



## รายงานผลการวิจัย

เรื่อง สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และการย่อยสลายของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติ  
วัลคาไนซ์ที่ใช้แป้งชนิดต่างๆ เป็นสารตัวเติม

**Mechanical, Physical and Biodegradation Properties of vulcanized NR  
Latex Composite with Different Starch Fillers**

ได้รับการจัดสรรงบประมาณวิจัย ประจำปี 2557 (นักวิจัยรุ่นใหม่)  
จำนวนเงินวิจัย 50,000 บาท

หัวหน้าโครงการ นางพิไลวรรณ พรประสิทธิ์  
ผู้ร่วมโครงการ นางสาวชฎา นรากรศักดิ์  
นางสาววิไลวรรณ สงวนวงษ์

ชื่อของโครงการ	.....
ชื่อของนักวิจัย	.....
.....	.....
.....	.....

งานวิจัยเสร็จสิ้นสมบูรณ์

...7.../...01.../2559...

## สารบัญ

หน้า

สารบัญตาราง	4
สารบัญภาพ	5
บทคัดย่อ	7
Abstract	8
กิตติกรรมประกาศ	9
บทนำ	11
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	12
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	12
การตรวจเอกสาร	12
อุปกรณ์และวิธีการ	14
ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการวิจัย	31
สรุปผลการวิจัย	59
เอกสารอ้างอิง	60
ภาคผนวก	62

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 สูตรการเตรียมคิสเพอร์ชั้นน้ำแป้ง	12
ตารางที่ 2 สูตรการเตรียมคิสเพอร์ชั้นกำมะถัน 50%	12
ตารางที่ 3 สูตรการเตรียมคิสเพอร์ชั้นแซคเคอมีบีที 50%	13
ตารางที่ 4 สูตรการเตรียมคิสเพอร์ชั้นแซคคีอี่ซี 50%	13
ตารางที่ 5 สูตรการเตรียมคิสเพอร์ชั้นแคลเซียมคาร์บอเนต 50%	13
ตารางที่ 6 สูตรการเตรียมคิสเพอร์ชั้นซิงค์ออกไซด์ 50%	13
ตารางที่ 7 สูตรการเตรียมคิสเพอร์ชั้นซีพีแอล 50%	14
ตารางที่ 8 สูตรการเตรียมสารละลายโพแทสเซียมโอเลอท 20%	14
ตารางที่ 9 สูตรการเตรียมสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 10%	14
ตารางที่ 10 สูตรการทำแผ่นยางควบคุม	15
ตารางที่ 11 สูตรการทำแผ่นยางที่ใช้แป้งเป็นสารตัวเติม	16
ตารางที่ 12 ลักษณะการจับตัวของน้ำยางเมื่อทดสอบด้วยคลอโรฟอร์ม	18
ตารางที่ 13 สมบัติของน้ำยางชั้นชนิดแอมโมเนียสูง	25
ตารางที่ 14 สมบัติแรงดึงของแผ่นยางวัลคาไนซ์	30
ตารางที่ 15 ความต้านทานแรงดึงของแผ่นยางวัลคาไนซ์หลังฝังดินระยะเวลา 10, 20 และ 30 วัน	33
ตารางที่ 16 การวิเคราะห์หุ้ผึ้งกัชั้นในน้ำยางธรรมชาติ	40
ตารางที่ 17 การวิเคราะห์หุ้ผึ้งกัชั้นในน้ำยางวัลคาไนซ์	41
ตารางที่ 18 ปริมาณโปรตีนในแผ่นยางวัลคาไนซ์ที่ฝังดินในระยะเวลา 0, 10, 20 และ 30 วัน	51

## สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 บล็อกแผ่นกระเบื้องชนิดเรียบ	9
ภาพที่ 2 ลำดับการเตรียมน้ำยางคอมพาวนด์	17
ภาพที่ 3 ลำดับการเตรียมน้ำยางวัลคาไนซ์	19
ภาพที่ 4 ชั้นทดสอบรูปคัมเบด DIE C (มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี. ม.ป.ป)	21
ภาพที่ 5 ความหนืดของน้ำยางคอมพาวนด์	26
ภาพที่ 6 ลักษณะรูปร่างของเม็ดแป้งดิบ (A) แป้งข้าวเจ้า (B) แป้งมันสำปะหลัง (C) แป้งสาकु (D) แป้งสาकुคิสเพอร์ชัน เมื่อส่องภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า	27
ภาพที่ 7 การฝังตัวของอนุภาคเม็ดแป้งและการกระจายตัวในยางของ (A) แป้งข้าวเจ้า (B) แป้งมันสำปะหลัง (C) แป้งสาकु เมื่อส่องภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 500 เท่า	28
ภาพที่ 8 ผลของปริมาณแป้ง และชนิดของแป้งต่อสมบัติเชิงกล (A) ค่าความต้านทานแรงดึง (B) ค่าระยะยืด ณ จุดขาด และ (C) มอดุลัสที่ระยะยืด 300%	31
ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างสูตรยางที่เติมแป้งชนิดต่าง ๆ ที่ปริมาณ 5, 10 และ 15 PHR หลังฝังดินระยะเวลา 10, 20 และ 30 วัน กับค่าความต้านทานแรงดึง	34
ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างสูตรยางที่เติมแป้งชนิดต่าง ๆ ที่ปริมาณ 5, 10 และ 15 PHR หลังฝังดินระยะเวลา 10, 20 และ 30 วัน กับค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 300%	35
ภาพที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างสูตรยางที่เติมแป้งชนิดต่าง ๆ ที่ปริมาณ 5, 10 และ 15 PHR หลังฝังดินระยะเวลา 10, 20 และ 30 วัน กับระยะยืด ณ จุดขาด	36
ภาพที่ 12 FTIR สเปกตรัมของน้ำยางธรรมชาติ (KANG ET AL., 2000)	40
ภาพที่ 13 FTIR สเปกตรัมของน้ำยางวัลคาไนซ์ที่เติมสารตัวเติมแป้งชนิดต่างๆ	41
ภาพที่ 14 เปรียบเทียบการบวมพองของแผ่นยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติผสมแป้งชนิดต่าง ๆ ที่ปริมาณ 5 PHR	42
ภาพที่ 15 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การบวมพองของแผ่นยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติผสมแป้งชนิดต่าง ๆ ที่ปริมาณ 10 PHR	43
ภาพที่ 16 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การบวมพองของแผ่นยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติผสมแป้งชนิดต่าง ๆ ที่ปริมาณ 15 PHR	43

ภาพที่ 17 เปรียบเทียบความหนาแน่นการเชื่อมโยงของแผ่นยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจาก น้ำยางธรรมชาติผสมแป้งชนิดต่าง ๆ ที่ปริมาณ 5 PHR	44
ภาพที่ 18 เปรียบเทียบความหนาแน่นการเชื่อมโยงของแผ่นยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจาก น้ำยางธรรมชาติผสมแป้งชนิดต่าง ๆ ที่ปริมาณ 10 PHR	44
ภาพที่ 19 เปรียบเทียบความหนาแน่นการเชื่อมโยงของแผ่นยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติผสมแป้งชนิดต่าง ๆ ที่ปริมาณ 15 PHR	45
ภาพที่ 20 เปอร์เซ็นต์การบวมพองของแผ่นยางวัลคาไนซ์ผสมแป้งชนิดต่าง ๆ ที่ปริมาณ 15 PHR ที่ฝังคืนในระยะเวลาต่าง ๆ โดยแช่ในโทลูอีนเป็นเวลา 120 ชั่วโมง	46
ภาพที่ 21 ความหนาแน่นการเชื่อมโยงของแผ่นยางวัลคาไนซ์ผสมแป้งแป้งชนิดต่าง ๆ ที่ปริมาณ 15 PHR หลังฝังคืนที่ระยะเวลาต่าง ๆ โดยแช่ในโทลูอีนเป็นเวลา 120 ชั่วโมง	47
ภาพที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ (WATER ABSORPTION) ของยางแต่ละสูตร ที่ปริมาณ 15 PHR หลังจากทำการฝังคืนเป็นเวลา 10 วัน	48
ภาพที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ (WATER ABSORPTION) ของยางแต่ละสูตร ที่ปริมาณ 15 PHR หลังจากทำการฝังคืนเป็นเวลา 20 วัน	49
ภาพที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ ( WATER ABSORPTION) ของยางแต่ละสูตรที่ปริมาณ 15 PHR หลังจากทำการฝังคืนเป็นเวลา 30 วัน	49
ภาพที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการฝังคืนและปริมาณ โปริดีนที่เกิดขึ้น ก่อนและหลังทำการฝังคืนที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของแผ่นยางที่ใส่แป้งที่ปริมาณ 15 PHR	51

สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และการย่อยสลายของแผ่นยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ที่  
ใช้แป้งชนิดต่าง ๆ เป็นสารตัวเติม

**Mechanical, Physical and Biodegradation Properties of vulcanized NR Latex  
Composite with Different Starch Fillers**

พิไลวรรณ พรประสิทธิ์\* ชลดา นรากรศักดิ์ และวิไลวรรณ สงวนวงษ์  
Philaiwan Pomprasit\*, Chonlada Narakonsak, Wilaiwan Sa-nguanwong

สาขาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้  
จ.เชียงใหม่ 50290

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของแป้งต่างชนิด ได้แก่ แป้งข้าวเจ้า แป้งมันสำปะหลัง และแป้ง  
สาकु ในปริมาณที่แตกต่างกัน เมื่อใช้แป้งเป็นสารตัวเติมในน้ำยางวัลคาไนซ์ โดยการทดลองทำการ  
แปรปริมาณแป้งที่ 0, 5, 10 และ 15 phr และศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และการย่อย  
สลายของแผ่นยางวัลคาไนซ์ จากผลการทดสอบพบว่า ค่าความต้านทานแรงดึง และค่ามอดูลัสของ  
แผ่นยางวัลคาไนซ์มีแนวโน้มลดลง ในขณะที่ค่าระยะยืด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น ตามปริมาณสารตัวเติม  
แป้ง จากการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของแผ่นยางวัลคาไนซ์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ  
ส่องกราด พบว่าแผ่นยางที่ผสมแป้งสาकुมีการฝังตัวและกระจายตัวของแป้งสาकुทั่วแผ่นยางอย่าง  
สม่ำเสมอ จากการวิเคราะห์ลักษณะหมู่ฟังก์ชันเฉพาะของยางวัลคาไนซ์ด้วยวิธีฟูเรียทรานสฟอร์ม  
อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี พบว่าสารตัวเติมแป้งฝังตัวเข้ากับน้ำยาง ซึ่งปรากฏหมู่ฟังก์ชันของน้ำ  
ยางและแป้งแต่ละชนิดให้พีคของพันธะคล้ายกัน จากการทดสอบการบวมพองพบว่าแป้งแต่ละชนิด  
ที่ปริมาณ 15 phr มีอัตราการบวมพองสูงสุด แผ่นยางที่ผสมแป้งสาकुมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำสูง  
ที่สุด โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการฝังดิน นอกจากนี้พบว่าปริมาณโปรตีนก่อนฝังดินมี  
ค่าสูงกว่าหลังฝังดินและหลังฝังดินพบว่าแผ่นยางที่ผสมแป้งข้าวเจ้ามีปริมาณโปรตีนจากแบคทีเรีย  
สูงที่สุด

คำสำคัญ: แป้งสาकु แป้งข้าวเจ้า แป้งมันสำปะหลัง วัสดุผสม น้ำยางธรรมชาติ

### Abstract

The effects of different types of starch, including rice flour, cassava and sago starch on mechanical, physical and biodegradation properties of NR latex vulcanizates were studied. The starch was used as filler in vulcanized natural rubber latex at loading levels of 0, 5, 10, and 15 phr. As the results showed that the tensile strength and modulus at 300% strain of vulcanized NR latex tended to decrease with increasing amount of starch, while elongation at break increased. Based on scanning electron microscope images, the sago-vulcanized NR latex composite showed that the good filler-rubber interaction, embedded and evenly dispersed in NR. For FTIR analysis showed the similarity the molecular of structure of starch and NR in all compound. The starch content at 15 phr in vulcanized NR gave the highest swelling. The sago-vulcanized NR latex composite gave the highest water absorption with tended to increase with increasing the duration of buried in soil. Moreover the protein content of the composite before buried was higher than that of the composite after buried. The rice flour-NR composite gave the highest protein content.

**Keywords:** sago starch, rice flour, cassava starch, composite, natural rubber latex

### กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่อง สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และการย่อยสลายของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ที่ใช้แป้งชนิดต่างๆ เป็นสารตัวเติม (Mechanical, Physical and Biodegradation Properties of vulcanized NR Latex Composite with Different Starch Fillers) ได้สำเร็จลุล่วง โดยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย จากสำนักวิจัยและส่งเสริมวิชาการการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ประจำปีงบประมาณ 2557 ผู้วิจัยขอขอบคุณ สาขาวิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ที่อนุเคราะห์เรื่องสถานที่ เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินการวิจัยให้เสร็จสมบูรณ์

ผู้วิจัย



### คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A	=	พื้นที่หน้าตัดของชั้นทดสอบ ( $\text{mm}^2$ )
CS	=	แผ่นยางวัลคาไนซ์ที่เติมสารตัวเติมแป้งมันสำปะหลัง
$\text{CaCO}_3$	=	แผ่นยางวัลคาไนซ์ที่เติมสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต
C1	=	สูตรการทำแผ่นยางควบคุม (No Filler)
C2	=	สูตรการทำแผ่นยางควบคุม ( $\text{CaCO}_3$ )
D	=	น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)
$F_m$	=	แรงที่ทำให้ยางยืดออก 300% (N)
$F_u$	=	แรงดึงสูงสุด (N)
L	=	ความยาวระหว่างขีดบนชั้นทดสอบเมื่อยืดจนขาด (mm)
$L_0$	=	ความยาวระหว่างขีดบนชั้นทดสอบก่อนทำการยืด
NF	=	แผ่นยางวัลคาไนซ์ที่ไม่เติมสารตัวเติม
RF	=	แผ่นยางวัลคาไนซ์ที่เติมสารตัวเติมแป้งข้าวเจ้า
SG	=	แผ่นยางวัลคาไนซ์ที่เติมสารตัวเติมแป้งสาคุ
$W_i$	=	น้ำหนักชั้นทดสอบหลังแช่โทลูอิน (กรัม)
$W_0$	=	น้ำหนักของชั้นทดสอบก่อนแช่โทลูอิน (กรัม)

