE-52-cellulose chromatography โดยใช้ 1 M formic acid เป็นสารชะ (H3)

ตารางที่ 4.6 ชนิดและปริมาณน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลส*

	น้ำตาล (%mol)								
เฮมิเซลลูโลส	แรมโนส	อะราบิโนส	กาแลกโตส	กลูโคส	ไซโลส	แมนโนส	กรดกาแลกตูโรนิก	กรดกลูโคนิก	อะราบิโนสต่อไซโลส
H1***	4.49a** ± 0.91	20.22c ± 0.72	9.64a ± 0.83	49.02a ± 1.53	6.14b ± 1.15	1.52a ± 0.46	4.18a ± 0.32	1.40a ± 0.22	3.29:1
H2***	1.54b ± 0.29	40.32b ± 2.07	5.52b ± 0.15	11.35b ± 1.17	40.08a ± 3.36	ไม่พบ	0.68c ± 0.09	0.84b ± 0.13	1.00:1
H3***	1.93b ± 0.48	45.46a ± 0.68	6.34b ± 0.08	9.60b ± 4.85	34.93a ± 5.46	ไม่พบ	0.84b ± 0.13	1.49a ± 0.15	1.30:1

* ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

** ตัวอักษรหลังค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันในแนวนอน หมายถึง ค่าเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

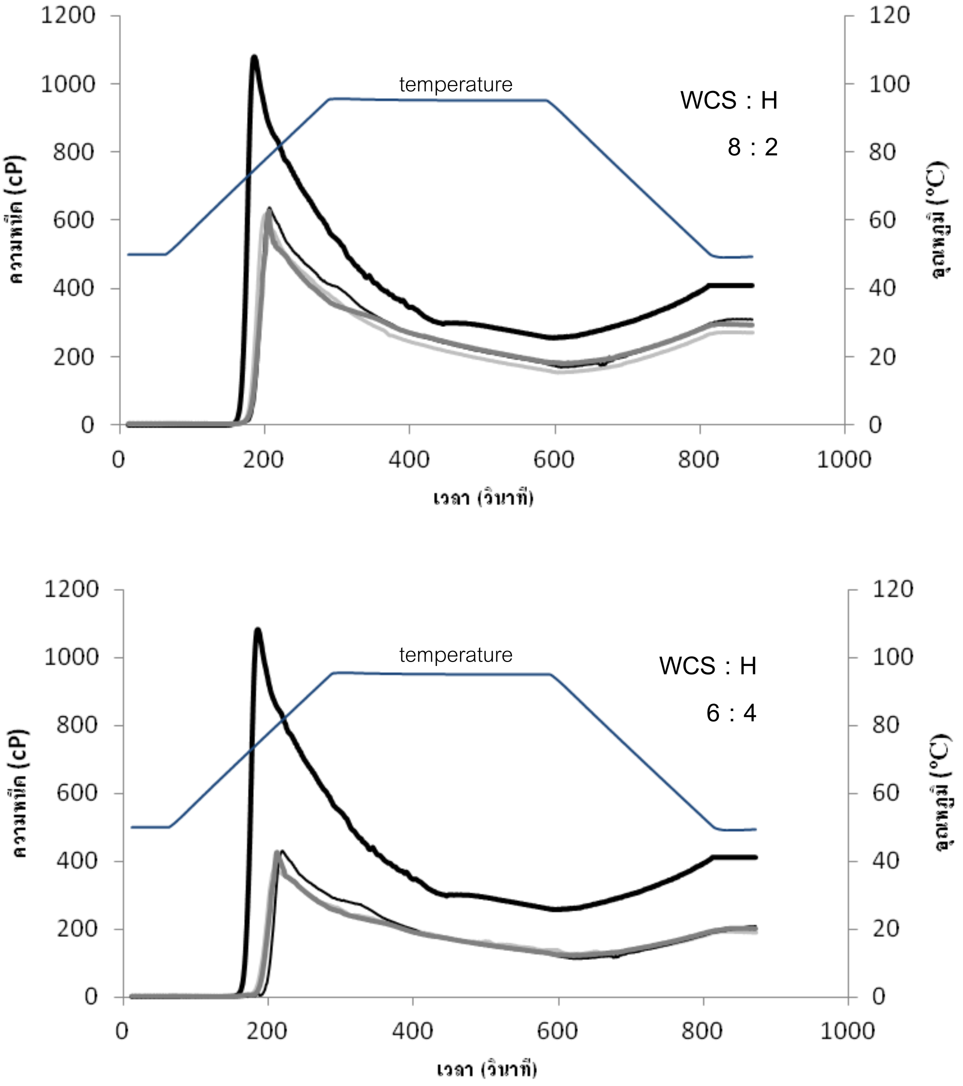
*** H1 คือ เฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยน้ำร้อน

H2 คือ เฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยสารละลายด่างแล้วแยกด้วย DEAE-52-cellulose chromatography โดยใช้ 0.005M formic acid เป็นสารชะ

H3 คือ เฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยสารละลายด่างแล้วแยกด้วย DEAE-52-cellulose chromatography โดยใช้ 1 M formic acid เป็นสารชะ

4.6 อิทธิพลของเฮมิเซลลูโลสจากรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 ต่อสมบัติทางความหนืดขณะร้อนของสตาร์ชข้าวโพด

จากการศึกษาสมบัติทางความหนืดของสารผสมระหว่างสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียว (waxy corn starch; WCS) และเฮมิเซลลูโลสจากรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 (H) ในสัดส่วนสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียวต่อเฮมิเซลลูโลส (WCS:H) คือ 10:0 8:2 และ 6:4 แสดงดัง**รูปที่ 4.4 และตารางที่ 4.7** พบว่าการเติมเฮมิเซลลูโลสจะทำให้ความหนืดเริ่มต้น (initial viscosity; IV) และอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืด (pasting temperature; PT) ของสารผสมสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เนื่องจากเมื่อมีเฮมิเซลลูโลสในระบบ น้ำบางส่วนอาจจะถูกจับไว้กับเฮมิเซลลูโลสส่งผลให้มีปริมาณน้ำอิสระในระบบลดลง จึงทำให้ระบบมีความหนืดที่สูงขึ้น โมเลกุลของน้ำอิสระอาจเคลื่อนตัวเข้าสู่เม็ดสตาร์ชได้ยากขึ้น และต้องการอุณหภูมิที่สูงขึ้นเพื่อทำให้สตาร์ชเกิดการพองตัวหรือเกิดเจลาติไนเซชัน (Chaisawang and Suphantharika, 2005; Aguirre-Cruz *et al.*, 2005) เมื่อเปรียบเทียบอิทธิพลต่อสมบัติทางความหนืดของเฮมิเซลลูโลสทั้งสามส่วน (H1, H2 และ H3) พบว่า H2 มีอิทธิพลต่อ IV และ PT มากกว่า H3 และ H1 ตามลำดับ ซึ่งน่าจะเป็นอิทธิพลอันเนื่องมาจากความแตกต่างของโครงสร้างทั้งในเรื่องของน้ำหนักโมเลกุล และความเป็นสายโซ่ตรงหรือกิ่งก้าน H2 มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักที่สูงกว่า H3 และ H1 (**ตารางที่** 4.5) และมีโครงสร้างที่เป็นสายโซ่ตรงและมีความเป็นกิ่งก้านต่ำ ดังนั้น H2 จึงน่าที่จะเกิดโครงสร้างร่างแหระหว่างกันได้ดี ส่งผลให้ระบบมีความหนืดที่สูงขึ้น และมีปริมาณน้ำอิสระที่ลดลง จาก**รูปที่ 4.4** และ**ตารางที่ 4.7** จะเห็นว่าอิทธิพลของเฮมิเซลลูโลสต่อ IV และ PT จะเห็นได้ชัดเจนหรือมากขึ้นเมื่อระบบมีปริมาณเฮมิเซลลูโลสที่สูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบอิทธิพลในแนวโน้มเดียวกันของ เฮมิเซลลูโลสต่อค่า IV และ PT ในระบบที่เป็นสารผสมระหว่างสตาร์ชข้าวโพด (normal corn starch; CS) และเฮมิเซลลูโลส ในสัดส่วน CS:H คือ คือ 10:0 8:2 และ 6:4 แสดงดัง**รูปที่ 4.5 และตารางที่** 4.8



รูปที่ 4.4 สมบัติทางความหนืดของสารผสมระหว่างสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียว (WCS) และเฮมิ-เซลลูโลส (H) ที่ได้จากรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่สัดส่วน CS:H, 8:2 และ 6:4

(▬▬ WCS, ▬▬ WCS:H1, ▬▬WCS:H2, ▬▬WCS:H3)

ตารางที่ 4.7 สมบัติทางความหนืดของสารผสมระหว่างสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียว (WCS) และเฮมิเซลลูโลส (H) ที่ได้จากรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในสัดส่วน WCS:H ที่ระดับต่างๆ*

WCS:H	สัดส่วน	Initial viscosity (cP)	Pasting temperature (^{o}C)	Peak viscosity (cP)	Breakdown (cP)	Final viscosity (cP)	Setback (cP)
WCS:H	10:0	0.93f**±0.01	69.86f ±0.14	1034.00a±66.47	784.15a±57.77	407.35a±4.17	157.50a ±4.53
WCS:H1***	8: 2	1.23e±0.16	71.89e ±0.15	610.40b± 8.34	459.90b± 4.81	267.55d±4.60	117.05c ±1.06
	6: 4	1.58d±0.10	73.50c ±0.14	379.55c± 7.00	252.05c± 2.05	190.10f ±2.69	62.60f ±2.26
WCS:H2***	8: 2	3.19b±0.08	73.55c ±0.14	638.93b± 5.05	467.93b± 0.81	310.31b±3.33	139.31b ±0.91
	6: 4	4.16a±0.12	76.15a ±0.15	432.22c± 4.13	312.22c± 4.35	210.85e±3.05	90.85d ±5.44
WCS:H3***	8:2	2.40c±0.08	72.70d ±0.14	636.00b±12.73	453.50b± 6.36	298.95c±9.12	116.45c ±2.76
	6:4	3.16b±1.08	74.52b ±0.14	430.21c± 6.50	301.71c± 2.80	202.41e±1.67	73.92e ±7.52

* ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

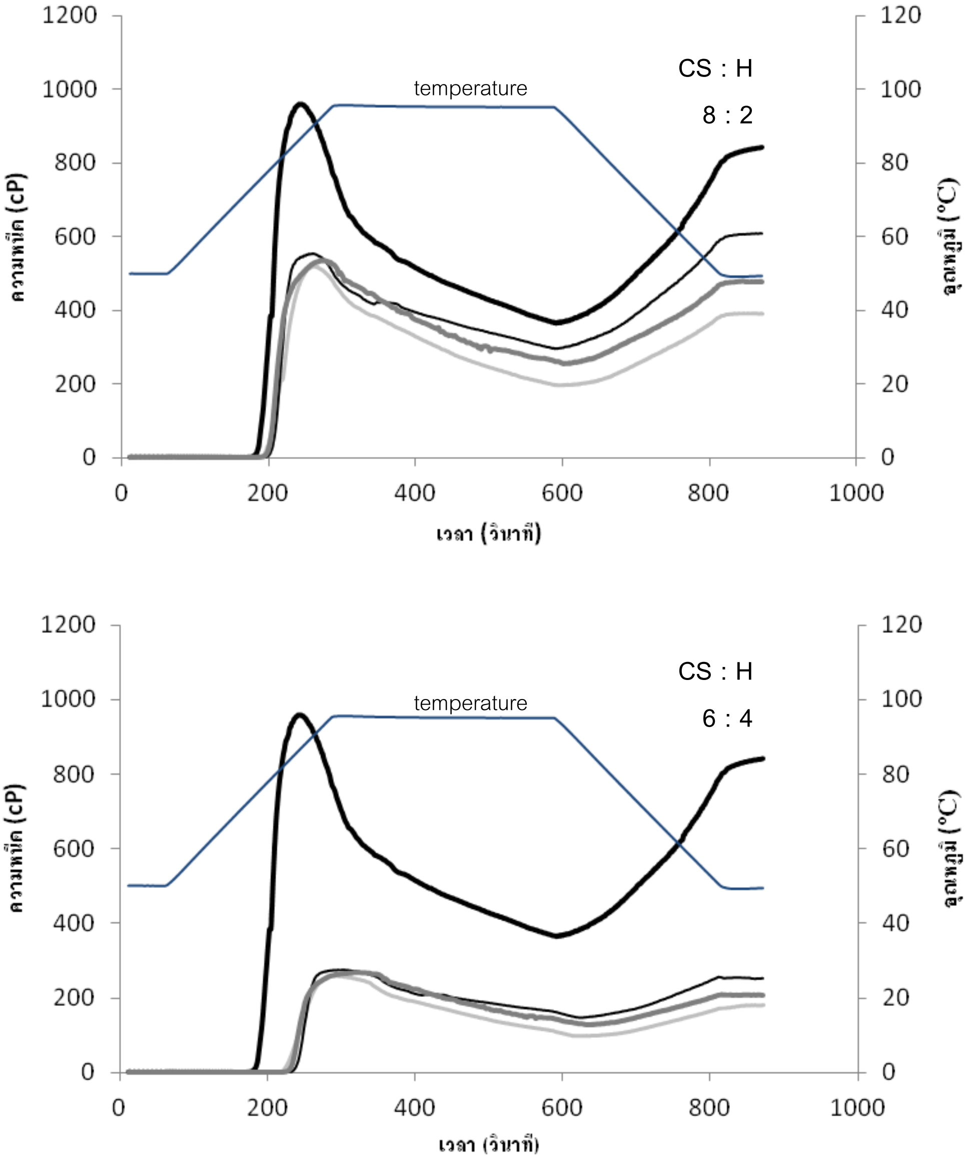
** ตัวอักษรหลังค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง ค่าเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

*** WCS คือ สตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียว

H1 คือ เฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยน้ำร้อน

H2 คือ เฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยสารละลายด่างแล้วแยกด้วย DEAE-52-cellulose chromatography โดยใช้ 0.005M กรดฟอร์มิกเป็นสารชะ

H3 คือ เฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยสารละลายด่างแล้วแยกด้วย DEAE-52-cellulose chromatography โดยใช้ 1 M กรดฟอร์มิกเป็นสารชะ



รูปที่ 4.5 สมบัติทางความหนืดของสารผสมระหว่างสตาร์ชข้าวโพด (CS) และเฮมิเซลลูโลส (H) ที่ได้จากรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่สัดส่วน CS:H, 8:2 และ 6:4 (━CS, ━ CS:H1, ━ CS:H2, ━ CS:H3)

ตารางที่ 4.8 สมบัติทางความหนืดของสารผสมระหว่างสตาร์ชข้าวโพด (CS) และเฮมิเซลลูโลส (H) ที่ได้จากรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในสัดส่วน CS:H ที่ระดับต่างๆ*

CS:H	proportion	Initial viscosity (cP)	Pasting temperature (°C)	Peak viscosity (cP)	Breakdown (cP)	Final viscosity (cP)	Setback (cP)
CS:H	10:0	0.67f** ±0.09	74.01f ±0.28	966.25a ±10.39	606.10a ±15.70	840.75a ± 1.06	480.60a ± 4.24
CS:H1***	8:2	1.05e ±0.05	76.35e ±0.14	538.05c ±23.55	334.46b ±14.64	404.40d ±17.68	200.81d ± 8.78
	6:4	1.91d ±0.04	77.05d ±0.57	343.79e ± 7.37	213.69d ± 4.57	258.65f ± 5.90	128.55f ± 3.10
CS:H2***	8:2	2.38c ±0.07	77.96bc ±0.14	622.50b ±17.96	319.96b ± 8.58	621.89b ±17.95	319.36b ± 8.56
	6:4	4.48a ±0.13	78.76a ±0.14	416.44d ± 1.75	214.06d ± 1.32	416.01d ± 1.77	213.64cd ± 1.34
CS:H3***	8:2	1.81d ±0.03	77.35cd ±0.14	543.00c ± 9.33	285.64c ± 5.85	483.68c ± 8.31	226.31c ± 4.82
	6:4	3.33b ±0.07	78.16ab ±0.14	354.28e ± 3.27	186.34e ± 2.32	319.40e ± 8.32	151.47e ± 7.37

* ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

** ตัวอักษรหลังค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง ค่าเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

*** CS คือ สตาร์ชข้าวโพด

H1 คือ เฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยน้ำร้อน

H2 คือ เฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยสารละลายด่างแล้วแยกด้วย DEAE-52-cellulose chromatography โดยใช้ 0.005M formic acid เป็นสารชะ

H3 คือ เฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยสารละลายด่างแล้วแยกด้วย DEAE-52-cellulose chromatography โดยใช้ 1 M formic acid เป็นสารชะ

ความหนืดสูงสุด (peak viscosity; PV) เป็นค่าที่ใช้บอกความสามารถในการพองตัวอย่างอิสระของเม็ดสตาร์ชก่อนที่เม็ดสตาร์ชจะแตก (กล้าณรงค์ ศรีรอต และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2543) เมื่อมีการเติมเฮมิเซลลูโลสในระบบของสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียว (WCS) พบว่าค่า PV ของสตาร์ช ลดลง (**รูปที่ 4.4** และ**ตารางที่ 4.7**) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับหลายงานวิจัย (Funami *et al.*, 2008; Furuta *et al.*, 2003) ที่ให้เหตุผลว่าในระบบที่พอลิแซกคาไรด์อยู่ร่วมกับเม็ดสตาร์ช พอลิแซกคาไรด์จะถูกดูดซับ (adsorb) หรือเคลือบ (coating) อยู่โดยรอบผิวเม็ดสตาร์ช (Christianson, 1982) จึงเปรียบเสมือนเป็นการป้องกันการรั่วหรือการหลุดออกของโมเลกุลสตาร์ชระหว่างการเกิดเจลาติไนเซชัน กล่าวคือพอลิแซกคาไรด์จะทำหน้าที่เป็นตัวขัดขวางหรือเป็นฟิล์ม (Funami *et al.*, 2008) ทำให้การบวมของเม็ดสตาร์ชเกิดขึ้นได้อย่างจำกัด นอกจากปรากฏการณ์ดังกล่าวแล้วในงานวิจัยของ สิริลักษณ์ พวงประยงค์ (2550) ยังอธิบายบนพื้นฐานของความหนืดของระบบที่สูงขึ้นเนื่องจากการเติมไฮโดรคอลลอยด์ว่าการเติมไฮโดรคอลลอยด์ทำให้ความสามารถในการพองตัว (swelling power) และความสามารถในการละลายของสตาร์ชลดลง เนื่องจากไฮโดรคอลลอยด์จับกับน้ำทำให้ความหนืดของระบบเพิ่มขึ้น ปริมาณน้ำอิสระที่ใช้ในการพองตัวของสตาร์ชน้อยลง และเมื่อความหนืดของสารละลายภายนอกแกรนูลสูง โมเลกุลภายในแกรนูลออกไปภายนอกแกรนูลได้น้อยลงทำให้ความสามารถในการละลายของสตาร์ชลดลง การเติมเฮมิเซลลูโลสทั้งสามส่วนทำให้ค่า PV ของ WCS ลดลงในปริมาณที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยการลดลงของค่า PV จะลดลงมากขึ้นเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของปริมาณเฮมิเซลลูโลส อย่างไรก็ตามเม็ดสตาร์ช WCS ในระบบที่มี H2 จะมีค่า PV ในแนวโน้มที่สูงกว่าในระบบที่มี H3 และ H1 ตามลำดับ สาเหตุที่เป็นเช่นนี้อาจเกิดได้จาก 2 กรณี คือ ความหนืดโดยรวมของทั้งระบบและความสามารถในการเคลือบผิวเม็ดสตาร์ชของเฮมิเซลลูโลส โดย H2 ซึ่งมีโครงสร้างที่เป็นสายโซ่ตรงและมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักที่สูง ทำให้ความหนืดในจุดที่เกิด PV มีค่าสูงกว่าระบบที่มี H3 และ H1 และจากการที่มีโครงสร้างเป็นสายโซ่ตรง ความเป็นกิ่งก้านน้อย และมีขนาดใหญ่ของ H2 อาจจะเป็นลักษณะโครงสร้างที่ไม่เอื้อต่อการถูกดูดซับหรือเคลือบบนพื้นผิวของเม็ดสตาร์ช WCS จึงทำให้ไปขัดขวางการพองตัวของเม็ดสตาร์ชได้น้อย การลดลงของค่า PV เมื่อมีการเติมเฮมิเซลลูโลสนี้ยังพบในระบบของสารผสมระหว่างสตาร์ชข้าวโพด (CS) และเฮมิเซลลูโลส ดังแสดงใน**รูปที่ 4.5** และ**ตารางที่ 4.8**

