# รายงานการวิจัย

# การเตรียมวัสดุประกอบนาโนระหว่างแป้งและเซลลูโลสกับยางธรรมชาติ

# Preparation of Starch and Cellulose/Natural Rubber Nanocomposites


**ชุติมา แกมกิจ**

**Chutima Kaemkit**

**คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**

**มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย**



**ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย**

**งบประมาณแผ่นดินประจำปี พ.ศ. 2557**

# การเตรียมวัสดุประกอบนาโนระหว่างแป้งและเซลลูโลสกับยางธรรมชาติ

**ชุติมา แกมกิจ**

## บทคัดย่อ

การศึกษานี้เป็นศึกษาการเตรียมวัสดุประกอบระหว่างแป้งและเซลลูโลสกับยางธรรมชาติ โดยใช้แป้ง 2 ชนิดได้แก่ แป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวโพด เส้นใย 2 ชนิด ได้แก่ เส้นใยชานอ้อย และเส้นใยผักตบชวา เริ่มต้นในกระบวนการคือการย่อยแป้งหรือเส้นใยด้วยกรดซัลฟิวริก ขนาดของแป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพด เส้นใยชานอ้อย และเส้นใยผักตบชวา หลังจากย่อยด้วยกรดแล้วมีขนาดอยู่ที่ 1,123.6 nm 1,214.1 nm 4,347.0 nm และ 3,766.4 nm ตามลำดับ หลังจากนั้นเตรียมวัสดุประกอบระหว่างแป้งและเส้นใยเซลลูโลสกับยางธรรมชาติ แล้วนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่าสมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยด้วยกรดให้สมบัติเชิงกลสูงสุดที่ปริมาณ 10 phr และแป้งข้าวโพดที่ผ่านการย่อยด้วยกรดให้สมบัติเชิงกลสูงสุดที่ปริมาณ 15 phr และยางวัลคาไนซ์ที่มีการเติมแป้งที่ไม่ผ่านการย่อยด้วยกรดให้ค่าสมบัติเชิงกลที่ต่ำกว่าแป้งที่ผ่านการย่อยด้วยกรด ในส่วนของเส้นใยเซลลูโลส สมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากเส้นใยที่ผ่านการย่อยด้วยกรดทั้งสองชนิดให้สมบัติเชิงกลสูงสุดที่ปริมาณ 20 phr เมื่อระดับการย่อยเพิ่มขึ้นเส้นใยจะถูกย่อยทำให้มีขนาดเล็กลงเนื่องจากกรดสามารถแทรกตัวผ่านเส้นใยจึงเกิดการผุกร่อนของเส้นใย และการกระจายตัวของเส้นใยที่ผ่านการย่อยด้วยกรดทั้งสองชนิดสามารถกระจายตัวในยางธรรมชาติได้ดีกว่าเส้นใยที่ไม่ผ่านการย่อยด้วยกรด

**คำสำคัญ** แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพด เส้นใยชานอ้อย เส้นใยผักตบชวา ยางธรรมชาติ วัสดุประกอบ

# Preparation of Starch and Cellulose/Natural Rubber Nanocomposites

**Chutima Kaemkit**

## Abstract

This research is the study of Preparation of Starch and Cellulose/Natural Rubber composites. Types of starch are include cassava starch and corn starch and two fiber with bagasse and hyacinth fiber. The Starch and Cellulose digested with sulfuric acid. Size of cassava starch, corn starch, bagasse fiber And hyacinth fiber after acid digestion were 1,123.6 nm, 1,214.1 nm, 4,347.0 nm, and 3,766.4 nm, respectively. After that, The composites prepared between starch and cellulose fiber with natural rubber. The highest mechanical properties of vulcanized rubber with cassava starch by acid digestion amount of 10 phr and the acid digested corn starch amount of 15 phr. The mechanical properties of vulcanized rubber with acid digested starch more than vulcanized rubber with non-acidic starch. In the cellulose fiber. The highest mechanical properties of the vulcanized rubber prepared from both hydrolysed fibers amount of 20 phr. When the digestibility level increased, the fiber reduced to a smaller size due to acid addition. Pass through the fiber, resulting corroded the fiber. And distribute the fibers that digested with both acids dispersed in natural rubber better than those that are not digested with acid.

Keyword: cassava starch, corn starch, bagasse fiber, hyacinth fiber, natural rubber, composites

# กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ปีงบประมาณ 2557 ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้ และขอขอบคุณห้องปฏิบัติการสังเคราะห์พอลิเมอร์ โรงฝึกปฏิบัติการทางเทคโนโลยียาง คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือในการทำวิจัย ขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือในการทดสอบ SEM และ Zeta potential analyzer ขอขอบพระคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ในสาขาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ ที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือด้านต่างๆในการวิจัย

ชุติมา แกมกิจ

กรกฎาคม 2560

# สารบัญ

**หน้า**

บทคัดย่อ.....ก
Abstract.....ข
กิตติกรรมประกาศ.....ค
สารบัญ.....ง
สารบัญตาราง.....จ
สารบัญภาพ.....ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....1
บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....3
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....32
บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง.....41
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....58
ข้อเสนอแนะ.....60
เอกสารอ้างอิง.....61

# สารบัญตาราง

**หน้า**

**ตารางที่ 1** สมบัติที่สำคัญของอะมิโลสและอะมิโลเพกทิน.....3
**ตารางที่ 2** สมบัติทางโครงสร้างของอะมิโลส.....5
**ตารางที่ 3** สมบัติทางโครงสร้างของอะมิโลเพกทิน.....7
**ตารางที่ 4** การเตรียมแป้งด้วยวิธีการย่อยด้วยกรด.....35
**ตารางที่ 5** การเตรียมเส้นใยด้วยการย่อยด้วยกรด.....35
**ตารางที่ 6** อัตราส่วนของยางและแป้งที่ใช้ในการเตรียมวัสดุประกอบ.....36
**ตารางที่ 7** อัตราส่วนของยางและเส้นใยที่ใช้ในการเตรียมวัสดุประกอบ.....37
**ตารางที่ 8** ผลการวัดขนาดอนุภาคของเครื่อง Zeta potential analyzer.....42
**ตารางที่ 9** สัณฐานวิทยาของแป้งมันสำปะหลัง และแป้งข้าวโพด.....43
ที่ผ่านการย่อยด้วยกรดซัลฟิวริก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

# สารบัญภาพ

**หน้า**

**ภาพที่ 1** โครงสร้างของอะมิโลส....4
**ภาพที่ 2** ลักษณะเกลียวของอะมิโลส....6
**ภาพที่ 3** โครงสร้างอะมิโลเพกทิน....6
**ภาพที่ 4** การเกิดเจลาทิไนเซชันของเม็ดแป้ง....10
**ภาพที่ 5** การเกิดรีโทรเกรเดชัน....11
**ภาพที่ 6** กลไกการคืนตัวของแป้ง....12
**ภาพที่ 7** แผนภาพการเตรียมStarch nanocrystals....14
**ภาพที่ 8** โครงสร้างของเซลลูโลสในผนังเซลล์พืชชั้นสูง....14
**ภาพที่ 9** เส้นใยเซลลูโลสในผนังเซลล์พืชชั้นสูง....15
**ภาพที่ 10** โครงสร้างของเซลลูโลส....15
**ภาพที่ 11** ลักษณะการสานกันเป็นร่างแหของเซลลูโลส....16
**ภาพที่ 12** ผักตบชวา....
21
**ภาพที่ 13** ต้นอ้อยและชานอ้อย....22
**ภาพที่ 14** ลักษณะของวัสดุประกอบที่ใช้เป็นตัวเสริมแรงชนิดอนุภาคและเส้นใย....25
**ภาพที่ 15** สัณฐานวิทยาของยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจาก Cassava Starch Hydrolysis....45
**ภาพที่ 16** สัณฐานวิทยาของยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจาก Maize Starch Hydrolysis....46
**ภาพที่ 17** ความแข็ง (Hardness) ของยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจาก CS, MS, CSH และ MSH....47
**ภาพที่ 18** ความแข็งของยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจาก ชานอ้อยและผักตบชวา....48
ที่ผ่านการย่อยและไม่ผ่านการย่อย
**ภาพที่ 19** ความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile Strength) ของยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจาก....49
CS, MS, CSH และ MSH
**ภาพที่ 20** ความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile Strength) ของยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจาก....50
ชานอ้อย และผักตบชวา ที่ผ่านการย่อยและไม่ผ่านการย่อย
**ภาพที่ 21** 500% Modulus ของยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจาก CS, MS, CSH และ MSH....51

# สารบัญภาพ (ต่อ)

**หน้า**

**ภาพที่ 22** ความสามารถในการยืดจนขาด (Elongation at Break).....52
ของยางที่วัลคาไนซ์ที่เตรียมจาก CS, MS, CSH และ MSH
**ภาพที่ 23** ความสามารถในการยืดจนขาด (Elongation at Break).....53
ของยางที่วัลคาไนซ์ที่เตรียมจาก ชานอ้อย และผักตบชวา ที่ผ่านการย่อย
และไม่ผ่านการย่อย
**ภาพที่ 24** ความต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear Strength) ของยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจาก.....54
CS, MS, CSH และ MSH
**ภาพที่ 25** ความต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear Strength)ของยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจาก.....55
ชานอ้อยและ ผักตบชวาที่ผ่านการย่อยและไม่ผ่านการย่อย
**ภาพที่ 26** ความต้านทานต่อสึกหรอ (Abrasion loss) แบบ Taber ของยางวัลคาไนซ์.....56
ที่เตรียมจาก CS, MS, CSH และ MSH
**ภาพที่ 27** ความต้านทานต่อสึกหรอ (Abrasion loss) แบบ Taber ของยางวัลคาไนซ์.....57
ที่เตรียมจาก ชานอ้อย และผักตบชวาที่ผ่านการย่อยและไม่ผ่านการย่อย

# บทที่ 1

# บทนำ

## 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

วัสดุประกอบนาโนเป็นวัสดุที่ประกอบด้วยวัสดุหลายวัฏภาคโดยมีวัฏภาคหนึ่งมีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร การเติมสารตัวเติมที่มีขนาดนาโนในปริมาณเล็กน้อยลงในเมทริก สามารถเสริมสร้างความแข็งแรงให้กับพอลิเมอร์ได้มากขึ้น เนื่องจากสารตัวเติมที่มีขนาดนาโนจะมีอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมาก ทำให้มีพื้นผิวที่สามารถเกิดอันตรกิริยากับเมทริกมากขึ้น ปัจจุบันมีการใช้ยางพาราเพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆมากมาย จึงได้มีการพัฒนาและคิดค้นวิธีการหรือเทคโนโลยีใหม่ๆในการพัฒนาผลิตภัณฑ์จากยางพาราอยู่เสมอ เพื่อเพิ่มความหลากหลายของการใช้งานหรือปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์ สารตัวเติมเป็นสารที่มีความสำคัญในการพัฒนาสมบัติของผลิตภัณฑ์จากยางรวมถึงยังช่วยลดต้นทุนและยังช่วยในกระบวนการผลิต แป้งมันสำปะหลังและเส้นใยเซลลูโลสซึ่งได้จาก ไม้ไผ่, มะพร้าว, ปาล์มน้ำมัน, ชานอ้อย, ซังข้าวโพด, เส้นใยฝ้าย และฟางข้าว เป็นต้น เป็นพอลิแซ็คคาไรด์ชนิดหนึ่งที่สามารถนำมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติได้ การกระจายของแป้งและเซลลูโลสส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติ เนื่องจากแป้งมันสำปะหลังและเซลลูโลสมีราคาถูก หาได้ง่าย ไม่มีสีไม่มีกลิ่น จึงเหมาะที่จะเติมลงไปในยางเพื่อช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางให้ดีขึ้น แต่เนื่องจากเม็ดแป้งปกติจะมีขนาดอยู่ในระดับไมโครเมตร เมื่อเติมลงไปในยางธรรมชาติอาจเกิดการเกาะกลุ่มกันทำให้เกิดการกระจายตัวที่ไม่ดี ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่มีการเติมแป้งลงไปลดลง ในงานวิจัยนี้จึงทำการเตรียมแป้งและเซลลูโลสในรูปของ Starch nanocrystals และ Cellulose nanocrystals โดย Starch nanocrystals และ Cellulose nanocrystals สามารถเตรียมได้จากการนำแป้งหรือเส้นใยเซลลูโลสมาทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสด้วยกรด วัตถุประสงค์ที่สำคัญในการเตรียม Starch nanocrystals และ Cellulose nanocrystals เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกระจายตัวของแป้งและเซลลูโลสในยางธรรมชาติ ซึ่งจะช่วยในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติให้ดีขึ้น

**1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย**

1.เพื่อศึกษาการเตรียม Starch nanocrystals และ Cellulose nanocrystals ด้วยวิธีการไฮโดรไลซิสด้วยกรด

2.เพื่อศึกษาการสังเคราะห์วัสดุประกอบนาโนระหว่าง Starch nanocrystalsและ Cellulose nanocrystals กับยางธรรมชาติ

3.เพื่อศึกษาลักษะการกระจายตัวของ starch nanocrystal และ Cellulose nanocrystals ในยางธรรมชาติและสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบนาโนระหว่าง starch nanocrystalและ Cellulose nanocrystals กับยางธรรมชาติ

**1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย**

1. สังเคราะห์ Starch nanocrystals และ Cellulose nanocrystals

2. สังเคราะห์วัสดุประกอบนาโนระหว่าง Starch nanocrystals และ Cellulosnanocrystals กับยางธรรมชาติ

3. ตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของ Starch nanocrystals และ Cellulose nanocrystals วัสดุประกอบนาโนระหว่าง Starch nanocrystals และ Cellulose nanocrystals กับยางธรรมชาติ ด้วยเทคนิค SEM

4. ทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบนาโนระหว่าง Starch nanocrystals และCellulose nanocrystals กับยางธรรมชาติ ซึ่งได้แก่ การทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength), ระยะยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) และความแข็ง (Hardness)

**1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าได้รับ**

1. นำแป้งมันสำปะหลัง เส้นใยเซลลูโลสและยางธรรมชาติ ซึ่งเป็นวัตถุดิบภายในประเทศและราคาถูกมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด

2. ทราบข้อมูลเบื้องต้นในส่วนของลักษะการกระจายตัวของ starch nanocrystal และ cellulose nanocrystal ในยางธรรมชาติและสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบนาโนระหว่าง starch nanocrystal และcellulose nanocrystal กับยางธรรมชาติ

3. เป็นองค์ความรู้สำหรับการวิจัยพัฒนาวัสดุประกอบนาโนระหว่าง starch nanocrystal และ cellulose nanocrystal กับยางธรรมชาติ เพื่อใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมยางต่อไป

# บทที่ 2

# การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

## 1 องค์ประกอบภายในแป้ง

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ในอัตราส่วน 6:10:5 มีสูตรเคมีโดยทั่วไป คือ $(C_6H_{10}O_5)n$ แป้งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคส ซึ่งประกอบด้วยหน่วยของน้ำตาลกลูโคสมาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (glucosidic linkage) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ทางด้านตอนปลายของสายพอลิเมอร์ที่มีหน่วยกลูโคสที่มีหมู่แอลดีไฮด์ (aldehyde group) เรียกว่าปลายรีดิวซิง (reducing end group) แป้งประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ พอลิเมอร์เชิงเส้น (อะมิโลส) และพอลิเมอร์เชิงกิ่ง (อะมิโลเพกทิน) วางตัวในแนวรัศมี แสดงระดับโครงสร้างของเม็ดแป้งองค์ประกอบหลักภายใต้เม็ดแป้งได้แก่ 1. อะมิโลส (amylose) 2. อะมิโลเพกทิน (amylopetin) 3. สารตัวกลาง (intermediate material) (กล้าณรงค์ และเกื้อกูล, 2550)

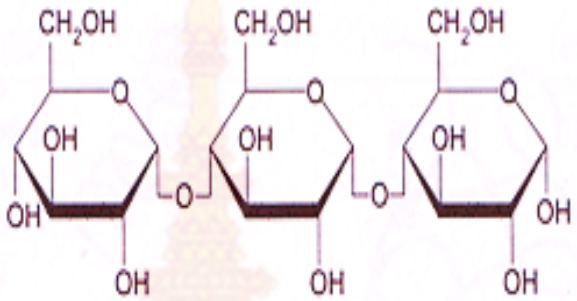
**ตารางที่ 1 สมบัติที่สำคัญของอะมิโลสและอะมิโลเพกทิน**

| คุณสมบัติ | อะมิโลส | อะมิโลเพกทิน |
|---|---|---|
| ลักษณะโครงสร้าง | สารประกอบของน้ำตาลกลูโคสเกาะกันเป็นเส้นตรง | สารประกอบของน้ำตาลกลูโคสเกาะกันเป็นกิ่งก้าน |
| พันธะที่จับ | $\alpha$-1,4 | $\alpha$-1,4 และ $\alpha$-1,6 |
| ขนาด | 200 – 2,000 หน่วยกลูโคส | มากกว่า 10,000 หน่วยกลูโคส |
| การละลาย | ละลายน้ำได้น้อยกว่า | ละลายน้ำได้ดีกว่า |
| การทำปฏิกิริยากับไอโอดีน | สีน้ำเงิน | สีแดงม่วง |
| การจับตัว | เมื่อให้ความร้อนแล้วทิ้งไว้จะจับตัวเป็นวุ้นและแผ่นแข็ง | ไม่จับตัวเป็นแผ่นแข็ง |

**ที่มา:** กล้าณรงค์ และเกื้อกูล (2550)

**1.1 อะมิโลส**

อะมิโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 2,000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิติก (glucosidic linkage) ชนิดแอลฟา -1, 4 (α-1, 4) ดังภาพที่ 1




**ภาพที่ 1** โครงสร้างของอะมิโลส
**ที่มา:** กล้าณรงค์ และเกื้อกูล (2550)

แป้งจากธัญพืช เช่น แป้งข้าวโพด แป้งสาลี แป้งข้าวฟ่าง มีปริมาณอะมิโลสสูงประมาณ 28% แป้งจากราก และหัว เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง แป้งสาคูมีปริมาณอะมิโลสต่ำประมาณ 20% แป้งข้าวเหนียว (waxy starch) ไม่มีอะมิโลสเลย และแป้งข้าวโพดอะมิโลเมส (amylomaize) มีอะมิโลสสูงมากถึง 80% น้ำหนักโมเลกุลของอะมิโลสอยู่ในช่วง 105 ถึง 106 ดาลตัล ซึ่งอะมิโลสในแป้งแต่ละชนิดจะมีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกันไป ในแป้งมันฝรั่ง และแป้งมันสำปะหลัง มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่าในแป้งข้าวโพดและแป้งสาลี แป้งแต่ละชนิดมีขนาดโมเลกุลหรือระดับขั้นการเกิดพอลิเมอร์ (Degree of polymerization, DP) ของอะมิโลสแตกต่างกัน แป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลังมีขนาดโมเลกุลของ อะมิโลสอยู่ในช่วง 1,000 ถึง 6,000 สูงกว่าแป้งข้าวโพดและแป้งสาลีซึ่งมีขนาดโมเลกุลของอะมิโลสในช่วง 200 ถึง 1,200 แป้งที่มีโมเลกุลของอะมิโลส ยาวขึ้นจะมีแนวโน้มในการเกิดรีโทรเกรเดชั่น (retrogradation) ลดลง ในธรรมชาติอะมิโลสมีกิ่งก้านอยู่บ้างแต่ไม่มาก คุณสมบัติทางโครงสร้างของ อะมิโลสของแป้งหลายๆ ชนิดแสดงดังตารางที่ 2

อะมิโลสสามารถรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีน และสารประกอบอินทรีย์อื่นๆ เช่น บิวทานอล กรดไขมัน สารลดแรงตึงผิว ฟีนอล และไฮโดรคาร์บอน สารประกอบเชิงซ้อนเหล่านี้จะไม่ละลายในน้ำ โดยอะมิโลสจะพันเป็นเกลียวล้อมรอบสารประกอบอินทรีย์

**ตารางที่ 2** สมบัติทางโครงสร้างของอะมิโลส

| แหล่งแป้ง | ปริมาณอะมิโลส (%) | β-Amylolysis Limit (%) | ขนาดโมเลกุล (DP) เฉลี่ย | จำนวนสายเฉลี่ย (NC) | ความยาวสายเฉลี่ย (CL) | โมเลกุลกิ่ง (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| แป้งสาลี | 28 | 88 | 1,300 | 4.8 | 270 | 27 |
| แป้งข้าวโพด | 28 | 82 | 930 | 2.7 | 340 | 44 |
| แป้งข้าวเจ้า | 17 | - | - | - | - | - |
| อินดิคา (Indica) | - | 73 | 1,000 | 4.0 | 250 | 49 |
| จาโปนิค (Japonica) | - | 81 | 1,100 | 34 | 320 | 31 |
| แป้งมันสำปะหลัง | 17 | 75 | 2,600 | 7.6 | 340 | 42 |
| แป้งมันฝรั่ง | 21 | 80 | 4,900 | 9.5 | 240 | - |

**ที่มา:** กล้าณรงค์ และเกื้อกูล (2550)

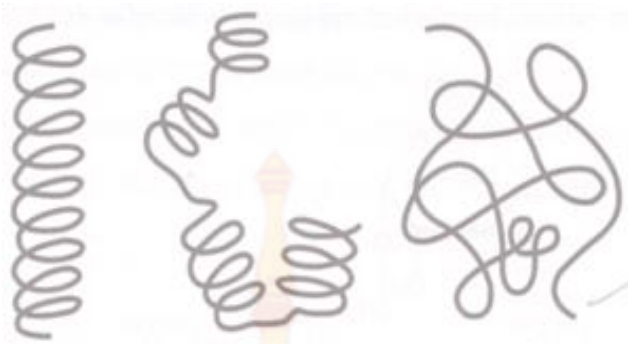
หมายเหตุ: β -Amylolysis = % การย่อยแป้งโดย β-amylase

DP = Degree of polymerization

NC = Average number of chain

CL = Average chain length

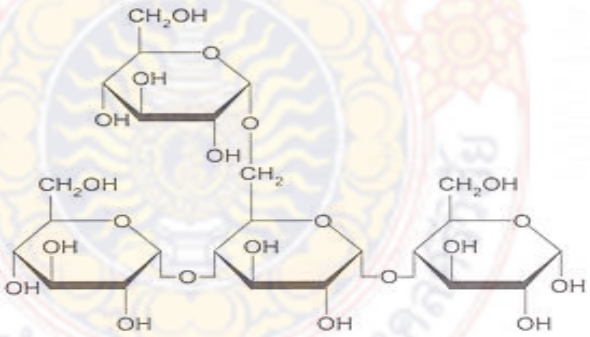
โครงสร้างของอะมิโลสเมื่ออยู่ในสารละลายจะมีหลายรูปแบบ คือ ลักษณะเป็นเกลียวม้วน (helix) เกลียวที่คลายตัว (interrupted helix) หรือ ม้วนยาวไม่เจาะจง (random coil) ดังภาพที่ 2.2 ในสารละลายที่อุณหภูมิห้อง อะมิโลสอยู่ลักษณะเป็นเกลียวม้วนหรือเกลียวที่คลายตัว แต่ในตัวทำละลายบางชนิดอะมิโลสจะอยู่ในลักษณะม้วนอย่างไม่เจาะจง นอกจากนี้โครงสร้างของอะมิโลสยังขึ้นอยู่กับขนาดโมเลกุลด้วย อะมิโลสที่มีขนาดน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 6,500 ถึง 160,000 จะอยู่ในลักษณะเกลียวคู่ที่แข็ง (double helixs) ส่วนอะมิโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 6,500 หรือมากกว่า 160,000 จะมีโมเลกุลเป็นม้วนอย่างไม่เจาะจง และอาจมีบางส่วนละลายได้



**ภาพที่ 2** ลักษณะเกลียวของอะมิโลส
**ที่มา:** กล้าณรงค์ และเกื้อกูล (2550)

**1.2 อะมิโลเพกทิน**

อะมิโลเพกทินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิกชนิด $\alpha$-1, 4 และส่วนที่เป็นกิ่งก้านสาขาที่เป็นพอลิเมอร์กลูโคสสายสั้น มีขนาดโมเลกุล (DP) อยู่ในช่วง 10 ถึง 60 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิกชนิด $\alpha$-1,6 ดังภาพที่ 3




**ภาพที่ 3** โครงสร้างอะมิโลเพกทิน
**ที่มา:** กล้าณรงค์ และเกื้อกูล (2550)

หน่วยกลูโคสที่มีพันธะโคซิดิกชนิด $\alpha$-1, 6 มีอยู่ประมาณ 5% ของปริมาณหน่วยกลูโคสในอะมิโลเพกทินทั้งหมด ขนาดโมเลกุลของอะมิโลเพกทินในแป้งแต่ละชนิดจะมีค่าประมาณ 2 ล้านหน่วยอะมิโลเพกทินมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1,000 เท่าของอะมิโลส คือ ประมาณ $10^7$ ถึง $10^9$ ดาลตัน และมีอัตราในการคืนตัวต่ำ เนื่องจากอะมิโลเพกทินมีลักษณะโครงสร้างกิ่ง

สำหรับอะมิโลเพกทินของแป้งข้าวเจ้า ข้าวเหนียว มันสำปะหลัง และมันฝรั่ง สายส่วนใหญ่ประมาณ 80 – 90% ประกอบด้วยกลุ่มเดี่ยวๆ และสายที่เหลืออีก 10 - 20% จะเป็นส่วนเชื่อมต่อของแต่ละกลุ่ม ในแต่ละกลุ่มประกอบไปด้วยสายประมาณ 22 – 25 สาย ทำให้เกิดเป็นส่วนผลึกของเม็ดแป้ง ในการจับกันเป็นกลุ่มของอะมิโลเพกทินทำให้เกิดเป็นเกลียวคู่ (double helix) ซึ่งช่วยให้เม็ดแป้งมีความคงทนต่อการทำปฏิกิริยาด้วยกรดและเอนไซม์

การเกิดเกลียวคู่ของอะมิโลเพกทินต้องใช้พันธะไฮโดรเจนและแรงวันเดอร์วาลส์ในการเชื่อมต่อกัน กิ่งอะมิโลเพกทินภายในเม็ดแป้งสามารถเกิดเป็นผลึกได้ ทั้งกิ่งที่อยู่ใกล้กันในกลุ่ม (cluster) เดียวกัน หรือเกิดขึ้นระหว่างกลุ่มที่ใกล้เคียงกัน สมบัติทางโครงสร้างของอะมิโลเพกทินแสดงดังตารางที่ 3

**ตารางที่ 3** สมบัติทางโครงสร้างของอะมิโลเพกทิน

| แหล่งแป้ง | ปริมาณอะมิโลเพกทิน (%) | ขนาดโมเลกุล (DP) เฉลี่ย | ความยาวสายเฉลี่ย (CL) | จำนวนสายเฉลี่ย (NC) | ความยาวสายภายนอกเฉลี่ย (ECL) | ความยาวสายภายในเฉลี่ย (ICL) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| แป้งสาลี | 72 | 4,800 | 19 | 250 | 13 | 5 |
| แป้งข้าวโพด | 72 | 8,200 | 12 | 037 | 15 | 6 |
| แป้งข้าวเจ้า | 83 | - | - | - | - | - |
| อินดิคา (Indica) | - | 4,700 | 21 | 220 | 14 | 6 |
| จาโปนิค (Japonica) | - | 12,800 | 19 | 670 | 13 | 5 |
| ข้าวเหนียว (Waxy Rice) | - | 18,500 | 18 | 1,000 | 12 | 5 |
| แป้งมันสำปะหลัง | 79 | 9,800 | 24 | 410 | 15 | 8 |
| แป้งมันฝรั่ง | 83 | - | - | - | - | - |