## 1. บทนำ

ปัจจุบันมีการใช้เทคโนโลยีสีเขียว (Green technology) มาช่วยแก้ไขปัญหาและกำจัดขยะมูลฝอยกันมากขึ้น โดยพบว่า 20% ของขยะมาจากผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติ (Roy *et al.*, 2006) ซึ่งจะต้านทานการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ เพราะยางธรรมชาติมีส่วนที่ไม่ชอบน้ำจาก Cis-1,4- polyisoprene แต่หลายๆ นักวิจัยได้พบว่า การเติมแป้งเข้าไปในพอลิเมอร์ จะสามารถทำให้เกิดกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพได้ (Sung *et al.*, 1992, Xie *et al.*, 2008) นอกเหนือจากการกำจัดขยะและของเสียแบบเดิม การย่อยสลายทางธรรมชาติ เป็นอีกวิธีหนึ่งในการแก้ไขปัญหาและกำจัดขยะได้

ได้มีการนำแป้งเติมเข้าไปเพื่อเตรียมน้ำยางคอมพาวนด์อย่างกว้างขวาง เนื่องจากหาได้ง่ายในธรรมชาติ สามารถย่อยสลายได้ และต้นทุนต่ำ แป้งยังสามารถเปลี่ยนระบบทางเคมีได้อีกด้วย โครงสร้างของแป้งจะประกอบไปด้วย โปรตีนอยู่ในสายโซ่ พอลิแซ็กคาไรด์ของ อะไมโลส และ อะไมโลแพคติน (Guimarães *et al.*, 2010, Buléon *et al.*, 1998, Karim *et al.*, 2008) โดยจุลินทรีย์ที่อยู่ในดินจะย่อยสลายแล้วเกิดเป็นเอนไซม์ ไปหยุดสายโซ่หลักของน้ำยางธรรมชาติ โมเลกุลเหล่านี้จะจัดเรียงตัวเป็นรูปทรงกลมเป็นชั้นๆ เรียงสลับกันระหว่างส่วนที่เป็นผลึกกับส่วนอสัณฐาน

ในระหว่างการเกิดเจล โครงสร้างของแป้ง แป้งจะถูกทำลายด้วยความร้อน โดยโครงสร้างที่ถูกทำลายจะขึ้นกับการให้ความร้อนเร็ว หรือ ช้า และขึ้นอยู่กับการให้แรง โครงสร้างถูกทำลายเนื่องจากเป็นโครงสร้างที่อ่อนแอของพันธะไฮโดรเจน การดูดซับน้ำ และการบวมตัวของแป้ง ในการเกิดเจลจะเกิดการแตกพันธะระหว่างโมเลกุลของแป้ง ความร้อนจะช่วยให้ไฮโดรเจนดูดซับน้ำได้มากขึ้น การแทรกซึมของน้ำจะเพิ่มความไม่เป็นระเบียบในโครงสร้างและลดจำนวนและขนาดของผลึกเกิดเป็นอสัณฐานมากขึ้น

การเย็นตัวของเจล กระบวนการนี้เรียกว่า กระบวนการ Retrogradation เกิดจากเม็ดแป้งจะเกิดปฏิกิริยาในโครงสร้างมีการรวมตัวกันใหม่ เอาส่วนอะไมโลสออกจากเจลาติน ที่อุณหภูมิต่ำเป็นเวลานาน โมเลกุลเชิงเส้นของ อะไมโลส และส่วนที่เป็นเส้นตรงของโมเลกุล อะไมโลแพคติน จะจัดเรียงตัวเป็นผลึกขึ้นใหม่

อะไมโลสจะมีผลต่อกระบวนการ Retrogradation มากกว่า อะไมโลเพคติน ซึ่งในทางตรงกันข้าม อะไมโลเพคตินจะมีผลน้อย กระบวนการเกิดเจลอาจเกิดขึ้น หลังจากแป้งสูญเสีย น้ำ จะหดตัว และเย็นตัวลง ขณะเกิดเจลถ้าไม่ถูกรบกวน เจลจะมีความแข็งแรง

ในโครงการวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาชนิดของแป้งเมื่อใช้เป็นสารตัวเติมในน้ำยางวัลคาไนซ์ และทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพ ทางกล และการย่อยสลายทางชีวภาพของแผ่นฟิล์มน้ำยางธรรมชาติวัลคาไนซ์

## 2. วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 2.1 เพื่อตรวจสอบความเข้ากันได้ของการเติมแป้งต่างชนิด ได้แก่ แป้งสาकु แป้งมันสำปะหลัง และแป้งข้าวเจ้าที่ใช้เป็นสารตัวเติมในปริมาณที่แตกต่างกันในน้ำยางวัลคาไนซ์
- 2.2 เพื่อศึกษาผลของการเติมแป้งต่างชนิดที่มีผลต่อ สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกลและการย่อยสลายทางชีวภาพของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติวัลคาไนซ์

## 3. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 3.1 สามารถนำผลจากการวิจัยไปให้ทางอุตสาหกรรมผลิตถุงมือยางที่ใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้งได้ เพื่อจะได้ช่วยลดขั้นตอนการกำจัดขยะได้
- 3.2 สามารถนำผลการวิจัยไปเผยแพร่ในวารสารวิชาการระดับชาติได้

## 4. การตรวจเอกสาร

Izmar *et al.* (2012) ได้ศึกษาผลคุณสมบัติทางกายภาพและการย่อยสลายของน้ำยางพรีวัลคาไนซ์ที่ใช้แป้งสาकुเป็นสารตัวเติมเพื่อเพิ่มปริมาณโปรตีนให้กับน้ำยาง โดยทำการเพิ่มปริมาณแป้งสาकुลงในน้ำยางสองวิธีการคือ วิธีการ A. เพิ่มก่อนวัลคาไนซ์น้ำยางและ วิธีการ B. เพิ่มหลังวัลคาไนซ์น้ำยาง ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส สำหรับกระบวนการย่อยสลายยาง น้ำยางที่เป็นแผ่นฟิล์มจะถูกฝังในดิน และนำออกมาทดสอบสมบัติเชิงกล และสมบัติทางสัณฐานวิทยาในแต่ละสัปดาห์ โดยผลการทดสอบ แสดงให้เห็นว่าปริมาณแป้งสาकु ที่เติมลงไปปริมาณ 10 phr จะให้สมบัติต้านทานแรงดึงที่เหมาะสมในระหว่างกระบวนการย่อยสลาย สมบัติเชิงกลของส่วนประกอบทั้งสองวิธีจะลดลงซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระบวนการย่อยสลายมีผลต่อสมบัติเชิงกลของ น้ำยางและแป้งสาकुคอมโพสิต จากผลการวิเคราะห์ภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ซึ่งวิธีการ

A แสดงให้เห็นถึงการรวมตัวกันที่ดีของโครงสร้างระหว่างยางกับสารตัวเติมแป้งสาธ ในขณะ  
วิธีการ B จะให้สมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นซึ่งประเมินผลจากสมบัติความต้านทานแรงดึง

แก้วตา แก้วตาทิพย์ (2556) ได้ศึกษาการนำกลูเตนข้าวสาลีไปใช้เป็นวัตถุดิบที่ในการ  
นำมาผลิตเป็นพลาสติกชีวภาพ เนื่องจากมีสมบัติที่ดีหลายประการ เช่น ราคาถูก มีปริมาณมาก และ  
ย่อยสลายได้ง่ายในธรรมชาติ และเมื่อผสมกลูเตนข้าวสาลีร่วมกับพลาสติกโพลิเอสเตอร์สามารถขึ้นรูปได้  
ด้วยเทคนิคต่าง ๆ เหมือนการขึ้นรูปพลาสติกทั่วไป โครงสร้างของกลูเตนข้าวสาลีประกอบด้วย  
กรดอะมิโนหลายชนิด แต่กรดอะมิโนที่มีอิทธิพลต่อโครงสร้างและสมบัติของกลูเตนข้าวสาลี คือ  
ซิสทีน เนื่องจากซิสทีนประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันไทออลที่สามารถสร้างพันธะไดซัลไฟด์ทั้งภายใน  
และภายนอกสายโซ่ของโปรตีนหรือเกิดการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โปรตีน โดยการเชื่อมขวาง  
ระหว่างสายโซ่โปรตีนจะส่งผลต่อสมบัติของพลาสติกชีวภาพจากกลูเตนข้าวสาลี ปัจจัยที่มีผลต่อ  
การเกิดการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โปรตีน เช่น อุณหภูมิในการขึ้นรูป ชนิดของพลาสติกโพลิเอสเตอร์  
และชนิดของสารเติมแต่ง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องควบคุมการเกิดการเชื่อมขวางของสายโซ่  
โปรตีนให้มีปริมาณที่เหมาะสม เพื่อให้ได้พลาสติกชีวภาพจากกลูเตนข้าวสาลีที่มีสมบัติที่ดีและ  
สม่ำเสมอเหมาะแก่การนำไปใช้งาน

มงคล สุขวัฒนาสินทร์ (2553) นำแป้งซึ่งเป็นวัสดุจากธรรมชาติที่มีราคาถูก และผลิต  
ขึ้นใหม่ได้มาเป็นตัวเติมสำหรับพลาสติกที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม มีการใช้ยูเรียและกลีเซอรอล  
เป็นพลาสติกโพลิเอสเตอร์สำหรับการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาบิล (TPS) ที่มีจุดหลอมเหลว และความ  
เป็นผลึกของแป้งลดลง เพื่อให้แป้งมันสำปะหลังและพอลิแลคติกแอซิด (PLA) หลอมผสมเข้า  
กันได้ดี นอกจากนี้ยังทดสอบการใช้ไทรเอทิลซิเทรต ไตรบิวทิลแอเซทิลซิเทรต และสไตรีนมาลิก  
แอนไฮไดรด์ เป็นตัวช่วยทำให้เข้ากันได้ เพื่อเพิ่มแรงกระทำของการกระจายตัวในพลาสติกผสม  
TPS/PLA โดยใช้เครื่องอัดเม็ดแบบสกรูคู่ในการผสมระหว่าง TPS และ PLA และทำการศึกษา  
สมบัติของพลาสติกผสม เช่น การทนแรงกระแทก การทนแรงดึง การยึดตามแรงดึง การทนความ  
ร้อน และสัณฐานวิทยาในระดับจุลภาค ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณแป้ง (หรือ TPS) ใน  
พลาสติกผสมทำให้สมบัติการทนแรงกระแทก และการคงรูปตามอุณหภูมิสูงขึ้น ในขณะที่การทน  
แรงดึง และการยึดตามแรงดึงลดลง ทั้งนี้ TPS สามารถผสมเข้าไปในพลาสติกได้ถึง 60% โดยที่  
พลาสติกยังคงมีสมบัติเชิงกลที่ยอมรับได้ แต่พลาสติกที่มีการผสม TPS ในระดับ 70% มีสมบัติ

ค่อนข้างเปราะ และการใช้โทรเอทิลซิเทรต เป็นสารช่วยทำให้เข้ากันได้ให้พลาสติกผสมที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าการใช้สารอีกสองชนิดที่เหลือ

Riyajan *et al.* (2012) ศึกษาการปรับปรุงส่วนที่ชอบน้ำของยางธรรมชาติให้ดีขึ้นโดยใช้วิธีการกราฟต์ น้ำมันธรรมชาติกับแป้งมันสำปะหลังที่ดัดแปลงแล้ว โดยใช้โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยแป้งมันสำปะหลังดัดแปลง (ST) ถูกเติมลงในน้ำยางที่มี Terric เป็นสารปรับพื้นผิวชนิดไม่มีประจุ ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยเตรียมแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติกราฟต์แป้งสาकुดัดแปลงบนแผ่นกระจก ซึ่งตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีของน้ำยางธรรมชาติกราฟต์กับแป้งสาकुดัดแปลงด้วยวิธีการ FTIR และตรวจสอบอัตราการบวมพองของยางธรรมชาติกราฟต์กับแป้งสาकुดัดแปลงโดยแช่ลงในน้ำ ผลการทดลองพบว่าอัตราการบวมพองของยางที่ใส่แป้งสาकुดัดแปลง (ST) มีอัตราส่วนการบวมพองที่ลดลง นอกจากนี้ค่าความต้านทานแรงดึงของยางที่ถูกปรับปรุงโดยการใส่แป้งสาकुดัดแปลง ที่ 50 phr มีค่าสูงที่สุด ค่าความทนความร้อนของน้ำยางธรรมชาติที่กราฟต์ด้วยแป้งสาकुดัดแปลง (ST) มีค่าสูงกว่าน้ำยางธรรมชาติผสมกับแป้งสาकुดัดแปลง ตรวจสอบโดยเทคนิค TGA เชื้อหุ้มพอลิเมอร์ของน้ำยางธรรมชาติที่กราฟต์ด้วยแป้งสาकुดัดแปลงเป็นตัวควบคุมการเกิดยูเรีย ทำให้เกิดการย่อยสลายได้ง่ายในดินผลิตภัณฑ์ควบคุมการขับน้ำได้ดี จึงเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานเกี่ยวกับพืชสวน และในด้านการเกษตร

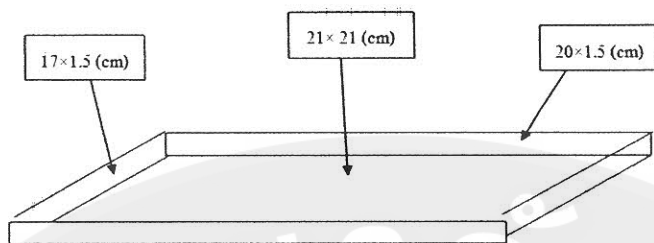
## 5. อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

### 5.1 อุปกรณ์

#### 5.1.1 อุปกรณ์ในการทดลอง

- บล็อกแผ่นกระเบื้องชนิดเรียบ

ตัดแผ่นกระเบื้องขนาด 21×21 เซนติเมตร 1 แผ่น และตัดกระจกที่มีความหนา 5 มิลลิเมตร จำนวน 4 ชิ้น ยาว 17×1.5 เซนติเมตร 2 ชิ้น และ 20×1.5 เซนติเมตร 2 ชิ้น หลังจากนั้นนำชิ้นส่วนกระจกที่ได้มาติดบนขอบของแผ่นกระเบื้องทั้ง 4 ด้าน โดยใช้กาวเอนกประสงค์สำหรับติดประสานชิ้นงานที่ทนความร้อน โดยเฉพาะเป็นตัวยึดติดตั้งทิ้งไว้ให้กาวแห้งจะได้บล็อกแผ่นกระเบื้องชนิดเรียบตามภาพที่ 3.1