ค่าความหนืดลดลง (breakdown; BD) เป็นค่าที่ใช้บอกความทนต่อแรงเฉือน และความร้อนของโมเลกุลในสารละลายสตาร์ช (Dengate, 1984) จากผลการศึกษาในสารละลาย WCS พบว่าค่า BD ลดลงเมื่อมีการเติมเฮมิเซลลูโลส กล่าวคือเมื่อมีการเติมเฮมิเซลลูโลส สารละลายสตาร์ชจะมีความสามารถในการทนต่อแรงเฉือนเพิ่มขึ้น โดยเฮมิเซลลูโลสทั้งสามส่วนจะทำให้ค่า BD ของสารละลาย WCS ลดลง ที่ระดับใกล้เคียงกัน และไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเติมในปริมาณที่เท่ากัน ค่า BD จะลดลงมากขึ้นเมื่อมีปริมาณเฮมิเซลลูโลสในระบบเพิ่มขึ้น ในระบบของสารละลาย CS พบว่าการเติมเฮมิเซลลูโลสทำให้ค่า BD ลดลงเช่นเดียวกับที่พบในระบบของสารละลาย WCS การลดลงของค่า BD ของสารละลายสตาร์ชเมื่อมีเฮมิเซลลูโลสอยู่ในระบบนั้น อาจจะเนื่องมาจากการที่เม็ดสตาร์ชไม่สามารถพองตัวได้อย่างเต็มที่เมื่อมีเฮมิเซลลูโลสอยู่ในระบบ ดังที่เห็นได้จากการลดลงของค่า PV เมื่อเม็ดสตาร์ชไม่สามารถพองตัวอย่างเต็มที่แล้วแตกออกนั้น พฤติกรรมการลดลงของความหนืดอันเนื่องจากแรงเฉือนของโมเลกุลสตาร์ชโดยเฉพาะแอมิโลเพกทินจึงเห็นได้ไม่ชัดเจน

ความหนืดสุดท้าย (final viscosity; FV) เป็นผลมาจากการจัดเรียงตัวใหม่ของโครงสร้างของโมเลกุลสตาร์ช (retrogradation) และค่าที่ใช้บอกแนวโน้มในการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชคือ ค่าการคืนตัว (setback; SB) ซึ่งค่าทั้งสองมีความเกี่ยวพันกับแอมิโลสมากกว่าแอมิโลเพกทิน เนื่องจากโครงสร้างที่เป็นสายโซ่ตรงของแอมิโลสจะส่งเสริมการเกิดรีโทรเกรเดชันได้ดีกว่า

โครงสร้างแบบกิ่งก้านของแอมิโลเพกทิน ทำให้แอมิโลสสามารถเกิดรีโทรเกรเดชันได้เร็วกว่าแอมิโลเพกทิน จากผลการศึกษาในระบบของสารละลาย WCS พบว่าเมื่อมีการเติมเฮมิเซลลูโลส ทำให้ค่า FV และ SB ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ทั้งนี้อาจเป็นไปได้ที่เฮมิเซลลูโลสสามารถขัดขวางการจัดเรียงตัวใหม่ของโครงสร้างของโมเลกุลสตาร์ช โดยพบอิทธิพลนี้ใน H1 มากกว่า H3 และ H2 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) และจะพบอิทธิพลนี้มากขึ้นเมื่อมีการเติมเฮมิเซลลูโลสมากขึ้น โดยการศึกษาอิทธิพลของเฮมิเซลลูโลสต่อค่า FV และ SB ของสารละลาย CS ก็ให้ผลในทำนองเดียวกัน แต่จะทำให้มีการลดลงของค่า FV และ SB ในระดับที่มากกว่า ทั้งนี้อาจจะเนื่องมาจากในระบบสารละลาย CS นั้นมีแอมิโลสอยู่สูงเมื่อเทียบกับระบบของสารละลาย WCS ซึ่งแอมิโลสจะมีบทบาทโดยตรงต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันในระยะสั้น โดย

แสดงออกมาในค่า FV และ SB เมื่อมีเฮมิเซลลูโลสมาขัดขวางการเกิดรีโทรเกรเดชันของแอมิโลส จึงส่งผลทำให้ค่า FV และ SB ลดลงอย่างชัดเจนกว่าในระบบที่ไม่มีแอมิโลส และจากความแตกต่างของระดับอิทธิพลต่อการลดลงของค่า FV และ SB ระหว่างเฮมิเซลลูโลสทั้งสามนั้นแสดงให้เห็นว่า เฮมิเซลลูโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ มีความเป็นกิ่งก้านสูง และมีขั้วค่อนข้างสูง ดังที่พบใน H1 นั้น จะสามารถขัดขวางการเกิดรีโทรเกรเดชันของโมเลกุลสตาร์ชได้มากกว่าเฮมิเซลลูโลสที่มีขนาดใหญ่ มีความเป็นสายโซ่ตรง และมีความมีขั้วต่ำ เช่นที่พบใน H2 ซึ่งโครงสร้างที่เป็นสายโซ่ตรง มีกิ่งก้านน้อยของ H2 นั้น มีความคล้ายคลึงกับแอมิโลสจึงน่าจะสามารถเกิดอันตรกิริยาระหว่างกันได้พอสมควร ส่งผลให้ค่า FV และ SB ไม่ลดลงไปมาก

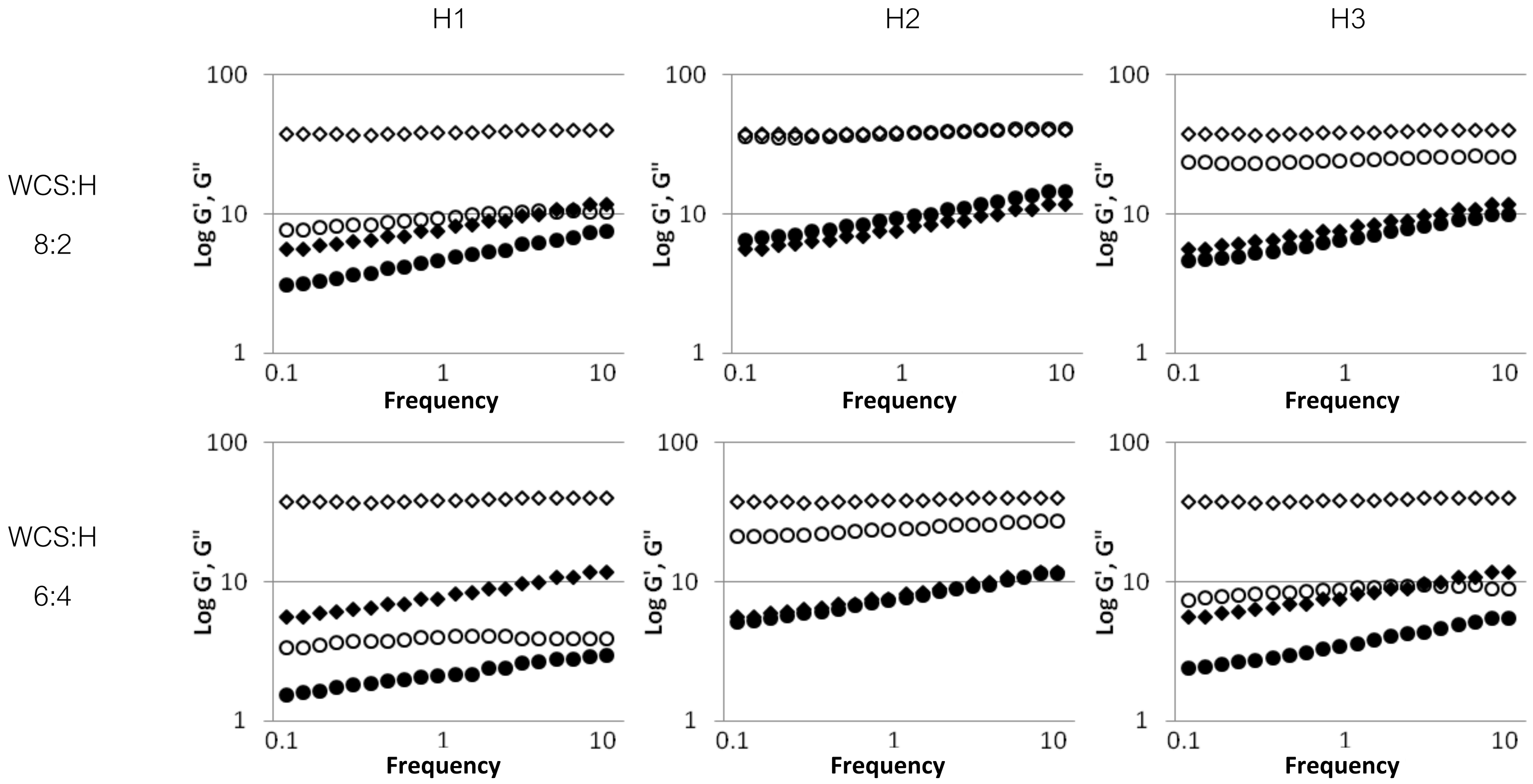
4.7 **อิทธิพลของเฮมิเซลลูโลสจากรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 ต่อสมบัติทางวิสโคอีลาสติกของ เจลสตาร์ช**

การวิเคราะห์สมบัติวิสโคอีลาสติกแบบการสั่นทางพลวัติ (dynamic oscillation) เป็นการวิเคราะห์การตอบสนองต่อความเค้น (stress) หรือความเครียด (strain) ภายใต้การเคลื่อนที่แบบสั่นของวัสดุวิสโคอีลาสติก โดยพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา ได้แก่ storage modulus (*G'*) loss modulus (*G''*) และ loss tangent (tanδ) *G'* เป็นค่าที่บ่งถึงความเป็นของแข็งยืดหยุ่น (elastic solid) ของตัวอย่าง *G''* เป็นค่าที่บ่งถึงความเป็น ของเหลว (liquid) ของตัวอย่าง และค่า tanδ เป็นค่าที่ใช้ในการบ่งความเป็นวิสโคอีลาสติกของตัวอย่าง (จิรารัตน์ ทัตติยกุล, 2554)

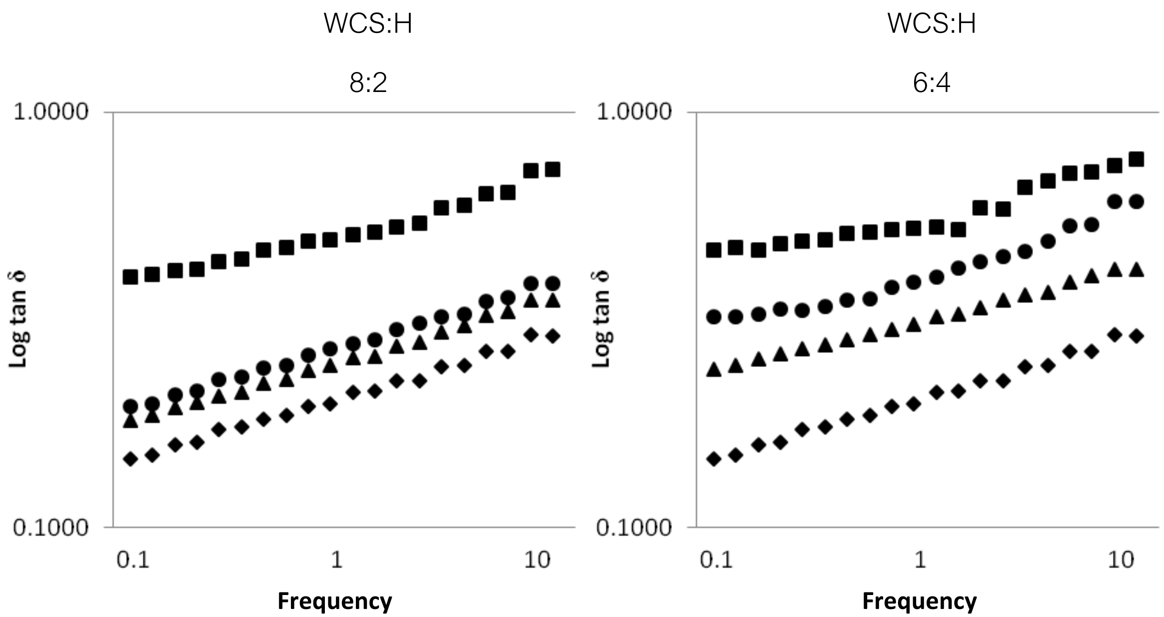
จากการวิเคราะห์สมบัติทางวิสโคอีลาสติกของเจลผสมระหว่างสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียว (WCS) และเฮมิเซลลูโลส (H) ภายหลังจากการเกิดเจลาติไนเซชัน แล้วทำให้เย็นที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ให้ผลดัง**รูปที่** 4.6 และ**รูปที่** 4.7 พบว่าเจลสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียวที่มี และไม่มีการเติมเฮมิเซลลูโลส ให้ค่า *G'* สูงกว่าค่า *G''* ในทุกช่วงความถี่ที่ใช้ศึกษา แต่เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์กับความถี่ พบว่าค่า *G'* และ *G''* มีค่าเข้าใกล้กันเมื่อความถี่สูงขึ้น แสดงว่าตัวอย่างมีความเป็นของเหลวที่สามารถเปลี่ยนรูปร่างได้มากกว่าความเป็นของแข็งยืดหยุ่นได้ (จิรารัตน์ ทัตติยกุล, 2554) การเติมเฮมิเซลลูโลสทำให้ค่า *G'* และ *G''* ลดลง แสดงว่าเจลสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียวที่มีการเติมเฮมิเซลลูโลสมีความแข็งแรงของโครงสร้างน้อยกว่าเมื่อไม่มีการเติม ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการมีเฮมิเซลลูโลสในระบบจะขัดขวางการจัดเรียงโครงสร้างใหม่ระหว่างโมเลกุลน้ำ

และโมเลกุลสตาร์ช เจลที่ได้จึงมีโครงสร้างที่แข็งแรงน้อย ค่า $\tan\delta$ ที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมเฮมิเซลลูโลส แสดงว่าเจลของสารผสมระหว่างสตาร์ชและเฮมิเซลลูโลสมีความเป็นของแข็งยืดหยุ่นได้ต่ำกว่าเมื่อไม่เติมเฮมิเซลลูโลส โดยค่า $\tan\delta$ อยู่ในช่วง 0.2-0.5 ซึ่งเป็นลักษณะของพอลิเมอร์ที่เป็นอสัณฐาน (amorphous polymer) หรือมีลักษณะเป็น weak gel อิทธิพลเหล่านี้พบมากขึ้นเมื่อมีการเติมเฮมิเซลลูโลสมากขึ้น โดย H1 จะมีอิทธิพลต่อค่า G', G'' และ $\tan\delta$ มากที่สุด รองลงมาคือ H3 และ H2 ตามลำดับ ทั้งนี้อาจจะเป็นเพราะโครงสร้างที่มีความเป็นกิ่งก้านมากของ H1 สามารถขัดขวางการจัดเรียงตัวโครงสร้างของโมเลกุลสตาร์ชได้มากกว่าโครงสร้างที่เป็นสายโซ่ตรง มีความเป็นกิ่งก้านน้อยอย่างเช่นที่พบใน H2 อิทธิพลของเฮมิเซลลูโลสต่อสมบัติทางวิสโคอีลาสติกของเจลสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียวนี้ ให้ผลที่สนับสนุนอิทธิพลของเฮมิเซลลูโลสต่อการลดลงของค่า FV และ SB ระหว่างการเกิดรีโทรเกรเดชันที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 4.6

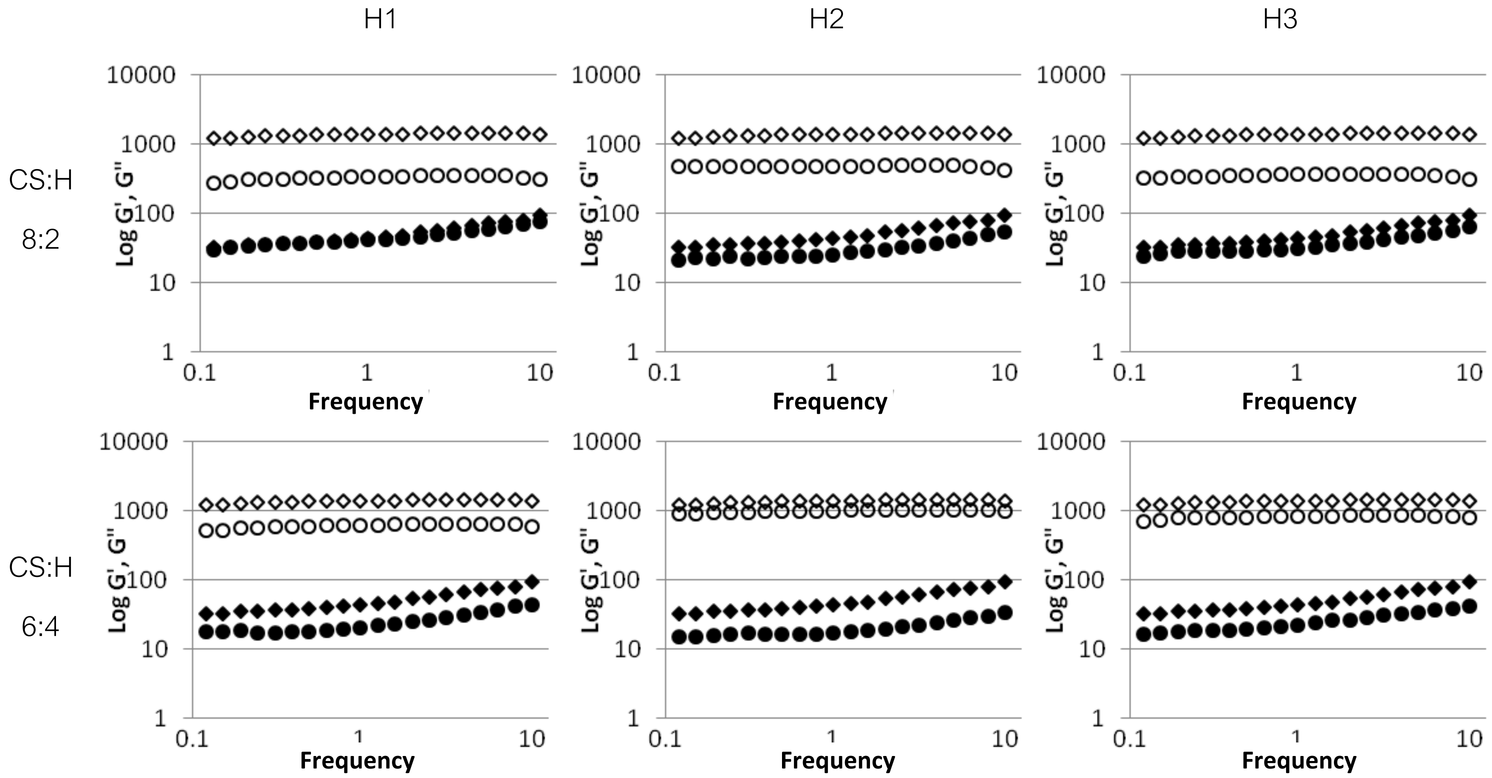
จากการวิเคราะห์สมบัติทางวิสโคอีลาสติกของเจลของสารผสมระหว่างสตาร์ชข้าวโพดและเฮมิเซลลูโลส ให้ผลดัง**รูปที่** 4.8 และ**รูปที่** 4.9 พบว่าเจลสตาร์ชข้าวโพดที่มี และไม่มีการเติมเฮมิเซลลูโลส ให้ค่า G' สูงกว่าค่า G'' และค่อนข้างคงที่ในทุกช่วงความถี่ที่ใช้ศึกษา แสดงว่าเจลของสตาร์ชมีสมบัติคล้ายของแข็งยืดหยุ่นมากกว่าของเหลว และแสดงคุณลักษณะของเจลที่แท้จริง (true gel) คือสามารถรักษารูปร่างได้เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ เมื่อมีการเติมเฮมิเซลลูโลสทำให้เจลสตาร์ชข้าวโพดมีค่า G' และ G'' ลดลง และค่า $\tan\delta$ เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นแนวโน้มเดียวกันกับที่พบในเจลสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียว โดยพบว่า H1 จะมีอิทธิพลต่อค่า G', G'' และค่า $\tan\delta$ ของเจลสตาร์ช มากกว่า H3 และ H2 ตามลำดับ