**ที่มา:** กล้าณรงค์ และเกื้อกูล (2550)

หมายเหตุ : DP = Degree of polymerization

NC = Average number of chain

CL = Average chain length

ECL = External chain length

ICL = Internalchain length

## 2 สมบัติของแป้ง

### 2.1 การดูดซับน้ำ การพองตัวและการละลาย

เมื่อเติมน้ำลงในแป้งและตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำที่เติมลงไปภายใต้สภาวะบรรยากาศของห้อง จนเกิดสมดุลระหว่างความชื้นภายในเม็ดแป้งกับน้ำที่เติมและความชื้นในบรรยากาศ ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซึมจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ แป้งส่วนใหญ่เมื่อเกิดสมดุลภายใต้บรรยากาศปกติจะมีความชื้น 10 ถึง 17% จากการทดลองพบว่าแป้งข้าวโพด แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง และแป้งข้าวโพดข้าวเหนียว สามารถดูดซึมน้ำได้ในปริมาณ 39.9, 42.9, 50.9 และ 51.4 กรัมต่อน้ำหนักแห้ง 100 กรัม ตามลำดับ

แป้งดิบจะไม่ละลายน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาทิไนซ์ เนื่องจากมีพันธะไฮโดรเจนซึ่งเกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งที่อยู่ใกล้ๆกันเชื่อมต่อกันอยู่ แต่เมื่ออุณหภูมิของสารผสมน้ำแป้งเพิ่มสูงกว่าช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาทิไนซ์ พันธะไฮโดรเจนจะถูกทำลาย โมเลกุลของน้ำจะเข้ามาจับกับหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระเม็ดแป้งเกิดการพองตัว ทำให้การละลาย ความหนืดและความใสเพิ่มขึ้น ปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัว และความสามารถในการละลายคือ ชนิดของแป้ง ความแข็งแรง และลักษณะของร่างแหภายในเม็ดแป้ง สิ่งเจือปนภายในเม็ดแป้งที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต ปริมาณน้ำในสารละลายแป้ง และการดัดแปรแป้งทางเคมี รูปแบบในการพองตัวและการละลายของเม็ดแป้งแต่ละชนิดจะมีรูปแบบที่แตกต่างกันไป

เมื่อให้ความร้อนแก่สารละลายน้ำแป้ง เม็ดแป้งจะเกิดการพองตัว และบางส่วนของแป้งจะละลายออกมา กำลังการพองตัวของแป้งจะแสดงเป็นปริมาตรหรือน้ำหนักของเม็ดแป้งที่เพิ่มขึ้นมากที่สุดเมื่อเม็ดแป้งพองตัวได้อย่างอิสระในน้ำ สำหรับความสามารถในการละลายจะแสดงเป็นน้ำหนักของแข็งทั้งหมดในสารละลายที่สามารถละลายได้

### 2.2 ความหนืด

**2.2.1 ปัจจัยการเกิดความหนืด** ความหนืดเป็นสมบัติเฉพาะตัวที่สำคัญของแป้ง เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อความหนืดของแป้งได้แก่ ชนิดของแป้งและการดัดแปรแป้งด้วยวิธีต่างๆ

- การดัดแปรโดยวิธีทางกายภาพ เช่น แป้งพรีเจลาทิไนซ์ (pregelatinzed starch) สามารถกระจายตัวในน้ำเย็นหรือที่อุณหภูมิห้อง ให้ความหนืดได้ทันที เหมาะสมในการนำมาใช้ผลิตอาหารที่ไม่ต้องให้ความร้อน เช่น ขนมพุดดิง น้ำเกรวี ซอส และไส้กึ่งสำเร็จรูปสำหรับอาหารประเภทพายหรือครีมหน้าขนมต่างๆ

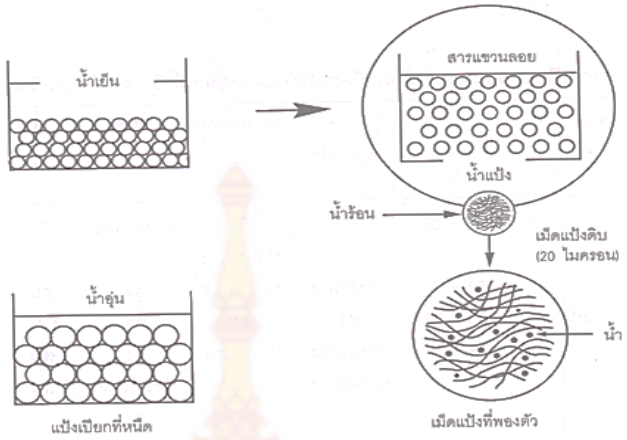
- การดัดแปรด้วยกรดหรือเดกซ์ทริไนเซชัน ให้ความหนืดขณะร้อนต่ำกว่า แป้งดิบเจลที่ได้ลักษณะใสและแข็งกว่าแป้งดิบ ใช้สำหรับผลิต ลูกกวาด และทอฟฟี่

- การดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน (esterification) ได้แป้งเอสเทอร์ เช่น สตาร์ชแอซีเทต (starch acetate) และสตาร์ชฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์ (starch phosphate monoester) ซึ่งมีความหนืดสูงกว่าแป้งดิบและคงความหนืดไว้ได้ดี มีอุณหภูมิที่เกิดความหนืด (pasting temperature) ต่ำกว่าแป้งดิบ ลักษณะเจลใส คงตัวอุณหภูมิต่ำในสภาวะการคืนรูปจากเยือกแข็ง เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้กับผลิตภัณฑ์อาหารแช่เยือกแข็ง หรืออาหารที่ต้องการความข้นหนืดและต้องเก็บไว้ที่อุณหภูมิต่ำในระหว่างการขนส่งและการเก็บรักษา

- การดัดแปรโดยวิธีครอสลิง (cross-linking) แป้งที่ได้สามารถรักษาความหนืดไว้ได้ที่อุณหภูมิสูง เหมาะสำหรับใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารกระป๋อง ซึ่งต้องการความหนืดต่ำในช่วงแรกเพื่อให้เกิดการนำความร้อนในกระป๋องเป็นไปอย่างรวดเร็ว และใช้เวลาในการทำลายเชื้อจุลินทรีย์น้อยลงผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความหนืดตามต้องการเมื่อเย็นลง

### 2.3 การเกิดเจลาทิไนเซชัน

โมเลกุลของแป้งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl groups) จำนวนมาก ยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน มีคุณสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) แต่เนื่องจากเม็ดแป้งอยู่ในรูปของร่างแห (micelles) ดังนั้นการจัดเรียงตัวลักษณะนี้จะทำให้เม็ดแป้งละลายในน้ำเย็นได้ยาก ดังนั้นในขณะที่แป้งอยู่ในน้ำเย็นเม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำและพองตัวได้เล็กน้อย แต่เมื่อให้ความร้อนกับสารละลายน้ำแป้ง พันธะไฮโดรเจนจะคลายตัวลง เม็ดแป้งจะดูดน้ำแล้วพองตัว ดังแสดงในภาพที่ 4 ส่วนผสมของน้ำแป้งจะมีความหนืดมากขึ้นและใสขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของน้ำอิสระที่เหลืออยู่รอบๆ เม็ดแป้งเหลือน้อยลง เม็ดแป้งเคลื่อนไหวได้ยากขึ้นทำให้เกิดความหนืด ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การเกิดเจลาทิไนเซชัน (gelatinization) อุณหภูมิที่สารละลายเริ่มเกิดความหนืดเรียกว่า อุณหภูมิเริ่มเจลาทิไนซ์ ซึ่งจะแตกต่างกันในแป้งแต่ละชนิด แป้งจากพืชหัว เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่งจะมีอุณหภูมิเริ่มเจลาทิไนซ์ต่ำกว่าอุณหภูมิจากแป้งธัญพืช




**ภาพที่ 4** การเกิดเจลาทิไนเซชันของเม็ดแป้ง
**ที่มา:** กล้าณรงค์ และเกื้อกูล (2550)

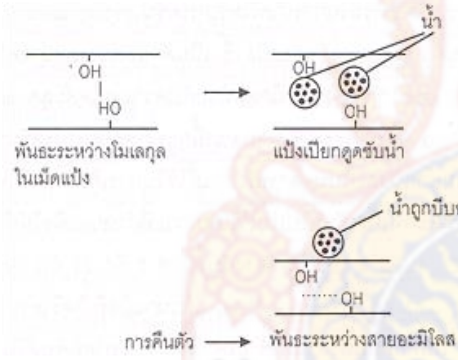
**2.4 การเกิดรีโทรเกรเดชัน**

เมื่อแป้งได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลาทิไนเซชันแล้วให้ความร้อนต่อไป จะทำให้เม็ดแป้งพองตัวเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่พองตัวเต็มที่และแตกออก โมเลกุลของอะมิโลสขนาดเล็กจะกระจัดกระจายออกมาทำให้ความหนืดลดลง เมื่อปล่อยให้เย็นตัว โมเลกุลอะมิโลสที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล เกิดเป็นร่างแหสามมิติ โครงสร้างใหม่นี้สามารถอุ้มน้ำและไม่มีการดูดน้ำเข้ามาอีก มีความหนืดคงตัวมากขึ้น เกิดลักษณะเจลเหนียวคล้ายฟิล์มหรือผลึก เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดรี โทรเกรเดชัน (retrogradation) หรือการคืนตัว (setback) ทำให้เจลมีลักษณะขาวขุ่นและมีความหนืดเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 5

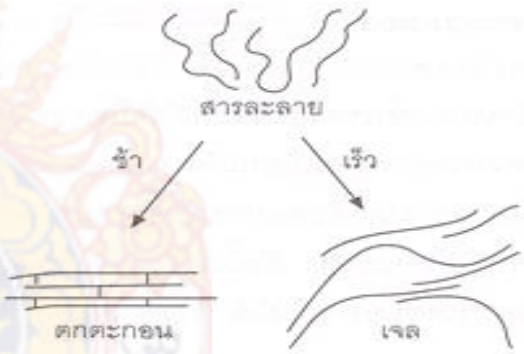
การคืนตัวของแป้งเปียกและสารละลายแป้งทำให้สารละลายมีความหนืดเพิ่มขึ้นมีลักษณะขุ่นและทึบแสง เกิดชิ้นส่วนที่ไม่ละลายในแป้งเปียกที่ร้อน เกิดการตกตะกอนของอนุภาคแป้งที่ไม่ละลาย ทำให้เกิดเจล และโมเลกุลน้ำถูกบีบออกมานอกเจล ในการคืนตัวของแป้งเมื่อเกิดขึ้นอย่างช้าๆ จะเกิดการตกตะกอน เมื่อเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้เกิดเจลขุ่น ดังแสดงกลไกการคืนตัวของแป้ง แสดงในภาพที่ 6

การคืนตัวของแป้งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ชนิดของแป้ง ความเข้มข้นของแป้ง กระบวนการให้ความร้อน กระบวนการให้ความเย็น อุณหภูมิ ระยะเวลา ความเป็นกรด-เบส (pH) ของสารละลาย ปริมาณและขนาดของอะมิโลส อะมิโลเพกทิน และองค์ประกอบทางเคมีอื่นๆ ในแป้งในสภาวะที่อุณหภูมิต่ำและความเข้มข้นของแป้งสูง แป้งสามารถคืนตัวได้ดี ในช่าง pH 5 - 7 แป้งสามารถคืนตัวได้เร็วที่สุด สำหรับช่วง pH ที่สูงหรือต่ำกว่านี้แป้งจะคืนตัวได้ช้าลง ในการชะลอ

การคืนตัวของแป้งจะใช้เกลือที่มีประจุลบและบวก (monovalent anion และ cation), แคลเซียมไนเตรท (calcium nitrate) และยูเรีย (urea) ปริมาณและขนาดของอะมิโลสมีความสำคัญต่อการคืนตัวของแป้ง แป้งที่มีปริมาณอะมิโลสสูงจะเกิดการคืนตัวได้มากและเร็วกว่าแป้งที่มีปริมาณอะมิโลเพกทินสูง อัตราในการคืนตัวจะสูงสุด (การละลายต่ำที่สุด) เมื่อขนาดโมเลกุล (degree of polymerization) ของอะมิโลสเท่ากับ 100 ถึง 200 อัตราคืนตัวจะลดลงเมื่อโมเลกุลของอะมิโลสยาวหรือสั้นกว่านี้ ในการทำให้อะมิโลสที่คืนตัวกลับมาละลายได้อีกครั้งหนึ่งต้องใช้อุณหภูมิสูงถึง 100 ถึง 160 °C อะมิโลเพกทินจะมีผลทำให้เกิดการคืนตัวน้อยมาก ดังนั้นแป้งแต่ละชนิดจะมีอัตราการคืนตัวที่แตกต่างกัน ในแป้งข้าวโพดข้าวเหนียวจะมีอัตราการคืนตัวของแป้งต่ำที่สุด เนื่องจากไม่มีอะมิโลสในแป้งข้าวโพดเหนียว สำหรับแป้งข้าวโพดและแป้งสาลีจะมีอัตราการคืนตัวสูงกว่าแป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลัง เนื่องมาจากในแป้งธัญพืชมีปริมาณอะมิโลสสูง (ประมาณ 28%) มีอะมิโลสโมเลกุลเล็ก และมีไขมันในปริมาณสูงทำให้เกิดจากการจับตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของอะมิโลสและไขมัน (amylase lipid complex)




**ภาพที่ 5** การเกิดรีโทรเกรเดชัน
**ที่มา :** กล้าณรงค์ และเกื้อกูล (2550)




**ภาพที่ 6** กลไกการคืนตัวของแป้ง
**ที่มา :** กล้าณรงค์ และเกื้อกูล (2550)

## 3 การดัดแปรแป้ง

### 3.1 จุดประสงค์ในการดัดแปรแป้ง

เนื่องจากแป้งมีคุณสมบัติเฉพาะตัว ซึ่งบางครั้งไม่เป็นที่ต้องการต่อการใช้ในระดับอุตสาหกรรม หรือยังไม่เหมาะสมกับสภาวะบางอย่าง จึงมีการนำแป้งมาปรับเปลี่ยนคุณสมบัติผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำแป้ง (starch) เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพด แป้งมันฝรั่ง แป้งสาลี มาเปลี่ยนสมบัติทางเคมี และ/หรือทางฟิสิกส์จากเดิมด้วยความร้อน และ/หรือเอนไซม์ และ/หรือสารเคมีชนิดต่างๆเพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหารต่างๆ ลักษณะจำเพาะของแป้งนั้นอาจเป็นลักษณะพิเศษมาจากแหล่งที่ผลิต เช่น แป้งที่ได้จากมันสำปะหลัง ซึ่งมีลักษณะจำเพาะ เช่น ขนาดรูปร่าง และ การพองตัว แต่สิ่งที่แป้งทุกๆชนิดมีคล้ายกัน คือ ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนืดเมื่อมีปัจจัยความร้อน แรงเฉือน และ เวลาเข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งแป้งแต่ละชนิดจะแสดงการเปลี่ยนแปลงคล้ายๆกัน ถ้าสามารถปรับเปลี่ยนคุณสมบัติเหล่านี้ได้จะทำให้เราสามารถนำแป้งไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆได้มากขึ้น การดัดแปรแป้งจึงได้เริ่มมีผู้ค้นคว้าวิจัยขึ้น ทั้งโดยทางกายภาพและทางเคมี ทั้งนี้เนื่องจากแป้งมีความพร้อมในการทำปฏิกิริยาต่างๆได้ดีมาก แป้งดิบโดยทั่วไปมีสมบัติบางประการไม่เหมาะสมกับการผลิตในอุตสาหกรรม ได้แก่ มีช่วงความหนืดที่แคบ มีลักษณะเนื้อสัมผัสไม่ดี มีความคงทนต่อแรงเฉือนในกระบวนการผลิตหรือความคงทนต่อสภาวะต่างๆต่ำ ซึ่งทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพต่ำ และสิ้นเปลืองงบประมาณในการผลิตโดยไม่จำเป็น ดังนั้นจึงมีการดัดแปรคุณสมบัติบางประการของแป้งดิบเพื่อให้เหมาะสมต่อการใช้งาน เช่น ทำให้มีลักษณะเนื้อสัมผัสที่ดีขึ้น คงทนต่อสภาวะในการผลิตได้ดี การเกิดเจลาทิไนซ์ (gelatinization) การคืนตัว (retrogradation) และการสูญเสียน้ำของเจลลดลง มีความคงตัวในการคงรูปจากเยือกแข็ง (freeze-thaw) เพิ่มขึ้น ลักษณะของเนื้อเจลดีขึ้น มีคุณสมบัติความเป็นกาวเพิ่มขึ้น มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) หรือความสามารถในการผสมกับตัวทำละลายอื่นๆเพิ่มขึ้น แป้งมันสำปะหลังเป็นแป้งที่มีความบริสุทธิ์สูง มีการปนเปื้อนของสารประกอบเคมีอื่นๆต่ำ (เหมาะต่อการนำมาทำปฏิกิริยาเคมี ส่วนอสัณฐาน (amorphous) ของอะไมโลเพกทินจะเป็นส่วนที่ทำปฏิกิริยาเคมีได้ดีที่สุด

### 3.2 การแบ่งประเภทของแป้งดัดแปร

การดัดแปรแป้งแบ่งกลุ่มไว้หลายประเภทดังนี้ (1) การดัดแปรทางเคมี (Chemical modification) (2) การดัดแปรทางกายภาพ (Physical Modification) (3) การดัดแปรทางเทคโนโลยีชีวภาพ (Biotechnological Modification)

### 3.3 การดัดแปรทางเคมี

ในการทำปฏิกิริยาเคมีกับแป้ง โดยส่วนใหญ่แล้วจะทำในสภาพแขวนลอย ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาทิไนเซชัน (45-50 °C) สารเคมีจะทำปฏิกิริยากับแป้งบริเวณพื้นผิวเม็ดแป้ง โดยจะเกิดปฏิกิริยาเคมีของเม็ดแป้งขึ้นที่บริเวณพื้นผิวของส่วนผลึก (crystallite) และภายในส่วนอสัณฐาน (amorphous) เนื่องจากเม็ดแป้งประกอบด้วยอะไมโลสประมาณ 25% เมื่อทำปฏิกิริยาระหว่างเม็ดแป้งกับสารละลายไอโอดีน (มีน้ำเป็นตัวกลาง) เม็ดแป้งจะให้สารละลายเชิงซ้อนสีน้ำเงินทันที แต่เมื่อทำปฏิกิริยาเม็ดแป้งแห้งกับไอของไอโอดีน จะได้สีน้ำตาลแดง ซึ่งแสดงว่าปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นที่บริเวณพื้นผิวของเม็ดแป้งเท่านั้น ดังนั้นในการใช้สารเคมีทำปฏิกิริยากับเม็ดแป้งแห้ง สารเคมีจะไม่สามารถเข้าทำปฏิกิริยาได้ แต่เมื่อทำปฏิกิริยาเคมีกับเม็ดแป้งที่ชุ่มน้ำหรือเม็ดแป้งที่ผ่านการปรับสภาพด้วยด่าง เม็ดแป้งจะพองตัวและสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลไม่เกิน 1,000 ได้ ในระหว่างการดัดแปรแป้งทางเคมี จะหลีกเลี่ยงการเกิดเจลาทิไนเซชันได้โดยการเติมโซเดียมซัลเฟต หรือ โซเดียมคลอไรด์ลงในส่วนผสม การดัดแปรทางเคมีในระบบอุตสาหกรรมจะใช้สารเคมีในการทำปฏิกิริยาในปริมาณน้อย ปฏิกิริยาโดยส่วนใหญ่ทำในน้ำให้ค่าระดับการแทนที่ (Degree of Substitution, DS) ต่ำ ประมาณ 0.1-0.2 ใช้วิธีการดัดแปรหลายๆ วิธีร่วมกันให้ได้ลักษณะทางเคมีของผลิตภัณฑ์ที่สามารถปรับปรุงได้

### 3.4 การลดขนาดโมเลกุลแป้งโดยกรด

การผลิตแป้งดัดแปร โดยการลดขนาดโมเลกุลของแป้ง เป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับกรดเกลือหรือกรดกำมะถันเจือจาง กรดจะตัดโมเลกุลของแป้งทำให้ขนาดโมเลกุลเล็กลง จนได้ความหนืดที่ต้องการ ได้ผลิตภัณฑ์แป้งย่อยด้วยกรด (acid-modified starch) หรือ thin-boiling starch หรือ อะมิโลเดกซ์ทริน (amylodextrin) ผลิตภัณฑ์ที่ได้ส่วนใหญ่ยังคงอยู่ในรูปของเม็ดแป้งให้ความหนืดขณะร้อนต่ำกว่าแป้งดิบ ทำให้สามารถใช้แป้งได้ในปริมาณมากขึ้น เมื่อเกิดการคืนตัวจะได้เจลที่แข็ง สามารถยึดเกาะกันได้ดี ใช้ในผลิตภัณฑ์ลูกกวาด ท็อฟฟี่ ช็อคโกแลต เนื่องจากมีความหนืดต่ำในขณะร้อน สะดวกในการเทลงพิมพ์ และได้เจลที่แข็งและใสกว่าแป้งดิบ

**การผลิตแป้งย่อยด้วยกรด**

**กระบวนการผลิตแป้งย่อยด้วยกรด โดยทั่วไปเริ่มจากการนำสารละลายแป้งเข้มข้น (ของแข็ง 36-40 %) มา**ให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาทิไนซ์ (ประมาณ 40-60 °C) เติมกรด กวน เป็นระยะเวลา 1 – หลายชั่วโมง จนได้ความหนืดที่ต้องการ ทำให้เป็นกลาง กรองหรือเหวี่ยงให้ได้เม็ดแป้ง นำมาล้าง และทำให้แห้ง ชนิดของกรดที่ใช้ เช่น กรดไฮโปคลอริกกรดซัลฟูริก โดยความเข้มข้นของกรดที่ใช้ อุณหภูมิ ความเข้มข้นของแป้ง และเวลาที่ทำปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับผู้ผลิตและคุณสมบัติของแป้งดัดแปรที่ต้องการ

ในระหว่างกระบวนการผลิต กรดจะไฮโดรไลซ์พันธะไกลโคซิดิก ทำให้สายสั้นลง โดยที่พันธะ α-D-(1,4) ไกลโคซิดิก จะถูกไฮโดรไลซ์ได้ง่ายกว่าพันธะ α-D-(1,6) ไกลโคซิดิก

**สมบัติ**

แป้งที่ถูกลดขนาดโมเลกุลด้วยกรดที่อุณหภูมิเจลาทิไนซ์ จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นแป้งย่อยด้วยกรด ซึ่งมีลักษณะเม็ดแป้ง คุณสมบัติการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ และคุณสมบัติที่ไม่ละลายในน้ำเย็นเหมือนกับแป้งดิบ แต่มีคุณสมบัติบางประการที่เปลี่ยนแปลงไป ในขณะที่ให้ความร้อน เม็ดแป้งย่อยด้วยกรดจะแตกออก ได้แป้งเปียกเป็นของเหลวใสที่มีความหนืดลดลง มีความเหลว (fluidity) เพิ่มขึ้น จึงสามารถให้ความร้อนแก่แป้งที่มีความเข้มข้นสูงได้ แต่เมื่อเย็นลงจะเกิดการคืนตัวทำให้สูญเสียความใส ได้เป็นเจลแข็งทึบแสง นอกจากนี้แป้งย่อยด้วยกรดยังมีคุณสมบัติเหมาะสมที่จะใช้ขึ้นรูปฟิล์ม เนื่องจากมีความหนืดต่ำ สามารถให้ความร้อนได้ถึงแม้น้ำแป้งจะมีความเข้มข้นสูง ดูดน้ำหรือระเหยน้ำได้น้อย ดังนั้นฟิล์มจะแห้ง แข็ง และเกาะติดได้เร็ว การนำไปใช้

ในอุตสาหกรรมอาหาร ใช้ผลิตลูกกวาด ท็อฟฟี่ ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ ใช้เคลือบเส้นด้ายทำให้เส้นใยผ้าแข็งแรงและทนต่อการเสียดสีระหว่างการทอ ใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษ โดยเคลือบกระดาษเพื่อกันไม่ให้น้ำหมึกซึมผ่านกระดาษ ได้กระดาษที่มีผิวหน้าเรียบ มีคุณสมบัติในการพิมพ์ (printability) ที่ดี และใช้ผลิตกระดาษลูกฟูก

### 3.5 การย่อยสลายโดยใช้เอนไซม์

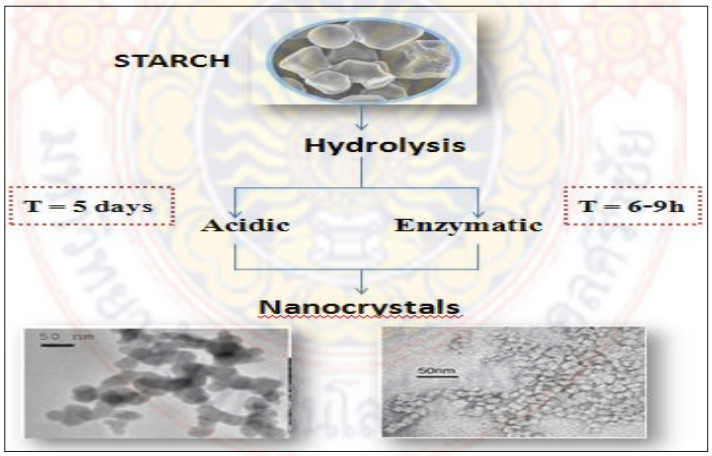
แป้งย่อยโดยใช้เอนไซม์เป็นแป้งดัดแปรที่ได้จากการย่อยสลายด้วนเอนไซม์ ผลิตโดยผสมสารละลายแป้งกับเอนไซม์ นำไปเจลาทิไนซ์โดยใช้ direct steam injection (jet-cooker) เมื่อเอนไซม์ย่อยถึงระดับที่ต้องการ หยุดปฏิกิริยาเอนไซม์โดยเพิ่มอุณหภูมิภายใน cooker ให้สูงขึ้น เอนไซม์ที่ใช้ในการย่อยแป้งมีหลายชนิดขึ้นอยู่กับลักษณะของแป้งดัดแปรที่ต้องการ ได้ผลิตภัณฑ์จากการย่อยแป้ง ได้แก่ น้ำเชื่อมกลูโคส น้ำเชื่อมฟรักโทส ไซโคลเดกซ์ทริน

**การนำไปใช้**

การย่อยแป้งโดยใช้เอนไซม์ต่างๆ ตามกระบวนการที่เหมาะสมเพื่อผลิตผลิตภัณฑ์ ได้แก่ น้ำเชื่อมกลูโคส น้ำเชื่อมฟรักโทส ไซโคลเดกซ์ทริน

### 4 Starch nanocrystals (SNC)

Starch nanocrystals (SNC) คือส่วนที่เป็นผลึกของแป้งที่เกิดจากการทำไฮโดรไลซิส วัตถุประสงค์ที่สำคัญในการเตรียม Starch nanocrystals เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกล การเตรียม Starch nanocrystals ทำได้โดยใช้กรดในช่วงความเข้มข้น2.2M–3.2Mไฮโดรไลซีส กรดที่นิยมใช้ เช่น กรด HCI หรือ H2SO4 ที่อุณหภูมิ 35-40 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลา 5-42 วัน นอกจากนี้สามารถเตรียมได้จากกระบวนการอื่นๆ เช่น การใช้เอ็นไซม์ไฮโดรไลซีส