ภาพที่ 1 บล็อกแผ่นกระเบื้องชนิดเรียบ

- ตู้อบ
- ช้อนตักสารเคมี
- ถ้วยตวงสารเคมี
- บีกเกอร์ขนาด 100-1000 มิลลิลิตร (ml)
- แท่งแก้วคนสาร
- แท่งแม่เหล็กกวนสาร (Magnetic bar)
- เครื่องให้ความร้อน (Hot Plate)
- คีมคีบแผ่นยาง
- เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง และ 4 ตำแหน่ง
- เครื่องทดสอบความหนาของแผ่นยาง
- โถดูดความชื้น (Desiccator)
- กรรไกร

#### 5.1.2 อุปกรณ์ในการทดสอบ

- เครื่องทดสอบค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile Testing Machine)
- เครื่องดิสเพนซ์สารเคมี
- เครื่องตัดชิ้นทดสอบรูปดัมเบล ตามมาตรฐาน ASTM D-412 แบบ Die C
- เครื่องทดสอบความหนืด (Brookfield Viscometer)
- เครื่องทดสอบปริมาณ ไปรดีน (Micro-Kjeldahl Digestion And Distillation)
- เครื่องฟูเรียทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FTIR)
- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)
- บั้วรดน้ำ
- ดินผสมสำเร็จรูป
- ถุงพลาสติกสำหรับปลูกต้นไม้ ขนาด 5x10 นิ้ว

### 5.1.3 ยางและสารเคมี

- (1) แป้งข้าวเจ้า ธรรมชาติผลิตโดย โรงงานประสมผลตราเมื่อ
- (2) แป้งมันสำปะหลังตราดอกไม้ไทย ผลิตโดย บริษัทกรุงเทพสตาซอินดัสตรีล จำกัด
- (3) แป้งสาคูเม็ดเล็ก ตราเจดีย์ผลิตโดย บริษัท เอส.ยู.วี. อินเตอร์เทรด จำกัด
- (4) 60% น้ำยางข้นชนิดแอมโมเนียสูง โดยมีปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำยาง (Total Solid Contents, TSC) 68.69% โดยน้ำหนักและมีปริมาณเนื้อยางแห้ง (Dry Rubber Content, DRC) 64.40% โดยน้ำหนักซึ่งน้ำยางข้นที่ได้นั้นถูกผลิตมาจากน้ำยางสดโดยกระบวนการปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) และรักษาสภาพด้วยแอมโมเนีย จัดจำหน่ายโดยบริษัทล็กกี้โพร จังหวัดนนทบุรี
- (5) 50% ดิสเพอร์ซันกำมะถัน (Sulphur) ทำหน้าที่เป็นสารคงรูปโดยมีลักษณะเป็นผงสีเหลือง จัดจำหน่ายโดยบริษัทล็กกี้โพร จังหวัดนนทบุรี
- (6) 50% ดิสเพอร์ซัน แซด ดี อี ซี (Zinc Diethylthiocarbamate, ZDEC) เป็นสารเคมีที่มีลักษณะเป็นผงสีขาวไม่มีกลิ่นมีฤทธิ์เป็นด่างทำหน้าที่เป็นสารตัวเร่งให้เกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เซชัน ทำให้การคงรูปของยางเกิดขึ้นได้เร็วขึ้นจัดจำหน่ายโดยบริษัทล็กกี้โพร จังหวัดนนทบุรี
- (7) 50% ดิสเพอร์ซัน แซด เอ็ม บี ที (Zinc-2-Mercapto Benzothiazole, ZMBT) เป็นสารเคมีที่มีลักษณะเป็นผงสีขาว ไม่มีกลิ่นทำหน้าที่เป็นสารตัวเร่งร่วมในการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เซชันจัดจำหน่ายโดยบริษัทล็กกี้โพร จังหวัดนนทบุรี
- (8) 50% ดิสเพอร์ซันซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide, ZnO) มีลักษณะเป็นผงละเอียดมีสีขาว ไม่ละลายน้ำทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้น (Activator) ที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์เซชัน จัดจำหน่ายโดย บริษัทล็กกี้โพร จังหวัด นนทบุรี
- (9) 50% ดิสเพอร์ซัน ซี พี แอล (Lowinox® CPL) เป็นอนุพันธ์ของฟีนอลโดยมีลักษณะเป็นผงสีขาวขุ่นทำหน้าที่เป็นสารต้านทานการเสื่อมสภาพของยาง (Antioxidant) ในน้ำยาง จัดจำหน่ายโดย บริษัทล็กกี้โพร จังหวัด นนทบุรี
- (10) 10% โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium Hydroxide, KOH) โดยเป็นสารประกอบไฮดรอกไซด์ของโพแทสเซียมมีลักษณะเป็นเม็ดสีขาวขุ่น ทำหน้าที่เป็นสารปรับ pH ในน้ำยางและน้ำแป้ง จัดจำหน่ายโดย บริษัทเวชวิทย์ จำกัด จังหวัดเชียงใหม่
- (11) 20% โพแทสเซียมโอเลอเทอ (Potassium Oleate Solution) เป็นของเหลวสีเหลืองใสทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความเสถียรให้กับน้ำยาง จัดจำหน่ายโดย บริษัทเวชวิทย์ จำกัด จังหวัดเชียงใหม่
- (12) แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate, CaCO<sub>3</sub>) มีลักษณะเป็นผงสีขาว โดยจัดอยู่ในกลุ่มสารตัวเติมประเภทเสริมแรง จัดจำหน่ายโดย บริษัทล็กกี้โพร จังหวัดนนทบุรี

- (13) วัลทามอล (Vultamol) ลักษณะเป็นผงสีน้ำตาล ทำหน้าที่เป็นสารช่วยกระจายตัว จัดจำหน่ายโดย บริษัท ลักกี้โพร่ จังหวัดนนทบุรี
- (14) เบนโทไนซ์เคลย์ (Bentonite Clay) มีลักษณะเป็นผงสีเทา ทำหน้าที่เป็นสารป้องกันการตกตะกอนของสารเคมีที่อยู่ในรูปของสารแขวนลอยจัดจำหน่ายโดยบริษัทลักกี้โพร่ จังหวัดนนทบุรี
- (15) คลอโรฟอร์ม (Chloroform) เป็นของเหลวใส ใช้เป็นสารจับตัวของน้ำยางเพื่อวัตถุประสงค์การวัลคาไนซ์ของน้ำยางพรีวัลคาไนซ์ จัดจำหน่ายโดย บริษัทเวชวิทย์ จำกัด จังหวัดเชียงใหม่
- (16) โทลูอิน (Toluene) ใช้เป็นตัวทำละลายในการทดสอบการบวมพองของแผ่นยาง (Swelling Resistance) จัดจำหน่ายโดย บริษัทเวชวิทย์ จำกัด จังหวัดเชียงใหม่
- (17) กรดซัลฟูริก (Sulfuric Acid) ความเข้มข้น 98% ใช้เป็นตัวช่วยอย่างในการทดสอบหาปริมาณโปรตีน จัดจำหน่ายโดยบริษัท บริษัท แกมมาโก้ (ประเทศไทย) จำกัด
- (18) คอปเปอร์ซัลเฟต (Copper Sulfate) เป็นสารเร่งให้เกิดปฏิกิริยาในการย่อยชิ้นงาน จัดจำหน่ายโดย บริษัท แกมมาโก้ (ประเทศไทย) จำกัด
- (19) สารเร่งปฏิกิริยา โดยใช้สาร คอปเปอร์ซัลเฟต (Copper Sulfate) และ โซเดียมซัลเฟต (Sodium Sulfate) ในอัตราส่วน 1:20 เพื่อเป็นสารเร่งให้เกิดปฏิกิริยาในการย่อยชิ้นงานจัดจำหน่ายโดยบริษัท บริษัท แกมมาโก้ (ประเทศไทย) จำกัด
- (20) เมทิลเรด (Methyl Red) เป็นอินดิเคเตอร์ในการไตเตรทหาปริมาณไนโตรเจน จัดจำหน่ายโดยบริษัท บริษัท แกมมาโก้ (ประเทศไทย) จำกัด

## 5.2 วิธีการ

5.2.1 ศึกษาวิธีการเตรียมน้ำแป้งข้าวเจ้าโดยการผสมน้ำกั้น และให้ความร้อนเพื่อให้แป้งเกิดการละลายตัวโดยตั้งอุณหภูมิขณะผสมที่ 45 องศาเซลเซียส เติม Vultamol เพื่อป้องกันการตกตะกอนของแป้ง

5.2.2 ศึกษาวิธีการเตรียมน้ำแป้งมันสำปะหลังโดยผสมน้ำกั้น และให้ความร้อนเพื่อให้แป้งเกิดการละลายตัวโดยตั้งอุณหภูมิขณะผสมที่ 45 องศาเซลเซียส เติม Vultamol เพื่อป้องกันการตกตะกอนของแป้งและ Bentonite เพื่อให้แป้งเกิดการกระจายตัวได้ดีขึ้น

5.2.3 ศึกษาวิธีการเตรียมน้ำแป้งสาชูโดยการดิสเพอร์ชันเนื่องจากแป้งสาชูมีลักษณะเป็นเม็ดที่มีขนาดใหญ่ และแข็งมากเพื่อให้ขนาดแป้งสาชูเล็กลงจึงได้ใช้วิธีการดัดแปลงมาจากการเตรียมน้ำแป้งเคมีในรูปแบบดิสเพอร์ชัน



ตารางที่ 1 สูตรการเตรียมดินเซอร์ชันน้ำแป้ง

สารเคมี	25% แป้งข้าวเจ้า (กรัม)	20% แป้งมันสำปะหลัง (กรัม)	10% แป้งสาเก* (กรัม)
น้ำกลั่น	67	67	85
10% KOH	3	3	3
Vultamol	5	5	1
Bentonite	-	5	1
รวม	100	100	100

\*บดในเครื่องบดลมิตเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

### 5.3 การเตรียมสารเคมีในรูปแบบดินเซอร์ชัน

การเตรียมสารเคมีสำหรับผสมน้ำยางในการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆจำเป็นต้องมีการเตรียมให้อยู่ในรูปของดินเซอร์ชันเนื่องจากสารเคมีที่ใช้ไม่สามารถละลายได้ในน้ำ และไม่สามารถกระจายตัวได้เมื่อนำไปผสมกับน้ำยางโดยตรงซึ่งจะจับตัวกัน และตกตะกอนทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานของสารเคมีลดลง และได้ผลิตภัณฑ์ที่ไม่ตรงตามความต้องการผู้วิจัยจึงต้องทำการบดสารเคมีให้มีขนาดอนุภาคเล็กลงโดยการเติมสารช่วยกระจายตัวและสารป้องกันการตกตะกอนลงไปเพื่อให้สารเคมีมีประสิทธิภาพในการทำงานได้ดียิ่งขึ้นซึ่งจะบดสารเคมีโดยวิธีการบดลมิต (Ball mill) โดยจะใช้ระยะเวลาในการบดที่แตกต่างกันซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของสารเคมีแต่ละชนิด

ตารางที่ 2 สูตรการเตรียมดินเซอร์ชันกำมะถัน 50%

สารเคมี	สัดส่วนสาร (phr)	น้ำหนักใช้จริง(กรัม)
กำมะถัน (Sulphur)	50	500
Bentonite	1.0	10.0
Vultamol	1.0	10.0
น้ำ	48	480

บดในเครื่องบดลมิตเป็นเวลา 72 ชั่วโมง

ตารางที่ 3 สูตรการเตรียมดินเพอร์ชั้้นแซดเอ็มบีที 50%

สารเคมี	สัดส่วนสาร (phr)	น้ำหนักใช้จริง(กรัม)
แซดเอ็มบีที (ZMBT)	50	500
Bentonite	1.0	10.0
Vultamol	1.0	10.0
น้ำ	48	480

บดในเครื่องบดมิลเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ตารางที่ 4 สูตรการเตรียมดินเพอร์ชั้้นแซดดีอีซี 50%

สารเคมี	สัดส่วนสาร (phr)	น้ำหนักใช้จริง(กรัม)
แซดดีอีซี (ZDEC)	50	500
Bentonite	1.0	10.0
Vultamol	1.0	10.0
น้ำ	48	480

บดในเครื่องบดมิลเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ตารางที่ 5 สูตรการเตรียมดินเพอร์ชั้้นแคลเซียมคาร์บอเนต 50%

สารเคมี	สัดส่วนสาร (phr)	น้ำหนักใช้จริง(กรัม)
แคลเซียมคาร์บอเนต	50	250
Bentonite	1.0	5.0
Vultamol	1.0	5.0
น้ำ	48	240

บดในเครื่องบดมิลเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ตารางที่ 6 สูตรการเตรียมดินเพอร์ชั้้นซิงค์ออกไซด์ 50%

สารเคมี	สัดส่วนสาร (phr)	น้ำหนักใช้จริง(กรัม)
ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide)	50	500
Bentonite	1.0	10.0
Vultamol	1.0	10.0
น้ำ	48	480

บดในเครื่องบดมิลเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ตารางที่ 7 สูตรการเตรียมดิสเพอร์ชันซีพีแอล 50%

สารเคมี	สัดส่วนสาร (phr)	น้ำหนักใช้จริง(กรัม)
ซีพีแอล (Antioxidant CPL)	50	500
Bentonite	1.0	10.0
Vultamol	1.0	10.0
น้ำ	48	480

บดในเครื่องบดมิลเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ตารางที่ 8 สูตรการเตรียมสารละลายโพแทสเซียมโอเลอเทต 20%

ส่วนผสม	สัดส่วนโดยน้ำหนัก(กรัม)
โพแทสเซียมโอเลอเทต	20.0
น้ำ	80.0

ทำการผสม โดยตั้งไว้บนเครื่องให้ความร้อน(Hot Plate)ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เพื่อให้โพแทสเซียมโอเลอเทตละลายตัวได้ดียิ่งขึ้น

ตารางที่ 9 สูตรการเตรียมสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 10%

ส่วนผสม	สัดส่วนโดยน้ำหนัก (กรัม)
โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์	10.0
น้ำ	90.0

#### 5.4 การออกแบบสูตรผลิตภัณฑ์

การออกแบบสูตรผลิตภัณฑ์น้ำยางให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์แบบจุ่มเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความเหนียวแข็งแรงยืดหยุ่น และเหมาะสำหรับการใช้งานที่ยาวนานเมื่อทำการบดมิลสารเคมีแล้วนำน้ำยางมาผสมกับสารเคมีโดยผสมแบ่งเป็น 9 สูตร และบ่มที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยแต่ละสูตรในการทดลองจะใช้ปริมาณน้ำแป้งเป็นตัวแปรในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน เพื่อทำการเปรียบเทียบสมบัติของน้ำยางหลังจากการเติมน้ำแป้ง และแผ่นยางที่ได้หลังจากการอบ หลังจากนั้นทำการทดสอบคลอโรฟอร์มนัมเบอร์จนถึงระดับที่ 2 จึงทำการเทน้ำยางลงในบล็อกแผ่นกระเบื้อง แล้วตั้งทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง เพื่อให้ น้ำยางเซตตัวก่อนนำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