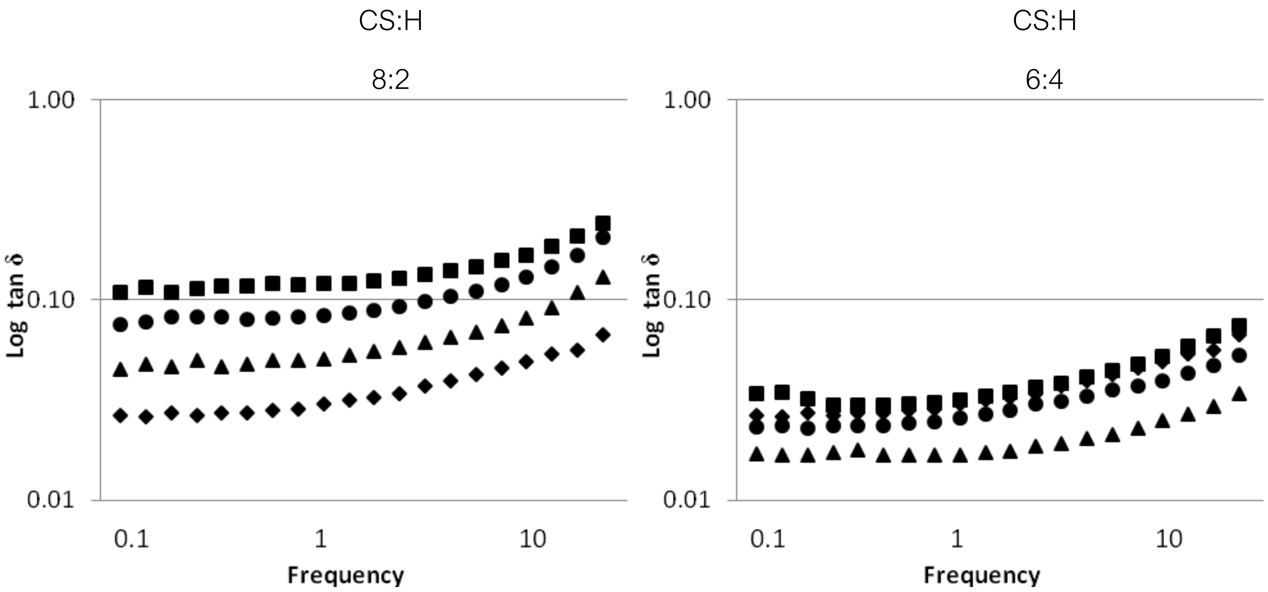
รูปที่ 4.6 สมบัติทางวิสโคอีลาสติกของเจลของสารผสมระหว่างสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียว (WCS) กับเฮมิเซลลูโลส (H) ที่ได้จากรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในสัดส่วน WCS:H ที่ระดับ 8:2 และ 6:4 โดย ♦ คือ *G''* และ ◇ คือ *G'* ของ WCS และ ● คือ *G''* และ ○ คือ *G'* ของ WCS:H



รูปที่ 4.7 สมบัติทางวิสโคอีลาสติกของเจลของสารผสมระหว่างสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียว (WCS) กับเฮมิเซลลูโลส (H) ที่ได้จากรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในสัดส่วน WCS:H ที่ระดับ 8:2 และ 6:4 โดย ♦ คือ tan δ ของ WCS, ■ คือ tan δ ของ WCS:H1, ▲ คือ tan δ ของ WCS:H2 และ ● คือ tan δ ของ WCS:H3



รูปที่ 4.8 สมบัติทางวิสโคอีลาสติกของเจลผสมระหว่างสตาร์ชข้าวโพด (CS) กับเฮมิเซลลูโลส (H) ที่ได้จากรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในสัดส่วน CS:H ที่ระดับ 8:2 และ 6:4 โดย ♦ คือ *G''* และ ◇ คือ *G'* ของ CS และ ● คือ *G''* และ ○ คือ *G'* ของ CS:H



รูปที่ 4.9 สมบัติทางวิสโคอีลาสติกของเจลของสารผสมระหว่างสตาร์ชข้าวโพด (CS) กับเฮมิเซลลูโลส (H) ที่ได้จากรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในสัดส่วน CS:H ที่ระดับ 8:2 และ 6:4 โดย ♦ คือ tan δ ของ CS, ■ คือ tan δ ของ CS:H1, ▲ คือ tan δ ของ CS:H2 และ ● คือ tan δ ของ CS:H3

4.8 อิทธิพลของเฮมิเซลลูโลสจากรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 ต่อสมบัติทางความร้อนของสตาร์ชข้าวโพด

4.8.1 อิทธิพลของเฮมิเซลลูโลสต่อสมบัติทางความร้อนในการเกิดเจลาติไนเซชันของสตาร์ชข้าวโพด

จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนของสารผสมระหว่างสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียว (WCS) กับเฮมิเซลลูโลส ด้วยเครื่อง DSC ที่ช่วงอุณหภูมิ 25-95 องศาเซลเซียส ในสัดส่วน WCS:H ที่ระดับ 10:0 9:1 8:2 7:3 และ 6:4 พบว่าการเติม เฮมิเซลลูโลส ทำให้อุณหภูมิเริ่มต้น (onset temperature, To) อุณหภูมิที่จุดสูงสุด (peak temperature, Tp) และอุณหภูมิสุดท้าย (conclusion temperature, Tc) ของการหลอมละลายโครงสร้างผลึกแอมิโลเพกทินสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แสดงใน**ตารางที่ 4.9** ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเมื่อมีเฮมิเซลลูโลสจะทำให้ในระบบมีความหนืดเริ่มต้น (initial viscosity; IV) สูงขึ้นดังได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 4.6 (**ตารางที่ 4.7**) ส่งผลให้การเคลื่อนที่อย่างอิสระของโมเลกุลน้ำลดลง การเคลื่อนที่ของโมเลกุลน้ำเข้าสู่เม็ดสตาร์ชทำได้ยากขึ้น อีกทั้งยังทำให้การส่งผ่านความร้อนเกิดได้ช้าลง จากปัจจัยเหล่านี้จึงทำให้การทำลายโครงสร้างผลึกแอมิโลเพกทินเกิดได้ยากกว่าในระบบที่ไม่มีเฮมิเซลลูโลส เช่นเดียวกับที่พบในสตาร์ชที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ชนิดอื่น (Chaisawang and Suphantharika, 2005; Aguirre-Cruz *et al*., 2005) อิทธิพลนี้พบในระบบที่มีการเติม H2 มากกว่า H3 และ H1 ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก H2 มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักสูงกว่า จึงทำให้มี IV สูงกว่าใน H3 และ H1 การขัดขวางการทำลายโครงสร้างผลึกแอมิโลเพกทินจึงเกิดได้มากกว่า และพบอิทธิพลนี้มากขึ้นเมื่อปริมาณเฮมิเซลลูโลสเพิ่มขึ้น ผลการศึกษาอิทธิพลต่อของเฮมิเซลลูโลสต่อสมบัติการเกิดเจลาติไนเซชันของสตาร์ชข้าวโพด (CS) แสดงดัง**ตารางที่ 4.10** โดยพบอิทธิพลของเฮมิเซลลูโลสต่อ To Tp และ Tc เช่นเดียวกับที่พบในสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียว

ตารางที่ 4.9 อิทธิพลของเฮมิเซลลูโลสต่อสมบัติทางความร้อนในการเกิดเจลาติไนเซชันของสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียว*

สัดส่วน WCS:H		ปริมาณสตาร์ช (%)	การสลายโครงสร้างผลึกแอมิโลเพกทิน				
			To (°C)	Tp (°C)	Tc (°C)	Tc-To (°C)	ΔH1 (J/g)
WCS***	10:0	20	67.25j** ±0.03	73.28i ± 0.04	78.56l ±0.12	11.31f ± 0.11	14.36a ±0.05
WCS:H1***	9:1	18	68.77i ±0.27	74.71h ± 0.32	79.90k ±0.53	11.13g ± 0.26	14.23b ±0.03
	8:2	16	70.61g ±0.18	76.21f ± 0.18	81.76i ±0.10	11.15g ± 0.08	14.14c ±0.03
	7:3	14	71.79d ±0.03	77.59d ± 0.08	83.41f ±0.40	11.63cd ± 0.03	14.04d ±0.12
	6:4	12	72.43c ±0.16	78.41c ± 0.07	83.88e ±0.09	11.45ef ± 0.08	14.00ef ±0.03
	0:10	0			ไม่พบ		
WCS:H2***	9:1	18	71.11e ±0.27	76.63e ± 0.04	82.72g ±0.04	11.60cd ± 0.06	14.16bc ±0.04
	8:2	16	72.36c ±0.02	78.32c ± 0.00	84.25d ±0.01	11.89b ± 0.03	14.14c ±0.03
	7:3	14	73.26b ±0.05	79.03b ± 0.00	84.76b ±0.22	11.50de ± 0.17	14.02de ±0.02
	6:4	12	73.71a ±0.04	79.38a ± 0.04	85.57a ±0.23	11.86c ± 0.21	13.93g ±0.06
	0:10	0			ไม่พบ		
WCS:H3***	9:1	18	70.06h ±0.12	75.66g ± 0.14	80.87j ±0.20	11.18h ± 0.37	14.17bc ±0.01
	8:2	16	70.93f ±0.04	76.60e ± 0.00	82.36h ±0.02	11.49ef ± 0.32	14.14c ±0.04
	7:3	14	71.68d ±0.07	77.59d ± 0.05	83.71e ±0.03	11.72b ± 0.25	14.04d ±0.03
	6:4	12	72.35c ±0.19	78.43c ± 0.22	84.52c ±0.05	11.83a ± 0.36	13.94g ±0.07
	0:10	0			ไม่พบ		

* ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

** ตัวอักษรหลังค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง ค่าเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

*** WCS คือ สตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียว

H1 คือ เฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยน้ำร้อนจากรำข้าวขาวดอกมะลิ 105

H2 คือ เฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยสารละลายด่างจากรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 แล้วแยกด้วย DEAE-52-cellulose chromatography โดยใช้ 0.005M formic acid เป็นสารชะ

H3 คือ เฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยสารละลายด่างจากรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 แล้วแยกด้วย DEAE-52-cellulose chromatography โดยใช้ 1 M formic acid เป็นสารชะ

ตารางที่ 4.10 อิทธิพลของเฮมิเซลลูโลสต่อสมบัติทางความร้อนในการเกิดเจลาติไนเซชันของสตาร์ชข้าวโพด*

สัดส่วน CS:H		ปริมาณสตาร์ช (%)	การสลายโครงสร้างผลึกแอมิโลเพกทิน				
			To (ºC)	Tp (ºC)	Tc (ºC)	Tc-To (ºC)	ΔH1 (J/g)
CS***	10:0	20	72.32k** ± 0.04	76.61j ± 0.05	81.61j ± 0.15	9.29b ± 0.18	13.17a ± 0.08
CS:H1***	9:1	18	73.57j ± 0.08	77.87i ± 0.10	82.128i ± 0.08	8.55f ± 0.01	12.82b ± 0.07
	8:2	16	74.54i ± 0.07	78.80h ± 0.00	83.00h ± 0.05	8.46f ± 0.02	12.66c ± 0.03
	7:3	14	76.55e ± 0.08	80.74d ± 0.04	85.10e ± 0.28	8.55def ± 0.2	12.49e ± 0.07
	6:4	12	77.64c ± 0.12	81.98b ± 0.20	86.19c ± 0.37	8.56f ± 0.49	12.29g ± 0.07
	0:10	0			ไม่พบ		
CS:H2***	9:1	18	76.00g ± 0.03	80.13f ± 0.00	84.66f ± 0.12	8.66ef ± 0.09	12.79b ± 0.06
	8:2	16	77.14d ± 0.09	81.28c ± 0.14	85.82d ± 0.43	8.68ef ± 0.33	12.58d ± 0.04
	7:3	14	77.78b ± 0.15	82.00b ± 0.27	86.83b ± 0.27	9.05bc ± 0.42	12.38f ± 0.03
	6:4	12	78.64a ± 0.02	82.84a ± 0.03	87.58a ± 0.07	8.94cd ± 0.08	12.17h ± 0.05
	0:10	0			ไม่พบ		
CS:H3***	9:1	18	74.58i ± 0.02	78.77h ± 0.00	82.98h ± 0.03	8.40f ± 0.04	12.80b ± 0
	8:2	16	75.75h ± 0.19	79.84g ± 0.26	84.29g ± 0.31	8.53f ± 0.12	12.64cd ± 0.04
	7:3	14	76.40f ± 0.15	80.55e ± 0.16	85.25e ± 0.39	8.85cde ± 0.25	12.47e ± 0.04
	6:4	12	77.20d ± 0.09	81.57c ± 0.11	86.55c ± 0.25	9.34a ± 0.34	12.22gh ± 0.04
	0:10	0			ไม่พบ		

* ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

** ตัวอักษรหลังค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง ค่าเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

*** CS คือ สตาร์ชข้าวโพด

H1 คือ เฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยน้ำร้อน

H2 คือ เฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยสารละลายด่างแล้วแยกด้วย DEAE-52-cellulose chromatography โดยใช้ 0.005M กรดฟอร์มิกเป็นสารชะ

H3 คือ เฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยสารละลายด่างแล้วแยกด้วย DEAE-52-cellulose chromatography โดยใช้ 1 M กรดฟอร์มิกเป็นสารชะ

พลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาติไนเซชัน (enthalpy of gelatinization, ΔH_1) เป็นค่าที่ใช้บ่งบอกถึงพลังงานรวมที่ใช้ในการทำลายพันธะไฮโดรเจนของผลึกแอมิโลเพกทิน จากการศึกษาอิทธิพลของเฮมิเซลลูโลสต่อการเกิดเจลาติไนเซชันของสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียว (**ตารางที่** 4.9) พบว่าค่า ΔH_1 ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ทั้งนี้อาจจะด้วยเหตุผลเดียวกันกับที่กล่าวไว้แล้วว่าในระบบที่มีเฮมิเซลลูโลส ระบบจะมีความหนืดมากขึ้น ทำให้การเคลื่อนที่ของน้ำเข้าสู่เม็ดสตาร์ชเกิดได้น้อยลง และการส่งผ่านความร้อนลดลง ทำให้การทำลายผลึกแอมิโลเพกทินเกิดยากขึ้นและน้อยลง หรือการเกิดเจลาติไนเซชันเกิดได้ไม่สมบูรณ์ ซึ่งการลดลงของ ΔH_1 นี้ พบได้ในการศึกษาสมบัติทางความร้อนของสตาร์ชเมื่อมีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ (Satrapai and Suphantharika, 2007; Temsiripong, Pongsawatmanit, Ikeda and Nishinari, 2005) โดยใน H2 จะมีอิทธิพลต่อค่า ΔH_1 มากกว่า H3 และ H1 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับอิทธิพลต่อค่า To Tp และ Tc ที่ได้กล่าวไว้แล้ว และอิทธิพลนี้จะมีมากขึ้นเมื่อมีการเติมเฮมิเซลลูโลสในปริมาณที่มากขึ้น

การมีเฮมิเซลลูโลสในระบบยังทำให้ช่วงอุณหภูมิของการเกิดเจลาติไนเซชัน (Tc-To) ของสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียวลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (**ตารางที่** 4.9) ซึ่งผลที่ได้นี้สอดคล้องกับการลดลงของค่า ΔH_1 ที่แสดงว่าเกิดการเจลาติไนเซชันได้ไม่สมบูรณ์

จากการศึกษาอิทธิพลของเฮมิเซลลูโลสต่อการเกิดเจลาติไนเซชันของสตาร์ชข้าวโพด (CS) ให้ผลในแนวโน้มเดียวกับที่เกิดในระบบสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียว (WCS) แต่อิทธิพลของเฮมิเซลลูโลสต่อค่า ΔH_1 มีมากกว่าในระบบ WCS สอดคล้องกับงานวิจัยของ Khanna และ Tester (2006) ที่ศึกษาอิทธิพลของคอนแจกกลูโคแมนแนน (purified konjac glucomannan; PKG) ต่อการเกิดเจลาติไนเซชันของสตาร์ชข้าวโพด โดยให้เหตุผลว่าการลดลงของ ΔH_1 มีความสัมพันธ์กับการลดลงของกำลังการพองตัวของสตาร์ชข้าวโพดที่มีปริมาณแอมิโลสสูง
เช่นเดียวกับที่พบในงานวิจัยนี้ โดยเมื่อพิจารณาจากค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity; PV) ที่ได้จากการศึกษาสมบัติทางความหนืด (**ตารางที่** 4.8) ซึ่งสัมพันธ์กับการพองตัวของเม็ดสตาร์ชพบว่าค่า PV ลดลง หรือสตาร์ชข้าวโพดเกิดการพองตัวลดลงนั่นเอง นอกจากนี้ในระหว่างการพองตัวของเม็ดสตาร์ช โมเลกุลของแอมิโลสจะหลุดออกมาก่อนการแตกสลายของเม็ดสตาร์ช เป็นไป

ได้ว่าแอมิโลสที่หลุดออกมานี้จะยิ่งทำให้ระบบมีความหนืดสูงขึ้นอีก และเป็นไปได้อีกว่าแอมิโลสเกิดการเกี่ยวพันกับเฮมิเซลลูโลสแล้วอุ้มน้ำไว้ในโครงสร้างเพิ่มขึ้น โมเลกุลน้ำอิสระที่เคลื่อนที่ได้ในระบบจึงน้อยลงกว่าในระบบที่ไม่มีแอมิโลส

4.8.2 อิทธิพลของเฮมิเซลลูโลสต่อสมบัติทางความร้อนในการเกิดรีโทรเกรเดชัน

ภายหลังจากการเก็บเจลผสมระหว่างสตาร์ชและเฮมิเซลลูโลสที่อุณหภูมิ 4 $^{\circ}$C เป็นเวลา 14 วัน แล้วนำมาวิเคราะห์ซ้ำด้วย DSC เพื่อศึกษาการเกิดรีโทรเกรเดชันในสตาร์ชข้าวโพด ข้าวเหนียว แสดงใน**ตารางที่ 4.11** พบว่าการเติมเฮมิเซลลูโลส ทำให้ค่า To Tp และ Tc เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) และจะสูงขึ้นเมื่อมีปริมาณเฮมิเซลลูโลสมากขึ้น แสดงว่าในระบบที่มีการเติมเฮมิเซลลูโลส การทำลายโครงสร้างที่จัดเรียงตัวใหม่ของสตาร์ชภายหลังการเกิดเจลาติไนเซชันจะต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่าไม่มีการเติมเฮมิเซลลูโลส สอดคล้องกับงานวิจัยของ Yohimura และคณะ (1999) และงานวิจัยของ Banchathanakij and Suphantharika (2009) ที่ศึกษาในระบบที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ในระบบของสตาร์ช ซึ่งสาเหตุที่เป็นเช่นนี้น่าจะเป็นเหตุผลเดียวกับที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 4.6.1 คือระบบที่มีเฮมิเซลลูโลสจะมีปริมาณน้ำอิสระลดลงจึงส่งผลให้มีน้ำน้อยลง และต้องการความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้นในการทำลายโครงสร้าง โดยอิทธิพลของเฮมิเซลลูโลสต่อ To Tp และ Tc ก็พบในแนวโน้มเดียวกันกับระบบของสตาร์ชข้าวโพด

เมื่อพิจารณาปริมาณการเกิดรีโทรเกรเดชันของแอมิโลเพกทินจากค่า $\Delta H_2/\Delta H_1$ จะพบว่าในระบบที่มีเฮมิเซลลูโลส ค่า $\Delta H_2/\Delta H_1$ จะลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ($p \leq 0.05$) และจะลดลงมากขึ้น เมื่อมีปริมาณเฮมิเซลลูโลสที่มากขึ้น การที่ค่า $\Delta H_2/\Delta H_1$ มีค่าลดลง แสดงให้เห็นว่าแอมิโลเพกตินเกิดรีโทรเกรเดชันได้น้อยลง ซึ่งน่าจะเกิดจากการที่มีเฮมิเซลลูโลสไปขัดขวางการรวมตัวเป็นผลึกใหม่ของแอมิโลเพกทิน โดยอิทธิพลนี้จะพบในระดับที่มากขึ้นเมื่ออยู่ในระบบสตาร์ชข้าวโพด (CS) **(ตารางที่ 4.12)** ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากในระบบมีทั้งเฮมิเซลลูโลสและแอมิโลสที่สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างกัน แล้วไปขัดขวางการจัดเรียงตัวใหม่ของแอมิโลเพกทินได้

จากผลการทดลองในสตาร์ชทั้งสองชนิด พบว่า H2 และ H3 มีแนวโน้มที่จะไปขัดขวางการเกิดรีโทรเกรเดชันของแอมิโลเพกทินมากกว่า H1 ซึ่งแนวโน้มนี้ตรงข้ามกับการขัดขวางการเกิดรีโทรเกรเดชันของแอมิโลสด้วยเฮมิเซลลูโลสที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.6 และ 4.7 คือ H1 จะขัดขวาง

การเกิดรีโทรเกรเดชันของแอมิโลสได้มากที่สุด H1 และ H2 มีโครงสร้างที่ค่อนข้างแตกต่างกันอย่างชัดเจน คือ H1 มีขนาดเล็กกว่าและมีความเป็นกิ่งก้านมากกว่า H2 ดังนั้นการขัดขวางการเกิดรีโทรเกรเดชันของแอมิโลสและแอมิโลเพกตินของเฮมิเซลลูโลส จึงเป็นกระบวนการที่ขึ้นอยู่กับลักษณะทางโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส

ตารางที่ 4.11 อิทธิพลของเฮมิเซลลูโลสต่อสมบัติทางความร้อนในการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียว*