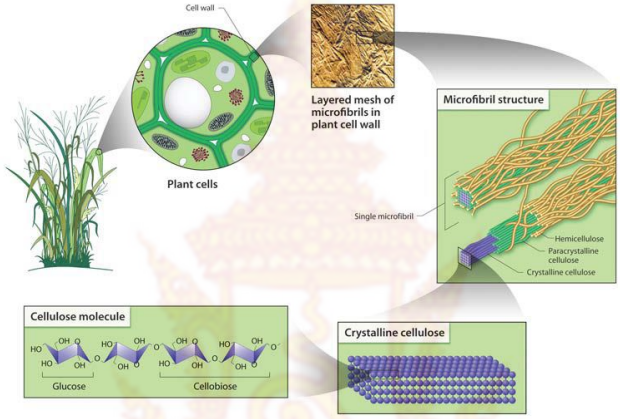



**ภาพที่ 7** แผนภาพการเตรียมStarch nanocrystals

### 5 เซลลูโลส (cellulose)

เซลลูโลส เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่พบมากที่สุดประมาณ 45 % ของสารอินทรีย์ทั้งหมด ในธรรมชาติ ส่วนใหญ่สะสมอยู่ที่ผนังเซลล์ในพืชชั้นสูงทุกชนิด ซึ่งมีส่วนประกอบของเซลลูโลส

มากกว่า 97-99 % จัดว่าเป็นเซลลูโลสบริสุทธิ์ ประกอบด้วย สายโซ่พอลิเมอร์ และยึดกันด้วย พันธะไฮโดรเจน ภายในโมเลกุลเซลลูโลสจึงยึดติดกันแน่น ทำให้เซลลูโลสทำปฏิกิริยากับสารต่างๆ ได้ช้า เซลลูโลสใน ผนังเซลล์หลัก (primary cell wall) ประกอบด้วยกลูโคสยาวประมาณ 2,000 โมเลกุล และ ไม่ต่ำกว่า 14,000 โมเลกุลใน ผนังเซลล์รอง (secondary cell wall) โดยโมเลกุลของเซลลูโลสจะเกาะกันเป็นคู่ตามยาวและเรียงขนานกันเป็นกลุ่ม 40 คู่ เรียกว่าไมโครไฟบริล (microfibril) เพื่อให้ความแข็งแรงกับผนังเซลล์ของพืช




**ภาพที่ 8** โครงสร้างของเซลลูโลสในผนังเซลล์พืชชั้นสูง

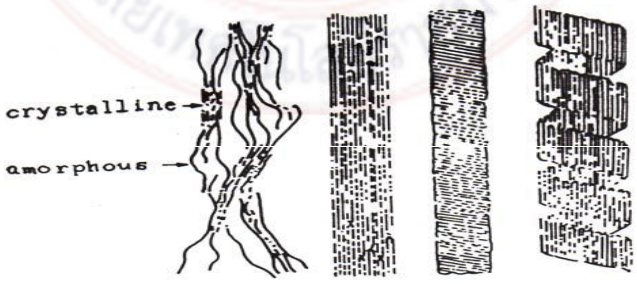
**ที่มา :** http://archive.lib.cmu.ac.th

โครงสร้างของเซลลูโลสในผนังเซลล์พืชชั้นสูง มี 3 แบบ

1. Fringe micelle ประกอบด้วยส่วนที่เป็นผลึก (crystalline) และส่วนที่เป็น อสัณฐาน (amorphous)

2. โครงสร้างของเซลลูโลสที่ม้วนหรือพับไปตามแกนของเส้นใยเซลลูโลส

3. โครงสร้างที่มีลักษณะเป็นแบบริบบิ้นและม้วนเป็นเกลียว

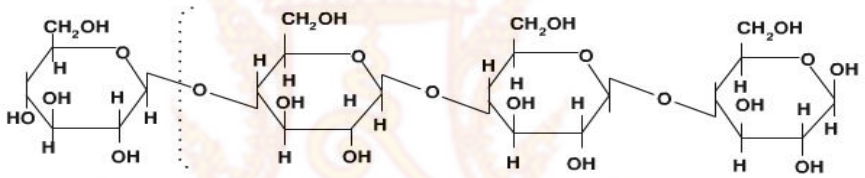



**ก ข ค**

**ภาพที่ 9** เส้นใยเซลลูโลสในผนังเซลล์พืชชั้นสูง (ก) แบบ Fringe micelle (ข) แบบที่ม้วนหรือพับไปตาม แกนของเส้นใยเซลลูโลส (ค) แบบริบบิ้นและม้วนเป็นเกลียว

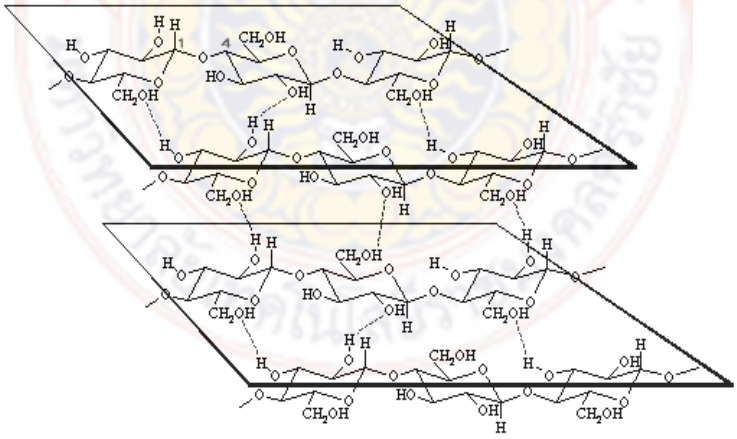
**ที่มา** : http://archive.lib.cmu.ac.th

โครงสร้างที่แตกต่างกัน 3 แบบ ก่อให้เกิดช่องว่างระหว่างโมเลกุล ทำให้โมเลกุลไม่ต่อเนื่อง ในธรรมชาติจึงไม่พบเซลลูโลสในรูปอิสระแต่มักรวมกับลิกนิน เฮมิเซลลูโลส เพนโตแซนกัม แทนนิน และ ไขมัน เป็นต้น ในด้านโครงสร้างทางเคมี เซลลูโลสเป็นสารประกอบคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วยหน่วยย่อยของน้ำตาลกลูโคส (glucose) จำนวน 1,000-10,000 โมเลกุล ต่อกันเป็นพอลิเมอร์ (polymer) เชื่อมกันด้วย $\beta$ -1, 4- glycosidic bond ระหว่าง alcoholic hydroxyl groups (Dalton) การเรียงตัวของโมเลกุลเซลลูโลสมีลักษณะเป็นเส้นตรง ไม่มีแขนงย่อยมีสูตรเคมีทั่วไป คือ $(C_6H_{10}O_5)n$ เมื่อ n คือ จำนวนหน่วยกลูโคสทั้งหมดที่ประกอบกันเป็นโครงสร้าง



**ภาพที่ 10** โครงสร้างของเซลลูโลส

**ที่มา** : http://archive.lib.cmu.ac.th



**ภาพที่ 11** ลักษณะการสานกันเป็นร่างแหของเซลลูโลส

**ที่มา :** http://archive.lib.cmu.ac.th

ชนิดของเซลลูโลสแบ่งตามความสามารถในการละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

ได้เป็น 3 ชนิด คือ

1. แอลฟา-เซลลูโลส ($\alpha$-cellulose) คือ เซลลูโลสที่ไม่ละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 17.5 %

2. เบต้า-เซลลูโลส ($\beta$-cellulose) คือ เซลลูโลสที่ละลายได้ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 17.5% ที่อุณหภูมิห้อง แต่สามารถตกตะกอนได้ง่ายในสารละลายที่มีสภาพเป็นกรด

3. แกมม่า-เซลลูโลส ($\gamma$-cellulose) คือ เซลลูโลสที่ละลายได้ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 17.5 % และสารละลายกรด แต่สามารถตกตะกอนได้โดยใช้แอลกอฮอล์

## 5.1 สมบัติของเซลลูโลส

เซลลูโลสจะไม่มีรสชาติและไม่มีกลิ่นไม่ละลายในน้ำและไม่ละลายในกรดอินทรีย์ เนื่องจากมีพันธะไฮโดรเจนและมีแนวโน้มที่จะก่อโครงสร้างผลึก ความยาวสายโซ่ของเซลลูโลสจะแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับแหล่งที่มา การย่อยสลายเซลลูโลส (cellulose hydrolysis) เซลลูโลสเป็นสารประกอบที่มีโครงสร้างเป็นผลึกหรือเป็น linear homopolymer ของกลูโคสที่จับกันด้วย $\beta$-1, 4-glucosidic linkage ซึ่งยากต่อการย่อยสลาย นอกจากนี้โดยธรรมชาติของเซลลูโลสจะมี ลิกนิน จับอยู่ ซึ่งเป็นตัวขัดขวางปฏิกิริยาการย่อยสลาย

## 5.2 การย่อยสลายเซลลูโลส

การย่อยสลายเซลลูโลสทำได้ 2 วิธี คือ

1.วิธีการทางเคมีหรือการย่อยสลายด้วยกรดเข้มข้นหรือกรดเจือจาง (acid hydrolysis) เช่น กรดซัลฟูริก และกรดไฮโดรคลอริก ซึ่งต้องทำภายใต้อุณหภูมิสูง วิธีนี้มีข้อจำกัด คือให้ปริมาณกลูโคสต่ำ และเกิดผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการด้วย

2. วิธีการทางชีวภาพหรือการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ (enzyme hydrolysis) ที่ได้จากจุลินทรีย์ เช่น เชื้อรา แบคทีเรีย โดยเอนไซม์จากจุลินทรีย์จะทำให้ปฏิกิริยาการย่อยเกิดภายใต้สภาวะที่ไม่รุนแรง คือที่อุณหภูมิประมาณ 50°C ความดันบรรยากาศ เพราะเอนไซม์มีความจำเพาะเจาะจงต่อสารประกอบเซลลูโลสมาก ทำให้ไม่สูญเสียกลูโคสระหว่างเกิดปฏิกิริยา และไม่เกิดผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการ

## 6 เส้นใย (Fiber)

เส้นใยเป็นส่วนเสริมแรงที่สำคัญที่สุดชนิดหนึ่งของวัสดุประกอบ เนื่องจากเส้นใยมีความแข็งแรง (Strength) และโมดูลัส (Modulus) สูง อาจอยู่ในรูปเส้นใยยาวต่อเนื่อง (Continuous fiber or filaments) เส้นใยสั้น (Short or Chopped fibers) หรือวิสเกอร์ (Whiskers) เส้นใยที่นิยมใช้ในวัสดุประกอบได้แก่ เส้นใยคาร์บอน (Boron) เส้นใยแก้ว (Glass) เส้นใยอะรามิดหรือเคฟลาร์ (Aramid or Kevlar®) เส้นใยโบรอน (Boron) และเส้นใยพอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) เส้นใยเหล่านี้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางแตกต่างกันตั้งแต่ไม่กี่ไมครอนจนถึงร้อยไมครอน อาจมีความยาวต่อเนื่องหรือเป็นเส้นใยถูกตัดสั้นไม่กี่เซนติเมตร

สมบัติของวัสดุประกอบ โดยเฉพาะการเสริมแรงขึ้นกับปริมาณสารเสริมแรง นั่นคือ เส้นใยในวัสดุประกอบ ซึ่งพบว่าวัสดุมีสมบัติเชิงกลที่ดี เช่น ความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) โมดูลัส (Modulus) ความแข็ง (Hardness) เป็นต้น เส้นใยทำหน้าที่เสริมแรงแต่จะทำให้สมบัติเชิงกลบางประการลดลง เช่น เปอร์เซ็นต์ยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) และความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) เมื่อวัสดุได้รับแรง จะมีการเปลี่ยนขนาดหรือความเครียด (Strain) ในส่วนของเส้นใยหรือสารตัวเติม ทำให้เกิดช่องว่างที่บริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาคหรืออินเตอร์เฟส (Interfaces) ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการแตกหัก การเพิ่มปริมาณเส้นใยหรือสารตัวเติมทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องจากวัฏภาคเมตริกซ์ มีรอยต่ออินเตอร์เฟสที่ไม่แข็ง เป็นผลให้เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) และความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) มีค่าลดลง และมีพื้นที่ผิวของเส้นใยที่ชอบน้ำเพิ่มขึ้นเป็นผลให้การดูดซับน้ำของวัสดุประกอบเพิ่มขึ้น (อิทธิพลและคณะ, 2545)

### 6.1 สมบัติของเส้นใย

เส้นใยควรมีโมดูลัสความยืดหยุ่นสูง เพื่อประสิทธิภาพในการเสริมแรง มีความแข็งแรงสูง โดยเส้นใยแต่ละเส้นไม่ควรแตกต่างกันมาก มีความเสถียรและความแข็งแรงขณะจัดเก็บได้ดีและพื้นที่ผิวของเส้นใยควรมีลักษณะเหมือนกัน การผสมเส้นใยช่วยเพิ่มสมบัติด้านต่าง ๆ ให้กับพอลิเมอร์ เช่น ความแข็ง ความหนืด ความเสถียรภาพของรูป ความเค้นและความต้านทานต่อการใช้งาน (www.wikled.com, 2552)

### 6.2 ประโยชน์ของเส้นใย

ประโยชน์ของเส้นใยธรรมชาติ

1. เส้นใยที่ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ คือ พืชที่ให้เส้นใยที่สามารถนำไปปั่นเป็นด้าย เช่น ฝ้าย ปอแก้ว ปอกระเจา ป่านลินิน ป่านรามี กระชง

2. เส้นใยที่ใช้ยัดเป็นไส้ใน เช่น ส่วนของหมอน ฟูก ที่นอน ผ้านวม ได้แก่ นุ่น ฝ้าย งิ้ว มะพร้าว

3. เส้นใยที่ใช้ทำกระดาษ หรือเยื่อกระดาษ เช่น ปอแก้ว ปอกระเจา ปอแก้วคิวบา ไผ่ ยูคาลิปตัส สน ฟางข้าว หญ้าขจรจบ

4. เส้นใยที่ใช้ทำเชือก เป็นลักษณะรวมเส้นใย หรือกลุ่มเส้นใยขนาดใหญ่ ทำเกลียวถัก หรือฟั่น ทำเป็นเชือก เช่น ปอแก้ว มะพร้าว ป่านศรนารายณ์

5. ใช้ทำแปรง ทอเป็นผืนแบบเสื่อ เช่น ป่านศรนารายณ์ กก มะพร้าว

6. ใช้ทำสิ่งของอื่นๆ เช่น ย่านลิเภา กก ไผ่ จักสาน ต้นหวาย ซึ่งเป็นตระกูลปาล์ม

ประโยชน์ของเส้นใยสังเคราะห์

1. เส้นใยพอลิเอสเตอร์ ใช้ในการทำเชือก ด้าย แห อวน

2. เส้นใยพอลิเอไมด์ ใช้ในการทำเสื้อผ้า ถุงเท้า ถุงน่อง ขนแปรงต่างๆ สายกีต้าร์ สายเอ็นไม้แร็กเก็ต เป็นต้น

3. เส้นใยอะคริลิก ใช้ในการทำเสื้อผ้า ผ้านวม ผ้าขนแกะเทียม ร่มชายหาด หลังคากันแดด ผ้าม่าน พรม เป็นต้น

4. เซลลูโลสแอซีเตด ใช้ผลิตเป็นแผ่นพลาสติกที่ใช้ทำแผงสวิตช์และหุ้มสายไฟ

**7 ผักตบชวา**

ผักตบชวามีชื่อทางพฤกษศาสตร์ว่า *Eichlornia crassipes Solms* ชื่อสามัญว่า Water Hyacinth อยู่ในวงศ์ Pontederiaceae เป็นพืชน้ำประเภทใบเลี้ยงเดี่ยว ลอยน้ำได้โดยไม่ต้องมีที่ยึดเกาะ สามารถแพร่พันธุ์ได้รวดเร็วมาก แผ่นใบคล้ายรูปหัวใจ เป็นมันหนา ก้านใบพองออก ตรงช่องกลางภายในมีลักษณะเป็นรูพรุนช่วยพยุงลำต้นให้ลอยน้ำได้ ผักตบสามารถอยู่ได้ทุกสภาพน้ำ ทั้งในน้ำสกปรกและน้ำสะอาด เจริญเติบโตได้ดีที่ pH 4-10 และอุณหภูมิของน้ำไม่สูงกว่า 34 องศาเซลเซียส และพืชจะมีน้ำเฉลี่ยประมาณร้อยละ 95 (ใบร้อยละ 89 และในก้านใบร้อยละ 96.7) มีถิ่นกำเนิดในแถบลุ่มน้ำอเมซอน ประเทศบราซิล ในทวีปอเมริกาใต้ มีดอกสีม่วงอ่อน คล้ายช่อดอกกล้วยไม้ และแพร่พันธุ์ได้อย่างรวดเร็วจนกลายเป็นวัชพืชที่ร้ายแรงในแหล่งน้ำทั่วไป การบริโภคดอกอ่อนและก้านใบอ่อนกินเป็นผักลวกจิ้มน้ำพริกหรือทำแกงส้ม ใช้เป็นอาหารเลี้ยงสัตว์ เช่นหมู ใช้ทำปุ๋ยหมัก ได้เครื่องจักสานผักตบชวาด้านสมุนไพร ใช้แก้พิษภายในร่างกาย และขับลม ใช้ทาหรือพอกแก้แผลอักเสบ

**ภาพที่ 12** ผักตบชวา

**ที่มา** : http://www.biogang.net/

**8 ชานอ้อย (bagasse)**

ชานอ้อย หมายถึง เศษเหลือจากการหีบเอาน้ำอ้อยออกจากท่อนอ้อยแล้ว เมื่อท่อนอ้อยผ่านลูกหีบชุดแรก อาจจะมี น้ำอ้อยตกค้างเหลืออยู่ยังหีบออกไม่หมด แต่พอผ่านลูกหีบชุดที่ 3-4 ก็จะมีน้ำอ้อย ตกค้างอยู่น้อยมาก หรือแทบจะไม่เหลืออยู่เลย คือเหลือแต่เส้นใยล้วน ๆ ชานอ้อยเป็นเชื้อเพลิงสำหรับต้มน้ำในหม้อน้ำให้เดือดแล้ว ใช้กำลังไอน้ำสำหรับเดินเครื่องจักรไอน้ำ และสำหรับกำเนิดไฟฟ้า

**ภาพที่ 13** ต้นอ้อยและชานอ้อย

**ที่มา :** http://www.biogang.net/

ส่วนประกอบ ทางเคมีของชานอ้อยคล้ายกับของไม้เนื้อแข็ง (ไม้เนื้อแข็ง ในแง่การทำเยื่อกระดาษ) ส่วนประกอบดังกล่าวปรวนแปรไปตามชนิดพันธุ์ อายุและสภาพที่อ้อยเติบโตขึ้นมา ชานอ้อยมีลิกนิน (lignin) น้อยกว่าไม้ยืนต้น มีสารเพนโตแซน (pentosan) มากกว่าไม้สน ไม้สปรูซ (spruce) และไม้ยืนต้นอื่น ๆ บางชนิด ขี้เถ้าของอ้อยมีส่วนประกอบผิดแผกจากไม้ชนิดอื่น คือมี ซิลิกา (silica) สูงมาก และมีโพแทสเซียมกับแคลเซียมต่ำ เส้นใยอ้อย เหมาะสมที่จะนำมาทำเยื่อกระดาษมาก คือ จัดเป็นเยื่อชนิดดี และฟอกสีได้ง่าย ข้อเสีย คือ จำเป็นจะต้องแยก pith ออกก่อน

และ pith ที่แยกออกมาสามารถนำไปสังเคราะห์ทำอาหารสัตว์ได้โดยผสมกับกากน้ำตาล หรือสามารถ ใช้ทำส่วนประกอบของวัตถุระเบิดได้ การทำเยื่อกระดาษจะต้องละลายส่วนที่เป็นลิกนินและเฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) ออกจากชานอ้อย ลิกนิน เป็นส่วนหนึ่งซึ่งยึดเส้นใยของชานอ้อยให้ติดกัน ทำให้ไม่สามารถทำให้ได้กระดาษแผ่นบาง ๆ ได้ ส่วนเฮมิเซลลูโลสถ้ามีอยู่เกิน 20 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้กระดาษที่ได้ขาดง่ายเกินไป ไม่เหนียวและหยุ่นตัวก่อนทำเยื่อกระดาษ

**9 Cellulose Nanocrystal**

Cellulose Nanocrystal ได้มาจากการนำเส้นใยเซลลูโลสมาไฮโดรไลซิสเพื่อเตรียมเป็น Cellulose Nanocrystal โดยใช้กรดซัลฟิวริกความเข้มข้นประมาณ 64 wt% ที่อุณหภูมิประมาณ 40-60 $^{o}$C ใช้เวลา 45 นาที -3 ชั่วโมงนอกจากนี้ยังสามารถเตรียมได้จากกระบวนการอื่น เช่น การใช้เอนไซม์ไฮโดรไลซิส

**10. ยางธรรมชาติ**

น้ำยางธรรมชาติ น้ำยางสดเป็นสารแขวนลอยของอนุภาคยางในของเหลวที่เรียกว่า ซีรั่ม (serum) อนุภาคยางดังกล่าวเป็นสารพอลิเมอร์ไฮโดรคาร์บอนที่มีชื่อทางเคมีว่า 1, 4 พอลิไอโซพรีน ที่มีโครงสร้างโมเลกุลแบบซิส (cis-1, 4–polyisoprene) ประกอบด้วยมอนอเมอร์ (monomer) ของไอโซพรีน (isoprene) ซึ่งมีคาร์บอน 5 อะตอม กับ ไฮโดรเจน 8 อะตอม ต่อกันจำนวนมากเป็นสายโซ่โมเลกุลยาง ส่วนประกอบของน้ำยางสด แบ่งได้ 2 ส่วนหลัก คือ

1. ส่วนที่เป็นยาง (Dry Rubber Content, DRC) เป็นอนุภาคยางของไอโซพรีนที่เชื่อมต่อกันประมาณ 2000-5000 หน่วย ต่อ 1 โมเลกุล

2. ส่วนที่ไม่ใช่ยาง (Non Rubber Content) เป็นส่วนประกอบอื่นๆทั้งหมดที่ไม่ใช่ยาง มีสารประกอบต่างๆหลายชนิด เช่น น้ำตาล โปรตีน ไขมัน คาโรทีนอยด์ เกลือแร่ เอนไซม์ และสารประกอบไนโตรเจน เป็นต้น

ชนิดของยางธรรมชาติ น้ำยางสดที่ได้จากต้นยางพาราโดยทั่วไปสามารถนำมาแปรรูปเป็นยางดิบได้ 2 แบบ คือน้ำยางข้น (Concentrated Latex) กับ ยางแห้ง (Dry Rubber)

**10.1 กรรมวิธีการผลิตยางแห้ง**

กรรมวิธีการผลิตยางแห้งโดยส่วนใหญ่ มี 2 ประเภท คือ

1 การผลิตยางแบบธรรมดา (Conventional Rubber Process) ได้แก่ การผลิตยางแผ่นรมควัน ยางแผ่นผึ่งแห้ง ยางเครพ และยางสกิม

2 การผลิตยางแบบระบุคุณภาพมาตรฐาน (Technically Specified Rubber Process) ได้แก่ยางแท่ง

### 10.2 สมบัติของยางธรรมชาติ

1 ยางธรรมชาติมีสมบัติดีเยี่ยมในด้านการทนต่อแรงดึง (tensile strength) แม้ไม่ได้เติมสารเสริมแรงและมีความยืดหยุ่นสูงมาก

2 ยางธรรมชาติมีความต้านทานต่อการฉีกขาด (tear resistance) สูงทั้งที่อุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิสูง

3 ลักษณะเด่นอีกอย่างของธรรมชาติคือ ความยืดหยุ่น (elasticity) ยางธรรมชาติมีความยืดหยุ่นสูง เมื่อแรงภายนอกที่มากระทำกับยางหมดไป ยางก็จะกลับคืนสู่รูปร่างและขนาดเดิมหรือใกล้เคียง อย่างรวดเร็ว ยางธรรมชาติยังมีสมบัติดีเยี่ยมด้านการเหนียวติดกัน (tack) ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบ (assemble) ชิ้นส่วนต่างๆ เข้าด้วยกัน

### 10.3 การใช้งานของยางธรรมชาติ

น้ำยางข้น

1. ผลิตภัณฑ์จุ่ม เช่น ถุงมือผ่าตัด ถุงมือตรวจโรค ถุงมือแม่บ้าน ถุงมืออุตสาหกรรม ถุงยางอนามัยลูกโป่ง จุกนมยาง ท่อสวนปัสสาวะ เป็นต้น

2. ผลิตภัณฑ์น้ำยางในอุตสาหกรรมพรม เช่น พรม tufted carpet มีการใช้น้ำยางอาบหลังพรมเพื่อยึดพรมไว้เรียกชั้นยางที่ยึดว่า anchor coat

3. ผลิตภัณฑ์ยางฟองน้ำ (latex foam) ใช้ทำที่นอน หมอน เบาะรองนั่ง เป็นต้น

4. สายยางยืด เช่น ยางยืดขอบกางเกงใน ถุงเท้า และเสื้อชั้นใน ยางรัดป้ายติดกระเป๋า เป็นต้น

5. ใช้น้ำยางเป็นตัวยึดฟูกใยขนสัตว์ และกาบมะพร้าว

ยางแห้ง

1. ยางล้อรถยนต์ (ยางรถบรรทุก และยางรถยนต์นั่ง) ยางล้อเครื่องบิน ยางรองคอสะพาน ยางรองรับแรงสะเทือน หรือแผ่นดินไหว ยางชิ้นส่วนรถยนต์ และเฟอร์นิเจอร์

2. พื้นรองเท้า กาวยาง ยางรัดของ รองเท้ายาง ยางปูพื้น

## 11. วัสดุประกอบนาโน

วัสดุประกอบนาโนคือวัสดุที่เตรียมขึ้นจากการนำสารตั้งแต่สองชนิดมาผสมกัน โดยมีสารอย่างน้อยหนึ่งชนิดที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร ($10^{-9}$m)โดยสารที่นำมาผสมกันนี้อาจเป็นได้ทั้ง

สารอินทรีย์ สารอนินทรีย์อสัณฐาน ผลึกหรือกึ่งผลึก ซึ่งมีความแตกต่างกันทั้งสมบัติทางกายภาพและทางเคมี แต่เมื่อนำมาผสมกันแล้ววัสดุที่ได้จะมีสมบัติต่างๆดีขึ้นปัจจุบันได้มีการนำวัสดุนาโนคอมโพสิต มาใช้ในทางการค้าเพิ่มมากขึ้นทั้งในด้านบรรจุภัณฑ์อาหาร เครื่องสำอาง อุปกรณ์อิเลคทรอนิคส์ สารช่วยดูดซับ ขวดและภาชนะเป่าขึ้นรูปวัสดุนาโนสามารถจะจัดแบ่งได้เป็นผลึกนาโน (nanocrystalline) และอนุภาคนาโน (nanoparticle) โดยที่ก้อนหรือปริมาตรของผลึกนาโนซึ่งประกอบด้วยเม็ดผลึก(grain sizes) ที่มีขนาดช่วงสเกลการวัดอยู่ในระดับนาโนถึงประมาณ 100 นาโนเมตรแต่ขณะที่อนุภาคนาโนมีเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำกว่า 100 นาโนเมตรดังนั้นก้อนหรือปริมาตรของวัสดุที่เป็นผลึกนาโนจึงประกอบขึ้นหรือเกิดจากการรวมกลุ่มกันของอนุภาคนาโนนั่นเอง