กันซึ่งจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิการเกิดเจลลาติไนซ์ของแป้งในแต่ละชนิด โดยสูตรที่ใช้ในการทดลอง จะแสดงตามตารางที่ 10-11

ตารางที่ 10 สูตรการทำแผ่นยางควบคุม

น้ำยางและสารเคมี	น้ำหนักแห้ง (phr)	
	(สูตร C1)	(สูตร C2)
60% น้ำยางชั้น	100.00	100.00
50% แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate)	-	30.0
10% โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium Hydroxide)	0.2	0.2
20% โพแทสเซียมโอเลอเทอ (Potassium Oleate)	0.2	0.2
50% ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide)	1.0	1.0
50% แซดดีอีซี (ZDEC)	1.0	1.0
50% แซดเอ็มบีที (ZMBT)	0.5	0.5
50% ซีพีแอล (Antioxidant CPL)	1.0	1.0
50% กำมะถัน (Sulphur)	1.5	1.5

\*หมายเหตุ C1 คือ สูตรการทำแผ่นยางควบคุม(No Filler)

หมายเหตุ C2 คือ สูตรการทำแผ่นยางควบคุม( $\text{CaCO}_3$ )

ตารางที่ 11 สูตรการทำแผ่นยางที่ใช้แป้งเป็นสารตัวเติม

น้ำยางและสารเคมี	น้ำหนักแห้ง (phr)								
	สูตร RF 5	สูตร CS5	สูตร SG 5	สูตร RF 10	สูตร CF 10	สูตร SG 10	สูตร RF 15	สูตร CS 15	สูตร SG 15
60% น้ำยางข้น	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
25% แป้งข้าวเจ้า	5.0	-	-	10.0	-	-	15.0	-	-
20% แป้งมันสำปะหลัง	-	5.0	-	-	10.0	-	-	15.0	-
10% แป้งสาकु	-	-	5.0	-	-	10.0	-	-	15.0
10% โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium Hydroxide)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
20% โพแทสเซียมโอเลต (Potassium Oleate)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
50% ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
50% แซดดีอีซี (ZDEC)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
50% แซดเอ็มบีที (ZMBT)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
50% ซีพีแอล (Antioxidant CPL)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
50% กำมะถัน (Sulphur)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5

\*หมายเหตุ RF 5 คือ ปริมาณแป้งข้าวเจ้า 25% ที่ 5 Phr

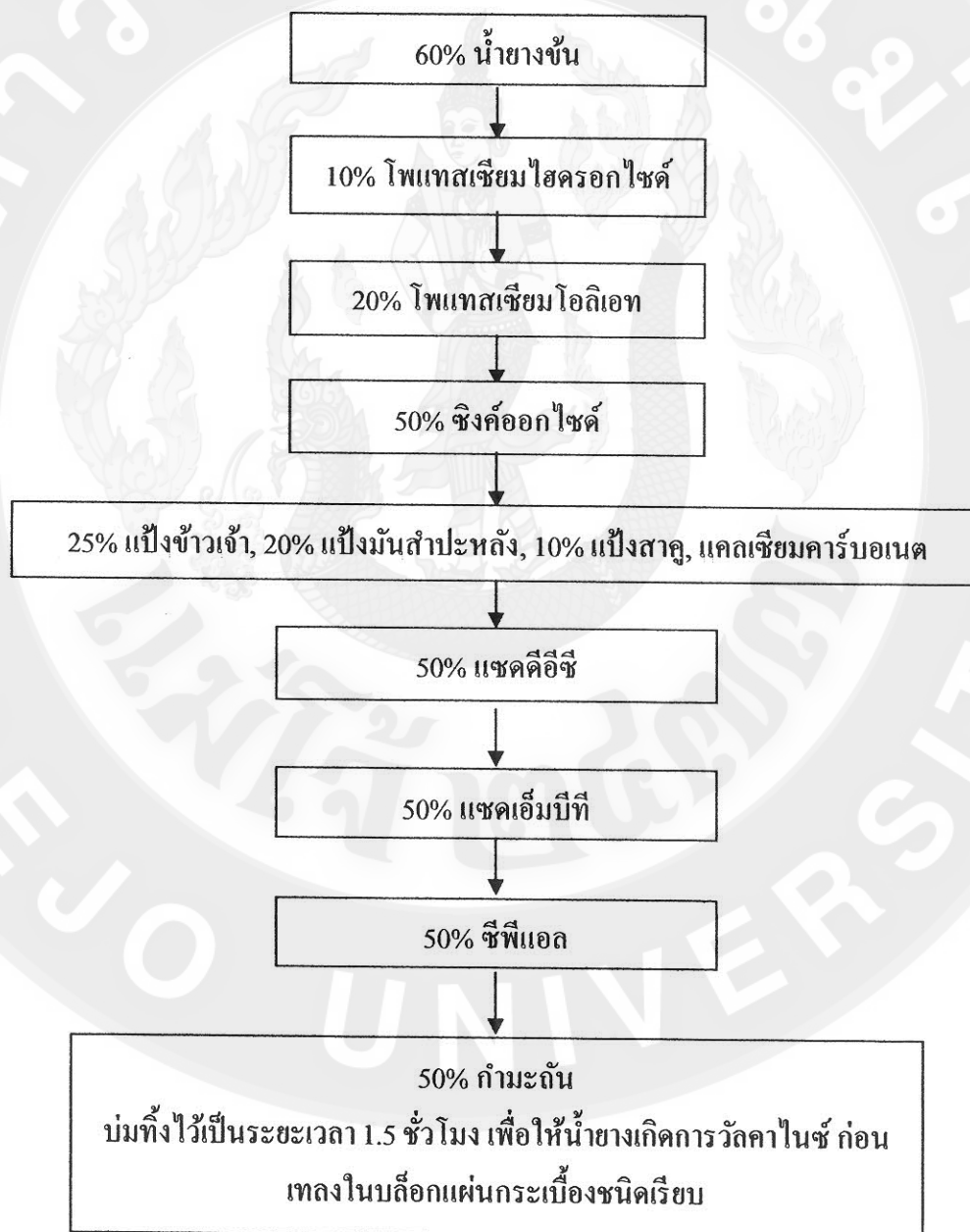
หมายเหตุ CS 5 คือ ปริมาณแป้งมันสำปะหลัง 20% ที่ 5 Phr

หมายเหตุ SG 5 คือ ปริมาณแป้งสาकु 10% ที่ 5 Phr

5.5 การศึกษาผลของแป้งต่างชนิดที่ใช้เป็นสารตัวเติม ในปริมาณที่แตกต่างกัน ต่อสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และการย่อยสลายทางชีวภาพของแผ่นยางวัลคาไนซ์

#### 5.5.1 การเตรียมน้ำยาง

เตรียมน้ำยางคอมพาวนด์ ดังภาพที่ 2 หลังจากนั้นนำน้ำยางคอมพาวนด์ที่ได้มาบ่มที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง และทดสอบระดับการวัลคาไนซ์ด้วยคลอโรฟอร์ม ดังรายละเอียดในหัวข้อที่ 3.5.2 ก่อนนำไปเตรียมเป็นแผ่นยาง



ภาพที่ 2 ลำดับการเตรียมน้ำยางคอมพาวนด์

### 5.5.2 การทดสอบระดับการวัลคาไนซ์ของน้ำยางคอมพาวนด์ด้วยคลอโรฟอร์ม

#### (Chloroform Test)

- (1) นำน้ำยางที่ได้จากการบ่มปริมาตร 10 มิลลิลิตร เทใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร
- (2) ค่อย ๆ เทคลอโรฟอร์มลงไปลงในน้ำยางในปริมาตร 10 มิลลิลิตร เท่า ๆ กัน (สัดส่วน 1:1)
- (3) กวนด้วยแท่งแก้วเพื่อให้น้ำยางจับตัวเป็นก้อน
- (4) ตรวจสอบก้อนยางที่ได้โดยสังเกตลักษณะการยึดตัวเมื่อดึงออกจากกันเพื่อจัดเกรดตามตารางที่ 12

ตารางที่ 12 ลักษณะการจับตัวของน้ำยางเมื่อทดสอบด้วยคลอโรฟอร์ม

Chloroform No.	ระดับการวัลคาไนซ์	ลักษณะการจับตัว และลักษณะก้อนยาง เมื่อดึงยึดออก	การใช้งาน
No.1	ยังไม่เกิดการวัลคาไนซ์	ยางจับตัวเป็นก้อนเมื่อดึงยึดยางจะยึดออกเป็นสายยาวเหนียว ๆ	ใช้ไม่ได้
No.2	เกิดการวัลคาไนซ์เล็กน้อย	ยางจับตัวกันเป็นก้อนเมื่อดึงยึดยางจะยึดออกได้เล็กน้อยและขาดออกจากกัน	ใช้ได้
No.3	เกิดการวัลคาไนซ์ปานกลาง	ยางจับตัวกันเป็นก้อนเมื่อดึงยึดยางจะขาดตัวออกจากกันทันที	ใช้ได้
No.4	เกิดการวัลคาไนซ์มากเกินไป	ยางไม่เกิดการจับตัวกันเป็นก้อน และเกิดเป็นเม็ดเล็กๆ แฉกร่วน	ใช้ไม่ได้

### 5.5.3 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นยางธรรมชาติ

นำน้ำยางคอมพาวนด์ที่ได้จากการบ่มไปชั่งน้ำหนัก ประมาณ 95.0 กรัม แล้วเทน้ำยางลงในบล็อกแผ่นกระเบื้องโดยตั้งทิ้งไว้ให้น้ำยางเซตตัวประมาณ 1.5 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำบล็อกแผ่นกระเบื้องที่ได้ไปอบในตู้อบโดยแบ่งเข้าเข้า และแบ่งมันสำปะหลังจะอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ส่วนแบ่งสาจะอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำชิ้นงานออกจากบล็อกแผ่นกระเบื้องไปแช่ในตู้เย็นเพื่อให้แบ่งเกิดการคืนตัวตามภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ลำดับการเตรียมแผ่นยางวัลคาไนซ์

#### 5.5.4 การทดสอบสมบัติน้ำยางชั้น

1. การทดสอบปริมาณของแข็งในน้ำยาง (Total Solid Content, TSC) ทำการทดสอบโดยชั่งน้ำยางชั้นปริมาณ 2.0 กรัม ลงในเพลตที่สะอาดจนบึงก้นน้ำหนักที่ได้แล้วเติมน้ำกลั่นเล็กน้อยเพื่อให้ น้ำยางกระจายตัวทั่วเพลตหลังจากนั้นนำไปปอบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้ยางแห้ง และนำยางที่แห้งแล้วไปวางในโถดูดความชื้น (Desiccator) เพื่อให้ยางเย็นตัว ลำดับสุดท้ายนำยางที่ได้ไปชั่งน้ำหนักเพื่อเปรียบเทียบน้ำหนักของยางก่อนอบโดยคำนวณตามสมการที่ 1

$$TSC (\%) = \frac{\text{น้ำหนักยางหลังอบ}}{\text{น้ำหนักยางก่อนอบ}} \times 100 \quad \dots(1)$$

2. การทดสอบปริมาณเนื้อยางแห้ง (Dry Rubber Content, DRC) ทำการทดสอบโดยนำน้ำยางชั้นเทลงในบีกเกอร์ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ประมาณ 20 มิลลิลิตรแล้วเทกรดอะซิติกเข้มข้น 10% ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ลงไปในบีกเกอร์ที่เทน้ำยางไว้แล้วเพื่อจับตัวน้ำยางตั้งทิ้งไว้ในอ่างน้ำอุ่นที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำยางจับตัวกันเป็นก้อน และมีน้ำใส ๆ เกิดขึ้นจากนั้นนำก้อนยางที่ได้มารีดด้วยเครื่องรีดที่มีความหนา 2 มิลลิเมตร ล้างแผ่นยางให้สะอาดด้วยน้ำเปล่าแล้วนำไปปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำยางที่แห้งแล้วตั้งทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น (Desiccator) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำยางที่ได้ไปชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งตามสมการที่ 2



$$DRC(\%) = \frac{\text{น้ำหนักเนื้อยางแห้ง}}{\text{น้ำหนักยางที่ใช้}} \times 100 \quad \dots(2)$$

3. ค่าความหนืด (Viscosity) ทดสอบโดยการนำน้ำยางคอมพาวนด์ (ไม่ใส่สารตัวเติม) ปริมาณ 500 กรัม และน้ำยางคอมพาวนด์ที่เติมน้ำแป้งแต่ละชนิดที่ 15 phr ปริมาณ 500 กรัมทดสอบด้วยเครื่อง Brookfield Viscometer โดยทำการเลือกหัวเข็ม (Spindel) ที่เหมาะสมซึ่งจะเลือกหัวเข็มเบอร์เล็กเป็นอันดับแรก และเลือกให้ความเร็วที่ 20 รอบต่อนาที ซึ่งในการทดลองจะเลือกหัวเข็มขนาด LV1 โดยบันทึกค่าความหนืดสูงสุดเครื่องรายงาน

#### 5.5.5 การทดสอบลักษณะพื้นฐานวิทยาของแป้งดิบ

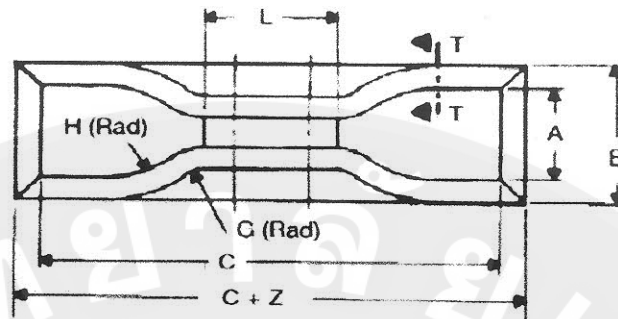
ทดสอบโดยการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) โดยนำแป้งข้าวเจ้า และแป้งมันสำปะหลังร่อนผ่านตะแกรง 100 Mesh หลังจากนั้นนำไปอบเพื่อไล่ความชื้น ก่อนนำไปติดบน Stub หลังจากนั้นนำไปเคลือบด้วยทองคำ ส่วนแป้งสาหลูหลังจากทำการดิสเพอร์ชัน เทคิสเพอร์ชันแป้งสาหลูลงในเพลตก่อนนำไปอบให้แห้งแล้วลอกให้เป็นแผ่น ก่อนนำไปติดบน Stub แล้วนำไปเคลือบด้วยทองคำ และส่องด้วยกล้องที่กำลังขยาย 2,000 เท่า เพื่อดูขนาดอนุภาคแป้งดิบของแป้งแต่ละชนิดที่จะเติมลงไปนน้ำยาง