สัดส่วน WCS:H		ปริมาณสตาร์ช (%)	การสลายโครงสร้างผลึกแอมิโลเพกทินที่เกิดจากรีโทรเกรเดชัน To (°C)	Tp (°C)	Tc (°C)	Tc-To (°C)	ΔH2 (J/g)	ΔH2/ΔH1
WCS***	10:0	20	44.50i** ± 0.29	56.54e ± 0.40	64.64g ± 0.31	20.13a ± 0.07	5.84a ± 0.41	0.40a ± 0.03
WCS:H1***	9:1	18	46.23h ± 0.15	57.10de ± 0.04	64.86fg ± 0.03	18.63b ± 0.12	4.94b ± 0.29	0.35b ± 0.02
	8:2	16	47.24f ± 0.15	58.41bc ± 0.19	65.31abcd ± 0.19	18.07c ± 0.34	4.70c ± 0.10	0.33bcd ± 0.01
	7:3	14	48.27de ± 0.11	58.42bc ± 0.09	65.08def ± 0.37	16.81ef ± 0.26	4.64ef ± 0.31	0.33bcd ± 0.02
	6:4	12	50.12a ± 0.55	59.23a ± 0.21	65.14cde ± 0.14	15.02e ± 0.69	4.46h ± 0.42	0.32cd ± 0.03
	0:10	0			ไม่พบ			
WCS:H2***	9:1	18	46.65gh ± 1.12	57.68cd ± 0.73	65.50a ± 0.02	18.86b ± 1.1	4.69b ± 0.06	0.33bcd ± 0.00
	8:2	16	48.59cd ± 0.09	58.45bc ± 0.13	65.37abc ± 0.07	16.78ef ± 0.02	4.69ef ± 0.23	0.33bcd ± 0.02
	7:3	14	49.09bc ± 0.02	58.80ab ± 0.12	65.30abcd ± 0.10	16.2g ± 0.11	4.57g ± 0.59	0.33bcd ± 0.04
	6:4	12	49.19b ± 0.56	58.55ab ± 0.03	65.51a ± 0.19	16.32fg ± 0.75	3.87fg ± 0.19	0.28e ± 0.01
	0:10	0			ไม่พบ			
WCS:H3***	9:1	18	47.05fg ± 0.5	56.96de ± 0.01	64.66g ± 0.15	17.61cd ± 0.07	4.93cd ± 0.13	0.35b ± 0.01
	8:2	16	47.81e ± 0.71	58.25bc ± 0.22	65.00ef ± 0.15	17.2de ± 0.56	4.73de ± 0.15	0.33bc ± 0.01
	7:3	14	48.74bcd ± 0.03	58.43bc ± 0.14	65.40ab ± 0.04	16.67efg ± 0.07	4.62efg ± 0.05	0.33bcd ± 0.00
	6:4	12	48.57cd ± 0.48	58.29bc ± 0.19	65.20bcde ± 0.19	16.63efg ± 0.29	4.28efg ± 0.36	0.31d ± 0.01
	0:10	0			ไม่พบ			

* ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

** ตัวอักษรหลังค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง ค่าเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

*** WCS คือ สตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียว

H1 คือ เฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยน้ำร้อน

H2 คือ เฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยสารละลายด่างแล้วแยกด้วย DEAE-52-cellulose chromatography โดยใช้ 0.005M formic acid เป็นสารชะ

H3 คือ เฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยสารละลายด่างแล้วแยกด้วย DEAE-52-cellulose chromatography โดยใช้ 1 M formic acid เป็นสารชะ

ตารางที่ 4.12 อิทธิพลของเฮมิเซลลูโลสต่อสมบัติทางความร้อนในการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชข้าวโพด*

สัดส่วน WCS:H		ปริมาณสตาร์ช	การสลายโครงสร้างผลึกแอมิโลเพกทินที่เกิดจากรีโทรเกรเดชัน					ΔH2/ΔH1
			To (ºC)	Tp (ºC)	Tc (ºC)	Tc-To (ºC)	ΔH2 (J/g)	
CS***	10:0	20	46.72f** ± 0.10	56.98e ± 0.04	65.60cd ± 0.07	18.88b ± 0.16	5.72a ± 0.64	0.43a ± 0.05
CS:H1***	9:1	18	47.64e ± 0.25	57.50d ± 0.23	65.56de ± 0.12	17.92c ± 0.37	5.18b ± 0.41	0.41ab ± 0.03
	8:2	16	48.59bc ± 0.15	58.13bc ± 0.27	65.44ef ± 0.03	16.85def ± 0.13	4.41c ± 0.17	0.34cd ± 0.13
	7:3	14	49.17b ± 0.15	58.31b ± 0.08	65.73c ± 0.07	16.56ef ± 0.21	3.72de ± 0.37	0.29ef ± 0.03
	6:4	12	49.82a ± 0.04	58.91a ± 0.36	66.16ab ± 0.13	16.35f ± 0.1	3.04f ± 0.13	0.25g ± 0.11
	0:10	0	ไม่พบ					
CS:H2***	9:1	18	47.80de ± 0.11	57.79cd ± 0.51	65.60cd ± 0.08	17.80c ± 0.10	4.94b ± 0.30	0.39bc ± 0.02
	8:2	16	48.32cd ± 0.14	58.46b ± 0.09	66.07b ± 0.03	17.74c ± 0.13	3.82de ± 0.03	0.30ef ± 0.00
	7:3	14	48.85bc ± 0.13	58.12bc ± 0.51	66.26a ± 0.20	17.40cd ± 0.13	3.36df ± 0.03	0.27fg ± 0.00
	6:4	12	48.36cd ± 0.39	58.48b ± 0.04	65.41f ± 0.17	17.05de ± 0.3	3.09f ± 0.82	0.25g ± 0.07
	0:10	0	ไม่พบ					
CS:H3***	9:1	18	45.09g ± 0.12	56.34f ± 0.42	65.67cd ± 0.11	20.58a ± 0.16	4.96b ± 0.11	0.39bc ± 0.01
	8:2	16	46.51f ± 0.09	57.01e ± 0.14	65.34f ± 0.13	18.83b ± 0.041	4.05cd ± 0.05	0.32de ± 0.00
	7:3	14	47.43e ± 0.59	56.72ef ± 0.09	66.04b ± 0.07	18.62b ± 0.53	3.69de ± 0.44	0.29ef ± 0.03
	6:4	12	48.69bc ± 0.13	57.74cd ± 0.94	66.04b ± 0.16	17.35cd ± 0.15	3.10f ± 0.17	0.25g ± 0.01
	0:10	0	ไม่พบ					

* ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

** ตัวอักษรหลังค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง ค่าเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

*** CS คือ สตาร์ชข้าวโพด

H1 คือ เฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยน้ำร้อน

H2 คือ เฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยสารละลายด่างแล้วแยกด้วย DEAE-52-cellulose chromatography โดยใช้ 0.005M formic acid เป็นสารชะ

H3 คือ เฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยสารละลายด่างแล้วแยกด้วย DEAE-52-cellulose chromatography โดยใช้ 1 M formic acid เป็นสารชะ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

เฮมิเซลลูโลสที่สกัดได้จากรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 แล้วนำมาแยกด้วยวิธีการไดอะไลซิส จะมีสมบัติด้านการละลายดีกว่าที่ตกตะกอนด้วยเอทานอล เนื่องจากเป็นวิธีทางกายภาพ และไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและสมบัติของเฮมิเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยน้ำร้อน (H1) มีปริมาณผลผลิตสุทธิน้อย มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก ($\overline{M}_w$) ค่อนข้างต่ำ มีน้ำตาลกลูโคสเป็นองค์ประกอบหลัก รองลงมา คือ อะราบิโนส กาแลกโตส แมนโนส ไซโลส และแรมโนส ตามลำดับ และพบปริมาณน้ำตาลที่เป็นกรดในปริมาณมาก จึงน่าจะมีโครงสร้างเป็นอัลฟาหรือเบต้ากลูแคน (α/β-glucan) กาแลกโตอะราบิโนไซแลน (galactoarabinoxylan) และแมนแนน (mannan) ที่มีโครงสร้างโมเลกุลสายสั้น มีความเป็นกิ่งและมีขั้วมาก นอกจากนี้ H1 อาจจะมีเพกทินปนอยู่ด้วย เฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยสารละลายด่างจะมีปริมาณผลผลิตสุทธิมาก เมื่อนำมาแยกด้วย DEAE-52-cellulose chromatography ตามความมีขั้ว เฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยสารละลายด่างที่มีขั้วต่ำ (ชะด้วย 0.005M formic acid; H2) มีปริมาณผลผลิตสุทธิน้อยกว่าที่มีขั้วสูง (ชะด้วย 1M formic acid; H3) H2 และ H3 มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก ($\overline{M}_w$) สูงกว่า H1 โดย H2 จะมี $\overline{M}_w$ สูงกว่า H3 ทั้ง H2 และ H3 มีปริมาณน้ำตาลอะราบิโนสและไซโลสเป็นองค์ประกอบหลัก แต่ H3 มีอัตราส่วนของน้ำตาลอะราบิโนสต่อไซโลสสูงกว่า H2 H3 จึงน่าจะมีโครงสร้างเป็นอะราบิโนไซแลนที่มีกิ่งก้านมากกว่า H2

การเติมเฮมิเซลลูโลสทั้งสาม (H1, H2 และ H3) ส่งผลต่อสมบัติของสตาร์ชในระหว่างการเกิดเจลาติไนเซชันและรีโทรเกรเดชันในทิศทางเดียวกัน แต่ส่งผลในระดับที่ต่างกัน เนื่องจากความแตกต่างทางด้านน้ำหนักโมเลกุล ความมีกิ่งก้าน และความมีขั้วของเฮมิเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ทำให้ระบบมีความหนืดสูงขึ้น ซึ่งการเคลื่อนที่ของโมเลกุลน้ำอิสระเข้าสู่เม็ดสตาร์ชลดลงมากกว่าเฮมิเซลลูโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ส่งผลให้อุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดและอุณหภูมิเริ่มต้นของการทำลายผลึกแอมิโลเพกทินสูงขึ้น แต่ในระหว่างการพองตัว เฮมิเซลลูโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำอาจถูกดูดซับหรือเคลือบอยู่บริเวณผิวของเม็ดสตาร์ชได้ดีกว่าเฮมิเซลลูโลสที่มี

น้ำหนักโมเลกุลสูง การพองตัวและการหลุดออกของโมเลกุลในเม็ดสตาร์ชจึงถูกจำกัดมากกว่า ช่วงเริ่มต้นของการจัดเรียงตัวใหม่ของโมเลกุลสตาร์ช เฮมิเซลลูโลสที่โครงสร้างมีความเป็นสายกิ่งมากจะขัดขวางการจัดเรียงตัวใหม่ของแอมิโลสเกิดเป็นเจลที่มีสมบัติทางวิสโคอีลาสติกที่คล้ายของเหลวมากกว่าของแข็ง ในทางกลับกันการเก็บเจลผสมในระบบที่มีความหนืดสูงจากการเติมเฮมิเซลลูโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง จะขัดขวางการจัดเรียงตัวใหม่ของแอมิโลเพกทินได้มากกว่าเนื่องจากการเคลื่อนที่เพื่อสร้างโครงสร้างใหม่เกิดได้ยากกว่าในระบบที่มีความหนืดต่ำ และในระบบที่มีการเติมเฮมิเซลลูโลสในปริมาณที่สูงขึ้น จะพบอิทธิพลนี้มากขึ้นด้วย นอกจากนี้ชนิดของสตาร์ชส่งผลให้อิทธิพลที่พบจากการเติมเฮมิเซลลูโลสแตกต่างกัน สตาร์ชที่มีปริมาณแอมิโลสสูง (normal corn starch; CS) จะพบอิทธิพลนี้มากกว่าสตาร์ชที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำ (waxy corn starch; WCS) แอมิโลสจึงน่าจะมีผลต่ออิทธิพลที่เกิดขึ้นจากเฮมิเซลลูโลสทั้งในระหว่างการเกิดเจลาติไนเซชันและการเกิดรีโทรเกรเดชัน

จากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าเฮมิเซลลูโลสที่สกัดและแยกด้วยวิธีการต่างกัน จะมีความแตกต่างกันทั้งชนิดของน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบ ชนิดของเฮมิเซลลูโลส โครงสร้าง ความเป็นกิ่งก้าน และความมีขั้ว ซึ่งส่งผลต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของเฮมิเซลลูโลส ดังจะเห็นได้จากอิทธิพลต่อการเกิดเจลาติไนเซชันและรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชในระดับที่ต่างกัน นอกจากนี้ปริมาณเฮมิเซลลูโลสที่เติมให้ระบบ และสัดส่วนของแอมิโลสและแอมิโลเพกทิน ส่งผลให้อิทธิพลที่พบจากการเติมเฮมิเซลลูโลสนี้ เกิดขึ้นในระดับที่ต่างกันด้วย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

การข้าว, กรม. 2554. สถานการณ์การผลิตและการตลาดข้าวของโลก ปี 2554/2555 [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.ricethailand.go.th/rice%20web/Rice%20Situation/data/54-55/May11.pdf [2 มีนาคม 2555]

กล้าณรงค์ ศรีรอต และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ. 2543. เทคโนโลยีแป้ง. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์,

จิรารัตน์ ทัตติยกุล. 2554. วิทยากระแสของอาหาร. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

นิธิยา รัตนาปนนท์. 2549. เคมีอาหาร. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์.

วันเพ็ญ แสงทองพินิจ. 2554. การวิเคราะห์คาร์โบโฮเดรตด้วย High Performance Anion Exchange Chromatography with Pulsed Amperometric Detection (HPAEC-PAD). วิทยาศาสตร์ 2 (สิงหาคม): 69-76.

วิวัฒน์ หวังเจริญ. 2548. เรื่องของใยอาหาร. วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 18 (กรกฎาคม-กันยายน): 55-62.

สมวงษ์ ตระกูลรุ่ง. 2554. ข้าวโภชนาการเพื่อสุขภาพและการใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรม [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.n2n-inter.com/education/rice6.htm [2 มีนาคม 2555]

สิริลักษณ์ พวงประยงค์. 2548. การศึกษาไฮโดรคอลลอยด์ต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของฟลาว, สตาร์ชและอายุการเก็บของเอกซ์ทรูเดตจากข้าว. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเกษตร ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อรอนงค์ นัยวิกุล. 2547. ข้าว: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์,

ภาษาอังกฤษ

Albersheim, P., Darvill, A., Robert, K., Sederoff, R. and Staehelin, A. 2010. Plant Cell Walls. 1st ed. New york: Garland Science.

Achayuthakan, P. and Suphantharika, M. 2008. Pasting and rheological properties of waxy corn starch as affected by guar gum and xanthan gum. Carbohydrate Polymers 71: 9–17.

Aguirre-Cruz, A., Méndez-Montealvo, G., Solorza-Feria, J. and Bello-Pérez, L. A. 2005. Effect of carboxymethylcellulose and xanthan gum on the thermal, functional and rheological properties of dried nixtamalised maize masa. Carbohydrate Polymers, 62, 222–231.

Association of Official Analytical Chemists (AOAC), 2005. Official Methods of Analysis. Association of Official Analytical Chemists. 17thed. Washington D.C.: AOAC International.

Banchathanakij, R. and Suphantharika, M. 2009. Effect of different β-glucans on the gelatinisation and retrogradation of rice starch. Food Chemistry 114: 5–14.

BeMiller, J. N. 2011. Pasting, paste and gel properties of starch–hydrocolloid combinations. Carbohydrate Polymers, 86: 386-423.

Chaisawang, M. and Suphantharika, M. 2005. Effects of guar gum and xanthan gum additions on physical and rheological properties of cationic tapioca starch. Carbohydrate Polymers 61: 288–295.

Choi, Y. S., Choi, J. H., Han, D. J., Kim, H. Y., Lee, M. A., Kim, H. W., Jeong, J. Y. and Kim, C. J. 2009. Characteristics of low-fat meat emulsion systems with pork fat replaced by vegetable oils and rice bran fiber. Meat Science 82: 266–271.

Choi, Y. S., Choi, J. H., Han,D. J., Kim, H. Y., Lee, M. A., Kim, H. W., Lee, J. W., Chung, H. J. and Kim, C. J. 2010. Optimization of replacing pork back fat with grape seed oil and rice bran fiber for reduced-fat meat emulsion systems. Meat Science 84: 212–218

Christianson, D. D. 1982. Hydrocolloid interactions with starches. in Lineback, D. R., and Inglett, G. E, Food carbohydrates, 399-419. Westport, Conneticut: AVI Publishing Company.

Funami, T., Kataoka, Y., Omoto, T., Goto, Y., Asai, I. and Nishinari, K. 2005. Effects of non-ionic polysaccharides on the gelatinization and retrogradation behavior of wheat starch. Food Hydrocolloids 19: 1–13.

Funami, T., Nakauma, M., Noda, S., Ishihara, S., Asai, I., Inouchi, N., Nishinari, K. 2008a. Effects of some anionic polysaccharides on the gelatinzation and retrogradation behaviors of wheat starch: Soybean-soluble polysaccharide and gum arabic. Food Hydrocolloids 22: 1528–1540.

Funami, T., Kataoka, Y., Noda, S., Hiroe, M., Ishihara, S., Asai, I., Takahashi, R., Nishinari, K. 2008b. Functions of fenugreek gum with various molecular weights on the gelatinization and retrogradation behaviors of corn starch-1: Characterizations of fenugreek gum and investigations of corn starch/fenugreek gum composite system at a relatively high starch concentration; 15 w/v%. Food Hydrocolloids 22:763–776.

Funami, T., Kataoka, Y., Noda, S., Hiroe, M., Ishihara, S., Asai, I., Takahashi, R., Inouchi, N., Nishinari, K. 2008c. Functions of fenugreek gum with various molecular weights on the gelatinization and retrogradation behaviors of corn starch-2: Characterizations of starch and investigations of corn starch/fenugreek gum composite system at a relatively low starch concentration; 5 w/v%. Food Hydrocolloids 22: 777–787.

Furuta, H., Nakamura, A., Ashida, H., Asano, H., Maeda, H. and Mori, T. 2003. Properties of rice cooked with commercial water-soluble soybean polysaccharides extracted under weakly acidic conditions from soybean cotyledons. Bioscience Biotechnology and Biochemistry 67: 677–683

Hamid, A. A. and Luan, Y. S. 2000. Functional properties of dietary fibre prepared from defatted rice bran. Food Chemistry 68: 15-19.

Hu, G., Huang, S., Cao, S. and Ma, Z. 2009. Effect of enrichment with hemicellulose from rice bran on chemical and functional properties of bread. Food Chemistry 115: 839–842

Jane, J. I. 2003. Starch: structure and properties. in P. Tomasik, Chemical and Functional Properties of Food Saccharides. United States: CRC Press, LLC.

Jenkins, P. J., Cameron, R. E., Donald, A. M., Bras, W., Derbyshire, G. E., Mant, G. R., and Ryan, A. J. 1994. In situ simultaneous small and wide angle x-ray scattering: A new technique to study starch gelatinization. Journal of Polymer Science Part B. Polymer Physics 32: 1579-1583.

Khanna, S. and Tester, R. F. 2006. Influence of purified konjac glucomannan on the gelatinization and retrogradation properties of maize and potato starches. Food Hydrocolloids 20: 567–576.

Krawczyk, H., Persson, T., Andersson, A., Jonsson, A.S. 2008. Isolation of hemicelluloses from barley husks, Food Bioprod.Process. 86: 31–36.

Mod, R. R., Conkerton, E. J., Ory, R. L. and Normand, F. L. 1978. Hemicellulose composition of dietary fiber of milled rice and rice bran. Agricultural and Food Chemistry 26: 1031-1035.

Mod,R. R., Conkerton, E. J., Ory, R. L. and Normand, F. L. 1979. Composition of water-soluble hemicelluloses in rice bran from four growing areas. Cereal chemistry 56: 356-358.

Newport scientific. 2007. Rapid visco analyzer series 4 (RVA-4) installation and operation manual. (n.p.).

Okechukwu, P. E. and Rao, M. A. 1998. Rheology of Structure Polysaccharide Food System: Starch and Pectin. In Walter, R. H., Polysaccharide association structure in food, 289-328. New York: Marcel Dekker.

Peng, F., Ren, J. L., Xu, F., Bian, J., Peng, P. and Sun, R.C. 2010. Comparative studies on the physico-chemical properties of hemicelluloses obtained by DEAE-cellulose-52 chromatography from sugarcane bagasse. Food Research International 43: 683-693.

Phillips, G.O. and Williams, P.A. 2000. Handbook of Hydrocolloids. New York: CRC Press.

Popa, V. I. and Spiridon, I. 1998. Hemicelluloses: Structure, Properties. in Dumitriu, S., Polysaccharides Structural Diversity and Functional Versality, 297-311, New York: Marcel Dekker.

Ren, J. L. and Sun, R. C. 2010. Chapter 4 Hemicelluloses. Cereal Straw as a Resource for Sustainable Biomaterials and Biofuels - Chemistry, Extractives, Lignins, Hemicelluloses and Cellulose: 73-130.

Rojas, J. A., Rosell, C. M. and Benedito de Barber, C. 1999. Pasting properties of different wheat flour–hydrocolloid systems. Food Hydrocolloids 13: 27–33.

Roos, A.A., Persson, T., Krawczyk, H., Zacchi, Stalbrand, G. H. 2009. Extraction of water–soluble hemicelluloses from barley husks, Bioresource Technology 100: 763–769.

Rosell, C. M., Yokoyama, W. and Shoemaker, C. 2011. Rheology of different hydrocolloids–rice starch blends. Effect of successive heating–cooling cycles. Carbohydrate Polymers 84: 373–382.

Satrapai, S. and Suphantharika, M. 2007. Influence of spent brewer's yeast β-glucan on gelatinization and retrogradation of rice starch. Carbohydrate Polymers 67: 500–510.

Shi, X. and BeMiller, J. N. 2002. Effects of food gums on viscosities of starch suspensions during pasting. Carbohydrate Polymers 50: 7–18.