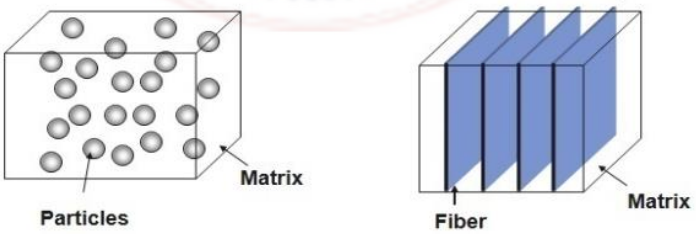
โครงสร้างนาโนคุณลักษณะเฉพาะที่สำคัญมากอย่างหนึ่งของอนุภาคนาโนก็คือมีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวและปริมาตรค่อนข้างสูงสัดส่วนพื้นที่ผิวของอะตอมที่สูงมากดังกล่าวทำให้อนุภาคนาโนมีคุณสมบัติที่แตกต่างไปจากก้อนปริมาตรของวัสดุในขนาดใหญ่วัสดุผลึกนาโนอาจประกอบไปด้วยผลึกกึ่งผลึก (quasi-crystalline) และ สถานะอสัณฐาน (amorphous phase) วัสดุผลึกนาโนอาจจะเป็นโลหะ กึ่งโลหะ (intermetallics) เซรามิกซ์หรือวัสดุประกอบ (composites) นอกจากนี้รูปของผลึกยังสามารถจัดแบ่งได้เป็นรูปทรงแผ่นหรือผลึกแบบชั้น (layer-shaped crystalline) ผลึกรูปทรงแท่ง (rod-shaped crystalline) และผลึกรูปขวานสมมาตร(equiaxed crystalline)

สมบัติของวัสดุประกอบขึ้นอยู่กับการยึดติดระหว่างเมทริกซ์และสารเสริมแรง สมบัติขนาด รูปร่าง ปริมาณของสารเสริมแรง กระบวนการผลิต การจัดเรียงตัวและการกระจายตัวของสารเสริมแรง ตำหนิหรือช่องว่างในวัสดุประกอบ การจัดจำแนกชนิดของวัสดุประกอบ แบ่งออกเป็น3กลุ่มใหญ่ๆตามตัวเสริมแรง (Reinforcement) ที่ใช้ ได้แก่

1.วัสดุประกอบที่ใช้เป็นตัวเสริมแรงชนิดอนุภาค (Particle-Reinforces Composite)

2 วัสดุประกอบที่ใช้ตัวเสริมแรงชนิดเส้นใย (Fibrous Composite)

3.วัสดุประกอบที่ใช้ตัวเสริมแรงชนิดโครงสร้าง




(a) ชนิดของอนุภาค (b) ชนิดเส้นใย

**ภาพที่ 14** ลักษณะของวัสดุประกอบที่ใช้เป็นตัวเสริมแรงชนิดอนุภาคและเส้นใย

วัสดุประกอบเสริมแรงด้วยเส้นใย เส้นใยมีหลายรูปแบบดังนี้

1. วิสเกอร์ (whisker) คือ ผลึกเดี่ยวที่มีค่าอัตราส่วนระหว่างความยาวกับเส้นผ่านศูนย์กลางสูงมากๆมีสภาพความสมบูรณ์ของการเป็นผลึกสูงและมีความแข็งแรงสูงโดยทั่วไปแล้ววิสเกอร์จะมีราคาแพงมาก เนื่องจากเตรียมได้ยาก ยกตัวอย่างเช่น แกรไฟต์ ซิลิกอน คาร์ไบด์ซิลิกอนไนไตรด์ อะลูมินา เป็นต้น

2. ไฟเบอร์ (fiber) คือเส้นใยของวัสดุที่มีลักษณะเป็นพหุผลึกหรือเป็น อสัณฐานที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก โดยทั่วไปแล้วมักจะเป็นพอลิเมอร์หรือเซรามิก ยกตัวอย่างเช่น อะรามิด (aramid) โบรอนออกไซต์ และอะลูมินา เป็นต้น

3. ลวดเหล็ก (fine wire) โดยทั่วไปแล้วลวดเหล็กจะมีขนาดใหญ่กว่าวิสเกอร์และไฟเบอร์ และมักจะหมายถึงโลหะ อย่างเช่น เหล็กกล้า โมลิบดีนัม และทังสเตน ยกตัวอย่างการใช้งานเช่น ลวดเหล็กกล้าที่ใช้เสริมแรงยางรถยนต์ หรือลวดเสริมแรงในตัวเคสของจรวด (rocket casting) เป็นต้น

## 12. การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (information) ที่เกี่ยวข้อง

ชวนชม (2552) งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการดัดแปรโมเลกุลแป้งโดยการทำปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันระหว่างแป้งและออกตะโนอิลคลอไรด์ได้แป้งออกตะโนเอต เพื่อช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างแป้งและพอลิเอธิลีน สำหรับนำไปพัฒนาเป็นพลาสติกคลุมโรงเรือนที่มีสมบัติย่อยสลายได้ เพื่อลดปัญหา อันเนื่องมาจากการกำจัดขยะพลาสติก โดยมุ่งเน้นที่จะพัฒนาพลาสติกคลุมโรงเรือนที่มีพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและแป้งเป็นองค์ประกอบหลัก เพื่อเพิ่มคุณสมบัติในการย่อยสลายได้โดยยังคงคุณสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานคลุมหลังคาโรงเรือนเพาะปลูกพืช จากการศึกษาพบว่าสมบัติเชิงกลทั้งค่าความต้านทานแรงดึง และค่า % การดึงยืด ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณแป้งดัดแปรเพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากแป้งดัดแปรซึ่งมีปริมาณหมู่ไฮดรอกซิล (OH) ของโมเลกุลแป้งที่ลดลง เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน ส่งผลให้มีความเป็นไฮโดรโฟบีกเพิ่มขึ้นและสามารถผสมเข้ากันกับพอลิเอธิลีนได้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าการดัดแปรแป้งดังกล่าวไม่ส่งผลต่อเสถียรภาพทางความร้อนของแป้ง อย่างไรก็ตามการผสมแป้ง 30% โดยน้ำหนักในพอลิเอธิลีน ส่งผลให้ค่า % การส่องผ่านของแสงลดลง แต่ยังอยู่ในระดับที่เพียงพอต่อความต้องการของพืช

ปฐมา และกล้าณรงค์ (มปป.) จากการศึกษาผลของการย่อยแป้งมันสำปะหลังด้วยกรดไฮโดรคลอริกร้อยละ 0.36 โดยปริมาตรในน้ำ และแอลกอฮอล์ชนิดต่างๆเป็นเวลา 1 วัน ต่อโครงสร้างทางโมเลกุล และสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของแป้งที่ได้โดยทั่วไป พบว่าแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยด้วยกรดส่วนใหญ่ยังคงอยู่ในรูปของเม็ดแป้งถึงแม้จะมีผิวไม่เรียบในระดับต่างๆกันเมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านการย่อยแป้งด้วยกรดในแอลกอฮอล์ทำให้โมเลกุลของส่วนประกอบในแป้งมีขนาดเล็กลงกว่าการย่อยด้วยกรดในน้ำโดยมีระดับของการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับชนิดของแอลกอฮอล์ที่ใช้แป้งที่ย่อยด้วยกรดในโพรพานอล และบิวทานอลมีขนาดโมเลกุลขององค์ประกอบเล็กกว่าแป้งที่ย่อยในเมทานอล และเอทานอลเมื่อได้รับความร้อนแป้งที่ย่อยในแอลกอฮอล์ให้ค่าความหนืดต่ำกว่าแป้งดิบ และแป้งที่ย่อยด้วยกรดในน้ำ อย่างมีนัยสำคัญความหนืดสูงสุดของแป้งที่ได้ลดลงเมื่อแป้งผ่านการย่อยด้วยกรดในแอลกอฮอล์ที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ขึ้นการย่อยแป้งด้วยกรดในแอลกอฮอล์ทำให้แป้งมันสำปะหลังมีความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

ปฐมา และคณะ (มปป.) จากการศึกษาผลของการดัดแปรแป้งมันสำปะหลังด้วยการแช่และการย่อยด้วยกรดโดยการวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างลักษณะ และการกระจายตัวของขนาดเม็ดแป้งโครงสร้างระดับโมเลกุล และสมบัติทางเคมีกายภาพเพื่อเปรียบเทียบกับแป้งดิบและแป้งที่ผ่านการแช่ที่สภาวะการย่อยเดียวกัน พบว่าเม็ดแป้งดิบและแป้งที่ผ่านการแช่แล้วหลังผ่านการย่อยด้วยกรดมีลักษณะพื้นผิวไม่เรียบแต่ยังคงรักษาสมบัติการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ไว้ได้เม็ดแป้งที่ได้จากการย่อยด้วยกรดมีขนาดเล็กลงเล็กน้อย และเม็ดแป้งบางส่วนแตกออกเป็นชิ้นส่วนเล็กๆเมื่อผ่านการย่อยเป็นเวลา 16 และ 32 วันโมเลกุลที่เป็นองค์ประกอบในเม็ดแป้งหลังผ่านการแช่มีขนาด และการกระจายตัวของโมเลกุลไม่แตกต่างจากแป้งดิบในขณะที่การย่อยด้วยกรดทำให้องค์ประกอบในเม็ดแป้งมีขนาดโมเลกุลเล็กลงอย่างต่อเนื่องเมื่อระยะเวลาในการย่อยนานขึ้นโดยการแช่แป้งไม่มีอิทธิพลต่อความคงทนต่อการย่อยด้วยกรดของแป้งมันสำปะหลังเมื่อได้รับความร้อนแป้งที่ย่อยด้วยกรดมีค่าความหนืดต่ำกว่าแป้งดิบ และแป้งที่ผ่านการแช่อย่างมีนัยสำคัญการย่อยแป้งด้วยกรดเป็นระยะเวลานานขึ้นทำให้แป้งมันสำปะหลังมีค่ากำลังการพองตัวต่ำลง ในขณะที่มีความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้นอุณหภูมิในการเจลาทิไนซ์แป้งสูงขึ้นเล็กน้อย ในระยะแรกของการย่อยด้วยกรดและลดลงรวมทั้งช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลาทิไนเซชันกว้างขึ้นหลังการย่อยเป็นเวลานานขึ้นพลังงานที่ใช้ในการเจลาทิไนซ์แป้งที่ผ่านการย่อย 16 และ 32 วัน มีค่าสูงขึ้นเจลที่ได้จากแป้งย่อยด้วยกรดรีโทรเกรดได้มากกว่าแป้งดิบและแป้งที่ผ่านการแช่แล้ว นอกจากนี้อุณหภูมิกลาสทรานสิชันในสภาวะที่มีน้ำจำกัดของเจลแป้งหลังการย่อยด้วยกรดมีค่าต่ำลงสำหรับแป้งที่ผ่านการย่อยเป็นเวลานานขึ้น

เจกิตาน์ และคณะ (2011) งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเตรียม และสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกจากแป้ง และยางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดร์ด ยางธรรมชาติถูกนำมาลดน้ำหนักโมเลกุลด้วยฟีนิลไฮดราซีนให้กลายเป็นยางธรรมชาติเหลว แล้วนำมาถูกกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดร์ดปริมาณ 3 phr หรือ 9 phr เมื่อพิสูจน์เอกลักษณ์ยางที่ได้ด้วยเทคนิค FT-IR และ H-NMR พบว่าเกิดพีคที่แสดงถึงหมู่แอนไฮไดร์ดจริง หลังจากนั้นนำยางที่ผ่านการกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดร์ดผสมกับแป้งมันสำปะหลังและกลีเซอรอลด้วยเครื่องผสมแบบภายในขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดเข้าแม่พิมพ์ แล้วทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทก สมบัติการดึงยืด และสมบัติความเสถียรทางความร้อน พบว่า เมื่อปริมาณการกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดร์ดเพิ่มขึ้น impact strength ของชิ้นงานมีค่าเพิ่มมากขึ้น แต่ไม่ทำให้สมบัติความเสถียรทางความร้อนเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมมากนัก

Bouthegourd et al.(2011) ได้ทำการเตรียมStarch nanocrystalsโดยใช้แป้งมันฝรั่งมาไฮโดรไลซิสด้วยกรด $H_2SO_4$จะใช้แป้งมันฝรั่ง 36 กรัม ทำการผสมในเครื่องโฮโมจีไนซ์กวนอย่างต่อเนื่อง 800 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 40 °C เป็นเวลา 5 วัน และนำมาล้างด้วยน้ำกลั่นจนเป็นกลาง อบให้แห้ง แล้วนำไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค TEM พบว่า อนุภาคของ Starch nanocrystals ที่สังเคราะห์ได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.45 nm หลังจากนั้นนำมากระจายตัวในน้ำด้วยเครื่อง ultrasonicatedจะได้ Starch nanocrystals ในรูปของสารแขวนลอย ผสมลงในน้ำยางธรรมชาติด้วยอัตราส่วนของ Starch nanocrystals 0%, 5%, 15%และ 20%w/w ดังตาราง ทำการผสมให้มีความสม่ำเสมอก่อนจะเทลงบนกระจกให้ได้ความหนา 1.5มม.อบให้แห้งจะได้วัสดุประกอบนาโนในลักษณะของแผ่นฟิล์ม แล้วนำไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค AFM เพื่อดูลักษณะการกระจายตัวของ Starch nanocrystals ในยางธรรมชาติพบว่า วัสดุประกอบนาโนที่มีการเติม Starch nanocrystalsที่ 5%, 15%และ 20%w/w สามารถเห็นการกระจายเป็นเนื้อเดียวกันของ Starch nanocrystals ที่ 5%w/w ในทางตรงกันข้ามที่ 15%w/w จะเห็นลักษณะการเกาะกลุ่มเป็นก้อนเกิดขึ้น แสดงให้เห็นว่าปริมาณของ Starch nanocrystals ที่เติมลงไปจะสามารถกระจายตัวได้ดีอย่างสม่ำเสมอที่ปริมาณต่ำกว่า 15%w/w

Wang et al.,(2009) เตรียมวัสดุประกอบนาโนระหว่างแป้งดัดแปรกับยางธรรมชาติ โดยนำแป้ง 162 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 2400 ml. เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 5mol/ L 100 ml ปั่นกวนเป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นเติมคาร์บอนไบซัลไฟด์ลงไปปั่นกวนเป็นเวลา 1ชั่วโมง เติม

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 0.5 mol/ L 17 ml.แล้วอบให้แห้งก็จะได้แป้งดัดแปร ชื่อว่า Starch xanthate แล้วนำไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FT-IR ของแป้ง เปรียบเทียบระหว่างแป้งไม่ดัดแปรกับแป้งดัดแปร พบว่าที่ตำแหน่ง 3340 cm-1 แคบลงและมีพีคใหม่เกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 1084 cm-1ซึ่งเป็นพีคของ S-C stretching สามารถยืนยันโครงสร้างของแป้งที่เปลี่ยนไปหลังจากดัดแปรด้วยคาร์บอนไบซัลไฟด์ได้ ต่อไปก็จะเป็นการเตรียมวัสดุประกอบระหว่างแป้งดัดแปรกับยางธรรมชาติ นำแป้งดัดแปรและน้ำยางธรรมชาติมาผสมกัน โดยปรับเปลี่ยนปริมาณแป้งเป็น 0,5,10,15,20 และ 25 เติมกรดอะซิติกลงไปเพื่อให้เกิดการจับตัวกันเป็นก้อน หลังจากนั้นนำมาล้างด้วยน้ำ แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 75°C ก็จะได้วัสดุประกอบระหว่างแป้งดัดแปรกับยางธรรมชาติ ในส่วนของสเปกตรัม FT-IR ของยางธรรมชาติ แป้งดัดแปร และวัสดุประกอบระหว่างแป้งดัดแปรกับยางธรรมชาติ จากผลการวิเคราะห์สามารถยืนยันการมีอยู่ของแป้งดัดแปรในวัสดุประกอบได้โดยในวัสดุประกอบปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 3300 cm-1(OH-stretching) และ1154 cm-1(unsymmetryC-O-C bond ) ซึ่งเป็นพีคเอกลักษณ์ของแป้งดัดแปร ลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุประกอบระหว่างแป้งดัดแปรกับยางธรรมชาติที่ตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM แสดงให้เห็นขนาดของเม็ดแป้งที่ยังไม่ดัดแปรมีขนาดประมาณ 1,000-5,000 nm มีรูปทรงค่อนข้างกลม ขนาดและรูปร่างของเม็ดแป้งไม่ดัดแปร ที่อยู่ในวัสดุประกอบยังคงเกือบเหมือนเดิมและมีบางส่วนแสดงถึงการแตกหักบริเวณพื้นผิวของวัสดุประกอบซึ่งบ่งบอกถึงความเข้ากันได้ระหว่างแป้งกับยางธรรมชาติที่ไม่ดี แต่หลังจากแป้งถูกดัดแปรขนาดของเม็ดแป้งเล็กลงอยู่ในช่วงต่ำกว่า 200 nm เมื่อใส่ลงไปในยางธรรมชาติจะเห็นว่าลักษณะของการแตกหักบริเวณพื้นผิวหยาบขึ้น จึงสามารถสรุปได้ว่าการปรับเปลี่ยนขนาดอนุภาคแป้งช่วยให้เกิดการกระจายตัวในยางธรรมชาติให้ดีขึ้นอย่างเห็นชัด สมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบที่มีการเติมแป้งดัดแปรและไม่ดัดแปร พบว่าเมื่อมีการใช้แป้งไม่ดัดแปรปริมาณ 10 phr สมบัติเชิงกลที่ได้จะมีค่าความแข็ง, ความเครียดที่ 500 %, และความต้านทานต่อแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้น 10 %, 22 % และ 5 %ตามลำดับ แต่หากใช้แป้งดัดแปรที่ปริมาณเท่ากันพบว่าสมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้น 20 %, 71 % และ 11 % ตามลำดับซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า xanthatesในโครงสร้างของแป้งดัดแปรสามารถช่วยให้แป้งกับยางเข้ากันได้มากขึ้น จึงส่งผลให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น การปรับเปลี่ยนปริมาณของแป้งส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบ ซึ่งจะเห็นได้จากที่ปริมาณแป้งที่ 20 phrจะมีความแข็ง, ความเครียดที่ 500 %, ความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาด มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น24 %, 179 %, 32 % และ 12 % ตามลำดับ เมื่อเทียบกับยางธรรมชาติที่ไม่มีการเติมแป้ง ค่าความแข็ง, ค่าโมดูลัส, ความต้านทานต่อแรงดึง และความต้านทานต่อการฉีกขาดของวัสดุประกอบจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของแป้ง ผลมาจากการเคลื่อนที่ของของสายโซ่ยางธรรมชาติถูกจำกัดด้วยอนุภาคของแป้งพันธะ C=S ในโมเลกุลของแป้งจะมีการเชื่อมโยงส่งผลให้

การเชื่อมโยงในวัสดุประกอบในขั้นตอนการวัลคาไนซ์ มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ระยะยืด ณ จุดขาด มีค่าลดลงซึ่งนั้นก็หมายถึง ยางมีความยืดหยุ่นลดลง

Julien et al. (2010) ศึกษาการเตรียมวัสดุประกอบนาโนระหว่าง Cellulose nanocrystal กับยางธรรมชาติ ทำการเตรียม Cellulose nanocrystal โดยใช้เส้นใยชานอ้อยมาย่อยสลายด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 65% โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 45oC เป็นเวลา 45 นาทีจากนั้นนำไปหมุนเหวี่ยงด้วยเครื่องเซ็นติฟิวซ์เพื่อเอากรดส่วนเกินออก ล้างด้วยน้ำกลั่นจนกว่าจะมีค่า pH ที่เป็นค่ากลาง แล้วนำไปอบให้แห้ง แล้วนำไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค TEM พบว่า Cellulose nanocrystal ที่ได้จากเส้นใยชานอ้อยหรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Celluose whisker มีความยาวเฉลี่ยอยู่ที่ 96.7±39 nm ความกว้างเฉลี่ยอยู่ที่ 7.5±2.3 nm โดยมีอัตราส่วนความกว้างต่อความยาวอยู่ที่ประมาณ 13 Cellulose nanocrystal ที่ได้ถูกนำมาใส่เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติในอัตราส่วน 0-12.5% โดยน้ำหนักผสมให้เข้ากันโดยการปั่นกวนเป็นเวลา 8 ชั่วโมงแล้วนำไปเตรียมเป็นฟิล์มที่มีความหนา 1 มิลลิเมตรอบที่อุณหภูมิ 40oC เป็นเวลา 2-3 วันวัสดุประกอบนาโนระหว่าง cellulose whiskers กับยางธรรมชาติถูกเตรียมเป็นฟิล์มเพื่อใช้ในการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM พบว่า cellulose whiskers เกิดการกระจายตัวในยางธรรมชาติอย่างสม่ำเสมอไม่มีการเกาะกลุ่มกันเป็นก้อน อย่างไรก็ตามในการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง ค่า Tensile modulus และ Tensile strength ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ cellulose whiskers โดยที่ปริมาณ cellulose whiskers 10% wt จะให้ค่าสูงสุด ซึ่งเป็นผลมาจากเสริมแรงของ cellulose whiskers ที่ใส่ลงไปโดย cellulose whiskers จะมีโครงสร้างเชื่อมโยงกันอย่างต่อเนื่องด้วยพันธะไฮโดรเจน อีกทั้งลักษณะของอนุภาคเป็นแบบแท่ง (rod) ซึ่งมีค่าอัตราส่วนความกว้างต่อความยาว (Aspect ratio) ที่สูงกว่าเซลลูโลสแบบเดิมจึงทำให้เมื่อวัสดุประกอบมีปริมาณ cellulose whiskers มากขึ้นจะมีค่า Tensile strength สูงขึ้นด้วย

Xiaodong et al. (2013) ศึกษาการเตรียมวัสดุประกอบนาโนระหว่าง Cellulose nanocrystal กับยางไนไตร์ลบิวตะไดอีนได้ทำการเตรียม Cellulose nanocrystal โดยใช้เส้นใยที่อยู่ในเมล็ดฝ้าย 30 กรัม มาตัดเป็นชิ้นเล็กๆ จากนั้นนำมาผสมกับสารละลายกรดซัลฟูริก 250 มิลลิลิตรที่มีความเข้มข้น 64% โดยน้ำหนักโดยใช้อุณหภูมิ 60oC เป็นเวลา 2 ชั่วโมงจากนั้นนำมาล้างด้วยน้ำกลั่นจนกว่าจะมีค่า pH ที่เป็นกลาง แล้วนำไปอบให้แห้งแห้ง นำไปกระจายตัวในน้ำที่ความเข้มข้น 5% โดยน้ำหนัก ผสมน้ำยางไนไตร์ล บิวตะไดอีนกับ Cellulose nanocrystal ที่อยู่ในรูปสารแขวนลอยด้วยอัตราส่วน 0, 5, 10, 15 และ 20 phr โดยปั่นกวนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที ต่อจากนั้นนำส่วนผสมเทลงในถาดแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 70oC จนมีน้ำหนักคงที่ หลังจากนั้นนำวัสดุประกอบ

ที่ได้ไปผสมกับสารเคมีในเครื่อง two roll mill แล้วทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง ตัดชิ้นยางมาหาค่า ODR ที่ T90 และนำมาวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 160oC ลักษณะสัณฐานวิทยาของ Cellulose nanocrystal และวัสดุประกอบระหว่าง Cellulose nanocrystal กับยาง NBR ซึ่งถูกตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค SEM พบว่าขนาดอนุภาคของ Cellulose nanocrystal มีความกว้างต่ำกว่า 50 นาโนเมตร และความยาวต่ำกว่า 500 นาโนเมตร บริเวณพื้นผิวของวัสดุประกอบที่มีการเติม Cellulose nanocrystal 0, 5, 10, 15 และ 20 phr จะเห็นการกระจายตัวของ Cellulose nanocrystal ในยาง NBR ค่อนข้างสม่ำเสมอ ซึ่งบ่งบอกถึงความเข้ากันได้ระหว่าง Cellulose nanocrystal กับยาง NBR โดยเกิดขึ้นเนื่องจากเกิดอันตรกิริยาระหว่างยาง NBR กับ Cellulose nanocrystal ที่หมู่ CN ของยาง NBR กับหมู่ OH บริเวณผิวของ Cellulose nanocrystal สมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบระหว่างยาง NBR กับ Cellulose nanocrystal พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ Cellulose nanocrystal ในวัสดุประกอบ ความต้านทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาด และความแข็งเพิ่มขึ้น โดยค่าความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นจาก 7.7 MPa ไปเป็น 15.7 MPa ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดเพิ่มขึ้นจาก 34 kN/m ไปเป็น 43 kN/m โดยเฉพาะวัสดุประกอบที่มีการเติม Cellulose nanocrystal เข้าไป 20 phr จะมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นจากยาง NBR ที่ไม่มีการเติม Cellulose nanocrystal ถึง 2 เท่า ซึ่งบอกถึงการเสริมแรงที่ดีของ Cellulose nanocrystal อย่างไรก็ตามในทางตรงกันข้าม ค่าระยะยืด ณ จุดขาดลดลง เมื่อมีการเติม Cellulose nanocrystal มากขึ้น เนื่องจากอันตรกิริยาที่แข็งแรงระหว่างยางกับสารตัวเติมส่งผลให้ความสามารถในการต้านทานต่อการเสียรูปของยางลดลง

# บทที่ 3

# วิธีการดำเนินการวิจัย

## 1 ยางและสารเคมี

1. น้ำยางธรรมชาติสด (Latex) มีลักษณะสีขาวหรือขาวออกเหลือง สูตรโครงสร้างทางเคมี คือ $C_5H_8$

2. กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid) เข้มข้น 95-97 เปอร์เซ็นต์ มีสูตรโครงสร้างทางเคมี $H_2SO_4$ น้ำหนักโมเลกุล 98.08 กรัมต่อโมล ผลิตโดยบริษัท Avantor Performance Materials สหรัฐอเมริกา

3. กรดอะซิติก (Acetic acid) เข้มข้น 99.8 เปอร์เซ็นต์ มีสูตรโครงสร้างทางเคมี $CH_3COOH$ น้ำหนักโมเลกุล 60.05 กรัมต่อโมล ผลิตโดยบริษัท J.T. Baker NEUTRASORB® ประเทศจีน

4. แป้งมันสำปะหลัง (Cassava starch) ลักษณะของแป้งมีสีขาว เนื้อเนียน ลื่นเป็นมัน

5. แป้งข้าวโพด (Maize starch) ลักษณะเป็นผงสีขาวเหลืองนวล จับแล้วผิวสัมผัสของแป้งเนียนลื่นมือ

6. ชานอ้อย (Bagasse) คือ ส่วนของลำต้นอ้อยที่หีบเอาน้ำอ้อยหรือน้ำตาลออกแล้ว

7. ผักตบชวา (Water Hyacinth)

8. กรดสเตียริก (Stearic acid) ลักษณะเป็นเกร็ดสีน้ำตาลอ่อน เป็นเกรดที่ใช้ในอุตสาหกรรม ผลิตโดยบริษัท อินพีเรียล อินดัสเตรียล เคมีคัล จำกัด ใช้เป็นสารกระตุ้นในปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ยาง

9. ซิงออกไซด์ (Zinc Oxide) ลักษณะเป็นผงสีขาวละเอียด เป็นเกรดที่ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตโดยบริษัท ยูนิไทย จำกัด ใช้เป็นสารกระตุ้นในปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ยาง

10. ไดไธโอ-บิส-เบนโซไธอาโซล (2,2-dithio-bis-benzothiazole, MBTS) ลักษณะเป็นผงสีขาวอมเหลืองๆ เป็นเกรดที่ใช้ในอุตสาหกรรม ผลิตโดยบริษัท Asia Pacific Specialty Limited ประเทศออสเตรเลีย ใช้เป็นสารตัวเร่งในปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์