#### 5.5.6 การทดสอบลักษณะพื้นฐานวิทยาของแผ่นยางวัลคาไนซ์

ทดสอบโดยการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) โดยตัดชิ้นทดสอบให้มีขนาด  $1 \times 10$  เซนติเมตร จุ่มลงในไนโตรเจนเหลว แล้วหักชิ้นงานให้มีลักษณะตรงที่สุด หลังจากนั้นตัดส่วนที่มีรอยหักของชิ้นงานแล้ววางลงบน Stub เพื่อไปเคลือบด้วยทองคำ และนำชิ้นงานที่ได้ไปส่องในกล้องที่มีกำลังขยาย 500 เท่า เพื่อตรวจสอบการฝังตัวของอนุภาคเม็ดแป้งแต่ละชนิดที่เติมลงไปนแผ่นยางวัลคาไนซ์

#### 5.5.7 การทดสอบสมบัติเชิงกล

1. การทดสอบสมบัติแรงดึง (Tensile properties) ทำการทดสอบโดยตัดชิ้นทดสอบเป็นรูปดัมเบลซึ่งใช้เครื่องตัดชิ้นทดสอบแบบ Die C ดังภาพที่ 4 จำนวน 3 ชิ้นทดสอบโดยใช้เครื่อง Tensile Testing Machine โดยใช้อัตราเร็วในการดึง 500 mm/min รายงานผลเป็นค่า ความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) มอดูลัสที่ระยะยืด 300% และระยะยืด ณ จุดขาด (Elongation at Break)



ภาพที่ 4 ชิ้นทดสอบรูปคัมเบล Die C (มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี. ม.ป.ป)

**มอดูลัส (Modulus)**

$$\text{มอดูลัส (Modulus)} = \frac{F_m}{A} \quad \dots(3)$$

โดยที่

$F_m$  = แรงที่ทำให้ยางยืดออก 300% (N)

$A$  = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบ ( $\text{mm}^2$ )

**ความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength)**

$$\text{Tensile strength} = \frac{F_u}{A} \quad \dots(4)$$

โดยที่

$F_u$  = แรงดึงสูงสุด (N)

$A$  = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบ ( $\text{mm}^2$ )

**ความสามารถในการยืดจนขาด (Elongation at break)**

$$\text{Elongation at break (\%)} = \frac{L-L_0}{L_0} \times 100 \quad \dots(5)$$

โดยที่

$L$  = ความยาวระหว่างขีดบนชิ้นทดสอบเมื่อยืดจนขาด (mm)

$L_0$  = ความยาวระหว่างขีดบนชิ้นทดสอบก่อนทำการยืด

#### 5.5.8 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ

1. การตรวจวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของแป้งแต่ละชนิดที่ฝังตัวอยู่ในแผ่นยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ ด้วยเครื่อง ฟูเรียทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR) ทำการทดสอบโดยนำน้ำยางเทลงในเพลต (Plate) ประมาณ 1 ซ้อนโต๊ะ ฉีดน้ำกลั่นลงไปเล็กน้อยเพื่อให้น้ำยางกระจายตัวหลังจากนั้นนำไปอบให้แห้งค่อย ๆ ลอกแผ่นยางออก

มาแล้วนำติดกับตัวประกอบแม่พิมพ์โดยใช้สก็อตเทปแปะติดแผ่นยางกับแม่พิมพ์ก่อนนำเข้าเครื่อง FTIR โดยใช้เลขคลื่นตั้งแต่ 4000-400  $\text{cm}^{-1}$

2. การทดสอบสมบัติการบวมพอง (Swelling Behavior) การทดสอบหาค่าความต้านทานการบวมพองของแผ่นยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ ในโทลูอีน (Toluene) ทดสอบโดยนำแผ่นยางชิ้นทดสอบมาตัดให้ได้ขนาด 1×1 เซนติเมตร แล้วนำไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง หลังจากนั้น นำชิ้นทดสอบไปแช่ลงในโทลูอีน เป็นระยะเวลา 30 นาที 1 ชั่วโมง 2, 4, 8, 12, 24, 78 และ 120 ชั่วโมง ตามลำดับ โดยนำชิ้นทดสอบออกมาชั่งน้ำหนักตามเวลาดังกล่าวอีกครั้ง ซึ่งจะคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การบวมพอง (Swelling, %) และความหนาแน่นการเชื่อมโยง (Crosslink density) ดังสมการที่ 6 และ 7 ตามลำดับ

$$\text{Swelling (\%)} = \frac{(W_i - W_0)}{W_0} \times 100 \quad \dots(6)$$

$$\text{Crosslink density} = \frac{1}{\text{Swelling (\%)}} \quad \dots(7)$$

โดยที่

$W_i$  = น้ำหนักชิ้นทดสอบหลังแช่โทลูอีน (กรัม)

$W_0$  = น้ำหนักของชิ้นทดสอบก่อนแช่โทลูอีน (กรัม)

3. สมบัติการดูดซับน้ำ (Water Absorption) ของแผ่นยางวัลคาไนซ์ หลังจากทำการฟุ้งที่ระยะเวลา 10, 20 และ 30 วัน ทดสอบโดยการนำแผ่นยางที่ฟุ้งดินเสร็จแล้วมาตัดให้ได้ขนาด 1×1 เซนติเมตร นำไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง หลังจากนั้นนำชิ้นทดสอบแช่ลงในน้ำกลั่น ที่ระยะเวลา 24, 48, 72, 96 และ 120 ชั่วโมง ตามลำดับ แล้วนำชิ้นทดสอบออกมาชั่งน้ำหนักตามระยะเวลาดังกล่าวอีกครั้ง ซึ่งจะคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ Water Absorption (%) โดยคำนวณตามสมการที่ 3.8 เพื่อตรวจสอบอัตราการย่อยสลายของแผ่นยางวัลคาไนซ์หลังฝังลงในดิน

$$\text{Water Absorption (\%)} = \frac{(W_i - W_0)}{W_0} \times 100 \quad \dots(8)$$

โดยที่

$W_i$  = น้ำหนักชิ้นทดสอบหลังแช่น้ำกลั่น (กรัม)

$W_0$  = น้ำหนักของชิ้นทดสอบก่อนแช่น้ำกลั่น (กรัม)

### 5.5.9 การทดสอบปริมาณโปรตีนจากแบคทีเรีย

วิธีการวิเคราะห์หาโปรตีนด้วยวิธีเจลดาล์ (Kjeldahl Method) มีขั้นตอนดังนี้คือ

1. ชั่งยงน้ำหนักยงแน่นอน 0.1 กรัมใส่ใน Micro Kjeldahl Flash เติมสารเร่งปฏิกิริยาซึ่งประกอบด้วย คอปเปอร์ซัลเฟต (Copper Sulfate) และ โซเดียมซัลเฟต (Sodium Sulfate) ในอัตราส่วนโดยปริมาตร 1:20 หรือน้ำหนัก 0.65 กรัม ผสมกับกรดซัลฟูริก 2.5 มิลลิลิตร
2. ให้ความร้อนจนกระทั่งสารละลายเป็นสีเขียว (หรือไม่มีสี) ใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง และต้องไม่มีสีเหลืองอ่อน ๆ ปนเหลืออยู่
3. ตั้งทิ้งให้เย็นแล้วทำให้เจือจางด้วยน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร
4. เติมน้ำกลั่นลงในเครื่องกลั่นซึ่งเตรียมผ่านไอน้ำให้ร้อนไว้แล้ว 30 นาที ล้างภาชนะด้วยน้ำกลั่น 2-3 มิลลิลิตร ประมาณ 2-3 ครั้ง
5. นำขวดแก้วรูปชมพู่บรรจุกรดบอริก 10 มิลลิลิตร และสารละลายเมธิลเรด 2-3 หยด มารับสารที่กลั่นได้ (อย่าให้ปลายหลอดจุ่มลงในสารละลาย)
6. เติมน้ำกลั่น 67% NaOH 10 มิลลิลิตร ลงในเครื่องกลั่น แล้วล้างด้วยน้ำไม่เกิน 5 มิลลิลิตร
7. ปลอ่ยให้ไอน้ำเข้าเครื่องกลั่นสารเป็นเวลา 5 นาที
8. เลื่อนขวดแก้วรูปชมพู่รองรับสารที่กลั่น ให้ปลายหลอดอยู่เหนือสารละลายกลั่นต่อ 1 นาที แล้วใช้น้ำกลั่นฉีดล้างปลายหลอดแก้ว
9. นำสารละลายที่ได้ไปไตเตรตกับสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 0.01 N จนได้จุดยุติ สารละลายเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีม่วง
10. ทำ BLANK ตามวิธีทดสอบเดิมทุกอย่าง แต่ไม่ใส่สารตัวอย่าง

การคำนวณ นำปริมาณสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟูริกที่ใช้ในการไตเตรต ไปคำนวณหาปริมาณไนโตรเจน แล้วคูณกับ Kjeldahl factor ซึ่งค่าเฉลี่ยของไนโตรเจนในโปรตีนอยู่ที่ร้อยละ 16 ได้เป็นค่าโปรตีนหยาบ (Crude Protein)

$$\% \text{ ในโตรเจน (Total Nitrogen)} = \frac{(A-B) \times C \times 0.014 \times 100}{D} \dots(10)$$

$$\% \text{ Crude Protein} = \% \text{ Nitrogen} \times 6.25 \quad \dots(11)$$

โดยที่

A = มิลลิลิตรของสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟูริก 0.1 นอร์มอลที่  
ไตเตรทกับตัวอย่าง

B = มิลลิลิตรของสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟูริก 0.1 นอร์มอลที่  
ไตเตรทกับ Blank

C = ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟูริก

D = น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)

#### 5.5.10 การทดสอบสมบัติการย่อยสลายทางชีวภาพ

จะทดสอบโดยการแผ่ขยายวัลคาไนซ์ที่ตัดเป็นรูปดัมเบล ไปฝังไว้ในถุงพลาสติกสำหรับ  
ปลูกต้นไม้ที่มีดินบรรจุอยู่ โดยให้ความลึกประมาณ 5-7 เซนติเมตร เป็นระยะเวลา 10, 20 และ 30  
วันตามลำดับ โดยรดน้ำประมาณ 1,000 มิลลิลิตร สัปดาห์ละ 1 ครั้ง เพื่อให้ดินมีความชุ่มชื้น  
หลังจากนั้นเก็บชิ้นงานตามระยะเวลาที่กำหนด โดยนำชิ้นงานมาล้างน้ำให้สะอาดก่อน 1 ครั้ง แล้ว  
ล้างด้วยน้ำกลั่นอีก 1 ครั้ง เช็ดทำความสะอาดชิ้นงานให้แห้งแล้วนำชิ้นงานที่ได้ไปทดสอบตาม  
หัวข้อ 5.5.7 สมบัติเชิงกล 5.5.8 สมบัติทางกายภาพ และ 5.5.9 ปริมาณโปรตีนจากแบคทีเรียของ  
แผ่นขยายวัลคาไนซ์หลังฝังดิน

## 6. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการวิจัย

### 1. สมบัติของน้ำยางชั้น

นำน้ำยางชั้นชนิดแอมโมเนียสูง (HA-latex) มาทดสอบสมบัติต่าง ๆ ตามวิธีการทดลองในข้อที่ 3.5.4 ได้ผลการทดสอบดังต่อไปนี้

ตารางที่ 13 แสดงสมบัติของน้ำยางชั้นชนิดแอมโมเนียสูง

สมบัติ	HA-Latex
ปริมาณของแข็งทั้งหมด (%TSC)	68.69
ปริมาณเนื้อยางแห้งทั้งหมด (%DRC)	64.40

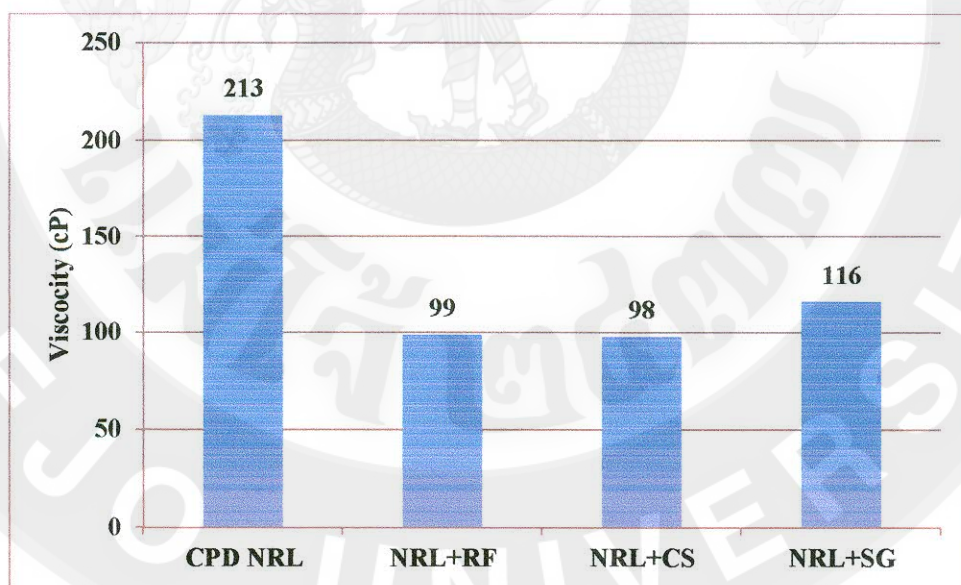
จากตารางที่ 13 พบว่าปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำยางชั้น ร่วมกับสารอื่นๆ ที่เป็นของแข็งและไม่ใช่มียางมีค่าสูงกว่าปริมาณเนื้อยางแห้งทั้งหมด ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการหา%DRC จะใช้กรดจับตัวเฉพาะเนื้อยางเท่านั้น ส่วนอื่นจะถูกกำจัดออกหมด จึงทำให้มีค่าต่ำกว่า %TSC

### 2. สมบัติของน้ำยางคอมพาวนด์

นำน้ำยางชั้นที่เติมสารเคมี และน้ำแป้งแต่ละชนิดที่ปริมาณ 15 phr มาทดสอบความหนืดด้วยเครื่อง Brookfield Viscometer โดยเลือกหัวเข็ม (Spindel) รุ่น LVI กำหนดความเร็วรอบในการหมุนของหัวเข็มที่, 20 รอบต่อนาที โดยบันทึกค่าความหนืดสูงสุด ได้ผลการทดลองภาพที่ 5