Shibuya, N. and Iwasaki, T. 1978. Polysaccharides and glycoproteins in rice endosperm cell wall. Agricultural Biology and Chemistry 42: 2259-2266.

Shibuya, N. and Iwasaki, T. 1985. Structural features of rice bran hemicelluloses. Phytochemistry 24: 285-289.

Song, J.Y., Kwon, J.Y., Choi, J., Kim, Y.C. and Shin, M. 2006. Pasting properties of non-waxy rice starch–hydrocolloid mixtures. Starch/Stärke 58: 223–230.

Sun, J.X., Sun, X.F., Sun, R.C. and Sua Y.Q. 2004. Fractional extraction and structural characterization of sugarcane bagasse hemicelluloses. Carbohydrate Polymers 56: 195–204.

Techawipharat, J., Suphantharika, M. and BeMiller, J. N. 2008. Effects of cellulose derivatives and carrageenans on the pasting, paste, and gel properties of rice starches. Carbohydrate Polymers 73: 417–426.

Temsiripong, T., Pongsawatmanit, R., Ikeda, S. and Nishinari, K. 2005. Influence of xyloglucan on gelatinization and retrogradation of tapioca starch. Food Hydrocolloids 19: 1054–1063.

Tester, R. F. and Sommerville, M. D. 2003. The effects of non-starch polysaccharides on the extent of gelatinisation, swelling and α-amylase hydrolysis of maize and wheat starches. Food Hydrocolloids 17: 41–54.

Wright , W.E. 2008. Statistical evidence for exchange of oxygen isotopes in holocellulose during long-term storage. Chemical Geology 252: 102–108.

Xu, F., Sun, J.X., Geng, Z.C., Liu, C.F., Ren, J.L., Sun, R.C., Fowler, P. and Baird, M.S. 2007. Comparative study of water-soluble and alkali-soluble hemicelluloses from perennial ryegrass leaves (*Lolium peree*). Carbohydrate Polymers 67: 56–65.

Yoshimura, M., Takaya, T. and Nishinari, K. 1999. Effects of xyloglucan on the gelatinization and retrogradation of corn starch as studied by rheology and differential scanning calorimetry. Food Hydrocolloids. 13: 101–111.

Zhong, F., Lia, L., Ibánez, A. M., Oh, M.H., McKenzie, K.S. and Shoemaker, C. 2009. The effect of rice variety and starch isolation method on the pasting and rheological properties of rice starch pastes. Food Hydrocolloids 23: 406–414.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

วิธีการวิเคราะห์

ก.1 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น ตามวิธี AOAC (2005) section 32.1.03

อุปกรณ์

1. ตู้อบลมร้อน (Mammert รุ่น W350, Germany)
2. ถ้วยอลูมิเนียมมีฝาปิด
3. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง
4. โถดูดความชื้น (dessiccator)
5. คีมคีบ (tongs)

วิธีการทดลอง

1. อบถ้วยอลูมิเนียมในตู้อบลมร้อนอุณหภูมิ 105 ± 3 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ใส่ในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนัก

2. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างประมาณ 2 กรัม (บันทึกน้ำหนักตัวอย่างที่แน่นอน) ใส่ลงในถ้วยอลูมิเนียม

3. นำตัวอย่างเข้าอบในตู้อบลมร้อนอุณหภูมิ 105 ± 3 องศาเซลเซียส โดยเปิดฝาไว้เป็นเวลา 6 ชั่วโมงหรือจนน้ำหนักคงที่

4. ปิดฝาถ้วยอลูมิเนียม ใส่ในโถดูดความชื้น แล้วชั่งน้ำหนัก

5. คำนวณหาความชื้นจากสมการ

$$\text{ปริมาณความชื้น (\%)} = \frac{(\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ})}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ}} \times 100$$

ก.2 การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน ตามวิธี AOAC (2005) section 32.1.22

อุปกรณ์

1. Buchi digestion unit (รุ่น K-424, Switzerland)
2. Buchi scrubber (รุ่น B-414, Switzerland)
3. เครื่องกลั่นหาปริมาณไนโตรเจน (VELP scientific รุ่น UDK 127, USA)
4. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง
5. ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร

สารเคมี

1. กรดซัลฟิวริกเข้มข้น (A.R. grade)
2. สารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ (A.R. grade) ความเข้มข้น 0.1M
3. สารละลายมาตรฐานไฮโดรคลอริก (A.R. grade) ความเข้มข้น 0.5M
4. สารละลายกรดบอริก (A.R. grade) ความเข้มข้น 14% (w/w)
5. สารเร่งปฏิกิริยา (selenium reagent mixture) (A.R. grade)
6. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (A.R. grade) ความเข้มข้น 45% (w/v)
7. สารละลายอินดิเคเตอร์ เตรียมโดยการละลายเมธิลเรด 1 กรัม ในเมทานอล 100 มิลลิลิตร

วิธีการทดลอง

1. ชั่งตัวอย่างให้มีน้ำหนักประมาณ 0.25-1 กรัม (บันทึกน้ำหนักที่แน่นอน) ห่อด้วยกระดาษกรอง Whatman No.1 ใส่ใน หลอดย่อย (Kjeidahl tube)

2. เติมสารเร่งปฏิกิริยาประมาณ 5 กรัม และกรดซัลฟิวริกเข้มข้นปริมาตร 20 มิลลิลิตร

3. นำไปหลอดย่อยไปย่อยด้วยเครื่อง Buchi digestion unit ที่ต่อเข้ากับเครื่องดูดไอกรด (scrubber) ใช้ความร้อนเบอร์ 8 จนสารในหลอดย่อยกลายเป็นสีน้ำตาลใส ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

4. เทสารละลายบอริกปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วหยดสารละลายอินดิเคเตอร์ 2-3 หยด ต่อเข้ากับปลาย condenser ของเครื่องกลั่น (distillation unit)

5. นำหลอดย่อยที่ผ่านการย่อยแล้ว ต่อเข้ากับเครื่องกลั่น แล้วนำสายสีดำของเครื่องกลั่นจุ่มลงในภาชนะบรรจุน้ำกลั่น ส่วนสายสีขาวจุ่มลงในภาชนะที่บรรจุสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ แล้วตั้งโปรแกรม distillation โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 70 มิลลิลิตร เวลา 8 นาทีในการกลั่น

6. ในระหว่างการกลั่นจะเกิดแอมโมเนีย ซึ่งจะถูกจับไว้ด้วยสารละลายบอริกในขวดรูปชมพู่ เมื่อครบเวลาการกลั่นจะได้สารละลายสีเขียว

7. นำสารละลายที่กลั่นได้ในขวดรูปชมพู่มาไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐานกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.5M จนถึงจุดยุติ (end point) จนได้เป็นสีม่วงแดง

8. ทำ blank โดยใช้น้ำกลั่นปริมาตร 2 มิลลิลิตร แทนตัวอย่าง แล้ววิเคราะห์เช่นเดียวกับตัวอย่าง

9. คำนวณหาปริมาณโปรตีน

$$\text{ปริมาณไนโตรเจน (\%)} = \frac{(V_S - V_B) \times N \times 1.4}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง (กรัม)}}$$

ปริมาณโปรตีน (%) = ปริมาณไนโตรเจน (%) X 5.95

V_S คือ ปริมาตรของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ในการไทเทรตตัวอย่าง

V_B คือ ปริมาตรของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ในการไทเทรต blank

N คือ ความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายไฮโดรคลอริกที่ใช้ในการไทเทรต

ก.3 การวิเคราะห์ปริมาณไขมัน ตามวิธี AOAC (2005) section 32.1.13

อุปกรณ์

1. Soxhlet
2. เครื่อง Evaporator (Eyela รุ่น SB-651, Japan)
3. ขวดก้นกลม
4. thimble
5. ตู้อบลมร้อน (Mammert รุ่น W350, Germany)
6. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง
7. โถดูดความชื้น (dessiccator)
8. คีมคีบ (tongs)

สารเคมี

1. ปิโตรเลียมอีเธอร์ (A.R. grade)

วิธีการทดลอง

1. ชั่งตัวอย่างที่ผ่านการอบแห้งแล้วประมาณ 2 กรัม (บันทึกน้ำหนักที่แน่นอน) ห่อด้วยกระดาษกรอง Whatman No.1 ใส่ลงใน thimble
2. ใส่ thimble ที่มีตัวอย่างในหลอดสกัดที่ต่อเข้ากับ condenser
3. เติมปิโตรเลียมอีเธอร์ 250 มิลลิลิตร ลงในขวดก้นกลมที่ทราบน้ำหนักแน่นอน
4. นำขวดก้นกลมไปต่อเข้ากับหลอดสกัด สกัดไขมันเป็นเวลา 6 ชั่วโมง
5. ระเหยปิโตรเลีมอีเธอร์ออกจากส่วนไขมันที่สกัดได้
6. อบขวดก้นกลมตู้อบลมร้อนอุณหภูมิ 105 ± 3 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ใส่ในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักขวดก้นกลม
7. คำนวณหาปริมาณไขมัน

$$\text{ปริมาณไขมัน (\%)} = \frac{\text{ปริมาณไขมันที่สกัดได้ (กรัม)}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง (กรัม)}} \times 100$$

ก.4 การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า ตามวิธี AOAC (2005) section 32.1.05

อุปกรณ์

1. เตาเผา (Muffle furnace, Fisher Scientific รุ่น Isotemp, USA)
2. ครูซิเบิล (crusible)
3. hot plate (IKA รุ่น C-MAG HS10, Germany)
4. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง
5. โถดูดความชื้น (dessiccator)

วิธีการทดลอง

1. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างประมาณ 3-5 กรัม (บันทึกน้ำหนักที่แน่นอน) ใส่ในครูซิเบิลที่ทราบน้ำหนักแน่นอน
2. นำตัวอย่างไปเผาโดยใช้ hot plate ในตู้ดูดควัน จนตัวอย่างหมดควัน
3. นำตัวอย่างที่หมดควันแล้วไปเผาต่อในเตาเผาที่อุณหภูมิ 550 ± 3 องศาเซลเซียส จนกระทั่งได้เถ้าสีขาว หรือน้ำหนักคงที่
4. นำไปใส่ในโถดูดความชื้น รอจนเย็น แล้วชั่งน้ำหนัก
5. คำนวณหาปริมาณเถ้า

$$\text{ปริมาณเถ้า(\%)} = \frac{\text{ปริมาณตัวอย่างหลังเผา (กรัม)}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง (กรัม)}} \times 100$$

ก.5 การวิเคราะห์ปริมาณเส้นใยหยาบ ตามวิธี AOAC (2005) section 32.1.15

อุปกรณ์

1. ครูซิเบิล
2. ถ้วยอลูมิเนียม
3. ตู้อบลมร้อน (Mammert รุ่น W350, Germany)
4. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง
5. เตาเผา (Muffle furnace, Fisher Scientific รุ่น Isotemp,USA)
6. โถดูดความชื้น (dessiccator)
7. ที่หนีบ (tongs)

สารเคมี

1. สารละลายกรดซัลฟิวริก (A.R. grade) ความเข้มข้น 1.25% (v/v)
2. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (A.R. grade) ความเข้มข้น 1.25% (w/v)
3. เอทานอล 95% (A.R. grade)

วิธีการทดลอง

1. นำตัวอย่างที่ผ่านการสกัดไขมันแล้วใส่ในบีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร

2. เติมสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 1.25% ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ ต้มจนเดือดนาน 30 นาที โดยปรับปริมาตรให้คงที่ด้วยน้ำร้อน

3. กรองตัวอย่างที่ย่อยด้วยกรดซัลฟิวริกแล้ว โดยใช้กรวย Bucher funnel กรองผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 ที่ทราบน้ำหนักแน่นอน โดยใช้ความดันสูญญากาศ 25 มิลลิเมตรปรอท แล้วล้างด้วยน้ำร้อนจนหมดความเป็นกรด ตรวจสอบโดยใช้กระดาษลิตมัส

4. นำตัวอย่างที่เหลือจากการย่อยด้วยกรดซัลฟิวริกมาย่อยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1.25% ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ต้มจนเดือดนาน 30 นาที โดยปรับปริมาตรให้คงที่ด้วยน้ำร้อน

5. กรองตัวอย่างที่ย่อยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์แล้ว โดยใช้กรวย Bucher funnel กรองผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 ที่ทราบน้ำหนักแน่นอน โดยใช้ความดันสูญญากาศ 25 มิลลิเมตรปรอท แล้วล้างด้วยน้ำร้อนจนหมดความเป็นด่าง ตรวจสอบโดยใช้กระดาษลิตมัส

6. ล้างตัวอย่างที่ย่อยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์แล้วด้วยเอทานอล 95% ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ทำซ้ำ 2 ครั้ง

7. นำตัวอย่างที่เหลือใส่ในถ้วยอลูมิเนียมที่ทราบน้ำหนักแน่นอน อบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 ± 3 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่

8. ใส่ในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา

9. นำตัวอย่างใส่ในครูซิเบิลที่ผ่านการเผา และทราบน้ำหนักที่แน่นอน

10. เผาตัวอย่างบน hot plate ในตู้ดูดควัน จนตัวอย่างหมดควัน ก่อนนำเข้าเตาเผาที่ 550 ± 3 องศาเซลเซียส จนได้เป็นเถ้าสีขาว หรือจนน้ำหนักคงที่

11. ใส่ในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนัก จะได้น้ำหนักตัวอย่างหลังเผา

12. คำนวณปริมาณเส้นใยหยาบ

$$\text{ปริมาณเส้นใยหยาบ(\%)} = \frac{[\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา (กรัม)} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังเผา (กรัม)}]}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง (กรัม)}} \times 100$$

ก.6 การคำนวณปริมาณคาร์โบไฮเดรต

วิธีการคำนวณ

ปริมาณคาร์โบไฮเดรต (%db) = 100 – (%โปรตีน + %เถ้า + %เส้นใยหยาบ + %ไขมัน)

ก.7 ปริมาณใยอาหาร ตามวิธี AOAC (2005) section 32.1.05

ส่งตัวอย่างไปวิเคราะห์ที่สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน

ก.8 การแยกเฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยสารละลายด่างตามระดับความมีขั้ว

อุปกรณ์

1. DEAE-52-Cellulose Chromatography (TSK gel-DEAE-5PW, Tosoh corporation, Tokyo, Japan)
2. คอลัมน์แก้ว (Benchmark column 15mm/250mm, Omnifit Ltd.)

3. Pump (Pharmacia Biotech Pump P-1) และ fraction collector (Pharmacia Biotech Redifrac)

วิธีการ

1. เตรียมเจลของ DEAE-52-Cellulose Chromatography โดยการ swell gel ในสารละลาย 0.5M NaOH

2. เทเจลของ DEAE-52-Cellulose Chromatography ใส่คอลัมน์แก้วให้มีความสูงประมาณ 15 เซนติเมตร แล้วเติม 0.005M formic acid ที่ปรับให้มี pH 5 ด้วย 4M แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (สารชะ) จนเต็มคอลัมน์

3. ปิดจุกส่วนบนของคอลัมน์ ค่อยๆ ทำให้ภายในเป็นสูญญากาศ โดยให้มีช่องว่างของอากาศประมาณ 0.5 เซนติเมตร และมีสารชะอยู่เหนือผิวเจลประมาณ 1 เซนติเมตร

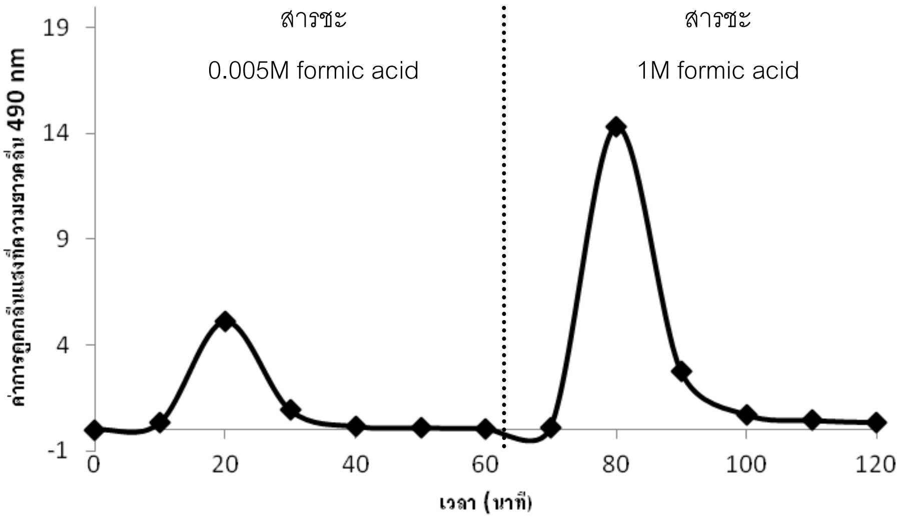
4. ต่อจุกส่วนบนของคอลัมน์เข้ากับปั๊ม และต่อปลายคอลัมน์เข้ากับเครื่องเก็บสารละลายอัตโนมัติ (fraction collector)

5. ผ่านสารละลายเฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยสารละลายด่าง โดยละลายในน้ำกลั่นที่ความเข้มข้น 0.05% (w/v) เข้าสู่คอลัมน์ โดยใช้ 0.005M formic acid เป็นสารชะที่อัตราการไหล 1 มิลลิลิตรต่อนาที แยกสารละลายที่ไหลออกมาในหลอดทดลอง หลอดละ 10 นาที เมื่อเก็บครบ 60 นาที เปลี่ยนสารชะเป็น 1M formic acid แยกสารละลายที่ไหลออกมาลงในหลอดทดลอง หลอดละ 10 นาที

6. นำสารละลายในแต่ละหลอดไปวิเคราะห์ปริมาณคาร์โบไฮเดรตทั้งหมดด้วยวิธี Phenol-Sulfuric method ดัดแปลงจากวิธีของ Miller (1959) ได้ผลดัง**รูป ก.1**

7. รวมสารละลายเฮมิเซลลูโลสหลอดที่ 2, 3 และ 4 เข้าด้วยกันแล้วทำให้เป็นกลาง นำไปทำแห้งแบบเยือกแข็ง จะได้เฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยสารละลายด่างที่ชะด้วย 0.005M formic acid (H2)

8. รวมสารละลายเฮมิเซลลูโลสจากหลอดที่ 8, 9 และ 10 เข้าด้วยกันแล้วทำให้เป็นกลาง นำไปทำแห้งแบบเยือกแข็ง จะได้เฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยสารละลายด่างที่ชะด้วย 1M formic acid (H3)



รูป ก.1 กราฟแสดงปริมาณคาร์โบไฮเดรตทั้งหมดด้วยวิธี Phenol-Sulfuric method ของสารละลายเฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยสารละลายด่างแล้วแยกด้วย DEAE-52-Cellulose Chromatography

ก.9 การวิเคราะห์การกระจายตัวตามน้ำหนักโมเลกุล และน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก ($\overline{M_w}$) ของเฮมิเซลลูโลส

อุปกรณ์

1. ระบบ high performance size exclusion chromatography (HPSEC) ซึ่งประกอบด้วย Waters 600 HPLC controller และ pump (Waters Corporation, Milford, MA) Tosoh TSK 64000PWXL preparative column (21.5mmID x 30cm, 17um) (Tosoh Corporation, Tokyo, Japan) Water 2414 Refractive Index (RI) detector (Waters Corporation, Milford, MA) ควบคุมด้วย Empower version 3 Chromatography Data software (Waters Corporation, Milford, MA)
2. เครื่องให้ความร้อนและกวนสารแบบแม่เหล็ก (IKA รุ่น C-MAG HS10, Germany)
3. เครื่องผสมสารละลาย (Vortex mixer VTX-3000L, LMS, Tokyo, Japan)

สารเคมี

1. สารละลาย Tris-HCl buffer pH 8 ความเข้มข้น 0.005M

2. สารละลายโซเดียมเอไซด์(A.R. grade) ความเข้มข้น 0.02% (w/v)
3. พูลลูแลน (pullulan) มาตรฐานที่น้ำหนักโมเลกุลต่างๆ (Shodex Standard P-82 kit, Japan) ดัง**ตาราง ก.1**

ตาราง ก.1 น้ำหนักโมเลกุลของพูลลูแลนที่นำมาใช้สร้างกราฟมาตรฐาน

Grade	$M_w \times 10^4$
P-800	78.8
P-400	40.4
P-200	21.2
P-100	11.2
P-50	4.73
P-20	2.28
P-10	1.18
P-5	0.59