11. ไซโคลเฮกซิลเบนโซไทอะซิลซัลฟีนาไมด์ (n-cyclohexylbenzothiazole-2-sulphenamide, CBS) ลักษณะเป็นเม็ดสีเขียวเป็นเกรดที่ใช้ในอุตสาหกรรม ผลิตโดยบริษัท Asia Pacific Specialty Limited ประเทศออสเตรเลีย ใช้เป็นสารตัวเร่งในปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์

11. ไตรเมทิลไฮโดรควิโนลีน (2, 2, 4-Trimethyl-1,2-dihydroquinoline, polymerized, TMQ) ลักษณะสีทองๆเป็นเกรดที่ใช้ในอุตสาหกรรม ผลิตโดยบริษัท Asia Pacific Specialty Limited ประเทศออสเตรเลีย ใช้เป็นสารตัวเร่งในปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์

12. กำมะถัน (Sulphur) ลักษณะเป็นผงสีเหลือง เป็นเกรดที่ใช้ในอุตสาหกรรม ผลิตโดยบริษัท เพชรไทยเคมีภัณฑ์ จำกัด ใช้เป็นสารวัลคาไนซ์ยาง

## 2 อุปกรณ์

1. เครื่องรีดยาง มีเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกกลิ้ง 3 นิ้ว เพื่อใช้รีดยางที่จับตัวแล้วเป็นแผ่นยาง

2. เครื่องผสมสองลูกกลิ้ง (Two Roll-Mill) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 นิ้ว ผลิตภัณฑ์ บริษัท ยงฟง ประเทศไทย จำกัด

3. ตู้อบแห้ง (Hot Air Oven) ยี่ห้อ Memmert UE500 ใช้ระบบอากาศร้อนหมุนเวียน

4. เครื่องกวนเชิงกล สามารถควบความเร็วในการกวน 60 – 500 รอบ/นาที

5. เครื่องกวนแม่เหล็กให้ความร้อน (Hot plate Stirrer) เป็นเครื่องสำหรับกวนโดยใช้แรงแม่เหล็กช่วยในการกวน และเป็นเครื่องที่สามารถให้ความร้อนในขณะกวนได้

6. อุปกรณ์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ ลักษณะของเครื่องแสดงดังภาพที่ 3.6 ประกอบด้วยโหลแก้ว ความจุประมาณ 8 ลิตร อ่างน้ำปรับอุณหภูมิได้ (Water Batch) และเครื่องกวนเชิงกล

7. เครื่องอัดเบ้า (Compression moulding) มีชุดควบคุมความร้อน 2 ชุด สามารถตั้งอุณหภูมิสูงสุดของเครื่องเท่ากับ 400 องศาเซลเซียส ซึ่งมีแรงอัดสูงสุดเท่ากับ 60 N ผลิตโดยบริษัทหงส์ยาวไทย จำกัด ใช้ขึ้นรูปและวัลคาไนซ์ชิ้นทดสอบและผลิตภัณฑ์

8. เครื่องทดสอบเวลาการวัลคาไนซ์ยางคอมเปาวด์ (Oscillating Disk Rheometer, ODR) ยี่ห้อ TECH PRO รุ่น TECH OD+ ใช้สำหรับหาเวลาการวัลคาไนซ์และเวลาการสุกของยางก่อนกำหนด

9. เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 2 ตำแหน่ง (Balance) ใช้ในการชั่งน้ำหนักของแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวโพด รุ่น PB 3002-3 มีพิกัดกำลังชั่งสูงสุด 3,100 กรัม ความละเอียดในการชั่ง 0.01 กรัม ผลิตโดยบริษัท Mettle – Toledo (Thailand) จำกัด

10. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง เพื่อชั่งชิ้นยางที่ทดสอบสมบัติการสึกหรอชนิดความละเอียด 0.0001 กรัม สามารถรับน้ำหนักได้สูงสุด 210 กรัม ยี่ห้อ Voyager R Pro ผลิตโดยบริษัท OHAUS (Switzerland)

11. เครื่องทดสอบความทนต่อแรงดึง (Tensile tester) เพื่อใช้ทดสอบความทนต่อแรงดึงของยาง ความต้านทานต่อการฉีกขาดของยาง สามารถรับแรงได้สูงสุด PB 3002-3 พิกัดกำลังชั่งสูงสุด 3,100 กรัม ผลิตโดยบริษัท mettle Toledo (Thailand) จำกัด

12. เครื่องวัดความแข็ง (Hardness tester) เพื่อทดสอบสมบัติความแข็งของยางเป็นเครื่องทดสอบชนิด Shore A ผลิตโดย บริษัท Rex Gauge CO, LTD ประเทศสหรัฐอเมริกา

13. เครื่องวัดความหนา (Thickness) ใช้วัดความหนาของชิ้นตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ

14. เครื่องทดสอบการสึกหรอ (Abrasion) เป็นเครื่องใช้ทดสอบสมบัติการทนต่อการสึกหรอของชิ้นงานรุ่น QC – 619 T ผลิตโดยบริษัท Cometech CO.LTD ประเทศญี่ปุ่น

15. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) เป็นเครื่องมือตรวจสอบสัณฐานวิทยาของยาง รุ่น SEM-Quanta 400 โดยมีกำลังขยายสูงสุด 300,000 เท่า ผลิตโดย FEI ประเทศสหรัฐอเมริกา

16. เครื่องวัดขนาดอนุภาค (Zeta potential analyzer) เป็นเครื่องมือสำหรับทำการวัดขนาดอนุภาคของสารรุ่น Zeta PALS ผลิตโดยบริษัท Brookhaven Instruments Corporation ประเทศสหรัฐอเมริกา

## 3 วิธีการทดลอง

### 3.1 การเตรียมแป้งด้วยวิธีการย่อยด้วยกรด

1. นำแป้งมันสำปะหลัง (Cassava Starch, CS) มาชั่งน้ำหนัก 300 กรัม หลังจากนั้นเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 3mol/L ปริมาตร 2,000 มิลลิลิตร ทำการกวนอย่างต่อเนื่อง 400 รอบต่อนาที โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 ชั่วโมง

2. หลังจากปั่นกวนครบตามเวลาที่กำหนดนำตะกอนที่ได้เติมน้ำกลั่นและรอให้แยกชั้น หลังจากนั้นดูดน้ำออก และเติมน้ำกลั่นอีกหลายๆครั้งทำซ้ำๆ จนน้ำล้างมีค่าเป็นกลาง นำไปอบให้แห้ง

3. นำตะกอนที่ได้ไปตรวจดูสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM

4. ทำการทดลองตามขั้นตอนข้างต้น โดยทำการปรับเปลี่ยนแป้งจากแป้งมันสำปะหลังเป็นแป้งข้าวโพด (Maize Starch, MS)

5. นำตะกอนไปทดสอบการละลายน้ำที่อุณหภูมิห้อง และที่อุณหภูมิ 65, 75, 85 และ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที แล้วสังเกตผลการทดลอง หลังจากนั้นทิ้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

# บทที่ 4

# ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

## 1. ผลของการย่อยแป้งมันสำปะหลังแป้งข้าวโพดชานอ้อยและผักตบชวาด้วยกรดซัลฟิวริก

จากการทดสอบการย่อยแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวโพดด้วยกรดซัลฟิวริก ดังข้อที่ 3.1 และ 3.2 เมื่อนำมาวิเคราะห์ขนาดอนุภาค การละลายน้ำ และตรวจสัณฐานวิทยาของแป้งที่ผ่านการย่อยด้วยกรด แสดงดังข้อที่ 1.1-1.3

### 1.1 ผลการวัดขนาดอนุภาค

แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพด แป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยด้วยกรด และแป้งข้าวโพดที่ผ่านการย่อยด้วยกรด ด้วยเครื่อง Zeta potential analyzer พบว่าโมเลกุลของแป้งมันสำปะหลัง และแป้งข้าวโพดที่ผ่านการย่อยด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 3 mol/L เป็นเวลา 90 ชม. มีขนาดเล็กกว่า โดยกรดจะตัดโมเลกุลของแป้งให้มีขนาดเล็กลง ซึ่งผลของขนาดอนุภาค แสดงดังตารางที่ 4.1 สอดคล้องกับการรายงานของ (ปฐมา และคณะ, มปป.) ชานอ้อย ผักตบชวา ชานอ้อยที่ผ่านการย่อยด้วยกรด และผักตบชวาที่ผ่านการย่อยด้วยกรดด้วยเครื่อง Zeta potential analyzer พบว่าขนาดของ ชานอ้อย และ ผักตบชวาที่ผ่านการย่อยด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 6 mol/l เป็นเวลา 120 ชั่วโมง มีขนาดเล็กกว่า ชานอ้อย และผักตบชวาที่ไม่ได้ผ่านการย่อย โดยกรดจะตัดโมเลกุลของเส้นใยให้มีขนาดเล็กลงซึ่งผลของขนาดอนุภาค

**ตารางที่ 8** ผลการวัดขนาดอนุภาคของเครื่อง Zeta potential analyzer

| ชนิดของแป้ง | ขนาดอนุภาค (nm.) |
|---|---|
| แป้งมันสำปะหลัง | 2,133.8 |
| แป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยด้วยกรด | 1,123.6 |
| แป้งข้าวโพด | 3,522.4 |
| แป้งข้าวโพดที่ผ่านการย่อยด้วยกรด | 1,214.1 |
| ชานอ้อย | 10,669.0 |
| ชานอ้อยที่ผ่านการย่อย | 4,347.0 |
| ผักตบชวา | 20,965.9 |
| ผักตบชวาที่ผ่านการย่อย | 3,766.4 |

### 1.2 ผลการทดสอบการละลายน้ำ

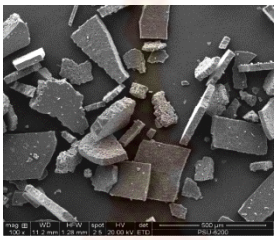
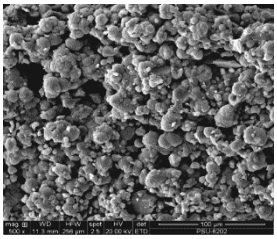
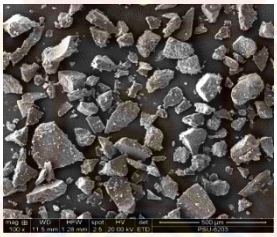
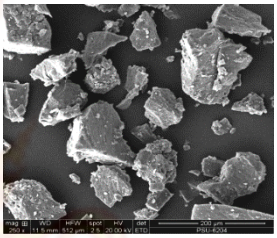
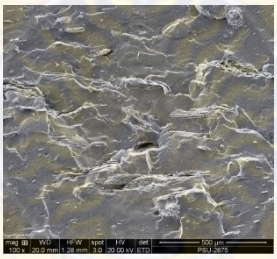
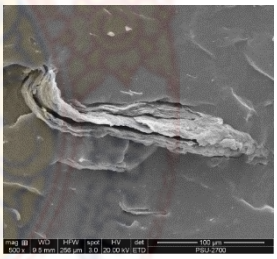
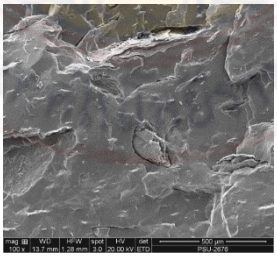
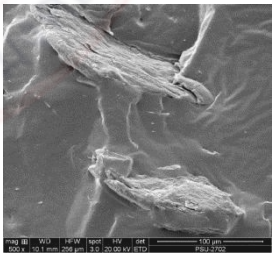
จากการทดสอบการละลายน้ำของ Cassava Starch (CS), Maize Starch (MS), Cassava Starch Hydrolysis (CSH) และ Maize Starch Hydrolysis (MSH) เมื่อนำมาละลายน้ำที่อุณหภูมิห้อง พบว่าแป้งที่ผ่านการย่อยไม่สามารถละลายน้ำได้แต่สามารถละลายน้ำได้ดีขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 65, 75, 85 และ 95 องศาเซลเซียส ในขณะที่แป้งที่ไม่ได้ผ่านการย่อยไม่สามารถละลายน้ำได้ทั้งที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 65, 75, 85 และ 95 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแป้งที่ผ่านการย่อยด้วยกรดจะมีการละลายน้ำที่ดีขึ้น หลังจากนั้นเมื่อตั้งทิ้งไว้ให้เกิดการตกตะกอนแป้งที่ผ่านการย่อยจะเกิดการตกตะกอนน้อยกว่า และช้ากว่าแป้งที่ไม่ผ่านการย่อย

### 1.3 สัณฐานวิทยาของแป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพด ผักตบชวาและชานอ้อย ที่ผ่านการย่อยด้วยกรดซัลฟิวริก

ศึกษาสมบัติด้านสัณฐานวิทยาของแป้งมันสำปะหลัง และแป้งข้าวโพด ที่ผ่านการย่อยด้วยกรดซัลฟิวริก พบว่าลักษณะผิวของเม็ดแป้งที่ถูกย่อยด้วยกรดจะมีลักษณะผุกร่อนทั่วทั้งผิวเม็ดแป้ง

**ตารางที่ 9** สัณฐานวิทยาของแป้งมันสำปะหลัง และแป้งข้าวโพด ที่ผ่านการย่อยด้วยกรดซัลฟิวริก

ด้วยเทคนิค SEM

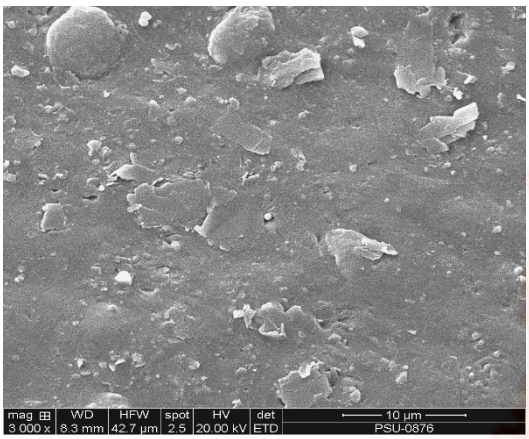
| ชนิดแป้ง | กำลังขยาย 100 เท่า | กำลังขยาย 500 เท่า |
|---|---|---|
| แป้งมันสำปะหลัง |  |  |
| แป้งข้าวโพด |  |  |
| ชานอ้อย |  |  |
| ผักตบชะวา |  |  |

**2. ผลของการใช้แป้งเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ**

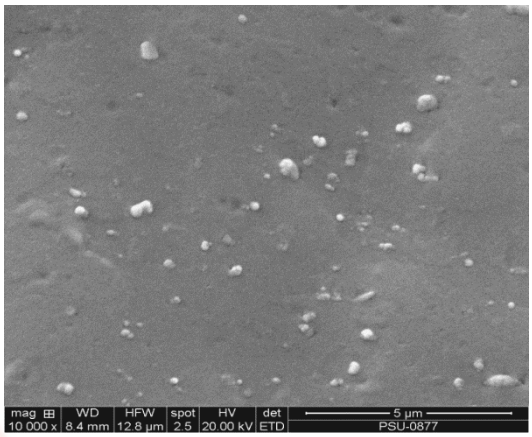
จากการนำแป้งมันสำปะหลัง และแป้งข้าวโพด ที่ผ่านการย่อยด้วยกรด เปรียบเทียบกับแป้งมันสำปะหลัง และแป้งข้าวโพด ที่ไม่ผ่านการย่อยด้วยกรด ดังหัวข้อที่ 3.3.1 ผลการทดลองแสดงในข้อ 2.1

**2.1 ผลการกระจายตัวของแป้งในยางธรรมชาติที่เตรียมจาก Cassava Starch Hydrolysis (CSH) และ Maize Starch Hydrolysis (MSH) ต่อสมบัติด้านสัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติ**

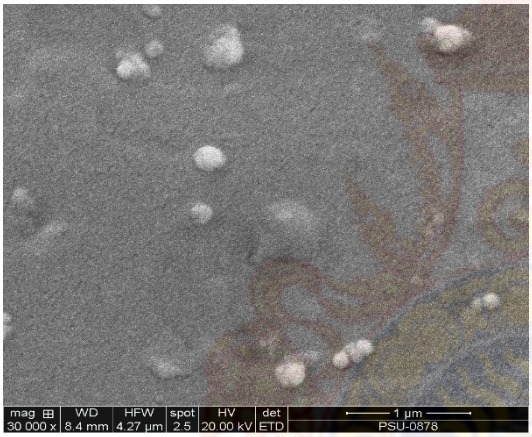
ศึกษาสมบัติด้านสัณฐานวิทยาของยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมได้จาก Cassava Starch Hydrolysis (CSH) และ Maize Starch Hydrolysis (MSH) โดยใช้น้ำยางธรรมชาติ 30% DRC ที่ปริมาณ CSH และ MSH 0, 5, 10, 15 และ 20 phr มาขึ้นรูปเป็นแผ่นยางโดยใช้เครื่องอัดเบ้าที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส นำแผ่นยางที่ได้ไปแช่ด้วยไนโตรเจนเหลว แล้วทำการเปิดผิวใหม่เพื่อศึกษาสมบัติด้านสัณฐานวิทยาของยางโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ซึ่งผลจากการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาพบว่าแป้ง CSH และ MSH มีการกระจายตัวที่ดี และมีการเกาะกลุ่มเป็นก้อนบ้างบางส่วน แสดงดังภาพที่ 15 – 16



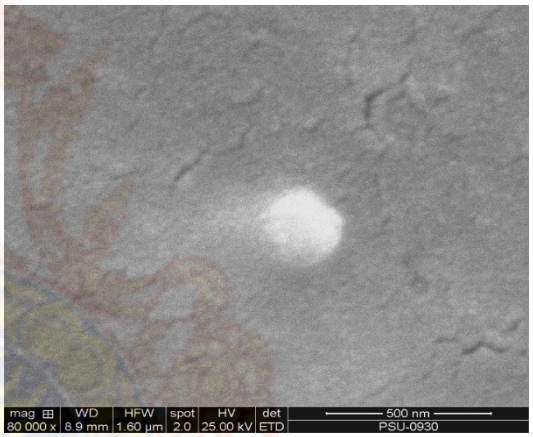

a.




b.

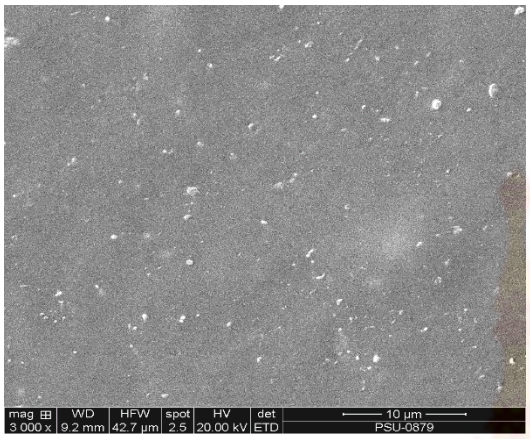



c.

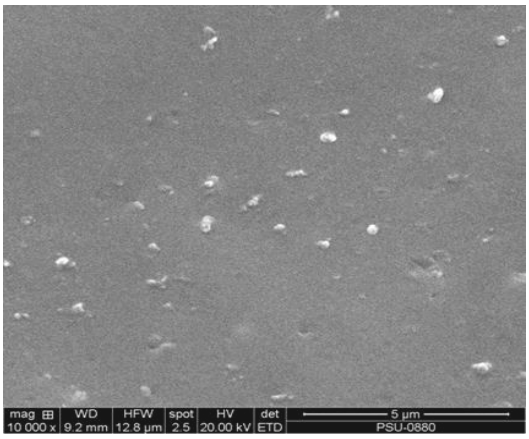



d.

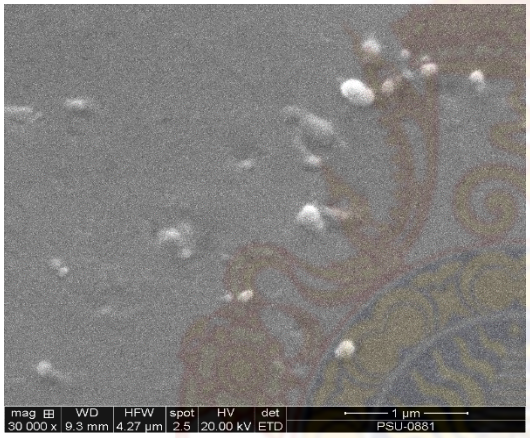
**ภาพที่ 15** สัณฐานวิทยาของยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจาก Cassava Starch Hydrolysis (CSH) 10 phr
a. กำลังขยาย 3,000 เท่าb. กำลังขยาย 10,000 เท่า
c. กำลังขยาย 30,000 เท่า d. กำลังขยาย 80,000 เท่า



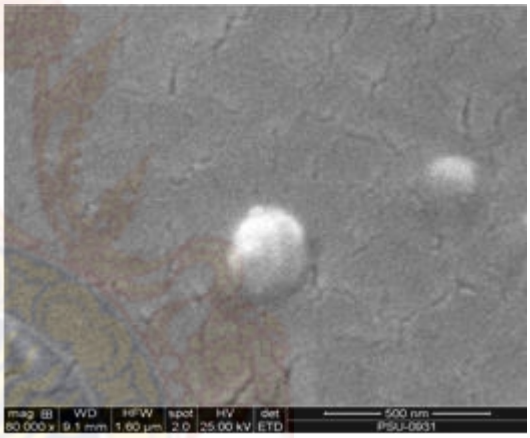

a.




b.




c.



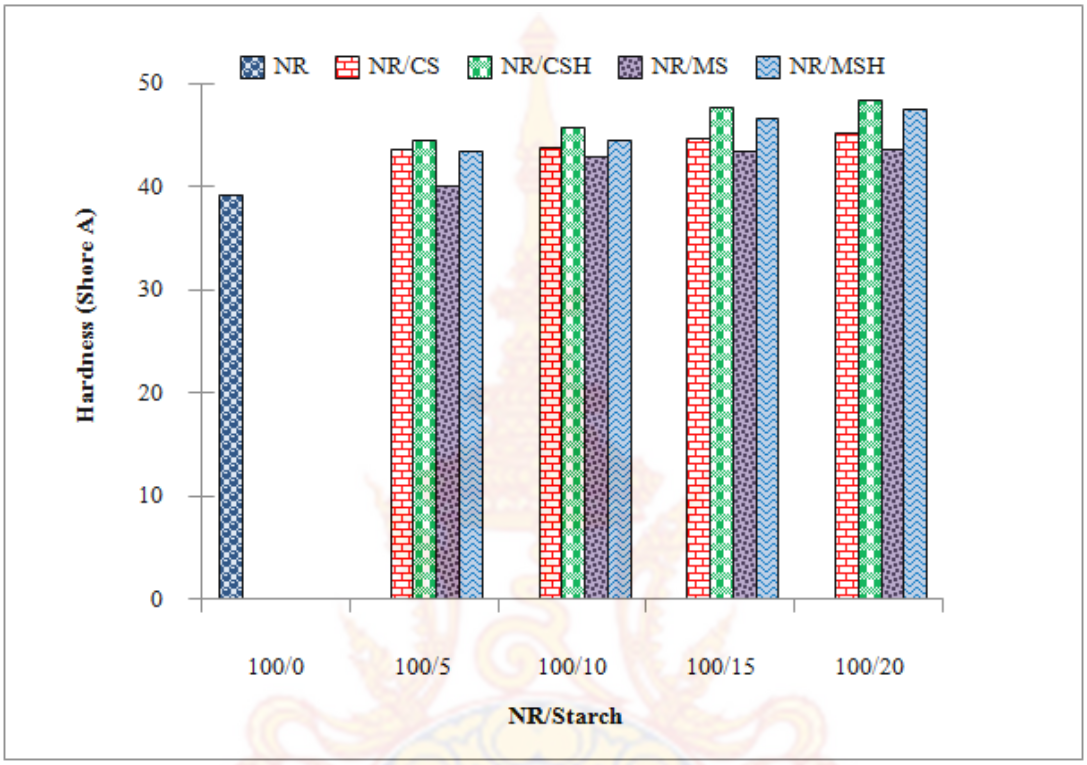

d.