จากภาพที่ 5 พบว่าความหนืดของน้ำยางชั้นมีค่ามากกว่าน้ำยางคอมพาวนด์และน้ำยางผสมแป้งแต่ละชนิดที่ปริมาณ 15 phr เนื่องจากการกระจายของอนุภาคยางในน้ำยางคงที่และสม่ำเสมอขณะที่ความหนืดของน้ำยางคอมพาวนด์ และน้ำยางผสมแป้งแต่ละชนิดมีค่าความหนืดต่ำกว่าน้ำยางชั้น เนื่องจากในน้ำยางที่ผสมสารเคมีและในน้ำแป้งแต่ละชนิด ผสมสารเคมีที่ได้จากการทำดิสเพอร์ชันซึ่งมีการผสมน้ำและสารอื่น ๆ เข้าไปด้วย จึงส่งผลให้ค่าความหนืดที่ได้ต่ำกว่าน้ำยางชั้น เมื่อพิจารณาชนิดสารตัวเติมแป้ง พบว่าน้ำยางชั้นที่ผสมแป้งสาขามีค่าความหนืดสูงกว่าน้ำยางชั้นที่เติมแป้งข้าวเจ้า และแป้งมันสำปะหลัง ตามลำดับ เนื่องจากแป้งสาขามีเป็นแป้งที่มีคาร์โบไฮเดรตที่บริสุทธิ์และสูงที่สุดในบรรดาคาร์โบไฮเดรตที่ได้จากธรรมชาติ และมีความเหนียวสูงสุด (นิธิยรัตน์ และพิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์, 2556) โดยแป้งสาขามีปริมาณอะไมโลส (55-75%) ที่สูงกว่าแป้งข้าวเจ้า (25%) และแป้งมันสำปะหลัง (28%) จึงทำให้มีความสามารถในการดูดซับน้ำและ

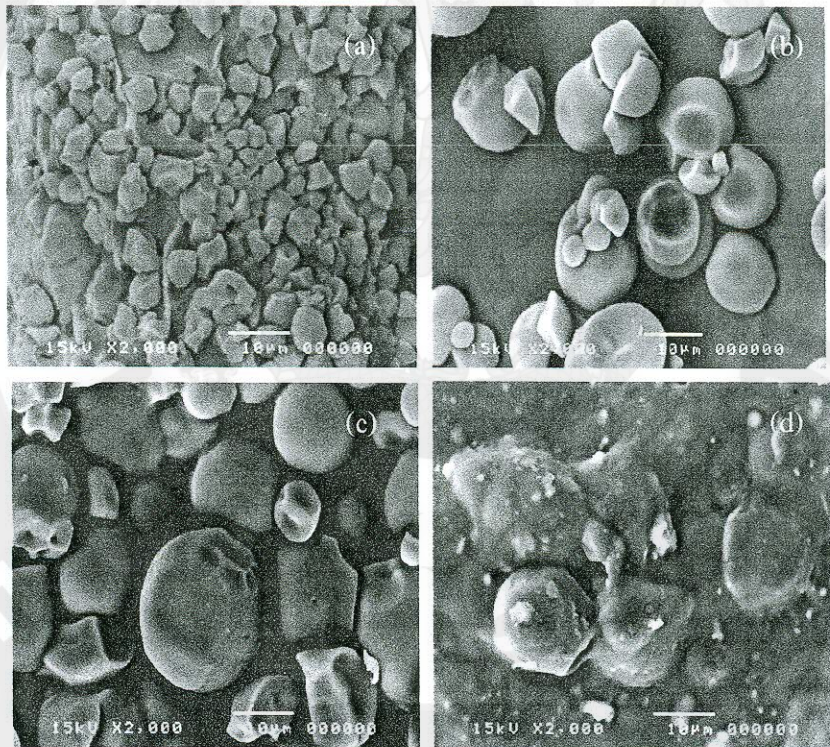
การพองตัวของสูงกว่าเม็ดแป้งข้าวเจ้า และเม็ดแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งขณะเตรียมดิสเพอร์ชันแป้งสาคุ เม็ดแป้งสาคุจะแตกจากการได้รับแรงเฉือนจากบอลมิล พันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุล อะไมโลสและอะไมโลเพคตินที่อัดแน่นอยู่ในเม็ดแป้งถูกทำลาย ทำให้เกิดหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระจำนวนมาก โมเลกุลของน้ำจะเข้าจับกับหมู่ไฮดรอกซิลที่อิสระนี้ เม็ดแป้งสาคุเกิดการพองตัวขึ้น โมเลกุลบางส่วนของแป้งจึงหลุดออกมา ความหนืดของน้ำยางจึงสูงขึ้น (S. Wattanachant, et al. 2002) เมื่อพิจารณาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเม็ดแป้งดิบแต่ละชนิดจากภาพที่ 6 พบว่าขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งดิบมีผลต่อค่าความหนืดของน้ำยาง โดยพบว่าเม็ดแป้งสาคุเมื่อทำการดิสเพอร์ชันจะมีลักษณะขุ่นหนืดเมื่อนำไปผสมกับน้ำยางจึงเข้ากับน้ำยางได้ดี ค่าความหนืดจึงสูงขึ้น ส่วนเม็ดแป้งข้าวเจ้ามีขนาดอนุภาคเล็กกว่าเม็ดแป้งมันสำปะหลังจึงทำให้สามารถผสมเข้ากับน้ำยางได้ดีกว่าเม็ดแป้งมันสำปะหลัง ความหนืดของน้ำยางผสมแป้งข้าวเจ้าจึงสูงกว่าน้ำยางผสมแป้งมันสำปะหลัง และนอกจากนี้อาจเป็นผลเนื่องจากในกระบวนการเตรียมสารแขวนลอย (Suspension) แป้งข้าวเจ้าและแป้งมันสำปะหลังนั้นให้ความร้อนไม่ถึงอุณหภูมิการเกิดเจลลาตินไนซ์ (แป้งข้าวเจ้า 72.2 °C, แป้งมันสำปะหลัง 70 °C) ทำให้ไม่เกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างแป้งและยางซึ่งเม็ดแป้งไม่สามารถดูดซับน้ำ เม็ดแป้งจึงไม่เกิดการพองตัว การเจลลาตินไนซ์จึงไม่สมบูรณ์ (Azura *et al.*, 2012)



ภาพที่ 5 ความหนืดของน้ำยางคอมพาวนด์

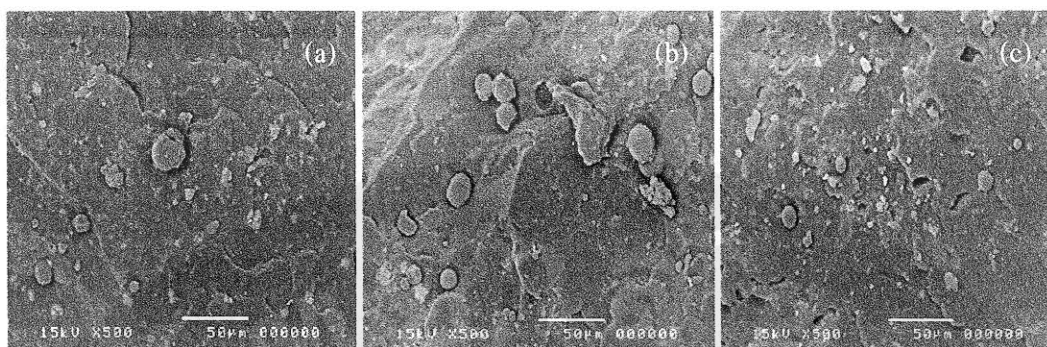
3. ลัทธิฐานวิทยา

ผลการวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างของเม็ดแป้งข้าวเจ้า แป้งมันสำปะหลัง และเม็ดแป้งสาकु ภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า และค่าความต่างศักย์เท่ากับ 15 kV พบว่าเม็ดแป้งข้าวเจ้ามีลักษณะรูปร่างเหลี่ยม มีรอยตัด ดังแสดงในภาพที่ 6(a) ส่วนเม็ดแป้งมันสำปะหลังมีลักษณะรูปร่างกลม และส่วนปลายด้านหนึ่งจะมีลักษณะเว้าและมีรอยตัด ดังแสดงในภาพที่ 6(b) และเม็ดแป้งสาकुจะมีรูปร่างกลมและส่วนปลายอีกด้านมีลักษณะเหมือนรอยตัดดังแสดงในภาพที่ 6(c) นอกจากนี้พบว่ามีเม็ดแป้งสาकुมีขนาดใหญ่กว่า (ประมาณ 10-25  $\mu\text{m}$ ) เม็ดแป้งข้าวเจ้า (ประมาณ 5-10  $\mu\text{m}$ ) แป้งมันสำปะหลัง(ประมาณ 5-15  $\mu\text{m}$ ) และเม็ดแป้งสาकु Dispersion (5-10  $\mu\text{m}$ ) ตามลำดับ



ภาพที่ 6 ลักษณะรูปร่างของเม็ดแป้งดิบ (a) แป้งข้าวเจ้า (b) แป้งมันสำปะหลัง (c) แป้งสาकु (d) แป้งสาकुดิสเพอร์ชัน เมื่อส่องภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า





ภาพที่ 7 การฝังตัวของอนุภาคเม็ดแข็งและการกระจายตัวในยางของ (a) แป้งข้าวเจ้า (b) แป้งมันสำปะหลัง (c) แป้งสาकु เมื่อส่องภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 500 เท่า

จากภาพที่ 7 การวิเคราะห์การฝังตัวของอนุภาคเม็ดแข็งและการกระจายตัวในยางของแป้งแต่ละชนิดเพื่อดูลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่นยางวัลคาไนซ์ และความเข้ากันได้ของน้ำยางกับแป้งแต่ละชนิด พบว่าแผ่นยางธรรมชาติที่ผสมแป้งสาकुนั้น การฝังตัวของอนุภาคเม็ดแข็งมีความสม่ำเสมอ กระจายตัวน้ำยางธรรมชาติได้ดีกว่าแผ่นยางที่ผสมแป้งข้าวเจ้าและแป้งมันสำปะหลัง ดังแสดงในภาพที่ 7(a) และ 7(b) ตามลำดับ เนื่องมาจากเม็ดแป้งสาकुถูกเตรียมโดยการทำดิสเพอร์ชัน และมีขนาดอนุภาคที่เล็กลง ซึ่งในกระบวนการทำดิสเพอร์ชันนั้น เม็ดแป้งสาकुได้รับความร้อนและแรงเฉือนจากบอลมิล ได้เป็นดิสเพอร์ชันแป้งที่ขึ้น เมื่อนำไปผสมกับน้ำยางจึงสามารถเข้ากันได้ดีกับน้ำยาง อนุภาคของแป้งสาकुสามารถเข้าไปแทรกในอนุภาคของน้ำยางได้เกิดอันตรกิริยาที่ดีระหว่างอนุภาคทั้งสอง แต่แผ่นยางที่ผสมแป้งข้าวเจ้าและแป้งมันสำปะหลังนั้น จะสังเกตเห็นว่าการฝังตัวของอนุภาคเม็ดแข็งไม่สม่ำเสมอ จับกันเป็นก้อน เนื่องจากในกระบวนการเตรียมสารแขวนลอย (Suspension) แป้งนั้นให้ความร้อนไม่ถึงอุณหภูมิการเกิดเจลลาติไนซ์ (แป้งข้าวเจ้า 72.2 °C, แป้งมันสำปะหลัง 70 °C) ทำให้ไม่เกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างแป้งและยาง เม็ดแป้งไม่สามารถดูดซับน้ำ เม็ดแป้งจึงไม่เกิดการพองตัว และไม่เกิดการเจลลาติไนซ์ (Azura *et al.*, 2012) เมื่อนำไปผสมกับน้ำยางจึงส่งผลให้อนุภาคของเม็ดแป้งไม่สามารถเข้าไปแทรกและเกิดอันตรกิริยากับอนุภาคของน้ำยางได้

#### 4. สมบัติแรงดึง (Tensile Properties)

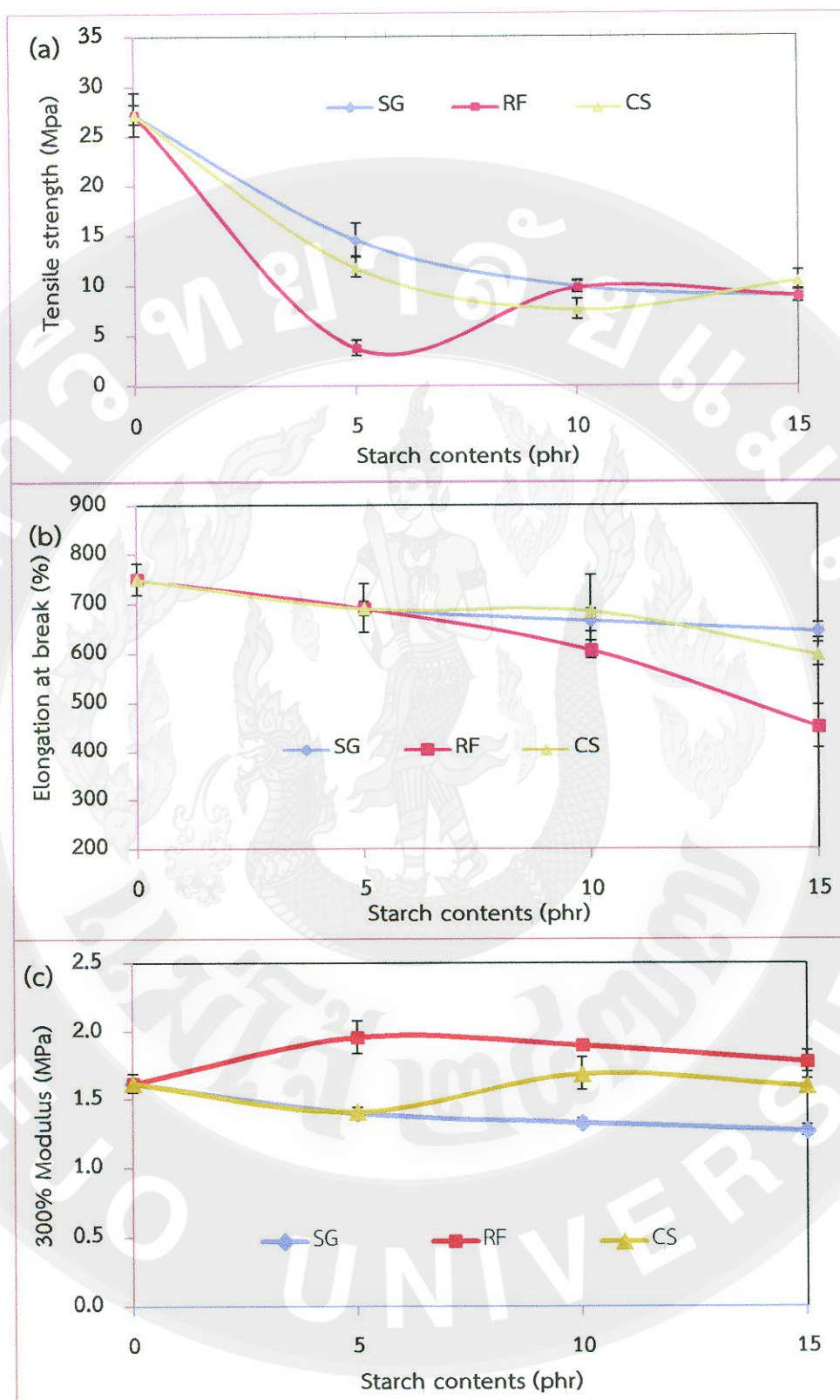
นำแผ่นยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมตัวเต็มแป้งข้าวเจ้า แป้งมันสำปะหลัง และแป้งสาकुที่ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr มาทดสอบสมบัติแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D 412 โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังหัวข้อที่ 5.5.7 ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 14