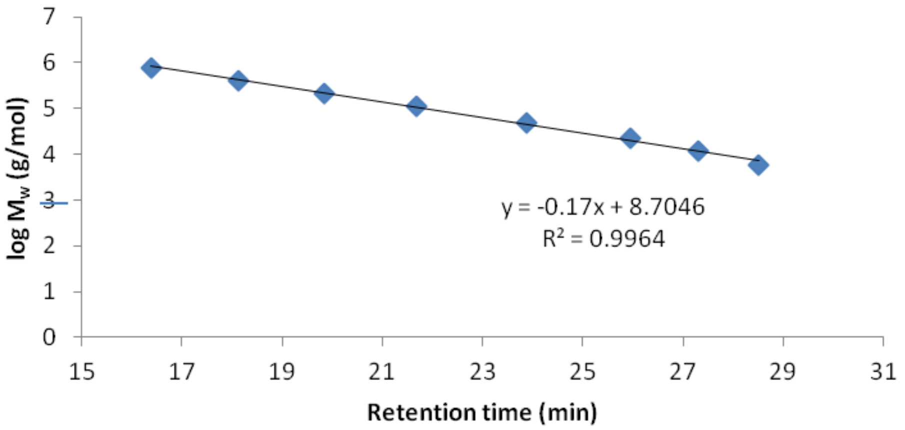
วิธีการทดลอง

การสร้างกราฟมาตรฐาน

1. ชั่งพูลลูแลน 1 มิลลิกรัม และปิเปตน้ำปริมาตร 1 มิลลิลิตร ใส่หลอดทดลอง แล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

2. ใส่แท่งแม่เหล็กสำหรับกวนผสมลงไปในหลอดทดลอง แล้ววางบนเครื่องกวนสารแบบแม่เหล็ก โดยกวนผสมที่อุณหภูมิห้อง นานประมาณ 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไปกรองผ่านเมมเบรน (nylon filter) ขนาด 0.45 ไมโครเมตร แล้วฉีดเข้าเครื่อง HPSEC

3. นำเวลาที่พูลลูแลนขนาดต่างๆ หลุดออกมา (retention time) ไปสร้างกราฟมาตรฐาน ดัง**รูป ก.2**



รูป ก.2 กราฟมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของเฮมิเซลลูโลส

การวิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของเฮมิเซลลูโลส

1. ชั่งน้ำหนักเฮมิเซลลูโลส 10 มิลลิกรัม ละลายในน้ำปราศจากไอออน (Deionized water) 1 มิลลิลิตร กวนผสมให้ละลายด้วยเครื่องผสมสารละลาย

2. กรองสารละลายเฮมิเซลลูโลสผ่านเมมเบรน (nylon filter) ขนาด 0.45 ไมโครเมตร แล้วฉีดเข้าระบบ HPSEC ควบคุมอุณหภูมิของคอลัมน์ที่ 40 องศาเซลเซียส โดยปริมาตรตัวอย่างที่ฉีดเท่ากับ 400 ไมโครลิตร และใช้สารละลาย 0.005M Tris-HCl buffer pH 8 ใน 0.02% NaN_3 ที่กรองผ่านแผ่นกรองขนาด 0.45 ไมโครเมตร และกำจัดอากาศแล้วเป็นเฟสเคลื่อนที่ ใช้อัตราการไหล 3 มิลลิลิตรต่อนาที

3. นำโครมาโตแกรมที่ได้มาวิเคราะห์หาเวลาที่เฮมิเซลลูโลสหลุดออกจากคอลัมน์ แล้วนำเวลาที่ได้ไปหาน้ำหนักโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลสจากกราฟมาตรฐานของพูลลูแลน

4. คำนวณน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก ($\overline{M}_w$) (น้ำหนักโมเลกุลที่ได้จากการเทียบกับพูล-ลูแลนมาตรฐาน

$$\overline{M}_w = \frac{\Sigma N_x M_x^2}{\Sigma N_x M_x}$$

N_x คือ พื้นที่ใต้กราฟที่ได้จาก chromatogram ของเฮมิเซลลูโลส (%area)

M_x คือ น้ำหนักโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลสเทียบจากน้ำหนักโมเลกุลของพูลลูแลนมาตรฐาน

ก.10 การวิเคราะห์ชนิดและปริมาณน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลส ดัดแปลงจากวิธีของ Heather and Carole (2006)

อุปกรณ์

1. ระบบ high performance anion exchange chromatography ที่ต่อกับ pulsed amperometric detector (HPLC-PAD) รุ่น Dionex DX-600 (Dionex Corporation, Sunnyvale, CA) ซึ่งประกอบด้วย GP40 gradient pump ED50 electrochemical detector CarboPac PA20 guard column (3mmID x 30mm) CarboPac PA20 analytical column (3mmID x 150mm) ควบคุมด้วย Chromeleon 68 Chromatography Data System
2. heating Box
3. แท่งแม่เหล็กสำหรับกวนสาร (magnetic bar)
4. เครื่องให้ความร้อนและกวนสารแบบแม่เหล็ก (IKA รุ่น C-MAG HS10, Germany)

สารเคมี

1. กรดไตรฟลูออโรอะซิติก (Trifluoroacetic acid) (A.R. grade)
2. แก๊สไนโตรเจน
3. น้ำปราศจากไอออน
4. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (HPLC grade) 50%
5. โซเดียมอะซิเตท (Sigma-Aldrich, A.R. grade)
6. น้ำตาลแรมโนส (L-(+)-Rhamnose) (Himedia Laboratories Ltd., A.R. grade)
7. น้ำตาลอะราบิโนส (L-(+)-Arabinose) (Sigma-Aldrich, A.R. grade)
8. น้ำตาลกาแลกโตส (D-(+)-Galactose) (Fluka, A.R. grade)
9. น้ำตาลกลูโคส (D-(+)-Glucose) (Sigma-Aldrich, A.R. grade)
10. น้ำตาลไซโลส (D-(+)-Xylose) (Himedia Laboratories Ltd., A.R. grade)
11. น้ำตาลแมนโนส (D-(+)-Mannose) (Himedia Laboratories Ltd., A.R. grade)
12. กรดกาแลกตูโรนิก (D-(+)-Galacturonic acid) (Fluka, A.R. grade)
13. กรดกลูโคนิก (D-Gluconic acid) (Sigma-Aldrich, A.R. grade)

วิธีการทดลอง

การเตรียมกราฟมาตรฐานของน้ำตาล

1. ชั่งน้ำตาลมาตรฐาน 1.2 มิลลิกรัม ละลายในน้ำปราศจากไอออน 10 มิลลิลิตร จะได้สารละลายน้ำตาลความเข้มข้น 0.12 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร (stock solution)

2. เจือจางสารละลายในข้อ 1 (stock solution) ให้มีความเข้มข้น 0.012, 0.009, 0.0045 และ 0.00225 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร แล้วนำไปฉีดเข้าระบบ HPAEC-PAD โดยเฟสเคลื่อนที่ที่ใช้คือ

Eluent A: สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 200mM (สำหรับล้างคอลัมน์)

Eluent B: สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.9mM

Eluent C: สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 150mM

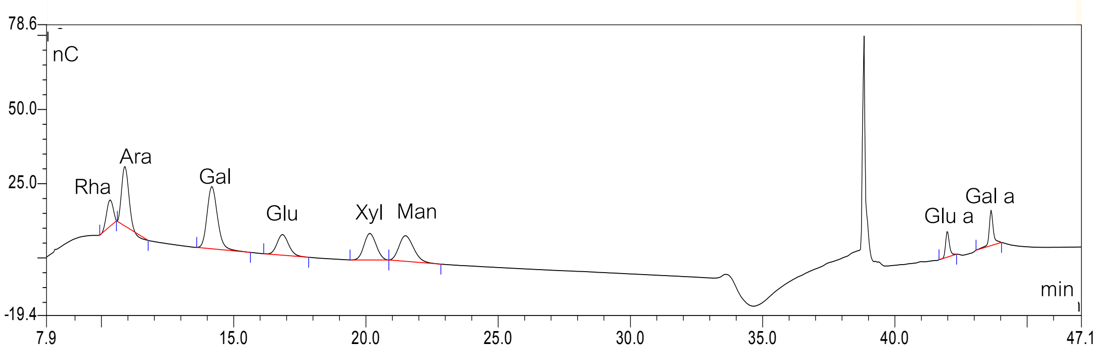
Eluent D: สารละลายโซเดียมอะซิเตท 1M ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 150mM

โดยมีอัตราไหล 0.3 มิลลิลิตรต่อนาที และผสมเฟสเคลื่อนที่แบบ gradient ณ เวลาต่างๆ ตาม**ตาราง ก.2**

3. นำความเข้มข้นของน้ำตาลและพื้นที่ใต้กราฟของ peak น้ำตาลที่ได้จาก chromatogram (**รูป ก.3**) ไปสร้างกราฟมาตรฐาน จะได้กราฟมาตรฐานดังแสดงใน**รูป ก.4**

ตาราง ก.2 โปรแกรม Gradient ที่ใช้ในการวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณน้ำตาล

Time (mins)	% Eluent			
	Eluent A	Eluent B	Eluent C	Eluent D
0-5	0	90	10	0
5.01	0	100	0	0
30 (Gradient)	0	98	0	2
50	0	83	0	17
50.01	0	0	100	0
60	0	100	0	0
80	Ready for inject new sample			



รูปที่ ก.3 Chromatogram ของน้ำตาลมาตรฐานความเข้มข้น 0.0045 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย HPAEC-PAD

การย่อยเฮมิเซลลูโลสให้เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว

1. ชั่งน้ำหนักเฮมิเซลลูโลส 1 มิลลิกรัม ลงในหลอดทดลองแบบฝาเกลียว ละลายในน้ำปราศจากไอออน 2 มิลลิลิตร กวนผสมให้ละลายด้วยเครื่องผสมสารละลาย

2. เติมกรดไตรฟลูออโรอะซิติก ความเข้มข้น 4M ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลอง ใส่แท่งแม่เหล็กสำหรับกวนสาร ปิดฝาให้สนิท

3. นำหลอดทดลองไปใส่ใน heating box แล้วให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 98 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ทำให้เย็นทันที

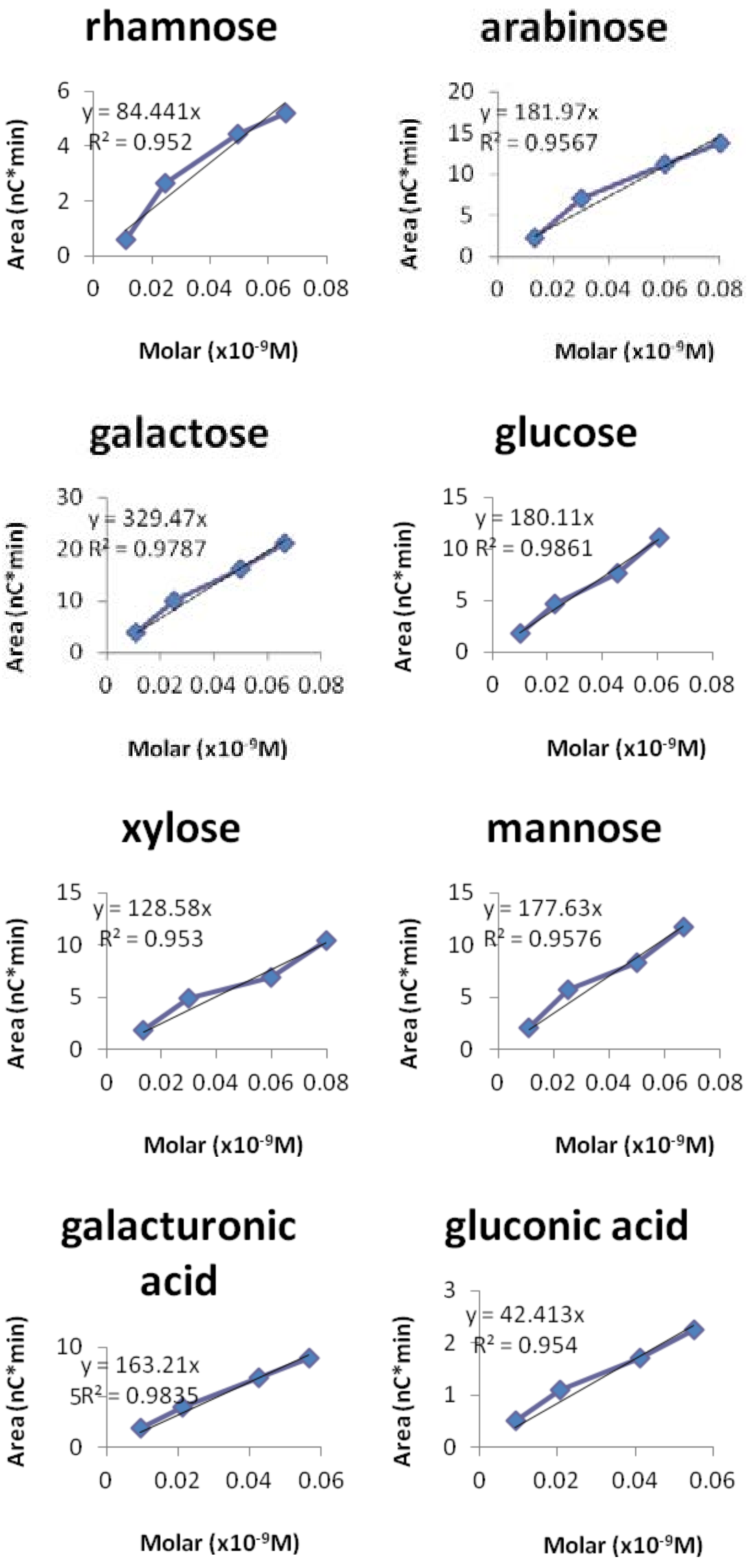
4. นำไปทำแห้งแบบเยือกแข็ง แล้วเก็บในสภาวะที่มีแก๊สไนโตรเจน

การวิเคราะห์น้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลส

1. นำตัวอย่างเฮมิเซลลูโลสที่ผ่านการย่อยแล้วมาเติมน้ำปราศจากไอออน 2 มิลลิลิตร กวนผสมให้ละลายด้วยเครื่องผสมสารละลาย (Vortex mixer, VTX-3000L, LMS, Tokyo, Japan)

2. กรองผ่านเมมเบรน (nylon filter) ขนาด 0.45 ไมโครเมตร แล้วฉีดเข้าระบบ HPAEC-PAD

3. นำพื้นที่ใต้กราฟของพีคน้ำตาลแต่ละชนิดไปคำนวณจากกราฟน้ำตาลมาตฐาน แล้วคำนวณเป็น %mol โดยเทียบจากน้ำตาลทั้งหมด



รูป ก.4 กราฟน้ำตาลมาตรฐานที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย HPSEC

ก.11 การวิเคราะห์สมบัติทางความหนืดขณะร้อนของสตาร์ชด้วยเครื่อง rheometer **ดัดแปลงจากวิธีของ** Rosella, Yokoyamab **และ** Shoemakerc (2011)

อุปกรณ์

1. rheometer (Physica MCR 301, Anton Paar, Austria)
2. เครื่องผสมสารละลาย (Vortex mixer VTX-3000L, LMS, Tokyo, Japan)

การเตรียมตัวอย่างสารผสมระหว่างสตาร์ชข้าวโพดและเฮมิเซลลูโลส

1. เตรียมสารละลายเฮมิเซลลูโลส (stock solution) ความเข้มข้น 3.2 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร (w/v) จากนั้นเจือจางให้มีความเข้มข้นเป็น 3.2 และ 1.6 มิลลิกรัมต่อ 100 ไมโครลิตร
2. เตรียมสารผสมสตาร์ชกับเฮมิเซลลูโลสที่ความเข้มข้น 8% ของของแข็งทั้งหมด (w/v) ชั่งน้ำหนักสตาร์ช แล้วปิเปตสารละลายเฮมิเซลลูโลสตามความเข้มข้นและปริมาณที่แสดงไว้ใน **ตาราง ก.3**
3. ตั้งสารผสมทิ้งไว้ 1 ชั่วโมงก่อนการวิเคราะห์

ตาราง ก.3 วิธีการเตรียมตัวอย่างสารผสมระหว่างสตาร์ชและเฮมิเซลลูโลสในการวิเคราะห์ด้วย rheometer

สัดส่วนของสตาร์ชต่อเฮมิเซลลูโลส	น้ำหนักสตาร์ช (มิลลิกรัม)	สารละลายเฮมิเซลลูโลส ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อ 100 ไมโครลิตร)	สารละลายเฮมิเซลลูโลส ปริมาตร (ไมโครลิตร)
10:0	8	0 (น้ำกลั่น)	100
8:2	6.4	1.6	100
6:4	4.8	3.2	100

การวิเคราะห์สมบัติทางความหนืด (pasting properties)

1. กวนผสมตัวอย่างสารผสมสตาร์ชและเฮมิเซลลูโลสให้เข้ากัน
2. ปิเปตตัวอย่างปริมาตร 320 ไมโครลิตรลงบนเพลท (plate) ที่ตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 50 องศาเซลเซียส

3. วิเคราะห์โดยใช้หัววัดแบบ paralell plate ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร (PP25) ตั้งค่า gap ที่ 500um วิเคราะห์แบบ rotational mode โดยตั้งอุณหภูมิและความเร็วรอบดัง**ตาราง ก.4**

4. วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้โดยใช้โปรแกรม Physica RheoPlus จะรายงานการวิเคราะห์เป็นค่าต่างๆ ดังนี้

4.1. เวลาที่เกิด peak ของความหนืด (peak time) มีหน่วยเป็นวินาที

4.2. อุณหภูมิเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting temperature) มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส

4.3. อุณหภูมิที่เกิด peak (peak temperature) มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส

4.4. ความแตกต่างของความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุด (breakdown) มีหน่วยเป็น cP

4.5. ความหนืดสุดท้ายของการทดสอบ (final viscosity) มีหน่วยเป็น cP

4.6. ความหนืดต่ำสุด (trough) มีหน่วยเป็น cP

4.7. ผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดสูงสุด (setback from peak) มีหน่วยเป็น cP

ตาราง ก.4 Temperature profile STD 1

เวลา (นาที.วินาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความเร็วรอบ (rpm)
0.00	50	960
0.01	50	160
1.00	50	160
4.42	95	160
7.12	95	160
11.00	50	160
13.00	50	160

ที่มา: AACC Method 76-21

ก.12 การวิเคราะห์สมบัติทางด้านวิสโคอีลาสติกของเจลสตาร์ชด้วยเครื่อง rheometer **ดัดแปลงจากวิธีของ** Aguirre-cruz **และคณะ** (2005)

อุปกรณ์

1. rheometer (Physica MCR 301, Anton Paar, Austria)

วิธีวิเคราะห์สมบัติทางวิสโคอีลาสติก

1. ภายหลังจากการศึกษาสมบัติทางความหนืดแล้ว ลดอุณหภูมิลงมาที่ 25 องศาเซลเซียส
2. วิเคราะห์โดยใช้หัววัดแบบ paralell plate ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร (PP25) ตั้งค่า gap ที่ 500um วิเคราะห์โดยใช้ oscillatory mode วิเคราะห์แบบ frequency sweep test ที่ช่วงความถี่ 0.1-10 เฮิรตซ์ (Hz)
3. วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้โดยใช้โปรแกรม Physica RheoPlus

ก.13 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง differential scanning calorimeter

อุปกรณ์

1. เครื่อง differential scanning calorimeter (Model Diamond DSC, Perkin–Elmer, Norwalk, CT, USA)
2. aluminum DSC pan
3. เครื่องมือสำหรับปิกผนึก DSC pan
4. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Ohaus explorer, Switzerland)

การเตรียมตัวอย่างสารผสมระหว่างสตาร์ชและเฮมิเซลลูโลส

1. เตรียมสารละลายเฮมิเซลลูโลส (stock solution) ความเข้มข้น 8 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร (w/v) จากนั้นเจือจางให้มีความเข้มข้นเป็น 0.2, 0.4, 0.6 และ 0.8 มิลลิกรัมต่อ 10 ไมโครลิตร
2. เตรียมสารผสมสตาร์ชกับเฮมิเซลลูโลสที่ความเข้มข้น 20% ของของแข็งทั้งหมด (w/v) ชั่งน้ำหนักสตาร์ชใส่ลงใน aluminum pan แล้วปิเปตสารละลายเฮมิเซลลูโลสใส่ลงใน pan ตามความเข้มข้นและปริมาณที่แสดงไว้ใน**ตาราง ก.5**
3. ปิดผนึกอย่างรวดเร็ว บ่มไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 คืน

ตาราง ก.5 วิธีการเตรียมตัวอย่างสารผสมระหว่างสตาร์ชและเฮมิเซลลูโลสในการวิเคราะห์ด้วย DSC

สัดส่วนของสตาร์ชต่อเฮมิเซลลูโลส (Starch/Hemicellulose)	น้ำหนักสตาร์ช (มิลลิกรัม)	สารละลายเฮมิเซลลูโลส ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อ 10 มิลลิตร)	สารละลายเฮมิเซลลูโลส ปริมาตร (มิลลิลิตร)
10:0	2	0 (น้ำกลั่น)	10
9:1	1.8	0.2	10
8:2	1.6	0.4	10
7:3	1.4	0.6	10
6:4	1.2	0.8	10

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนในการเกิดเจลาติไนเซชัน

1. นำ pan ใส่ในช่องใส่ตัวอย่างของเครื่อง DSC และวาง reference pan (pan เปล่า)
2. วิเคราะห์ในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเปลี่ยนอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที
3. หาค่าต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิเริ่มต้น (onset temperature; To หน่วยองศาเซลเซียส) อุณหภูมิที่จุดสูงสุด (peak temperature; Tp หน่วยองศาเซลเซียส) อุณหภูมิสุดท้าย (conclusion temperature; Tc หน่วยองศาเซลเซียส) ของการเกิดเจลาติไนเซชัน และพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาติไนเซชัน (enthalpy of gelatinization; ΔH_1 หน่วย จูลต่อกรัม)

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนในการเกิดรีโทรเกรเดชัน

1. ตัวอย่างที่ผ่านการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนในการเกิดเจลาติไนเซชันแล้ว เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน เมื่อครบกำหนดเวลาแล้วนำ pan ออกมาวางไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
2. นำ pan ใส่ในช่องใส่ตัวอย่างของเครื่อง DSC และวาง reference pan (pan เปล่า)
3. วิเคราะห์ในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเปลี่ยนอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

4. หาค่าต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิเริ่มต้น (onset temperature; To หน่วยองศาเซลเซียส) อุณหภูมิที่จุดสูงสุด (peak temperature; Tp หน่วยองศาเซลเซียส) อุณหภูมิสุดท้าย (conclusion temperature; Tc หน่วยองศาเซลเซียส) และพลังงานที่ใช้ในของการทำลายโครงสร้างผลึกของแอมิโลเพกทิน (enthalpy of melting amylopectin retrograde; ΔH_2 หน่วย จูลต่อกรัม)

ภาคผนวก ข.