**ภาพที่ 16** สัณฐานวิทยาของยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจาก Maize Starch Hydrolysis (MSH) 15 phr

a. กำลังขยาย 3,000 เท่า b. กำลังขยาย 10,000 เท่า

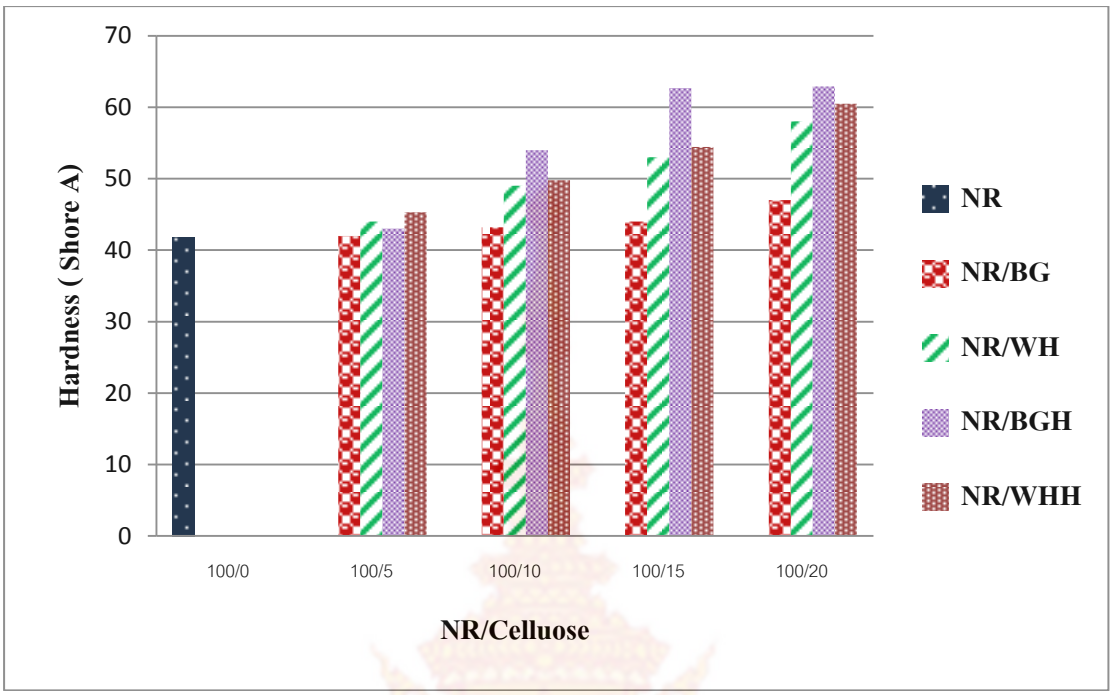
c. กำลังขยาย 30,000 เท่า d. กำลังขยาย 80,000 เท่า

**3. ผลสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่มีการเติมแป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพด ชานอ้อย และผักตบชวาที่ผ่านการย่อยด้วยกรด และแป้งที่ไม่ได้ผ่านการย่อยด้วยกรด**



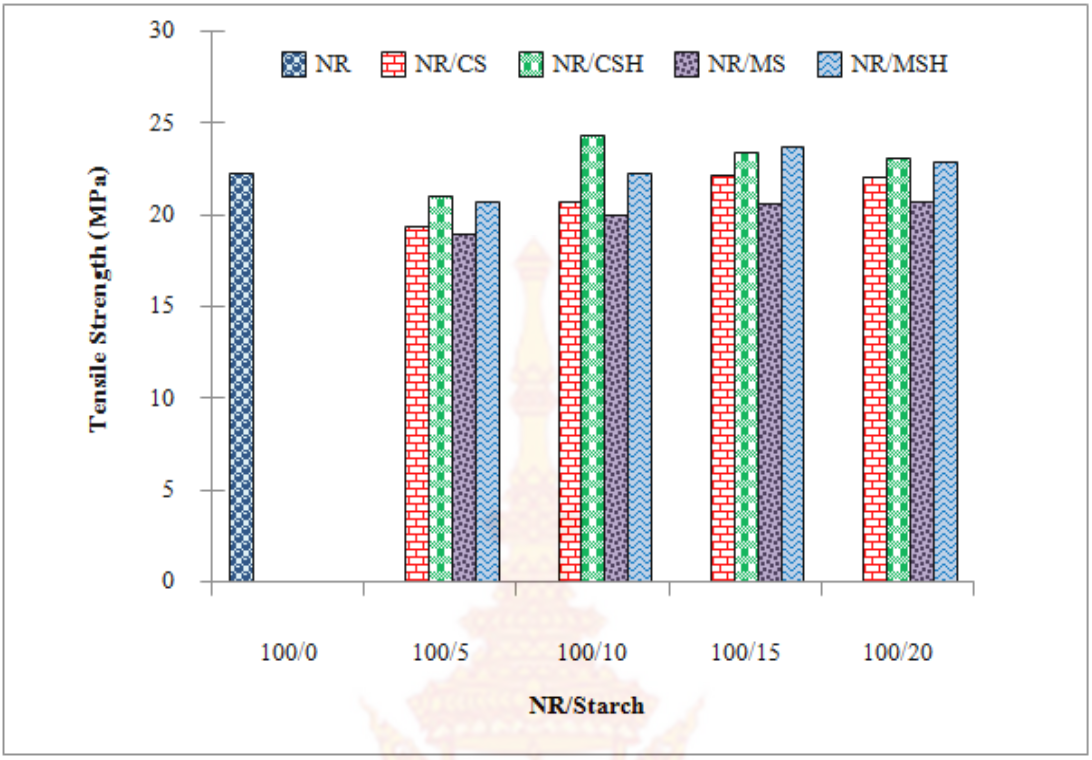

**ภาพที่ 17** ความแข็ง (Hardness) ของยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจาก CS, MS, CSH และ MSH

จากภาพที่ 17 แสดงค่าความแข็ง (Hardness) ของยางธรรมชาติที่มีการเติมแป้งทั้งสี่ชนิดที่ปริมาณแตกต่างกัน พบว่าค่าความแข็งที่ได้จากแป้งทั้งสี่ชนิดมีค่าความแข็งที่ไม่สูงมากนักเมื่อเทียบกับค่าความแข็งของยางธรรมชาติ เนื่องจากอนุภาคของแป้งทั้งสี่ชนิดมีอนุภาคใหญ่จึงส่งผลให้ค่าความแข็งที่ได้ต่ำ อนุภาคของแป้งทั้งสี่ชนิดมีอนุภาคใกล้เคียงกับแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งมีขนาดอนุภาคประมาณ 500-50,000 นาโนเมตร นอกจากนั้นแป้งเป็นสารตัวเติมที่มีขั้วเช่นเดียวกับแคลเซียมคาร์บอเนตจึงกระจายในยางที่ไม่มีขั้วเป็นไปได้ยากมีพื้นที่ผิวในการยึดเกาะกับโมเลกุลของยางน้อย จึงไม่สามารถเสริมประสิทธิภาพให้กับยางได้ดีนัก



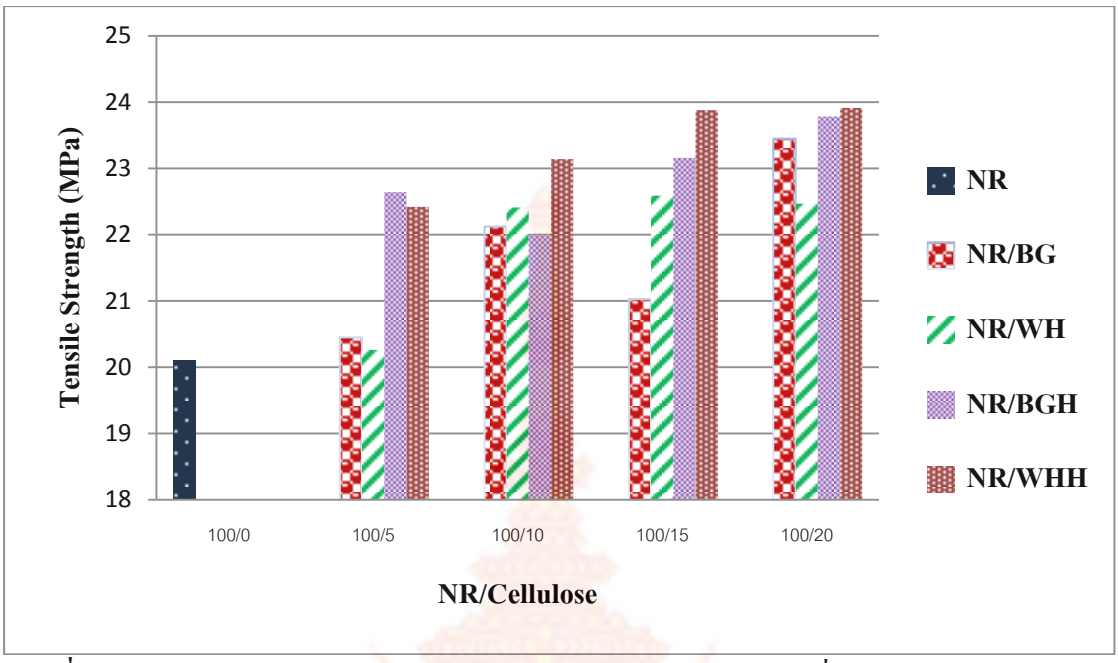

**ภาพที่ 18** ความแข็งของยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจาก ชานอ้อยและผักตบชวา ที่ผ่านการย่อยและไม่ผ่านการย่อย

จากภาพที่ 18 แสดงค่าความแข็ง ของยางวัลคาไนซ์ที่มีการเติมเส้นใยที่ไม่ผ่านการย่อยและเส้นใยที่ผ่านการย่อย พบว่าเมื่อเติมชานอ้อย และผักตบชวาที่ผ่านการย่อยในยางธรรมชาติจะมีค่าความแข็งมากกว่ายางธรรมชาติที่มีการเติม ชานอ้อยและผักตบชวาที่ไม่ผ่านการย่อยเนื่องจากเส้นใยที่ผ่านการย่อยแล้วมีความแข็งเพิ่มขึ้น จึงทำให้เมื่อเติมลงไปในยางธรรมชาติทำให้ยางมีความแข็งเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบที่ปริมาณเส้นใยที่แตกต่างกัน พบว่า ยางธรรมชาติจะมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้น



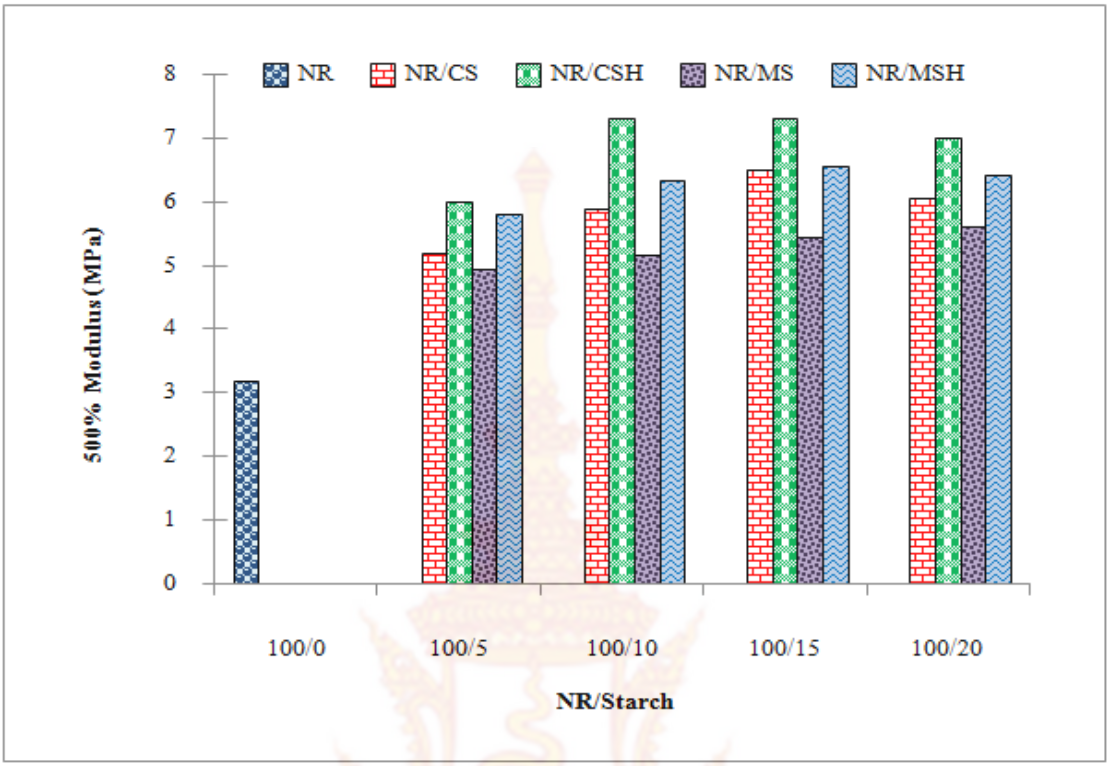

**ภาพที่ 19** ความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile Strength) ของยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจาก CS, MS, CSH และ MSH

จากภาพที่ 19 แสดงค่าความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile Strength) ยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากแป้ง CS, MS, CSH และ MSH พบว่ายางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากแป้งที่ผ่านการย่อยซึ่งได้แก่แป้ง CSH และ MSH มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงกว่ายางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากแป้งที่ไม่ได้ผ่านการย่อยซึ่งได้แก่ CS และ MS สามารถอธิบายได้ว่าขนาดอนุภาคที่เล็กลงของแป้งส่งผลให้เกิดการกระจายตัวในยางวัลคาไนซ์ได้ดีขึ้นจึงส่งผลให้ยางมีความต้านทานต่อแรงดึงสูงขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณของแป้ง พบว่ายางวัลคาไนซ์จะมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงขึ้น แต่เมื่อถึงจุดๆ หนึ่งการเพิ่มปริมาณของแป้งจะส่งผลให้ความต้านทานต่อแรงดึงของยางวัลคาไนซ์มีค่าลดลงเนื่องมาจากแป้งเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนเกิดการกระจายตัวที่ไม่ดีส่งผลให้ยางมีความต้านทานต่อแรงดึงลดลง



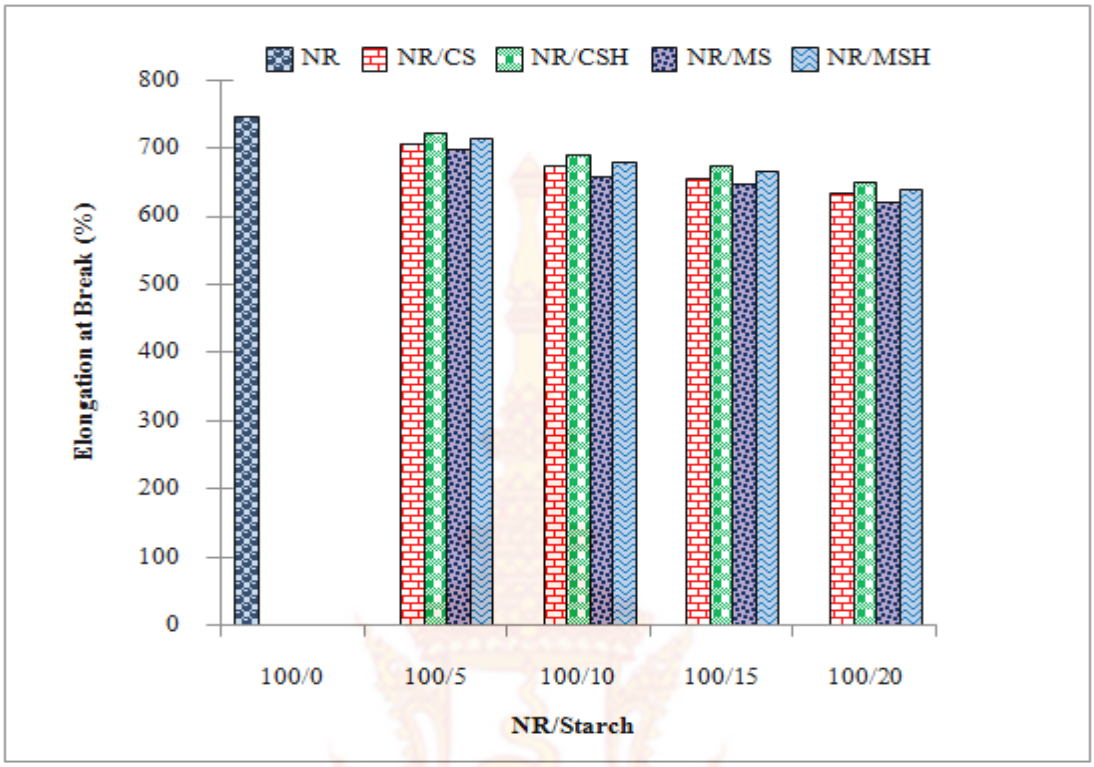

**ภาพที่ 20** ความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile Strength) ของยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจาก ชานอ้อย และผักตบชวา ที่ผ่านการย่อยและไม่ผ่านการย่อย

จากภาพที่ 20 แสดงค่าความต้านต่อแรงดึง (Tensile Strength) ของยางวัลคาไนซ์ที่มีการเติมเส้นใยที่ไม่ผ่านการย่อยและเส้นใยที่ผ่านการย่อยพบว่ายางธรรมชาติที่มีการเติมเส้นใย ชานอ้อย และผักตบชวาที่ผ่านการย่อยมีค่าความความต้านทานต่อแรงดึงมากกว่ายางธรรมชาติที่มีการเติมชานอ้อย และผักตบชวาที่ไม่ผ่านการย่อยเนื่องจากเส้นใยที่ผ่านการย่อยแล้วมีขนาดเล็กลงจึงสามารถกระจายตัวได้ดีขึ้น จึงสามารถเสริมแรงให้ยางมีความแข็งแรงมากขึ้น มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงจึงมากขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยมากขึ้นจะยิ่งส่งผล ให้ยางมีความแข็งแรงมากขึ้น มีความต้านทานต่อแรงดึงสูงขึ้น



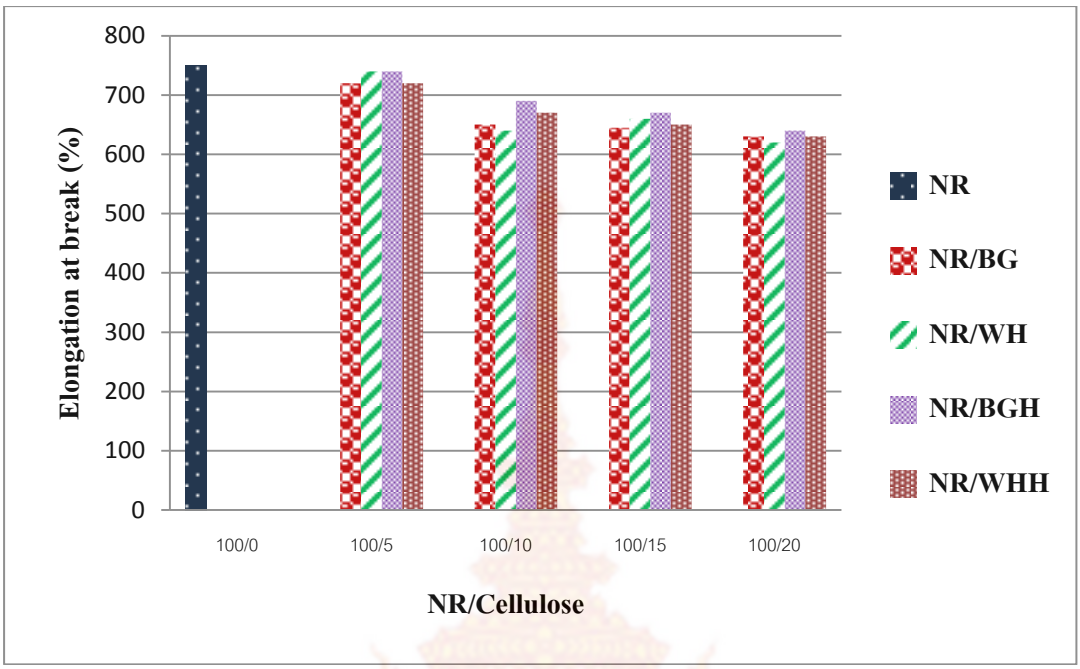

**ภาพที่ 21** 500% Modulus ของยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจาก CS, MS, CSH และ MSH

จากภาพที่ 21 แสดงค่า 500% มอดูลัส ยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากแป้งทั้งสี่ชนิด พบว่ายางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากแป้งที่ผ่านการย่อยให้ค่า 500% มอดูลัสสูงกว่ายางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากแป้งที่ไม่ผ่านการย่อย เนื่องจากขนาดอนุภาคของแป้งที่มีขนาดเล็กกว่าจึงสามารถกระจายตัวในยางได้ดีกว่า และเมื่อเพิ่มปริมาณมากขึ้นส่งผลให้ 500% มอดูลัสของยางวัลคาไนซ์มีค่าสูงขึ้น เนื่องจากสารตัวเติมที่เติมลงไปมีความแข็งเมื่อเพิ่มปริมาณจึงส่งผลให้ยางมีความแข็งแรงมากขึ้นซึ่งให้ผลสอดคล้องกับค่าความต้านทานต่อแรงดึง และค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด



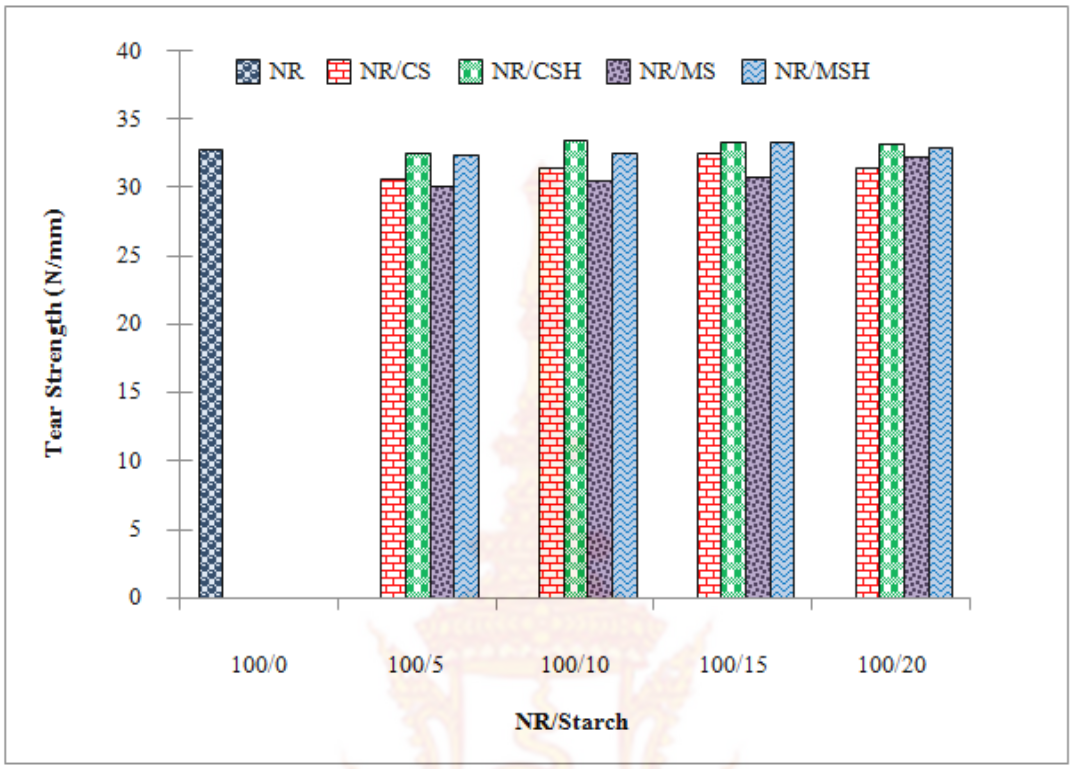

**ภาพที่ 22** ความสามารถในการยืดจนขาด (Elongation at Break) ของยางที่วัลคาไนซ์ที่เตรียมจาก CS, MS, CSH และ MSH

จากภาพที่ 22 แสดงค่าความสามารถในการยืดจนขาด (Elongation at break) ของยางวัลคาไนซ์ที่มีการเติมแป้งทั้งสี่ชนิด พบว่าค่าความสามารถในการยืดจนขาดของยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากแป้งที่ผ่านการย่อยแล้วมีค่าสูงกว่ายางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากแป้งที่ไม่ได้ผ่านการย่อย เนื่องจากสารตัวเติมที่เป็นของแข็งเมื่อเติมลงไปมีโอกาสทำให้เกิดจุดบกพร่องของชิ้นงานแป้งที่ไม่ได้ผ่านการย่อยซึ่งมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าจึงส่งผลให้เกิดจุดบกพร่องในชิ้นงานได้ง่ายกว่าส่งผลให้ยางยืดได้น้อยลงขาดง่ายขึ้นเมื่อเปรียบเทียบในปริมาณที่เพิ่มขึ้น พบว่าความสามารถในการยืดจนขาดมีค่าลดลงตามปริมาณที่เพิ่มขึ้นของสารตัวเติม เนื่องจากการเพิ่มปริมาณสารตัวเติมที่เป็นของแข็งเป็นการเพิ่มโอกาสที่จะทำให้เกิดจุดบกพร่องของชิ้นงานจึงทำให้ชิ้นงานเกิดการขาดง่ายขึ้นและยืดได้น้อยลง



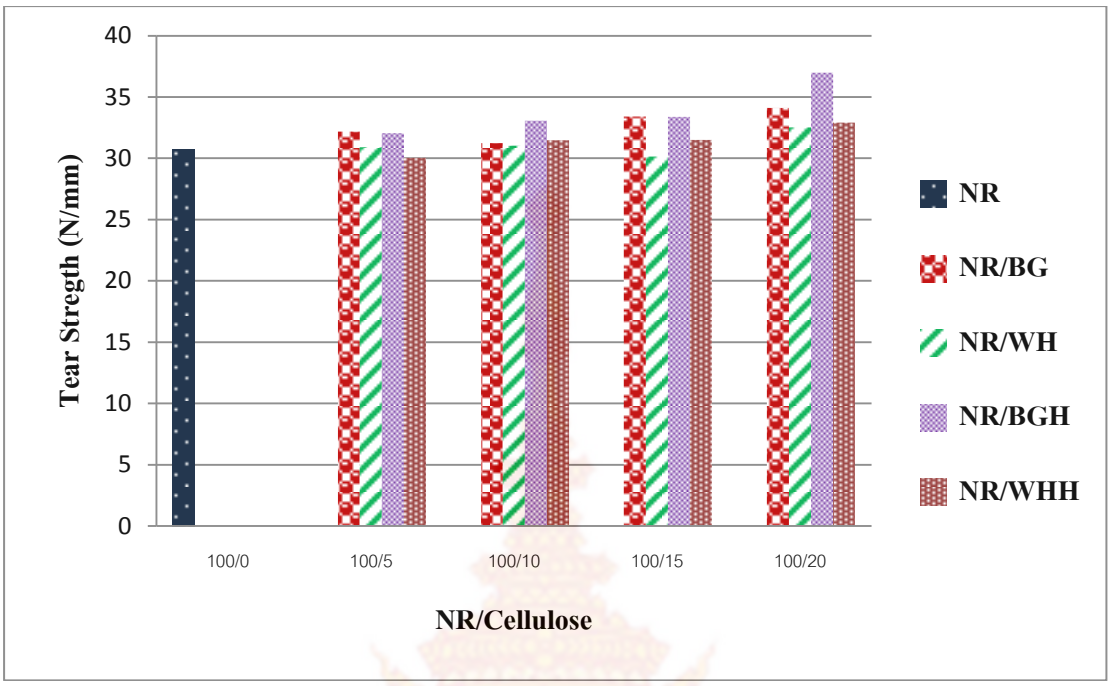

**ภาพที่ 23** ความสามารถในการยืดจนขาด (Elongation at Break)ของยางที่วัลคาไนซ์ที่เตรียมจากชานอ้อย และผักตบชวา ที่ผ่านการย่อยและไม่ผ่านการย่อย

จากภาพที่ 23 แสดงค่าความสามารถในการยืดจนขาด (Elongation at break) ของยางวัลคาไนซ์ที่มีการเติมเส้นใยที่ไม่ผ่านการย่อยและเส้นใยที่ผ่านการย่อย พบว่าค่าความสามารถในการยืดจนขาดของยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากเส้นใยที่ผ่านการย่อยแล้วมีค่าสูงกว่ายางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากเส้นใยที่ไม่ได้ผ่านการย่อย เนื่องจากสารตัวเติมเป็นเส้นใยที่มีความแข็งและมีขั้วเข้ากับยางธรรมชาติได้ยากจึงมักจะมีรอยแตกแยกเกิดขึ้นระหว่างเส้นใยกับยางธรรมชาติ เมื่อเติมลงไปมีโอกาสทำให้เกิดจุดบกพร่องของชิ้นงานโดยเส้นใยที่ยังไม่ได้ผ่านการย่อยจะมีขนาดใหญ่กว่าจึงส่งผลให้เกิดจุดบกพร่องในชิ้นงานมากกว่าเส้นใยที่ผ่านการย่อย และยังมีขนาดเล็กกว่าจุดบกพร่องที่เกิดขึ้น ส่งผลให้ยางขาดง่ายขึ้นจึงมีความสามารถในการยืดจนขาดลดลงเมื่อเปรียบเทียบในปริมาณที่เพิ่มขึ้น พบว่าความสามารถในการยืดจนขาดมีค่าลดลงตามปริมาณที่เพิ่มขึ้นของเส้นใย เนื่องจากการเพิ่มปริมาณเส้นใยเป็นการเพิ่มโอกาสที่จะทำให้เกิดจุดบกพร่องของชิ้นงานจึงทำให้ชิ้นงานเกิดการขาดง่ายขึ้นและยืดได้น้อยลง