จากตารางที่ 14 นำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสูตรยางที่เติมสารตัวเติมแข็งชนิดต่าง ๆ ที่ปริมาณ 5, 10, และ 15 phr กับค่าความต้านทานแรงดึง มอดูลัสที่ระยะยืด 300% และระยะยืด ณ จุดขาด ได้ดังภาพที่ 8

จากตารางที่ 14 และภาพที่ 8(a) แสดงค่าความต้านทานแรงดึงของแผ่นยางวัลคาไนซ์ที่เติมแข็งชนิดต่าง ๆ ที่ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr พบว่า สูตรยางที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตมีค่าความต้านทานแรงดึงต่ำกว่าสูตรยางที่ไม่เติมสารตัวเติม ทั้งนี้เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติมประเภทไม่เสริมแรง (Non-reinforcing filler) ซึ่งมีโครงสร้างต่ำ อนุภาคมีขนาดใหญ่ โดยอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยาง ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยางลดลง ดังนั้นความแข็งแรงของเนื้อยางจึงลดลง ค่าความต้านทานแรงดึงจึงลดลงตามไปด้วย เมื่อพิจารณาชนิดของแข็งพบว่าสูตรยางที่เติมสารตัวเติมแข็งเสา (SG) จะให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงกว่าสูตรยางที่เติมสารตัวเติมแข็งมันสำปะหลัง (CS) และแข็งข้าวเจ้า (RF) ตามลำดับ เนื่องจากเสาสามารถผสมเข้ากันได้ดีกับน้ำยาง ในขณะที่เตรียมดีสเปอร์ชันอนุภาคของเม็ดเสาแตกมีขนาดเล็กถึง (5-10  $\mu\text{m}$ ) อนุภาคของเม็ดเสาสามารถเข้าไปแทรกในอนุภาคยางเกิดอันตรกิริยาได้ดีกับอนุภาคของยางจึงส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสามารถอ้างอิงได้จากลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแข็งในภาพที่ 6-7 แต่จะมีค่าความต้านทานแรงดึงต่ำกว่าสูตรยางที่ไม่เติมสารตัวเติม เนื่องจากสูตรยางที่ไม่เติมสารตัวเติมมีปริมาณเนื้อยางที่มากกว่า โมเลกุลของยางสามารถจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบสามารถตกผลึกขณะดึงยืดจึงส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูง หากพิจารณาปริมาณแข็ง พบว่าปริมาณที่ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดสำหรับสูตรยางที่เติมสารตัวเติมแข็งข้าวเจ้า (RF) คือ ที่ปริมาณ 10 phr สูตรยางที่เติมสารตัวเติมแข็งมันสำปะหลัง (CS) คือ ที่ปริมาณ 5 phr และสูตรยางที่เติมสารตัวเติมแข็งเสา (SG) คือ ที่ปริมาณ 5 phr สามารถอธิบายได้ว่า ปริมาณแข็งมีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึง เมื่อใส่แข็งในปริมาณที่มาก เองเกิดการคืนตัว ตกตะกอน จับตัวกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ไปขัดขวางการเคลื่อนไหวของสายโซ่โมเลกุลยาง โมเลกุลยางไม่สามารถจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบและตกผลึกขณะดึงยืดจึงส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงต่ำ แต่เมื่อใส่สารตัวเติมแข็งในปริมาณที่เหมาะสมจะส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงตามไปด้วย

ตารางที่ 14 สมบัติแรงดึงของแผ่นยางวัลคาไนซ์

สูตร	ปริมาณ (phr)	Tensile strength (MPa)	Modulus at 300% (MPa)	Elongation at break (%)
No Filler		27.23±2.18	1.62±0.07	750 ± 31
RF	5	3.79±0.70	1.96±0.12	691 ± 13
	10	9.82±0.57	1.9±0.04	608 ± 18
	15	8.97±0.64	1.78±0.08	452 ± 44
CS	5	11.84±0.18	1.41±0.03	691 ± 5
	10	7.63±2.35	1.69±0.12	686 ± 71
	15	10.47±0.85	1.6±0.05	598 ± 23
SG	5	14.59±1.66	1.4±0.04	691 ± 48
	10	9.96±0.53	1.33±0.03	667 ± 22
	15	8.92±0.07	1.27±0.04	646 ± 15
CaCO <sub>3</sub>	30	22.27±0.64	2.61±0.07	629±21



ภาพที่ 8 ผลของปริมาณแป้ง และชนิดของแป้งต่อสมบัติเชิงกล (a) ค่าความต้านทานแรงดึง (b)ค่าระยะยืด ณ จุดขาด และ (c) มอดูลัสที่ระยะยืด 300%

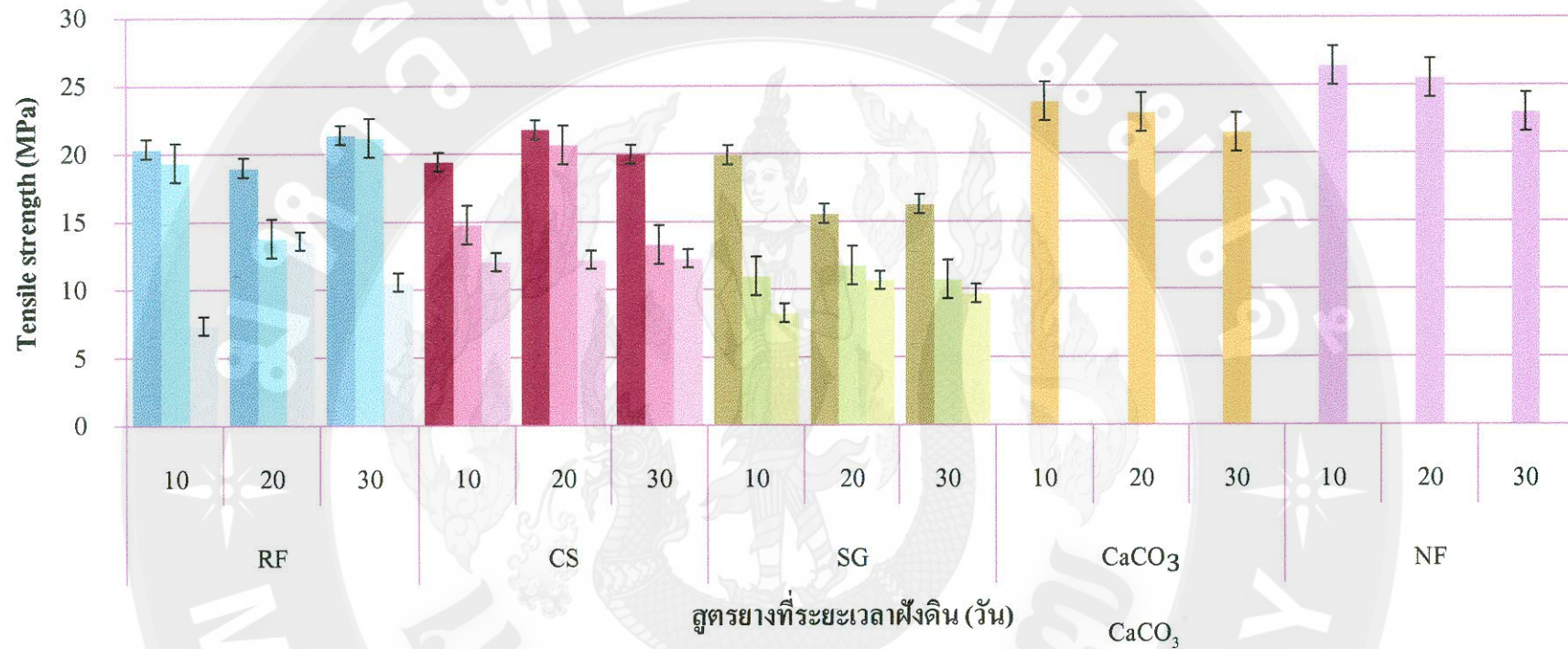
จากตารางที่ 14 และภาพที่ 8(b) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสูตรยางที่เติมแป้งชนิดต่าง ๆ ที่ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr กับระยะยืด ณ จุดขาด พบว่าค่าระยะยืด ณ จุดขาด ของยางวัลคาไนซ์ที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตมีค่าต่ำกว่าสูตรยางที่ไม่เติมสารตัวเติม ทั้งนี้เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติมประเภทไม่เสริมแรง อนุภาคของแคลเซียมเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยาง ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยางลดลง ความแข็งแรงของยางลดลง ซึ่งในทางตรงกันข้ามสูตรยางที่ไม่เติมสารตัวเติม มีปริมาณเนื้อยางที่สูงมากกว่าสูตรอื่น ๆ สายโซ่โมเลกุลยางจึงเกิดการเคลื่อนไหวได้ดีซึ่งส่งผลให้ระยะยืด ณ จุดขาดสูง และเมื่อพิจารณาชนิดของแป้งพบว่าสูตรยางที่ปริมาณแป้ง 5 phr ของสารตัวเติมแป้งทุกชนิดมีค่าสูงกว่าที่ปริมาณอื่น ๆ แสดงให้เห็นว่าเมื่อแป้งปริมาณน้อย สายโซ่โมเลกุลของยางเกิดการเคลื่อนไหวได้ดี ยางจึงมีระยะยืด ณ จุดขาดสูง แต่เมื่อปริมาณสารตัวเติมแป้งเพิ่มขึ้น พบว่าระยะยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มที่ลดลง เนื่องจากเมื่อปริมาณของสารตัวเติมแป้งเพิ่ม อนุภาคของแป้งจะไปขัดขวางการเคลื่อนไหวของสายโซ่โมเลกุลยาง เกิดความไม่สม่ำเสมอ จึงส่งผลให้ค่าระยะยืด ณ จุดขาดลดลง

จากตารางที่ 14 และภาพที่ 8(c) แสดงมอดูลัสที่ระยะยืด 300% ของแผ่นยางวัลคาไนซ์ พบว่ามอดูลัสที่ระยะยืด 300% มีแนวโน้มที่ลดลง โดยพบว่ามอดูลัสที่ระยะยืด 300% ของสูตรยางที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตมีค่าสูง เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติมมีขนาดอนุภาคขนาดใหญ่ และใส่ในปริมาณที่มาก คือ ที่ 30 phr ส่งผลให้ยางมีความแข็งเพิ่มขึ้น มอดูลัสที่ระยะยืด 300% จึงสูงตามไปด้วย สำหรับสูตรยางที่ไม่เติมสารตัวเติมพบว่ามอดูลัสที่ระยะยืด 300% มีค่าต่ำ เนื่องจากมีปริมาณเนื้อยางที่มาก โมเลกุลยางเกิดการเคลื่อนไหวได้ดี มีความยืดหยุ่น เมื่อพิจารณาชนิดของแป้งพบว่า สูตรยางที่เติมแป้งข้าวเจ้ามีมอดูลัสที่ระยะยืด 300 % มากที่สุด สูตรยางที่เติมแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาकुจะมีค่าลดลงตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของแป้งข้าวเจ้า (38%) มีปริมาณมากกว่า แป้งมันสำปะหลัง (37%) และแป้งสาकु (15-22%) ซึ่งความเป็นผลึกจะเพิ่มความแข็งแรงในพันธะคู่ของสายโซ่โมเลกุลเมื่อโมเลกุลมีการจัดเรียงชิดกันอย่างเป็นระเบียบ (Azura *et al.*, 2012) เมื่อพิจารณาปริมาณแป้ง พบว่าเมื่อปริมาณแป้งเพิ่มขึ้น มอดูลัสที่ระยะยืด 300% มีแนวโน้มที่ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากมีส่วนไม่ใช่อะไรเพิ่มมากขึ้น อนุภาคของแป้งเข้าไปแทรกในโมเลกุลยาง ความยืดหยุ่นของยางลดลง อนุภาคของแป้งไปขัดขวางการจัดเรียงตัวและการเคลื่อนไหวของสายโซ่โมเลกุลยาง ส่งผลให้เกิดความไม่สม่ำเสมอขึ้นในโครงสร้าง

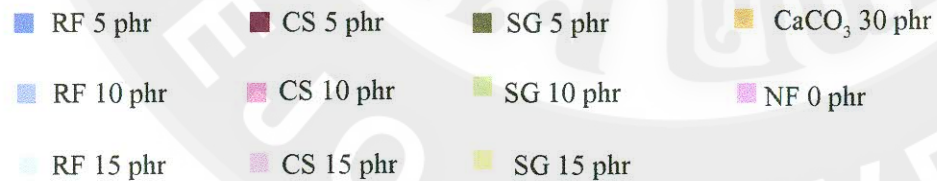
จากนั้นนำชิ้นทดสอบที่ชนิดและปริมาณแป้งต่าง ๆ ไปฝังดินตามวิธีการในหัวข้อที่ 3.5.10 แล้วนำมาทดสอบสมบัติแรงดึง ได้ผลดังตารางที่ 15