รายละเอียดผลการทดลองเพิ่มเติม

ตาราง ข.1 ปริมาณไขมันที่สกัดได้จากรำข้าวขาวดอกมะลิด้วยตัวทำละลายแต่ละชนิดตามลำดับ

ลำดับที่	ตัวทำละลาย	ปริมาณไขมันที่สกัดได้ (%db)
1	ปิโตรเลียมอีเธอร์	15.69 ± 0.09
2	อะซีโตน	3.30 ± 0.09
3	เมทานอล	4.98 ± 0.07
รวมปริมาณไขมันทั้งหมดที่สกัดได้		23.97

ตาราง ข.2 ค่า storage modulus (G') และค่า loss modulus (G'') ของเจลผสมสตาร์ชข้าวโพดและเฮมิเซลลูโลสที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย rheometer แบบ frequency sweep test

จุดที่	CS		CS:H1				CS:H2				CS:H3			
			8:2		6:4		8:2		6:4		8:2		6:4	
	G'	G''	G'	G''	G'	G''	G'	G''	G'	G''	G'	G''	G'	G''
1	5.534	37.69	3.078	7.651	1.543	3.322	6.459	35.69	5.109	21.17	4.581	23.44	2.383	7.378
2	5.636	37.75	3.148	7.731	1.586	3.367	6.687	35.74	5.218	21.26	4.672	23.57	2.461	7.621
3	5.921	37.5	3.319	8.007	1.637	3.519	6.906	35.36	5.473	21.42	4.81	23.04	2.56	7.853
4	6.023	37.6	3.425	8.187	1.747	3.629	7.106	35.54	5.673	21.67	4.93	23.12	2.67	7.952
5	6.397	37.09	3.68	8.423	1.816	3.706	7.456	35.82	5.906	21.9	5.286	23.17	2.738	8.195
6	6.487	37.14	3.74	8.433	1.846	3.732	7.647	36.04	6.106	22.1	5.365	23.28	2.823	8.288
7	6.86	37.47	4.075	8.729	1.925	3.769	8.143	36.48	6.406	22.62	5.705	23.45	2.981	8.439
8	6.95	37.38	4.175	8.824	1.955	3.799	8.343	36.67	6.705	22.94	5.811	23.57	3.051	8.576
9	7.455	38.05	4.455	9.076	2.082	3.982	8.901	37.34	6.996	23.39	6.228	23.91	3.29	8.698
10	7.557	38.05	4.578	9.273	2.095	3.997	9.312	37.76	7.296	23.57	6.534	24.21	3.42	8.797
11	8.164	38.65	4.87	9.584	2.16	4.084	9.763	38.15	7.735	24.04	6.793	24.49	3.603	8.998
12	8.266	38.75	5.09	9.874	2.13	4.081	9.883	38.24	7.925	24.26	6.993	24.62	3.812	9.047
13	8.841	39.27	5.319	10.02	2.391	4.076	10.69	39.07	8.46	25.06	7.55	25.08	4.044	9.231
14	8.941	39.54	5.519	12.18	2.382	4.066	10.99	39.35	8.95	25.43	7.87	25.39	4.194	9.342
15	9.73	39.92	6.05	10.27	2.583	3.908	11.84	39.93	9.335	25.73	8.243	25.68	4.366	9.415
16	9.86	39.95	6.25	10.44	2.683	3.918	12.34	40.26	9.545	25.96	8.453	25.87	4.572	9.329
17	10.71	40.4	6.535	10.28	2.783	3.897	13.17	40.63	10.42	26.63	9.09	25.87	4.948	9.312
18	10.74	40.36	6.735	10.49	2.793	3.893	13.54	40.86	10.83	26.74	9.34	26.04	5.123	9.542
19	11.8	40.37	7.422	10.29	2.899	3.885	14.49	41.12	11.45	27.28	9.978	25.85	5.458	8.945
20	11.7	40.38	7.482	10.31	2.979	3.879	14.52	41.15	11.47	27.31	9.995	25.86	5.461	8.948

* WCS คือ สตาร์ชข้าวโพด ข้าวเหนียว

H1 คือ เฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยน้ำร้อน

H2 คือ เฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยสารละลายด่างแล้วแยกด้วย DEAE-52-cellulose chromatography โดยใช้ 0.005M formic acid เป็นสารชะ

H3 คือ เฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยสารละลายด่างแล้วแยกด้วย DEAE-52-cellulose chromatography โดยใช้ 1 M formic acid เป็นสารชะ

ตาราง ข.3 ค่า loss tangent, tan δ ของเจลสตาร์ชผสมข้าวโพดและเฮมิเซลลูโลสที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย rheometer แบบ frequency sweep test

จุดที่	tan δ						
	WCS	WCS:H1		WCS:H2		WCS:H3	
		8:2	6:4	8:2	6:4	8:2	6:4
1	0.1468	0.4023	0.4645	0.1810	0.2413	0.1954	0.3230
2	0.1493	0.4072	0.4710	0.1871	0.2454	0.1982	0.3229
3	0.1579	0.4145	0.4652	0.1953	0.2555	0.2088	0.3260
4	0.1602	0.4183	0.4814	0.1999	0.2618	0.2132	0.3358
5	0.1725	0.4369	0.4900	0.2082	0.2697	0.2281	0.3341
6	0.1747	0.4435	0.4946	0.2122	0.2763	0.2305	0.3406
7	0.1831	0.4668	0.5107	0.2232	0.2832	0.2433	0.3532
8	0.1859	0.4731	0.5146	0.2275	0.2923	0.2465	0.3558
9	0.1959	0.4909	0.5229	0.2384	0.2991	0.2605	0.3782
10	0.1986	0.4937	0.5241	0.2466	0.3095	0.2699	0.3888
11	0.2112	0.5081	0.5289	0.2559	0.3218	0.2774	0.4004
12	0.2133	0.5155	0.5219	0.2584	0.3267	0.2840	0.4214
13	0.2251	0.5308	0.5866	0.2736	0.3376	0.3010	0.4381
14	0.2261	0.4531	0.5858	0.2793	0.3519	0.3100	0.4489
15	0.2437	0.5891	0.6610	0.2965	0.3628	0.3210	0.4637
16	0.2468	0.5987	0.6848	0.3065	0.3677	0.3267	0.4901
17	0.2651	0.6357	0.7141	0.3241	0.3913	0.3514	0.5314
18	0.2661	0.6420	0.7174	0.3314	0.4050	0.3587	0.5369
19	0.2923	0.7213	0.7462	0.3524	0.4197	0.3860	0.6102
20	0.2897	0.7257	0.7680	0.3529	0.4200	0.3865	0.6103

* CS คือ สตาร์ชข้าวโพด

H1 คือ เฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยน้ำร้อน

H2 คือ เฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยสารละลายด่างแล้วแยกด้วย DEAE-52-cellulose chromatography โดยใช้ 0.005M formic acid เป็นสารชะ

H3 คือ เฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยสารละลายด่างแล้วแยกด้วย DEAE-52-cellulose chromatography โดยใช้ 1 M formic acid เป็นสารชะ

ตาราง ข.4 ค่า storage modulus (*G'*) และค่า loss modulus (*G''*) ของเจลผสมสตาร์ชข้าวโพดและเฮมิเซลลูโลสที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย rheometer แบบ frequency sweep test

จุดที่	CS		CS:H1				CS:H2				CS:H3			
			8:2		6:4		8:2		6:4		8:2		6:4	
	G'	*G''*	*G'*	*G''*	*G'*	*G''*	*G'*	*G''*	*G'*	*G''*	*G'*	*G''*	*G'*	*G''*
1	1,201	31.88	277.2	30.12	512.5	17.48	472.0	21.31	896.8	15.29	324.5	24.34	706.4	16.33
2	1,236	32.43	280.6	32.34	519.8	17.95	474.2	22.53	910.6	15.30	329.6	25.76	721.1	17.07
3	1,291	35.45	311.3	33.76	572.3	18.25	476.1	22.15	954.8	15.96	340.5	28.23	793.2	18.12
4	1,317	34.90	309.5	35.42	576.4	17.13	469.7	23.57	948.1	16.37	341.1	27.93	786.7	18.49
5	1,331	36.14	313.5	36.58	583.4	17.42	472.3	21.84	956.1	16.92	346.1	28.59	793.3	18.55
6	1,347	36.95	319.7	37.23	591.1	17.67	476.5	22.82	967.1	16.27	350.9	28.25	801.5	18.88
7	1,362	38.08	323.6	38.98	601.6	18.16	478.4	23.74	977.8	16.32	355.3	28.97	810.7	19.51
8	1,375	39.45	329.7	39.20	608.8	18.55	480.2	23.91	987.5	16.52	359.2	29.56	819.3	20.26
9	1,386	41.74	333.7	40.09	615.6	19.57	480.4	24.44	996.6	16.68	362.9	30.32	827.1	21.38
10	1,397	44.34	337.9	41.11	623.0	20.58	483.5	25.52	1006.0	17.35	366.2	31.61	834.2	22.44
11	1,404	45.48	342.0	42.27	628.8	21.81	485.2	26.83	1013.0	17.87	369.2	32.78	840.6	23.66
12	1,417	47.94	345.5	44.09	634.2	23.08	487.7	28.37	1021.0	18.94	371.6	34.61	846.7	25.63
13	1,426	52.98	348.8	46.49	639.5	24.60	492.0	30.13	1029.0	19.80	373.9	36.62	852.2	26.59
14	1,434	56.69	352.0	49.15	644.4	26.48	494.9	32.19	1036.0	21.13	375.7	38.95	857	28.48
15	1,441	60.88	353.7	51.96	647.7	28.70	496.1	34.43	1042.0	22.19	375.5	41.59	861.3	30.46
16	1,444	65.92	354.3	55.39	649.6	31.04	495.7	37.03	1043.0	24.00	373.7	44.68	860.8	31.75
17	1,445	71.47	352.8	59.30	649.1	33.94	491.4	39.96	1042.0	25.86	369.1	48.17	858.5	34.08
18	1,440	77.46	346.8	63.77	643.1	37.54	481.0	44.12	1035.0	28.01	358.8	52.10	849.9	36.35
19	1,428	80.50	330.0	68.82	630.8	41.83	456.0	50.01	1017.0	30.00	335.8	56.00	829.7	38.76
20	1,388	93.24	308.3	74.92	602.0	44.44	419.4	54.27	977.4	33.25	310.3	63.39	791.9	41.74

* CS คือ สตาร์ชข้าวโพด

H1 คือ เฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยน้ำร้อน

H2 คือ เฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยสารละลายด่างแล้วแยกด้วย DEAE-52-cellulose chromatography โดยใช้ 0.005M formic acid เป็นสารชะ

H3 คือ เฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยสารละลายด่างแล้วแยกด้วย DEAE-52-cellulose chromatography โดยใช้ 1 M formic acid เป็นสารชะ

ตาราง ข.5 ค่า loss tangent, tan δ ของเจลสตาร์ชผสมข้าวโพดและเฮมิเซลลูโลสที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย rheometer แบบ frequency sweep test

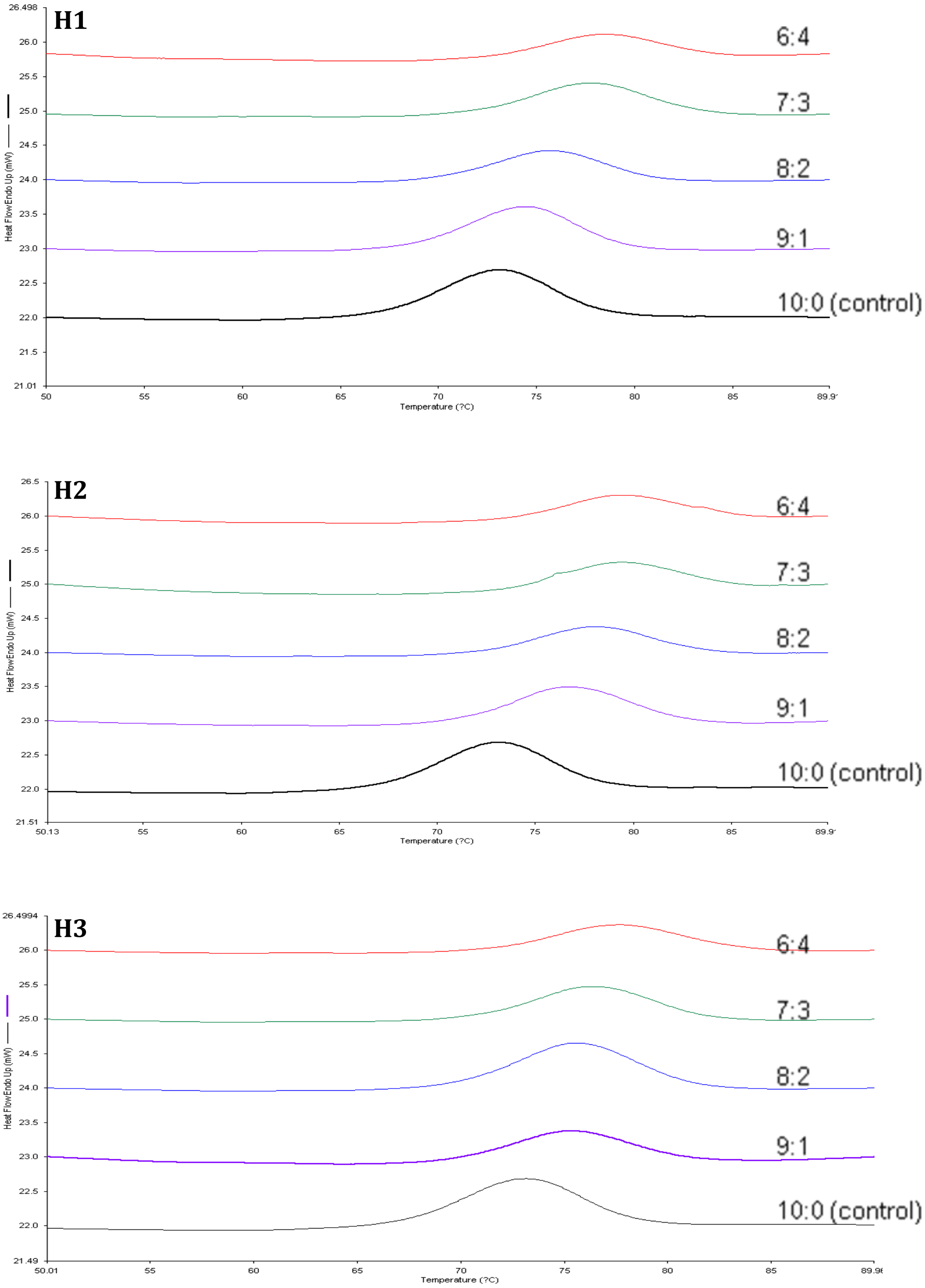
จุดที่	tan δ						
	CS	CS:H1		CS:H2		CS:H3	
		8:2	6:4	8:2	6:4	8:2	6:4
1	0.0265	0.1087	0.0341	0.0451	0.0170	0.0750	0.0231
2	0.0262	0.1153	0.0345	0.0475	0.0168	0.0782	0.0237
3	0.0275	0.1084	0.0319	0.0465	0.0167	0.0829	0.0228
4	0.0265	0.1144	0.0297	0.0502	0.0173	0.0819	0.0235
5	0.0272	0.1167	0.0299	0.0462	0.0177	0.0826	0.0234
6	0.0274	0.1165	0.0299	0.0479	0.0168	0.0805	0.0236
7	0.0280	0.1205	0.0302	0.0496	0.0167	0.0815	0.0241
8	0.0287	0.1189	0.0305	0.0498	0.0167	0.0823	0.0247
9	0.0301	0.1201	0.0318	0.0509	0.0167	0.0835	0.0258
10	0.0317	0.1217	0.0330	0.0528	0.0172	0.0863	0.0269
11	0.0324	0.1236	0.0347	0.0553	0.0176	0.0888	0.0282
12	0.0338	0.1276	0.0364	0.0582	0.0186	0.0931	0.0303
13	0.0372	0.1333	0.0385	0.0612	0.0192	0.0979	0.0312
14	0.0395	0.1396	0.0411	0.0650	0.0204	0.1037	0.0332
15	0.0422	0.1469	0.0443	0.0694	0.0213	0.1108	0.0354
16	0.0457	0.1563	0.0478	0.0747	0.0230	0.1196	0.0369
17	0.0495	0.1681	0.0523	0.0813	0.0248	0.1305	0.0397
18	0.0538	0.1839	0.0584	0.0917	0.0271	0.1452	0.0428
19	0.0564	0.2085	0.0663	0.1097	0.0295	0.1668	0.0467
20	0.0672	0.2430	0.0738	0.1294	0.0340	0.2043	0.0527

* CS คือ สตาร์ชข้าวโพด

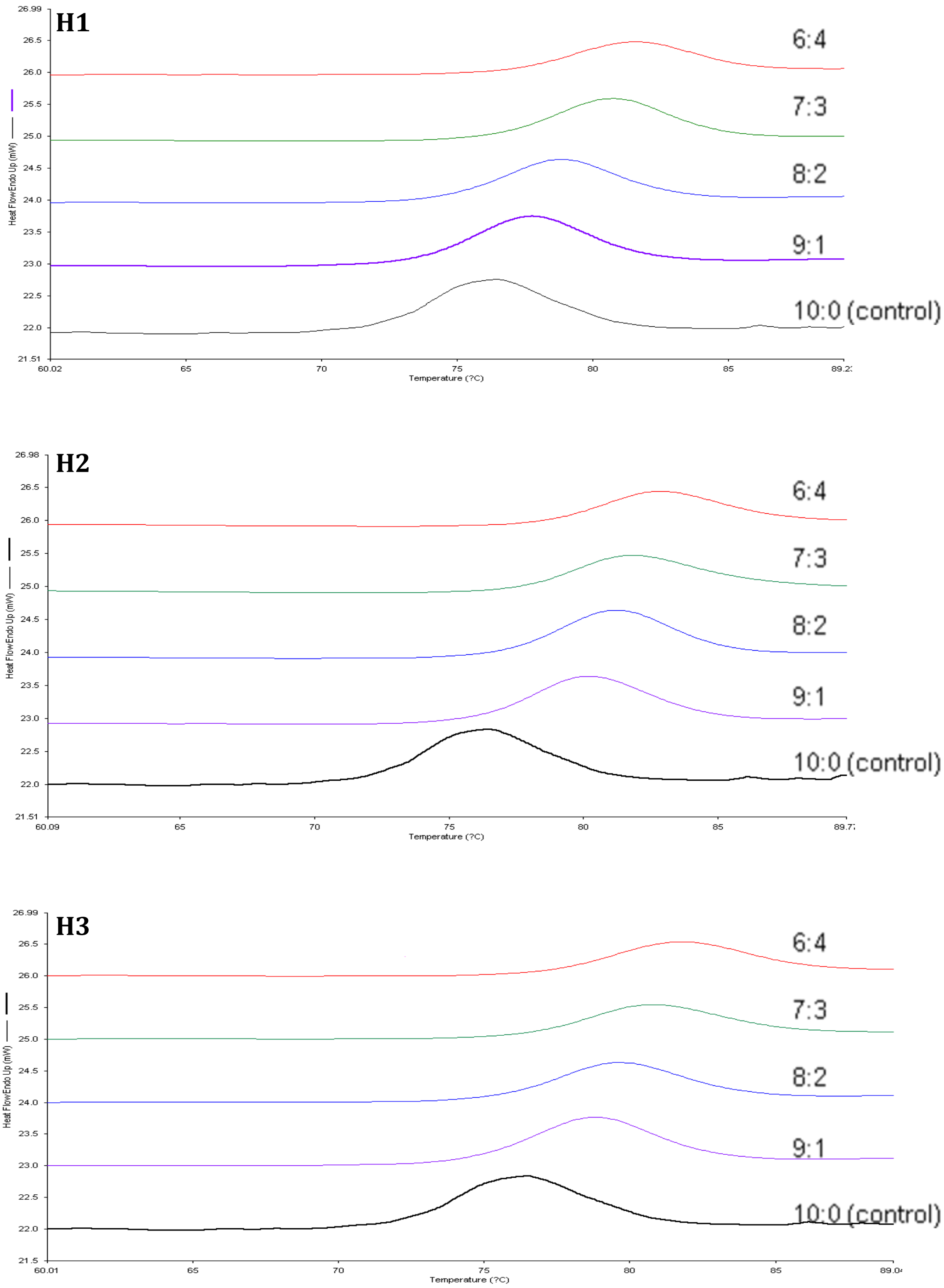
H1 คือ เฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยน้ำร้อน