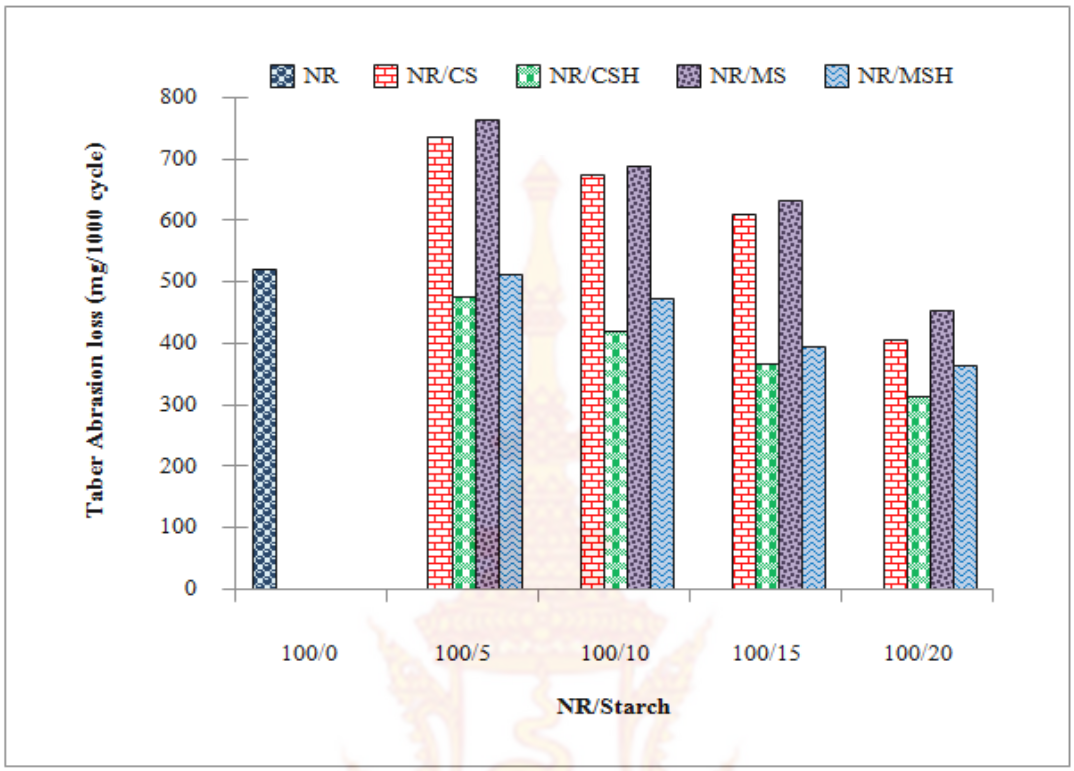

**ภาพที่ 24** ความต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear Strength) ของยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจาก CS, MS, CSH และ MSH

จากภาพที่ 24 แสดงค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear Strength) ของยางวัลคาไนซ์ที่มีการเติมแป้งทั้งสี่ชนิด พบว่ายางวัลคาไนซ์ที่ผ่านการเติมแป้งที่ย่อยแล้วให้ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดดีกว่ายางวัลคาไนซ์ที่ไม่ได้ผ่านการย่อยซึ่งเป็นผลมาจากขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าสามารถกระจายตัวในยางได้ดีกว่าสอดคล้องกับผลความต้านทานต่อแรงดึงที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น



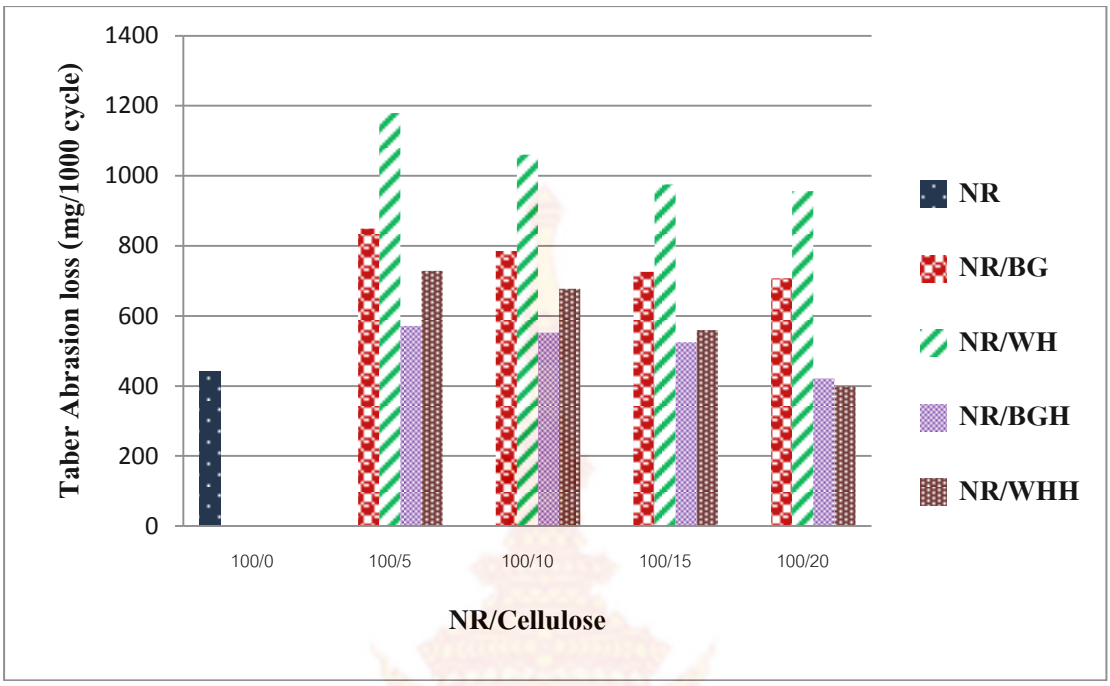

**ภาพที่ 25** ความต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear Strength)ของยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจาก ชานอ้อยและผักตบชวาที่ผ่านการย่อยและไม่ผ่านการย่อย

ภาพที่ 25 แสดงค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear Strength) ของยางวัลคาไนซ์ที่มีการเติมเส้นใยที่ไม่ผ่านการย่อยและผ่านการย่อย พบว่ายางธรรมชาติที่มีการเติมเส้นใยที่ผ่านการย่อยมีค่าความความต้านทานต่อการฉีกขาดมากกว่ายางธรรมชาติที่มีการเติม เส้นใยที่ไม่ผ่านการย่อย เนื่องจากเส้นใยที่ผ่านการย่อยแล้วมีขนาดเล็กลงจึงสามารถกระจายตัวได้ดีขึ้น จึงสามารถเสริมแรงให้ยางมีความแข็งแรงมากขึ้น มีค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดมากขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยมากขึ้นจะยิ่งส่งผล ให้ยางมีความแข็งแรงมากขึ้น มีความต้านทานต่อการฉีกขาดที่กล่าวไว้ข้างต้น




**ภาพที่ 26** ความต้านทานต่อสึกหรอ (Abrasion loss) แบบ Taber ของยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจาก CS, MS, CSH และ MSH

จากภาพที่ 26 แสดงค่าความต้านทานต่อการสึกหรอแบบ Taber ของยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากแป้งทั้งสี่ชนิด พบว่ายางวัลคาไนซ์ที่มีการเติมแป้งที่ผ่านการย่อยแล้วมีค่าความต้านทานต่อการสึกหรอดีกว่ายางวัลคาไนซ์ที่มีการเติมแป้งที่ไม่ได้ผ่านการย่อย เนื่องจากอนุภาคของแป้งที่ผ่านการย่อยมีความแข็งมากกว่าอนุภาคของแป้งที่ยังไม่ผ่านการย่อยเมื่อเติมลงไปในยางธรรมชาติ จึงทำให้ยางธรรมชาติทนการสึกหรอได้มากกว่า และเมื่อเพิ่มปริมาณมากขึ้นความแข็งของสารตัวเติมที่เติมลงไปในยางจะส่งผลให้ยางธรรมชาติทนต่อการสึกหรอมากขึ้น




**ภาพที่ 27** ความต้านทานต่อสึกหรอ (Abrasion loss) แบบ Taber ของยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากชานอ้อย และผักตบชวาที่ผ่านการย่อยและไม่ผ่านการย่อย

จากภาพที่ 27 แสดงค่าความต้านทานต่อการสึกหรอแบบ Taber ของยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากเส้นใยที่ผ่านการย่อยและเส้นใยที่ไม่ผ่านการย่อยพบว่ายางวัลคาไนซ์ที่มีการเติมเส้นใยที่ไม่ผ่านการย่อยแล้วมีค่าความต้านทานต่อการสึกหรอดีกว่ายางวัลคาไนซ์ที่มีการเติมเส้นใยที่ผ่านการย่อย เนื่องจากอนุภาคของเส้นใยที่ผ่านการย่อยมีความแข็งมากกว่าอนุภาคของเส้นใยที่ไม่ผ่านการย่อยเมื่อเติมลงไปในยางธรรมชาติจึงทำให้ยางธรรมชาติทนการสึกหรอได้มากกว่า และเมื่อเพิ่มปริมาณมากขึ้นความแข็งของสารตัวเติมที่เติมลงไปในยางจะส่งผลให้ยางธรรมชาติทนต่อการสึกหรอมากขึ้น

# บทที่ 5

# สรุปผลการทดลอง

## 1. ผลของการเตรียมวัสดุประกอบระหว่างแป้งกับยางธรรมชาติ

การย่อยแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวโพดด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 3mol/L ปริมาตร 2,000 มิลลิลิตร ทำการกวนอย่างต่อเนื่อง 400 รอบต่อนาที โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 ชั่วโมง พบว่าแป้งทั้งสองชนิดมีขนาดอนุภาคเล็กลง ผิวเม็ดแป้งเกิดการผุกร่อนและมีลักษณะขรุขระทั่วทั้งผิวเม็ด เมื่อระดับการย่อยเพิ่มขึ้นเม็ดแป้งจะถูกย่อยทำให้มีขนาดเล็กลง เนื่องจากกรดสามารถแทรกตัวผ่านรูพรุนบนผิวเม็ดแป้งจึงเกิดการผุกร่อนของเม็ดแป้ง การละลายน้ำของเม็ดแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยด้วยกรด แป้งข้าวโพดที่ผ่านการย่อยด้วยกรด และแป้งที่ไม่ผ่านการย่อยด้วยกรด ที่อุณหภูมิทดสอบ ได้แก่ อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิ 65, 75, 85 และ 95 องศาเซลเซียส การละลายของแป้งที่ผ่านการย่อยด้วยกรดจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเห็นได้ชัดกว่าแป้งที่ไม่ผ่านการย่อยด้วยกรด เพราะเม็ดแป้งที่ผ่านการย่อยด้วยกรดจะมีโครงสร้างเป็นอะมิโลเด็กซ์ทรินสายสั้นๆ ซึ่งละลายน้ำได้ดีเมื่อให้ความร้อน ผลการวัดขนาดอนุภาคของแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยด้วยกรด แป้งข้าวโพดที่ผ่านการย่อยด้วยกรด และแป้งที่ไม่ผ่านการย่อยด้วยกรด ด้วยเครื่อง Zeta potential analyzer พบว่าแป้งที่ผ่านการย่อยด้วยกรดทั้งสองชนิดมีขนาดอนุภาคเล็กลงอย่างเห็นได้ชัด ในส่วนของการกระจายตัวของแป้งในยางธรรมชาติ พบว่าการกระจายตัวของแป้งที่ผ่านด้วยกรดทั้งสองชนิดสามารถกระจายตัวในยางธรรมชาติได้ดีกว่าแป้งที่ไม่ผ่านการย่อยด้วยกรด ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่เติมแป้งที่ผ่านการย่อยด้วยกรดมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า เนื่องจากอนุภาคของแป้งที่ผ่านการย่อยด้วยกรดมีขนาดอนุภาคที่เล็กจึงสามารถเข้ากับยางธรรมชาติได้ดี สมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากแป้งที่ผ่านการย่อยด้วยกรดทั้งสองชนิดให้ค่า ความแข็ง ความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด ความต้านทานต่อการฉีกขาด ความต้านทานต่อการสึกหรอ และค่า 500% มอดูลัส ที่คล้ายคลึงกัน โดยสมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยด้วยกรดให้สมบัติเชิงกลสูงสุดที่ปริมาณ 10 phr และแป้งข้าวโพดที่ผ่านการย่อยด้วยกรดให้สมบัติเชิงกลสูงสุดที่ปริมาณ 15 phr แต่ยางวัลคาไนซ์ที่มีการเติมแป้งที่ไม่ผ่านการย่อยด้วยกรดให้ค่าสมบัติเชิงกลที่ต่ำกว่าแป้งที่ผ่านการย่อยด้วยกรด

## 2. ผลของการเตรียมวัสดุประกอบระหว่างเซลลูโลสกับยางธรรมชาติ

ผลจากการย่อยชานอ้อยและผักตบชวาด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 6mol/l ปริมาตร 4,500 มิลลิลิตร ทำการกวนอย่างต่อเนื่อง 400 รอบต่อนาที โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 ชั่วโมงแล้วนำไปวัดขนาดของชานอ้อยและ ผักตบชวาที่ผ่านการด้วยกรด และไม่ผ่านการย่อยด้วยกรด ด้วยเครื่อง Zeta potential analyzer พบว่าเส้นใยทั้งสองชนิดมีขนาดอนุภาคเล็กลงจาก 10,669.0 nm เป็น 4,347.0 nm และ 20,965.9 nm เป็น 3,766.4 nm ตามลำดับ ซึ่งเกิดจากผิวเส้นใยเกิดการผุกร่อนและมีลักษณะย่อยชิ้นเล็กๆเมื่อระดับการย่อยเพิ่มขึ้นเส้นใยจะถูกย่อยทำให้มีขนาดเล็กลงเนื่องจากกรดสามารถแทรกตัวผ่านเส้นใยจึงเกิดการผุกร่อนของเส้นใย และการกระจายตัวของเส้นใยที่ผ่านการย่อยด้วยกรดทั้งสองชนิดสามารถกระจายตัวในยางธรรมชาติได้ดีกว่าเส้นใยที่ไม่ผ่านการย่อยด้วยกรด เนื่องจากอนุภาคของเส้นใยที่ผ่านการย่อยด้วยกรดมีขนาดอนุภาคที่เล็กจึงสามารถเข้ากับยางธรรมชาติได้ดีส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากเส้นใยที่ผ่านการย่อยด้วยกรดทั้งสองชนิดให้ค่า ความแข็ง ความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด ความต้านทานต่อการฉีกขาด ความต้านทานต่อการสึกหรอ และค่า 300 % โมดูลัส ที่ดีขึ้น โดยสมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากชานอ้อยและผักตบชวาที่ผ่านการย่อยด้วยกรดให้สมบัติเชิงกลสูงสุดที่ปริมาณ 20 phr

# การเตรียมวัสดุประกอบนาโนระหว่างแป้งและเซลลูโลสกับยางธรรมชาติ

**Preparation of Starch and Cellulose/Natural Rubber Nanocomposites**

ชุติมา แกมกิจ[1]

Kaemkit, Chutima[1]

## บทคัดย่อ

การศึกษานี้เป็นศึกษาการเตรียมวัสดุประกอบระหว่างแป้งและเซลลูโลสกับยางธรรมชาติ โดยใช้แป้ง 2 ชนิดได้แก่ แป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวโพด เส้นใย 2 ชนิด ได้แก่ เส้นใยชานอ้อย และเส้นใยผักตบชวา เริ่มต้นในกระบวนการคือการย่อยแป้งหรือเส้นใยด้วยกรดซัลฟิวริก ขนาดของแป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพด เส้นใยชานอ้อย และเส้นใยผักตบชวา หลังจากย่อยด้วยกรดแล้วมีขนาดอยู่ที่ 1,123.6 nm 1,214.1 nm 4,347.0 nm และ 3,766.4 nm ตามลำดับ หลังจากนั้นเตรียมวัสดุประกอบระหว่างแป้งและเส้นใยเซลลูโลสกับยางธรรมชาติ แล้วนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่า สมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยด้วยกรดให้สมบัติเชิงกลสูงสุดที่ปริมาณ 10 phr และแป้งข้าวโพดที่ผ่านการย่อยด้วยกรดให้สมบัติเชิงกลสูงสุดที่ปริมาณ 15 phr และยางวัลคาไนซ์ที่มีการเติมแป้งที่ไม่ผ่านการย่อยด้วยกรดให้ค่าสมบัติเชิงกลที่ต่ำกว่าแป้งที่ผ่านการย่อยด้วยกรด ในส่วนของเส้นใยเซลลูโลส สมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากเส้นใยที่ผ่านการย่อยด้วยกรดทั้งสองชนิดให้สมบัติเชิงกลสูงสุดที่ปริมาณ 20 phr เมื่อระดับการย่อยเพิ่มขึ้นเส้นใยจะถูกย่อยทำให้มีขนาดเล็กลงเนื่องจากกรดสามารถแทรกตัวผ่านเส้นใยจึงเกิดการผุกร่อนของเส้นใย และการกระจายตัวของเส้นใยที่ผ่านการย่อยด้วยกรดทั้งสองชนิดสามารถกระจายตัวในยางธรรมชาติได้ดีกว่าเส้นใยที่ไม่ผ่านการย่อยด้วยกรด

**คำสำคัญ** แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพด เส้นใยชานอ้อย เส้นใยผักตบชวา ยางธรรมชาติ วัสดุประกอบ

---

[1]คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตนครศรีธรรมราช 109 หมู่ที่ 2 ตำบล ถ้ำใหญ่, อำเภอ ทุ่งสง จังหวัด นครศรีธรรมราช 80110

[1]Faculty of Science and Technology Rajamangala University of Technology Srivijaya Nakorn Sri Thammarat Saiyai campus 109 Thungson-Nakhon Si Thammarat Rd., Moo 2, T.Thamyai, Thungsong District Nakhon Si Thammarat 80110

## ABSTRACT

This research is the study of Preparation of Starch and Cellulose/Natural Rubber composites. Types of starch are include cassava starch and corn starch and two fiber with bagasse and hyacinth fiber. The Starch and Cellulose digested with sulfuric acid. Size of cassava starch, corn starch, bagasse fiber And hyacinth fiber after acid digestion were 1,123.6 nm, 1,214.1 nm, 4,347.0 nm, and 3,766.4 nm, respectively. After that, The composites prepared between starch and cellulose fiber with natural rubber. The highest mechanical properties of vulcanized rubber with cassava starch by acid digestion amount of 10 phr and the acid digested corn starch amount of 15 phr. The mechanical properties of vulcanized rubber with acid digested starch more than vulcanized rubber with non-acidic starch. In the cellulose fiber. The highest mechanical properties of the vulcanized rubber prepared from both hydrolysed fibers amount of 20 phr. When the digestibility level increased, the fiber reduced to a smaller size due to acid addition. Pass through the fiber, resulting corroded the fiber. And distribute the fibers that digested with both acids dispersed in natural rubber better than those that are not digested with acid.

Keyword: cassava starch, corn starch, bagasse fiber, hyacinth fiber, natural rubber, composites

# บทนำ

วัสดุประกอบนาโนเป็นวัสดุที่ประกอบด้วยวัสดุหลายวัฏภาคโดยมีวัฏภาคหนึ่งมีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร การเติมสารตัวเติมที่มีขนาดนาโนในปริมาณเล็กน้อยลงในเมทริก สามารถเสริมสร้างความแข็งแรงให้กับพอลิเมอร์ได้มากขึ้น เนื่องจากสารตัวเติมที่มีขนาดนาโนจะมีอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมาก ทำให้มีพื้นผิวที่สามารถเกิดอันตรกิริยากับเมทริกมากขึ้น ปัจจุบันมีการใช้ยางพาราเพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆมากมาย จึงได้มีการพัฒนาและคิดค้นวิธีการหรือเทคโนโลยีใหม่ๆในการพัฒนาผลิตภัณฑ์จากยางพาราอยู่เสมอ เพื่อเพิ่มความหลากหลายของการใช้งานหรือปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์ สารตัวเติมเป็นสารที่มีความสำคัญในการพัฒนาสมบัติของผลิตภัณฑ์จากยางรวมถึงยังช่วยลดต้นทุนและยังช่วยในกระบวนการผลิต แป้งมันสำปะหลังและเส้นใยเซลลูโลสซึ่งได้จาก ไม้ไผ่, มะพร้าว, ปาล์มน้ำมัน, ชานอ้อย, ซังข้าวโพด, เส้นใยฝ้าย และฟางข้าว เป็นต้น เป็นพอลิแซ็คคาไรด์ชนิดหนึ่งที่สามารถนำมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติได้ การกระจายของแป้งและเซลลูโลสส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติ เนื่องจากแป้งมันสำปะหลังและเซลลูโลสมีราคาถูก หาได้ง่าย ไม่มีสีไม่มีกลิ่น จึงเหมาะที่จะเติมลงไปในยางเพื่อช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางให้ดีขึ้น แต่เนื่องจากเม็ดแป้งปกติจะมีขนาดอยู่ในระดับไมโครเมตร เมื่อเติมลงไปในยางธรรมชาติอาจเกิดการเกาะกลุ่มกันทำให้เกิดการกระจายตัวที่ไม่ดี ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่มีการเติมแป้งลงไปลดลง ในงานวิจัยนี้จึงทำการเตรียมแป้งและเซลลูโลสในรูปของ Starch nanocrystals และ Cellulose nanocrystals โดย Starch nanocrystals และ Cellulose nanocrystals สามารถเตรียมได้จากการนำแป้งหรือเส้นใยเซลลูโลสมาทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสด้วยกรด วัตถุประสงค์ที่สำคัญในการเตรียม Starch nanocrystals และ Cellulose nanocrystals เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกระจายตัวของแป้งและเซลลูโลสในยางธรรมชาติ ซึ่งจะช่วยในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติให้ดีขึ้น

**วิธีดำเนินการวิจัย**

**1.วัสดุ**

ยาง STR 5L สารเคมีสำหรับยาง แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพด เส้นใยผักตบชวา และเส้นใยชานอ้อย

**2. การเตรียมแป้งด้วยวิธีการย่อยด้วยกรด**

นำแป้งมันสำปะหลัง (Cassava Starch, CS) มาชั่งน้ำหนัก 300 กรัม หลังจากนั้นเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 3mol/L ปริมาตร 2,000 มิลลิลิตร ทำการกวนอย่างต่อเนื่อง 400 รอบต่อนาที โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 ชั่วโมง หลังจากปั่นกวนครบตามเวลาที่กำหนดนำตะกอนที่ได้เติมน้ำกลั่นและรอให้แยกชั้น หลังจากนั้นดูดน้ำออก และเติมน้ำกลั่นอีกหลายๆครั้งทำซ้ำๆ จนน้ำล้างมีค่าเป็นกลาง นำไปอบให้แห้ง นำตะกอนที่ได้ไปตรวจดูสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM ทำการทดลองตามขั้นตอนข้างต้นโดยทำการปรับเปลี่ยนแป้งจากแป้งมันสำปะหลังเป็นแป้งข้าวโพด (Maize Starch, MS) นำตะกอนไปทดสอบการละลายน้ำที่

อุณหภูมิห้อง และที่อุณหภูมิ 65, 75, 85 และ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที แล้วสังเกตผลการทดลอง หลังจากนั้นทิ้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

**3. การเตรียมเส้นใยด้วยการย่อยด้วยกรด**

นำชานอ้อย (Bagasse, BG) มาชั่งน้ำหนัก 300 กรัม หลังจากนั้นเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 6 mol/l ปริมาตร 4,500 มิลลิลิตร ทำการกวนอย่างต่อเนื่อง 400 รอบต่อนาที โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 ชั่วโมง หลังจากปั่นกวนครบตามเวลาที่กำหนดนำตะกอนที่ได้เติมน้ำกลั่นและรอให้แยกชั้น หลังจากนั้นดูดน้ำออก และเติมน้ำกลั่นอีกหลายๆครั้งทำซ้ำๆ จนน้ำล้างมีค่า pH เป็นกลาง นำไปอบให้แห้ง นำตะกอนไปตรวจดูขนาดอนุภาค ด้วย Zeta potential analyzer ทำการทดลองตามขั้นตอนข้างต้นโดยทำการปรับเปลี่ยนจากชานอ้อยเป็นผักตบชวา (Water Hyacinth, WH)

**4. การเตรียมวัสดุประกอบระหว่างแป้งกับยางธรรมชาติ**

นำตะกอนของแป้งที่เตรียมได้ไปละลายน้ำด้วยอัตราส่วน 5% โดยน้ำหนัก นำสารละลายแป้งเติมลงไปในน้ำยางธรรมชาติผสมให้เข้ากันโดยการปั่นกวนเป็นเวลา 30 นาที นำส่วนผสมที่ได้ไปรีดเป็นแผ่นโดยอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วัน นำวัสดุประกอบที่ได้ไปผสมกับสารเคมีในเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง และนำมาวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส โดยปรับเปลี่ยนปริมาณของแป้ง ในช่วง 0, 5, 10, 15 และ 20 phr นำวัสดุประกอบที่ได้ไปตรวจดูลักษณะการกระจายตัวแป้งในยางธรรมชาติ ด้วยเทคนิค SEM ทดสอบสมบัติเชิงกล ทดสอบความแข็ง ทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง

**ตารางที่ 1** อัตราส่วนของยางและแป้งที่ใช้ในการเตรียมวัสดุประกอบ

| Compounds | NR<br>Phr | NR/CS<br>Phr | NR/MS<br>phr | NR/CSH<br>phr | NR/MSH<br>phr |
|---|---|---|---|---|---|
| NR | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Starch | 0 | 5,10,15,20 | 5,10,15,20 | 5,10,15,20 | 5,10,15,20 |
| Stearic acid | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| ZnO | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| CBS | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| MBTS | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| TMQ | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Sulphur | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |

หมายเหตุ CS ย่อมาจาก Cassava Starch

MS ย่อมาจาก Maize Starch

CSH ย่อมาจาก Cassava Starch Hydrolysis

MSH ย่อมาจาก Maize Starch Hydrolysis

**5. การเตรียมวัสดุประกอบระหว่างเส้นใยกับยางธรรมชาติ**

นำเส้นใยที่เตรียมได้ไปกระจายตัวในน้ำแล้วผสมกับน้ำยางธรรมชาติให้เข้ากันโดยการปั่นกวนเป็นเวลา 30 นาที นำส่วนผสมที่ได้ไปรีดเป็นแผ่นโดยอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วัน นำวัสดุประกอบที่ได้ไปผสมกับสารเคมีในเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง และนำมาวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส โดยปรับเปลี่ยนปริมาณของเส้นใย เป็น0, 5, 10, 15 และ 20 phr นำวัสดุประกอบที่ได้ไปตรวจดูลักษณะการกระจายตัวของเส้นใยในยางธรรมชาติ ด้วยเทคนิค SEM นำมาทดสอบสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความแข็ง ความต้านทานต่อแรงดึง

**ตารางที่ 2** อัตราส่วนของยางและเส้นใยที่ใช้ในการเตรียมวัสดุประกอบ

| Compounds | NR<br>Phr | NR/BG<br>phr | NR/WH<br>phr | NR/BGH<br>phr | NR/WHH<br>phr |
|---|---|---|---|---|---|
| NR | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Cellulose | 0 | 5,10,15,20 | 5,10,15,20 | 5,10,15,20 | 5,10,15,20 |
| Stearic acid | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| ZnO | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| CBS | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| MBTS | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| TMQ | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Sulphur | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |

หมายเหตุ BG ย่อมาจาก Bagasse

WH ย่อมาจาก Water Hyacinth

BGH ย่อมาจาก Bagasse Hydrolysis

WHH ย่อมาจาก Water Hyacinth Hydrolysis

**ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย**

## 1. ผลการวัดขนาดอนุภาค

แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพด แป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยด้วยกรด และแป้งข้าวโพดที่ผ่านการย่อยด้วยกรด ด้วยเครื่อง Zeta potential analyzer พบว่าโมเลกุลของแป้งมันสำปะหลัง และแป้งข้าวโพดที่ผ่านการย่อยด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 3 mol/L เป็นเวลา 90 ชม. มีขนาดเล็กกว่า โดยกรดจะตัดโมเลกุลของแป้งให้มีขนาดเล็กลง ชานอ้อย ผักตบชวา ชานอ้อยที่ผ่านการย่อยด้วยกรด และผักตบชวาที่ผ่านการย่อยด้วยกรดด้วยเครื่อง Zeta potential analyzer พบว่าขนาดของ ชานอ้อย และ ผักตบชวาที่ผ่านการย่อยด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 6 mol/l เป็น

เวลา 120 ชั่วโมง มีขนาดเล็กกว่า ชานอ้อย และผักตบชวาที่ไม่ได้ผ่านการย่อย โดยกรดจะตัดโมเลกุลของเส้นใยให้มีขนาดเล็กลงซึ่งผลของขนาดอนุภาคแสดงดังตารางที่ 3

**ตารางที่ 3** ผลการวัดขนาดอนุภาคของเครื่อง Zeta potential analyzer

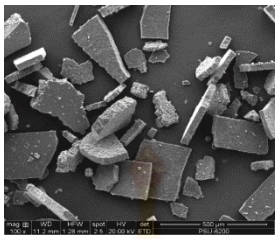
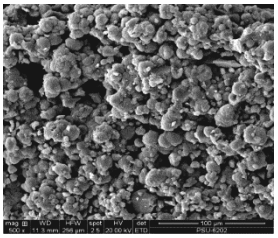
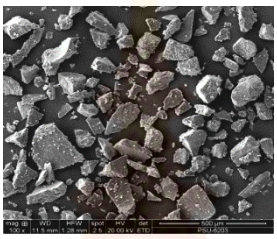
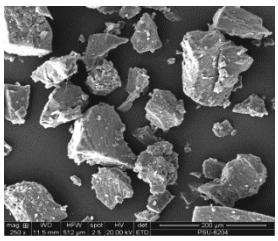
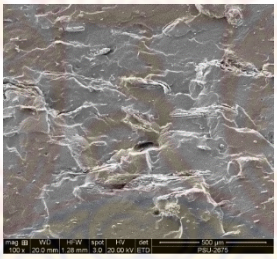
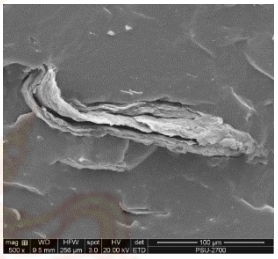
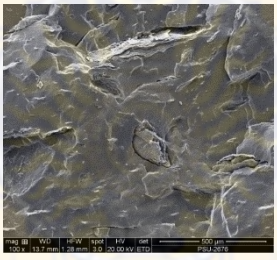
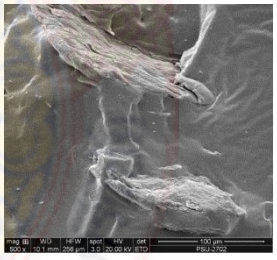
| ชนิดของแป้ง | ขนาดอนุภาค (nm.) |
|---|---|
| แป้งมันสำปะหลัง | 2,133.8 |
| แป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยด้วยกรด | 1,123.6 |
| แป้งข้าวโพด | 3,522.4 |
| แป้งข้าวโพดที่ผ่านการย่อยด้วยกรด | 1,214.1 |
| ชานอ้อย | 10,669.0 |
| ชานอ้อยที่ผ่านการย่อย | 4,347.0 |
| ผักตบชวา | 20,965.9 |
| ผักตบชวาที่ผ่านการย่อย | 3,766.4 |

## 2. สัณฐานวิทยาของแป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพด ผักตบชวาและชานอ้อย ที่ผ่านการย่อยด้วยกรดซัลฟิวริก

ศึกษาสมบัติด้านสัณฐานวิทยาของแป้งมันสำปะหลัง และแป้งข้าวโพด ที่ผ่านการย่อยด้วยกรดซัลฟิวริก พบว่าลักษณะผิวของเม็ดแป้งที่ถูกย่อยด้วยกรดจะมีลักษณะผุกร่อนทั่วทั้งผิวเม็ดแป้ง

**ตารางที่ 4** สัณฐานวิทยาของแป้งมันสำปะหลัง และแป้งข้าวโพด ที่ผ่านการย่อยด้วยกรดซัลฟิวริก ด้วยเทคนิค SEM

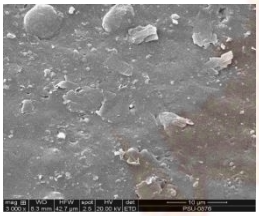
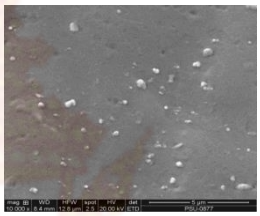
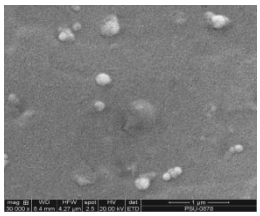
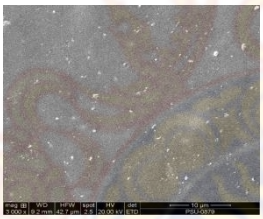
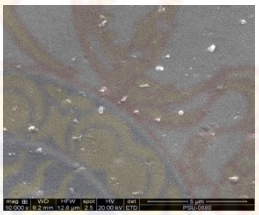
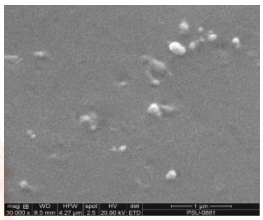
| ชนิดแป้ง | กำลังขยาย 100 เท่า | กำลังขยาย 500 เท่า |
|---|---|---|

| | | |
|---|---|---|
| แป้งมันสำปะหลัง |  |  |
| แป้งข้าวโพด |  |  |
| ชานอ้อย |  |  |
| ผักตบชวา |  |  |

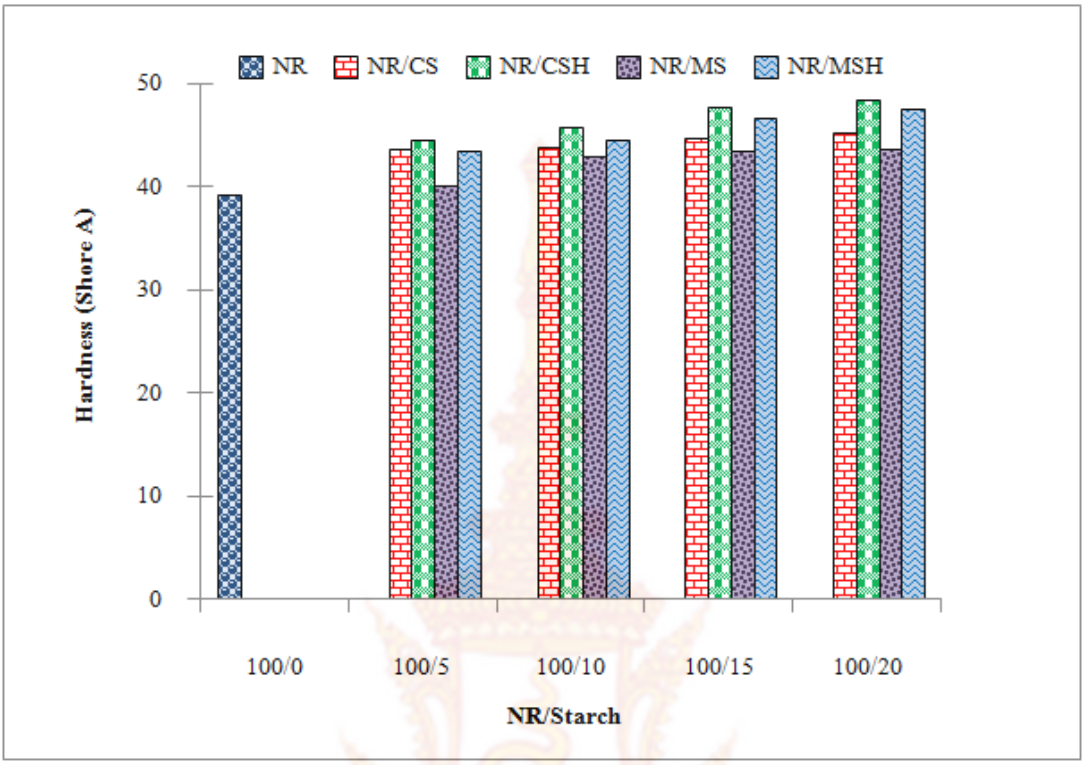
**3. ผลการกระจายตัวของแป้งในยางธรรมชาติที่เตรียมจาก Cassava Starch Hydrolysis (CSH) และ Maize Starch Hydrolysis (MSH) ต่อสมบัติด้านสัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติ**

ศึกษาสมบัติด้านสัณฐานวิทยาของยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมได้จาก Cassava Starch Hydrolysis (CSH) และ Maize Starch Hydrolysis (MSH) โดยใช้น้ำยางธรรมชาติ 30% DRC ที่ปริมาณ CSH และ MSH 0, 5, 10, 15 และ 20 phr มาขึ้นรูปเป็นแผ่นยางโดยใช้เครื่องอัดเบ้าที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส นำแผ่นยางที่ได้ไปแช่ด้วยไนโตรเจนเหลว แล้วทำการเปิดผิวใหม่เพื่อศึกษาสมบัติด้านสัณฐานวิทยาของยางโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ซึ่งผลจากการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาพบว่าแป้ง CSH และ MSH มีการกระจายตัวที่ดีและมีการเกาะกลุ่มเป็นก้อนบ้างบางส่วน แสดงดังตารางที่ 5

**ตารางที่ 5** สัณฐานวิทยาของยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมได้จาก Cassava Starch Hydrolysis (CSH) และ Maize Starch Hydrolysis (MSH)

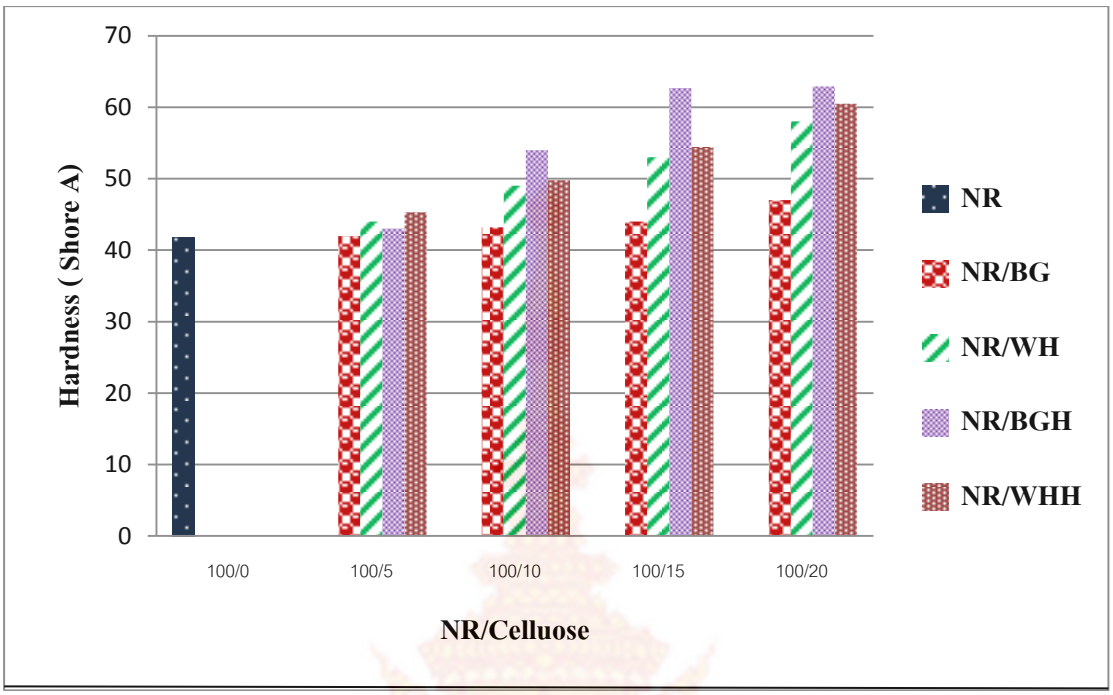
| ชนิดแป้ง | กำลังขยาย 3000 เท่า | กำลังขยาย 10000 เท่า | กำลังขยาย 30000 เท่า |
|---|---|---|---|
| แป้งมันสำปะหลัง |  |  |  |
| แป้งข้าวโพด |  |  |  |

## 4. ผลสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่มีการเติมแป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพด ชานอ้อย และผักตบชวาที่ผ่านการย่อยด้วยกรด และแป้งที่ไม่ได้ผ่านการย่อยด้วยกรด



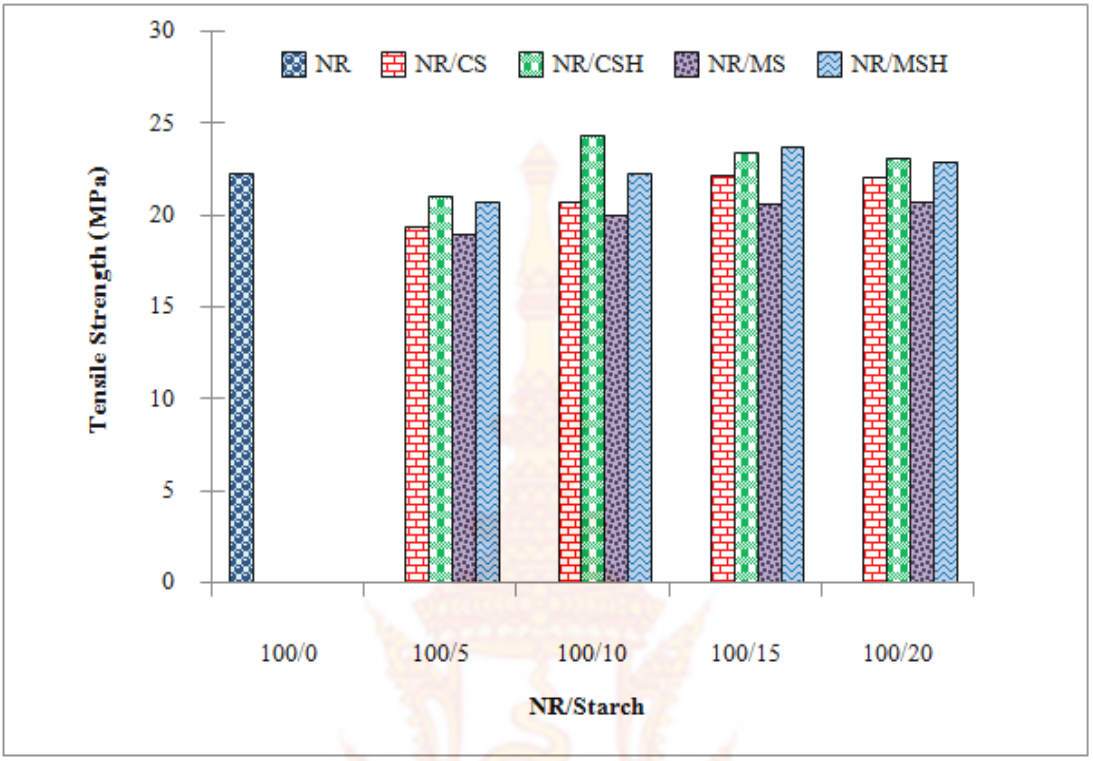

**ภาพที่ 1** ความแข็ง (Hardness) ของยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจาก CS, MS, CSH และ MSH

จากภาพที่ 1 แสดงค่าความแข็ง (Hardness) ของยางธรรมชาติที่มีการเติมแป้งทั้งสี่ชนิดที่ปริมาณแตกต่างกัน พบว่าค่าความแข็งที่ได้จากแป้งทั้งสี่ชนิดมีค่าความแข็งที่ไม่สูงมากนักเมื่อเทียบกับค่าความแข็งของยางธรรมชาติ เนื่องจากอนุภาคของแป้งทั้งสี่ชนิดมีอนุภาคใหญ่จึงส่งผลให้ค่าความแข็งที่ได้ต่ำ อนุภาคของแป้งทั้งสี่ชนิดมีอนุภาคใกล้เคียงกับแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งมีขนาดอนุภาคประมาณ 500-50,000 นาโนเมตร นอกจากนั้นแป้งเป็นสารตัวเติมที่มีขั้วเช่นเดียวกับแคลเซียมคาร์บอเนตจึงกระจายในยางที่ไม่มีขั้วเป็นไปได้ยากมีพื้นที่ผิวในการยึดเกาะกับโมเลกุลของยางน้อย จึงไม่สามารถเสริมประสิทธิภาพให้กับยางได้ดีนัก



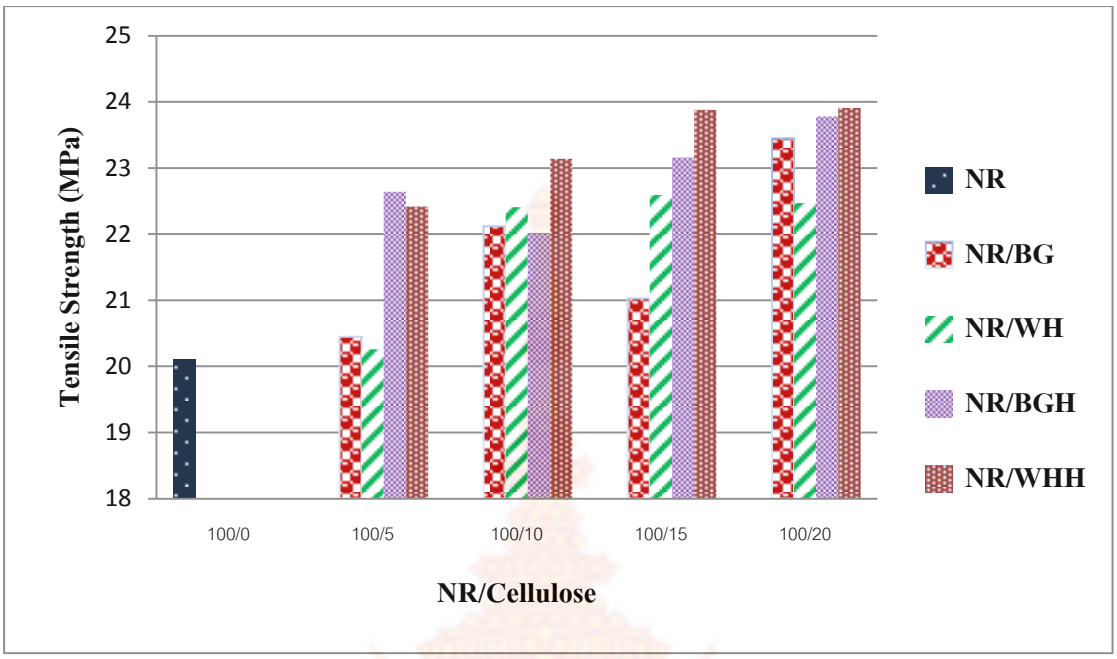

**ภาพที่ 2** ความแข็งของยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจาก ชานอ้อยและผักตบชวา ที่ผ่านการย่อยและไม่ผ่านการย่อย

จากภาพที่ 2 แสดงค่าความแข็ง ของยางวัลคาไนซ์ที่มีการเติมเส้นใยที่ไม่ผ่านการย่อยและเส้นใยที่ผ่านการย่อย พบว่าเมื่อเติมชานอ้อย และผักตบชวาที่ผ่านการย่อยในยางธรรมชาติจะมีค่าความแข็งมากกว่ายางธรรมชาติที่มีการเติม ชานอ้อยและผักตบชวาที่ไม่ผ่านการย่อยเนื่องจากเส้นใยที่ผ่านการย่อยแล้วมีความแข็งเพิ่มขึ้น จึงทำให้เมื่อเติมลงไปในยางธรรมชาติทำให้ยางมีความแข็งเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบที่ปริมาณเส้นใยที่แตกต่างกัน พบว่ายางธรรมชาติจะมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้น




**ภาพที่ 3** ความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile Strength) ของยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจาก CS, MS, CSH และ MSH

จากภาพที่ 3 แสดงค่าความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile Strength) ยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากแป้ง CS, MS, CSH และ MSH พบว่ายางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากแป้งที่ผ่านการย่อยซึ่งได้แก่แป้ง CSH และ MSH มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงกว่ายางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากแป้งที่ไม่ได้ผ่านการย่อยซึ่งได้แก่ CS และ MS สามารถอธิบายได้ว่าขนาดอนุภาคที่เล็กลงของแป้งส่งผลให้เกิดการกระจายตัวในยางวัลคาไนซ์ได้ดีขึ้นจึงส่งผลให้ยางมีความต้านทานต่อแรงดึงสูงขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณของแป้ง พบว่ายางวัลคาไนซ์จะมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงขึ้นแต่เมื่อถึงจุดๆ หนึ่งการเพิ่มปริมาณของแป้งจะส่งผลให้ความต้านทานต่อแรงดึงของยางวัลคาไนซ์มีค่าลดลง เนื่องมาจากแป้งเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนเกิดการกระจายตัวที่ไม่ดีส่งผลให้ยางมีความต้านทานต่อแรงดึงลดลง




**ภาพที่ 4** ความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile Strength) ของยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจาก ชานอ้อย และผักตบชวา ที่ผ่านการย่อยและไม่ผ่านการย่อย

จากภาพที่ 4 แสดงค่าความต้านต่อแรงดึง (Tensile Strength) ของยางวัลคาไนซ์ที่มีการเติมเส้นใยที่ไม่ผ่านการย่อยและเส้นใยที่ผ่านการย่อยพบว่ายางธรรมชาติที่มีการเติมเส้นใย ชานอ้อยและผักตบชวาที่ผ่านการย่อยมีค่าความความต้านทานต่อแรงดึงมากกว่ายางธรรมชาติที่มีการเติม ชานอ้อย และผักตบชวาที่ไม่ผ่านการย่อย เนื่องจากเส้นใยที่ผ่านการย่อยแล้วมีขนาดเล็กลงจึงสามารถกระจายตัวได้ดีขึ้น จึงสามารถเสริมแรงให้ยางมีความแข็งแรงมากขึ้น มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงจึงมากขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยมากขึ้นจะยิ่งส่งผล ให้ยางมีความแข็งแรงมากขึ้น มีความต้านทานต่อแรงดึงสูงขึ้น

**สรุปผลการวิจัย**

การย่อยแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวโพดด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 3mol/L ปริมาตร 2,000 มิลลิลิตร ทำการกวนอย่างต่อเนื่อง 400 รอบต่อนาที โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 ชั่วโมง พบว่าแป้งทั้งสองชนิดมีขนาดอนุภาคเล็กลง ผิวเม็ดแป้งเกิดการผุกร่อนและมีลักษณะขรุขระทั่วทั้งผิวเม็ด เมื่อระดับการย่อยเพิ่มขึ้นเม็ดแป้งจะถูกย่อยทำให้มีขนาดเล็กลงเนื่องจากกรดสามารถแทรกตัวผ่านรูพรุนบนผิวเม็ดแป้งจึงเกิดการผุกร่อนของเม็ดแป้ง ผลการวัดขนาดอนุภาคของแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยด้วยกรด แป้งข้าวโพดที่ผ่านการย่อยด้วยกรด และแป้งที่ไม่ผ่านการย่อยด้วยกรด ด้วยเครื่อง Zeta potential analyzer พบว่าแป้งที่ผ่านการย่อยด้วยกรดทั้งสองชนิดมีขนาดอนุภาคเล็กลงอย่างเห็นได้ชัด ในส่วนของการกระจายตัวของแป้งในยางธรรมชาติ พบว่าการกระจายตัวของแป้งที่ผ่านด้วยกรดทั้งสองชนิดสามารถกระจายตัวในยางธรรมชาติได้ดีกว่าแป้งที่ไม่ผ่านการย่อยด้วยกรด ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่เติมแป้งที่ผ่านการย่อยด้วยกรดมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า เนื่องจากอนุภาคของแป้งที่ผ่านการย่อยด้วยกรดมีขนาดอนุภาคที่เล็กจึงสามารถเข้ากับยางธรรมชาติ

ได้ดี โดยสมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยด้วยกรดให้สมบัติเชิงกลสูงสุดที่ปริมาณ 10 phr และแป้งข้าวโพดที่ผ่านการย่อยด้วยกรดให้สมบัติเชิงกลสูงสุดที่ปริมาณ 15 phr แต่ยางวัลคาไนซ์ที่มีการเติมแป้งที่ไม่ผ่านการย่อยด้วยกรดให้ค่าสมบัติเชิงกลที่ต่ำกว่าแป้งที่ผ่านการย่อยด้วยกรด

ผลจากการย่อยชานอ้อยและผักตบชวาด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 6mol/l ปริมาตร 4,500 มิลลิลิตร ทำการกวนอย่างต่อเนื่อง 400 รอบต่อนาที โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 ชั่วโมงแล้วนำไปวัดขนาดของชานอ้อยและ ผักตบชวาที่ผ่านการด้วยกรด และไม่ผ่านการย่อยด้วยกรด ด้วยเครื่อง Zeta potential analyzer พบว่าเส้นใยทั้งสองชนิดมีขนาดอนุภาคเล็กลงจาก 10,669.0 nm เป็น 4,347.0 nm และ 20,965.9 nm เป็น 3,766.4 nm ตามลำดับ ซึ่งเกิดจากผิวเส้นใยเกิดการผุกร่อนและมีลักษณะย่อยชิ้นเล็กๆเมื่อระดับการย่อยเพิ่มขึ้น เส้นใยจะถูกย่อยทำให้มีขนาดเล็กลงเนื่องจากกรดสามารถแทรกตัวผ่านเส้นใยจึงเกิดการผุกร่อนของเส้นใย และการกระจายตัวของเส้นใยที่ผ่านการย่อยด้วยกรดทั้งสองชนิดสามารถกระจายตัวในยางธรรมชาติได้ดีกว่าเส้นใยที่ไม่ผ่านการย่อยด้วยกรด เนื่องจากอนุภาคของเส้นใยที่ผ่านการย่อยด้วยกรดมีขนาดอนุภาคที่เล็กจึงสามารถเข้ากับยางธรรมชาติได้ดีส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากเส้นใยที่ผ่านการย่อยด้วยกรดทั้งสองชนิดดีขึ้น โดยสมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากชานอ้อยและผักตบชวาที่ผ่านการย่อยด้วยกรดให้สมบัติเชิงกลสูงสุดที่ปริมาณ 20 phr

**คำขอบคุณ**

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ประจำปีงบประมาณ 2557

**เอกสารอ้างอิง**

กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ. 2550. เทคโนโลยีของแป้ง. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นฤมล นะรรมโน. 2544. สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเอนไซม์เซลลูโลสของแบคทีเรียทนร้อน สาขาวิชาชีววิทยาคณะวิทยาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ปฐมา จาตกานนท์ รุ่งทิวา วันสุขศรี และ กล้าณรงค์ ศรีรอต. มปป. อิทธิพลของการแช่และการย่อยด้วยกรดต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งมันสำปะหลัง. สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตรมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

รัตนา ตันฑเทิดธรรม และ กล้าณรงค์ ศรีรอด. มปป. การศึกษาการเตรียมและสมบัติการต้านทานแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบ (composite) ของยางธรรมชาติ / เจลาติไนซ์สตาร์ช (Gelatinized starch) และแร่ดิน (mineralclay). สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตรมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

เจกิตาน์ แก้วพารา วันชัย เลิศวิจิตรจรัส และ อำนาจ สทธิธัตตระกูล. 2011. การเตรียมและสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกจากแป้งและยางธรรมชาติดัดแปร.สาขาวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร.

อิทธิพล แจ้งชัด.มปป.พอลิเมอร์คอมโพสิต. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

Bouthegourd, E., Rajisha, K.R., Kalarical, N., Saiter, J.M. and Thomas, S. 2011. Natural rubber latex / potato starch nanocrystal nanocomposites : Correlation morphology/electrical properties. Materials Letters. 65 : 3615-3617.

Bras, J., Hassan, M. L., Bruzesse, C., Hassan, E. A., EI-Wakil, N. A. and Dufresne, A. 2010.Mechanica, Barrier and biodegradability properties of bagasse cellulose whiskers reinforced natural rubber Nanocompsites. Industrial Crops Products. 32: 627-633.

Wang, Z.F., Peng, Z., Li, S.D., Lin, H., Zhang, K.X., She, X.D. and Fu, X. 2009.The impact of esterification on the properties of starch/natural rubber composite. Composites Science and Technology .69 : 1797–1803.