H2 คือ เฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยสารละลายด่างแล้วแยกด้วย DEAE-52-cellulose chromatography โดยใช้ 0.005M formic acid เป็นสารชะ

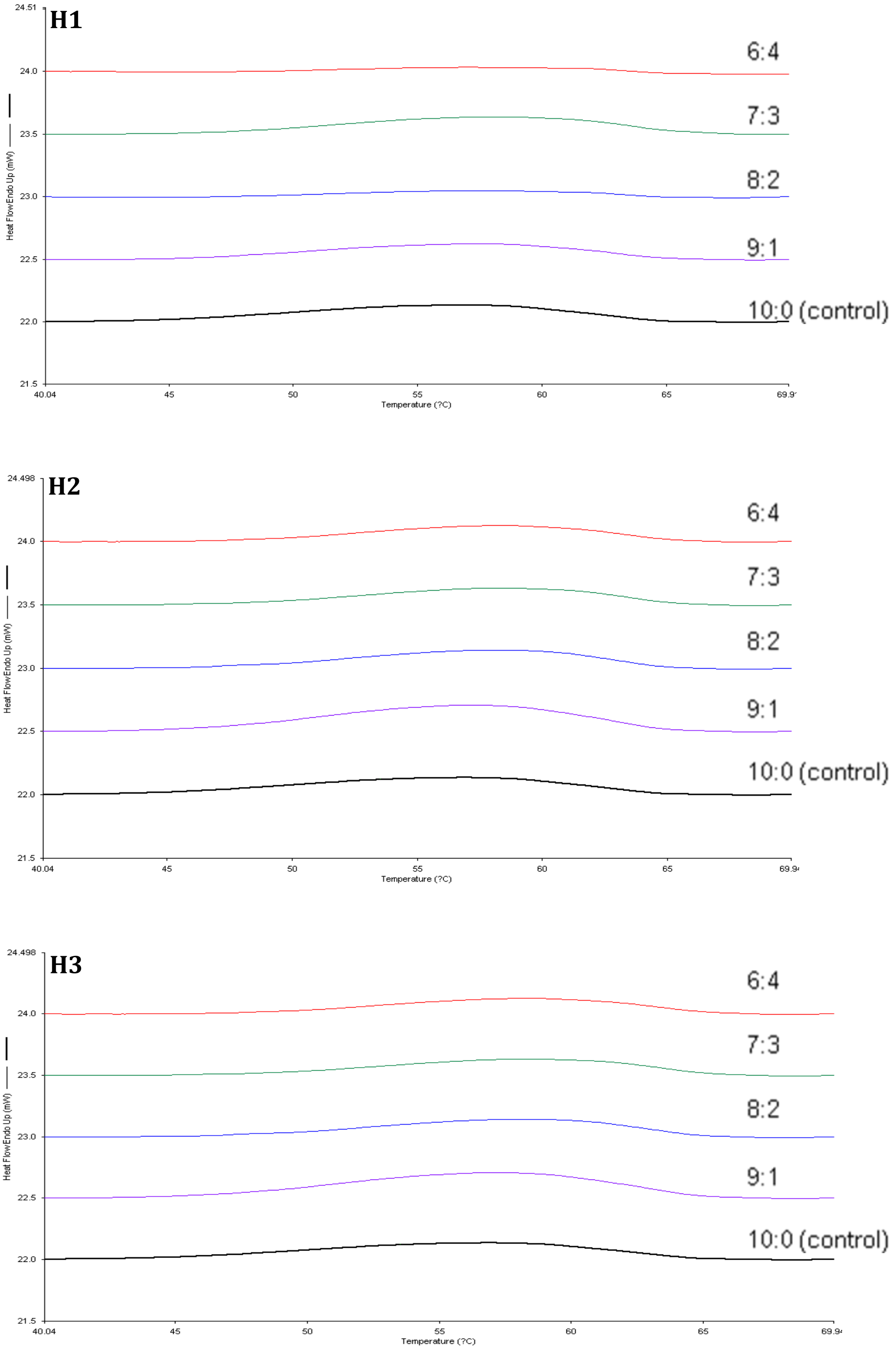
H3 คือ เฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยสารละลายด่างแล้วแยกด้วย DEAE-52-cellulose chromatography โดยใช้ 1 M formic acid เป็นสารชะ



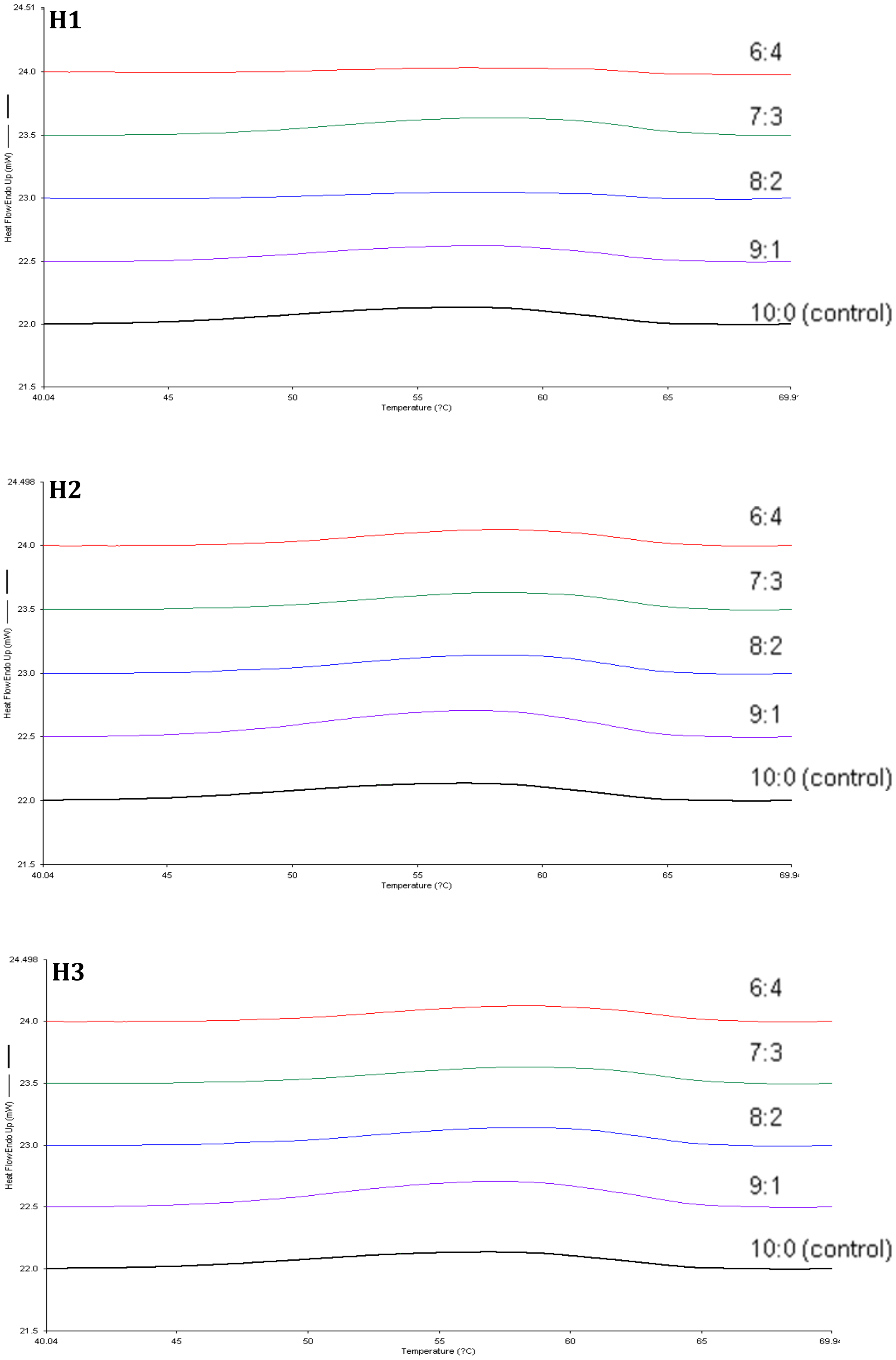
รูป ข.1 thermogram จาก DSC ของสารผสมระหว่างสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียวและเฮมิ-เซลลูโลสที่ระดับต่างๆ ในการเกิดเจลาติไนเซชัน



รูปที่ ข.2 thermogram จาก DSC ของสารผสมระหว่างสตาร์ชข้าวโพดและเฮมิเซลลูโลสที่ระดับต่างๆ ในการเกิดเจลาติไนเซชัน



รูปที่ ข.3 thermogram จาก DSC ของสารผสมระหว่างสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียวและเฮมิ-เซลลูโลสที่ระดับ ต่างๆ ในการทำลายโครงสร้างผลึกใหม่ของแอมิโลเพกทิน



รูปที่ ข.4 thermogram จาก DSC ของสารผสมระหว่างสตาร์ชข้าวโพดและเฮมิเซลลูโลสที่ระดับต่างๆ ในการทำลายโครงสร้างผลึกใหม่ของแอมิโลเพกทิน

ภาคผนวก ค

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน

ตารางที่ ค.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณของน้ำตาลแต่ละชนิดที่เป็นองค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลสที่ได้จากรำข้าวขาวดอกมะลิ 105

ลักษณะการทดสอบ	SOV	df	MS
ปริมาณของน้ำตาลแต่ละชนิดที่เป็นองค์ประกอบ	rhamnose	2	7.697 *
	error	6	0.382
	arabinose	2	533.939 *
	error	6	1.757
	galactose	2	14.268 *
	error	6	0.239
	glucose	2	1487.805 *
	error	6	10.632
	xanthan	2	1003.913 *
	error	6	14.141
	mannan	2	2.314 *
	error	6	0.70
	galacturonic acid	2	10.893 *
	error	6	0.039
	gluconic acid	2	0.375 *
	error	6	0.029

* หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ค.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมบัติทางความหนืดของสารผสมระหว่างสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียวและเฮมิเซลลูโลส โดยวิเคราะห์แบบ 2x3 factorial with control in CRD

ลักษณะการทดสอบ	ปัจจัยที่ศึกษา	SOV	df	MS	F	
สมบัติทางความหนืด	เฮมิเซลลูโลส (A)	initial viscosity	1	4.602	386.438	*
		pasting temperature	1	12.322	595.752	*
		peak viscosity	1	5672.685	93.162	*
		breakdown	1	4215.246	267.024	*
		final viscosity	1	1036.021	46.131	*
		setback	1	475.021	28.279	*
	สัดส่วนสตาร์ชต่อเฮมิเซลลูโลส (B)	initial viscosity	2	1.419	119.203	*
		pasting temperature	2	1.619	78.257	*
		peak viscosity	2	717.960	11.791	*
		breakdown	2	1424.154	90.216	*
		final viscosity	2	308.823	13.751	*
		setback	2	338.118	20.129	*
	A*B	initial viscosity	2	2.310	193.986	*
		pasting temperature	2	3.245	156.868	*
		peak viscosity	2	67703.683	1.112E3	*
		breakdown	2	42903.187	2.718E3	*
		final viscosity	2	12834.588	571.483	*
		setback	2	3694.038	219.916	*
	error	initial viscosity	6	.012		
		pasting temperature	6	.021		
		peak viscosity	6	60.891		
		breakdown	6	15.786		
		final viscosity	6	22.458		
		setback	6	16.797		

* หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ค.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมบัติทางความหนืดของสารผสมระหว่างสตาร์ชข้าวโพดและเฮมิเซลลูโลส โดยวิเคราะห์แบบ 2x3 factorial with control in CRD

ลักษณะการทดสอบ	ปัจจัยที่ศึกษา	SOV	df	MS	F
สมบัติทางความหนืด	เฮมิเซลลูโลส (A)	initial viscosity	1	6.140	1.208E3 *
		pasting temperature	1	2.823	40.324 *
		peak viscosity	1	12111.544	70.396 *
		breakdown	1	11048.184	189.251 *
		final viscosity	1	1445.627	10.695 *
		setback	1	1094.239	27.425 *
	สัดส่วนสตาร์ชต่อเฮมิเซลลูโลส (B)	initial viscosity	2	1.212	238.318 *
		pasting temperature	2	.747	10.673 *
		peak viscosity	2	2196.698	12.768 *
		breakdown	2	708.468	12.136 *
		final viscosity	2	10049.847	74.349 *
		setback	2	3362.832	84.283 *
	A*B	initial viscosity	2	3.285	646.205 *
		pasting temperature	2	1.558	22.253 *
		peak viscosity	2	57152.345	332.185 *
		breakdown	2	13237.719	226.757 *
		final viscosity	2	70411.237	520.907 *
		setback	2	18406.380	461.321 *
	error	initial viscosity	6	.005	
		pasting temperature	6	.070	
		peak viscosity	6	172.050	
		breakdown	6	58.378	
		final viscosity	6	135.170	
		setback	6	39.899	

* หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ค.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมบัติทางความร้อนในการเกิดเจลาติไนเซชันของสารผสมระหว่างสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียวและเฮมิเซลลูโลส โดยวิเคราะห์แบบ 3x4 factorial with control in CRD

ลักษณะการทดสอบ	ปัจจัยที่ศึกษา	SOV	df	MS	F
สมบัติทางความร้อนในการเกิดเจลาติไนเซชัน	เฮมิเซลลูโลส (A)	onset temperature (To)	2	6.491	249.171 *
		peak temperature (Tp)	2	5.599	171.195 *
		conclusion temperature (Tc)	2	8.720	161.368 *
		temperature range (Tc-To)	2	.251	10.007 *
		enthalpy of gelatinization (ΔH_1)	2	.019	.540
	สัดส่วนสตาร์ชต่อเฮมิเซลลูโลส (B)	onset temperature (To)	3	9.236	354.534 *
		peak temperature (Tp)	3	10.598	324.058 *
		conclusion temperature (Tc)	3	13.617	251.999 *
		temperature range (Tc-To)	3	.426	16.979 *
		enthalpy of gelatinization (ΔH_1)	3	.033	.932
	A*B	onset temperature (To)	6	.229	8.781 *
		peak temperature (Tp)	6	.220	6.723 *
		conclusion temperature (Tc)	6	.299	5.542 *
		temperature range (Tc-To)	6	.256	10.184 *
		enthalpy of gelatinization (ΔH_1)	6	.009	.264
	error	onset temperature (To)	12	.026	
		peak temperature (Tp)	12	.033	
		conclusion temperature (Tc)	12	.054	
		temperature range (Tc-To)	12	.025	
		enthalpy of gelatinization (ΔH_1)	12	.036	

* หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ค.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมบัติทางความร้อนในการเกิดเจลาติไนเซชันของสารผสมระหว่างสตาร์ชข้าวโพดและเฮมิเซลลูโลส โดยวิเคราะห์แบบ 3x4 factorial with control in CRD

ลักษณะการทดสอบ	ปัจจัยที่ศึกษา	SOV	df	MS	F	
สมบัติทางความร้อนในการเกิดเจลาติไนเซชัน	เฮมิเซลลูโลส (A)	onset temperature (To)	2	6.984	309.230	*
		peak temperature (Tp)	2	6.348	141.662	*
		conclusion temperature (Tc)	2	8.804	77.044	*
		temperature range (Tc-To)	2	.176	1.812	
		enthalpy of gelatinization (ΔH_1)	2	.017	.504	
	สัดส่วนสตาร์ชต่อเฮมิเซลลูโลส (B)	onset temperature (To)	3	10.813	478.816	*
		peak temperature (Tp)	3	11.427	255.029	*
		conclusion temperature (Tc)	3	14.370	125.747	*
		temperature range (Tc-To)	3	.274	2.818	
		enthalpy of gelatinization (ΔH_1)	3	.012	.376	
	A*B	onset temperature (To)	6	.550	24.371	*
		peak temperature (Tp)	6	.485	10.830	*
		conclusion temperature (Tc)	6	.376	3.292	*
		temperature range (Tc-To)	6	.078	.803	
		enthalpy of gelatinization (ΔH_1)	6	.004	.116	
	error	onset temperature (To)	12	.023		
		peak temperature (Tp)	12	.045		
		conclusion temperature (Tc)	12	.114		
		temperature range (Tc-To)	12	.097		
		enthalpy of gelatinization (ΔH_1)	12	.033		

* หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ค.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมบัติทางความร้อนในการเกิดรีโทรเกรเดชันของสารผสมระหว่างสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียวและเฮมิเซลลูโลส โดยวิเคราะห์แบบ 3x4 factorial with control in CRD

ลักษณะการทดสอบ	ปัจจัยที่ศึกษา	SOV	df	MS	F
สมบัติทางความร้อนในการเกิดเจลาติไนเซชัน	เฮมิเซลลูโลส (A)	onset temperature (To)	2	.387	1.046
		peak temperature (Tp)	2	.333	.459
		conclusion temperature (Tc)	2	.306	7.229 *
		temperature range (Tc-To)	2	.027	.067
		enthalpy of retrogradation (ΔH_2)	2	.131	1.133
		$\Delta H_2/\Delta H_1$	2	.001	1.024
	สัดส่วนสตาร์ชต่อเฮมิเซลลูโลส (B)	onset temperature (To)	3	7.884	21.335 *
		peak temperature (Tp)	3	2.595	3.585 *
		conclusion temperature (Tc)	3	.095	2.253
		temperature range (Tc-To)	3	6.348	16.074 *
		enthalpy of retrogradation (ΔH_2)	3	.460	3.967 *
		$\Delta H_2/\Delta H_1$	3	.002	2.948
	A*B	onset temperature (To)	6	.804	2.177
		peak temperature (Tp)	6	.182	.252
		conclusion temperature (Tc)	6	.098	2.305
		temperature range (Tc-To)	6	1.128	2.855
		enthalpy of retrogradation (ΔH_2)	6	.033	.288
		$\Delta H_2/\Delta H_1$	6	.000	.279
	error	onset temperature (To)	12	.370	
		peak temperature (Tp)	12	.724	
		conclusion temperature (Tc)	12	.042	
		temperature range (Tc-To)	12	.395	
		enthalpy of retrogradation (ΔH_2)	12	.116	
		$\Delta H_2/\Delta H_1$	12	.001	

* หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ค.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมบัติทางความร้อนในการเกิดรีโทรเกรเดชันของสารผสมระหว่างสตาร์ชข้าวโพดและเฮมิเซลลูโลส โดยวิเคราะห์แบบ 3x4 factorial with control in CRD

ลักษณะการทดสอบ	ปัจจัยที่ศึกษา	SOV	df	MS	F
สมบัติทางความร้อนในการเกิดเจลาติไนเซชัน	เฮมิเซลลูโลส (A)	onset temperature (To)	2	7.615	14.958 *
		peak temperature (Tp)	2	4.246	16.416 *
		conclusion temperature (Tc)	2	.025	1.179
		temperature range (Tc-To)	2	7.791	15.189 *
		enthalpy of retrogradation (ΔH_2)	2	.162	.865
		$\Delta H_2/\Delta H_1$	2	.001	.716
	สัดส่วนสตาร์ชต่อเฮมิเซลลูโลส (B)	onset temperature (To)	3	5.022	9.866 *
		peak temperature (Tp)	3	1.380	5.336 *
		conclusion temperature (Tc)	3	.233	11.065 *
		temperature range (Tc-To)	3	3.554	6.927 *
		enthalpy of retrogradation (ΔH_2)	3	4.142	22.049 *
		$\Delta H_2/\Delta H_1$	3	.022	18.075 *
	A*B	onset temperature (To)	6	.822	1.614
		peak temperature (Tp)	6	.102	.393
		conclusion temperature (Tc)	6	.252	11.968 *
		temperature range (Tc-To)	6	.587	1.145
		enthalpy of retrogradation (ΔH_2)	6	.045	.238
		$\Delta H_2/\Delta H_1$	6	.000	.234
	error	onset temperature (To)	12	.509	
		peak temperature (Tp)	12	.259	
		conclusion temperature (Tc)	12	.021	
		temperature range (Tc-To)	12	.513	
		enthalpy of retrogradation (ΔH_2)	12	.188	
		$\Delta H_2/\Delta H_1$	12	.001	

* หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวพรรณลดา ฉากทองคำ เกิดวันที่ 10 เมษายน 2530 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาอาหารและโภชนาการ คณะสาธารณสุข-ศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล เมื่อปีการศึกษา 2551 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2552

<u>ผลงานวิจัย</u>

เสนอผลงานระดับนานาชาติเรื่อง Influence of Jasmine Rice Bran Hemicelluloses on Thermal Properties of Corn Starches Varied in Amylose Content ในงานประชุมทางวิชาการ The 1st ASEAN Plus Three Graduate Research Congress (AGRC 2012) ระหว่างวันที่ 1-2 มีนาคม 2555 ณ The Empress Convention Center จังหวัดเชียงใหม่