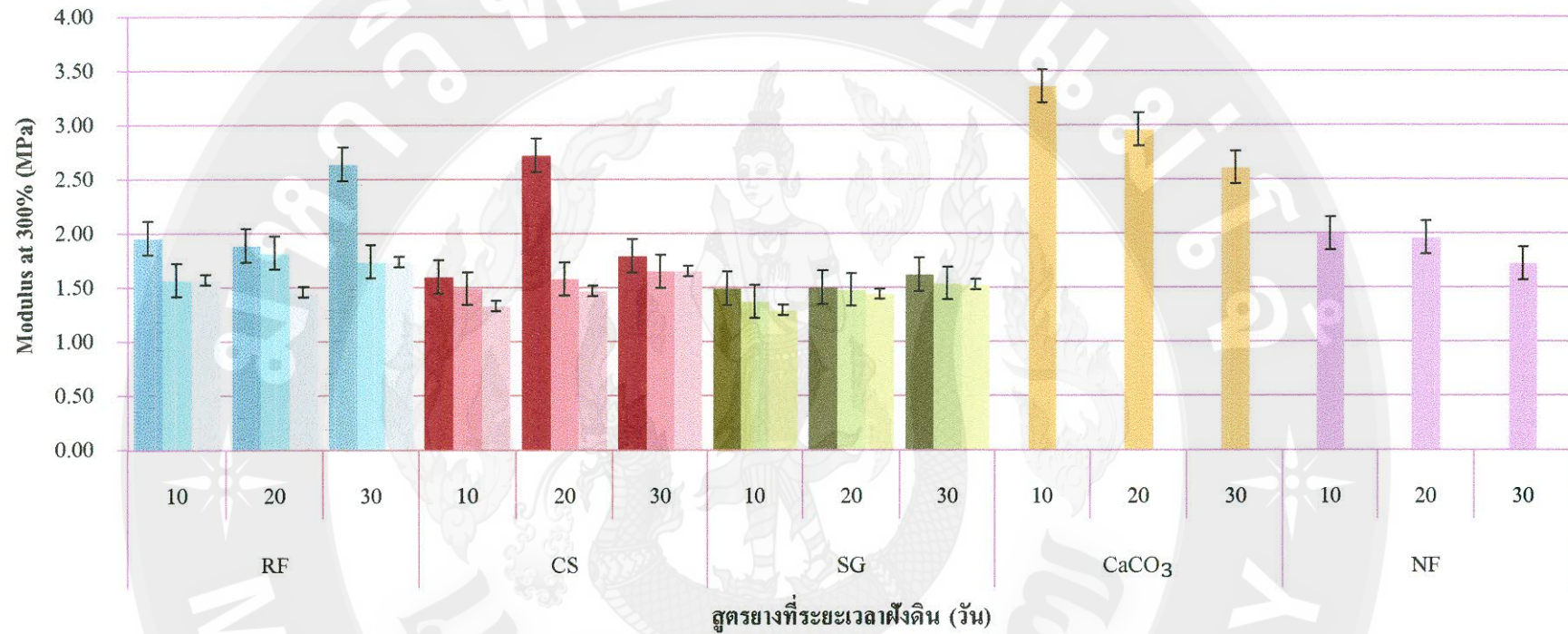
ตารางที่ 15 ความต้านทานแรงดึงของแผ่นยางวัลคาไนซ์หลังฝังดินระยะเวลา 10, 20 และ 30 วัน

สูตร	ระยะเวลา	10			20			30		
	ฝังดิน (วัน)	Tensile strength (MPa)	Modulus at 300% (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile strength (MPa)	Modulus at 300% (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile strength (MPa)	Modulus at 300% (MPa)	Elongation at break (%)
	ปริมาณ (phr)									
No Filler		26.40±1.50	1.96±0.05	733 ±14.00	25.50±1.70	2.00±0.03	73 ± 17.00	23.00±2.30	1.72±0.13	729 ± 1.00
RF	5	20.37±0.39	2.64±0.02	591 ± 8.15	18.99±3.03	1.96±0.08	612 ± 23.55	21.19±0.69	1.89±0.08	564 ± 30.38
	10	19.37±0.93	1.57±0.09	645 ± 25.98	13.79±3.30	1.82±0.29	655 ± 15.52	21.38±0.81	1.74±0.07	568 ± 20.29
	15	7.37±0.18	1.57±0.02	708 ± 7.75	13.59±5.31	1.46±0.24	672 ± 12.49	10.55±5.44	1.74±0.18	623 ± 33.20
CS	5	19.41±4.85	1.60±0.05	654 ± 18.01	21.76±1.99	2.72±0.05	619 ± 19.66	19.97±1.87	1.79±0.06	572 ± 27.80
	10	14.79±0.22	1.49±0.02	666 ± 18.01	20.66±12.23	1.58±1.72	628 ± 6.05	13.31±0.53	1.65±0.12	586 ± 39.06
	15	12.03±0.21	1.33±0.02	707 ± 39.01	12.20±0.10	1.47±0.02	699 ± 15.76	12.28±0.22	1.65±0.05	634 ± 5.51
SG	5	19.90±3.49	1.49±0.05	569 ± 16.49	15.57±0.53	1.48±0.08	594 ± 27.66	16.26±1.93	1.62±0.05	543 ± 29.45
	10	10.96±2.19	1.37±0.04	699 ± 58.90	11.77±0.57	1.50±0.05	603 ± 13.79	10.69±1.19	1.54±0.04	552 ± 5.83
	15	8.25±2.65	1.29±0.06	730 ± 12.09	10.66±0.62	1.44±0.06	632 ± 15.41	9.68±1.26	1.53±0.03	636 ± 5.44
CaCO <sub>3</sub>	30	23.80±1.40	2.96±0.03	698 ±41.00	23.00±0.80	3.36±0.06	677 ± 10.00	21.50±1.90	2.61±0.10	662 ± 27.00

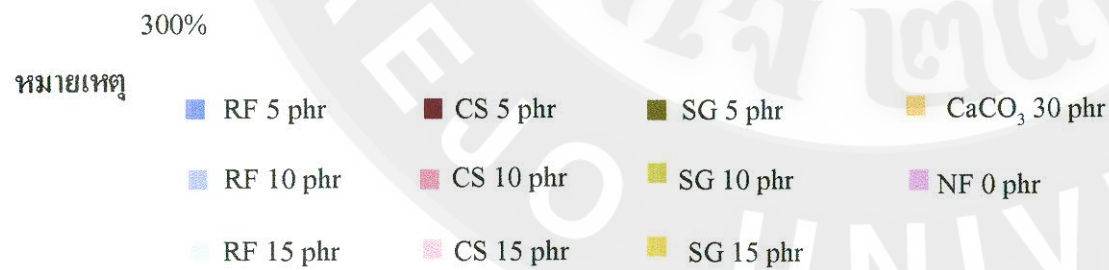


ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างสูตรยางที่เติมแป้งชนิดต่าง ๆ ที่ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr หลังฝังดินระยะเวลา 10, 20 และ 30 วัน กับค่าความต้านทานแรงดึง  
หมายเหตุ

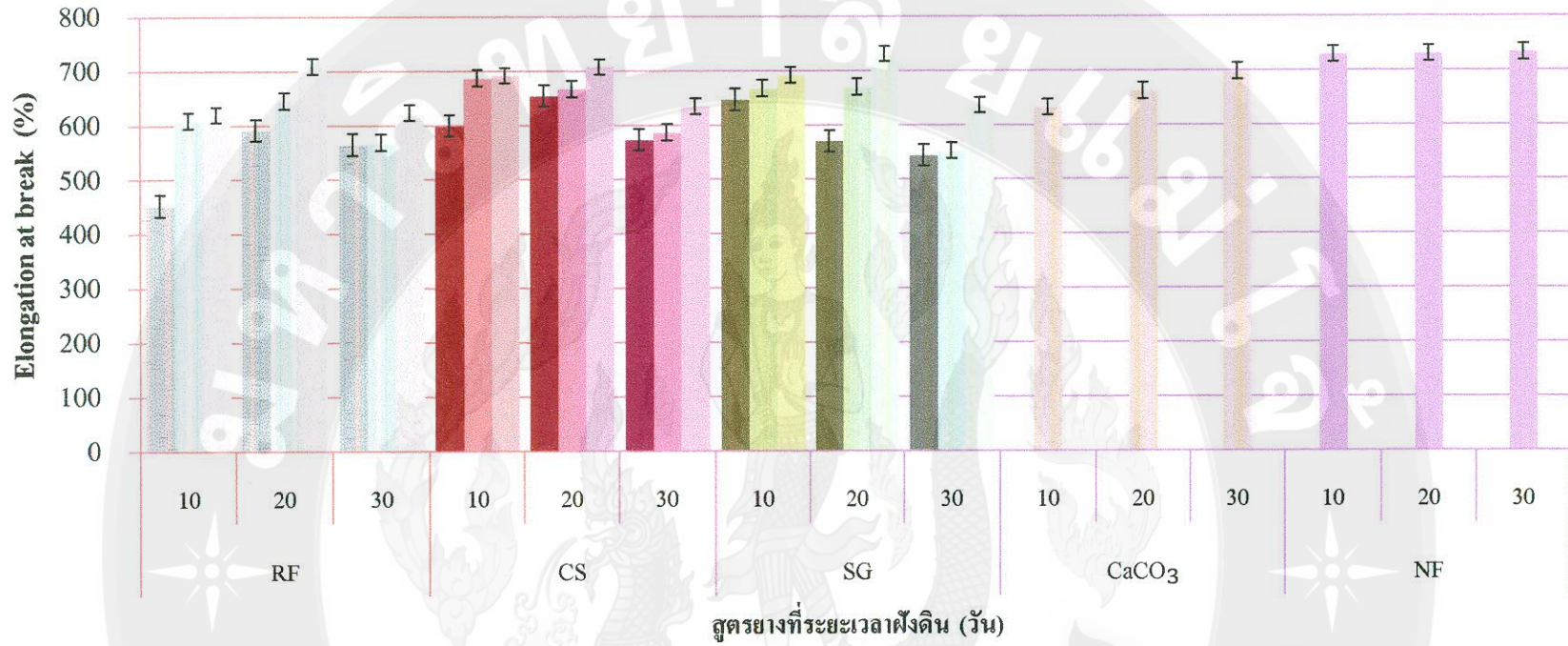




ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างสูตรยางที่เติมแป้งชนิดต่าง ๆ ที่ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr หลังฝังดินระยะเวลา 10, 20 และ 30 วัน กับค่ามอดูลัสที่ระยะยืด







ภาพที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างสูตรยางที่เติมแป้งชนิดต่าง ๆ ที่ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr หลังฝังดินระยะเวลา 10, 20 และ 30 วัน กับระยะยืด ณ จุดขาด

หมายเหตุ

- RF 5 phr
- CS 5 phr
- SG 5 phr
- CaCO<sub>3</sub> 30 phr
- RF 10 phr
- CS 10 phr
- SG 10 phr
- NF 0 phr
- RF 15 phr
- CS 15 phr
- SG 15 phr

จากภาพที่ 9 แสดงค่าความต้านทานแรงดึงของสูตรยางที่เติมสารตัวเติมแป้งข้าวเจ้า แป้งมันสำปะหลัง และแป้งสาकुที่ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr หลังฝังดินระยะเวลา 10, 20 และ 30 วัน พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงของสูตรยางที่ไม่เติมสารตัวเติมและสูตรยางที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนต มีค่าลดลงเมื่อฝังลงในดินเป็นระยะเวลานานขึ้น เนื่องจากยางเกิดการออกซิเดชัน มีการย่อยสลายของเนื้อยาง และพบว่าสูตรยางที่ไม่เติมสารตัวเติมมีค่าความต้านทานแรงดึงสูงกว่าสูตรยางที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนต ทั้งนี้เนื่องจากสูตรยางที่ไม่เติมสารตัวเติมมีปริมาณของเนื้อยางมากกว่า โมเลกุลของยางสามารถจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ เมื่อมีแรงมากระทำจึงตกผลึกขณะดึงยืด ค่าความต้านทานแรงดึงจึงสูงตามไปด้วย สำหรับสูตรยางที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตมีค่าต่ำกว่า เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติมประเภทไม่เสริมแรง อนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยาง ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของยางลดลง ดังนั้นความแข็งแรงของยางจึงลดลง ค่าความต้านทานแรงดึงจึงลดลงตามไปด้วย เมื่อพิจารณาชนิดของสารตัวเติมแป้ง พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงของสูตรยางที่เติมแป้งข้าวเจ้าและแป้งมันสำปะหลังใกล้เคียงกัน โดยพบว่าค่าความต้านทานแรงดึงของแผ่นยางวัลคาไนซ์ที่เติมสารตัวเติมแป้งสาकुหลังฝังดินมีค่าที่ลดลงมากที่สุด เนื่องจากแป้งสาकुเป็นคาร์โบไฮเดรตที่บริสุทธิ์ที่สุดในบรรดาคาร์โบไฮเดรตที่ได้จากธรรมชาติและมีปริมาณอะไมโลสสูงกว่าแป้งข้าวเจ้าและแป้งมันสำปะหลัง (นิธิยา รัตนาปนนท์ และพิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์. ม.ป.ป) โดยคาร์โบไฮเดรตเป็นสารอาหารเพื่อให้จุลินทรีย์เจริญเติบโตรวมไปถึงการแลกเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อให้เกิดกระบวนการย่อยสลายเกิดขึ้น (J.L., Guimaraes, et al. 2010) ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงของแผ่นยางวัลคาไนซ์ที่เติมแป้งสาकुลดลง สำหรับสูตรยางที่เติมแป้งข้าวเจ้าและแป้งมันสำปะหลังที่มีค่าความต้านทานแรงดึงที่ใกล้เคียงกันนั้น อาจเนื่องมาจากในกระบวนการเตรียมสารแขวนลอย (Suspension) แป้งข้าวเจ้าและแป้งมันสำปะหลังให้ความร้อนไม่ถึงอุณหภูมิการเกิดเจลลาติไนซ์ ทำให้ไม่เกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างแป้งและยางซึ่งเม็ดแป้งไม่สามารถดูดซับน้ำ เม็ดแป้งจึงไม่เกิดการพองตัว และไม่เกิดการเจลลาติไนซ์ (A.R. Azura, et al. 2012) จึงทำให้เม็ดแป้งเกิดการตกตะกอน อนุภาคของเม็ดแป้งเกิดการจับตัวเป็นก้อนบริเวณขอบแผ่นยาง เมื่อนำแผ่นยางวัลคาไนซ์มาตัดเป็นรูปดัมเบลทำให้ชิ้นงานที่ได้มีส่วนของเนื้อยางในปริมาณที่มากกว่าแผ่นยางวัลคาไนซ์ที่เติมสารตัวเติมแป้งสาकु เมื่อมีแรงมากระทำโครงสร้างอนุภาคยางจึงสามารถจัดเรียงตัวเกิดการตกผลึกขณะดึงยืดได้มาก แป้งข้าวเจ้า และแป้งมันสำปะหลังบางส่วนที่ตกตะกอนจึงทำหน้าที่เป็นตัว

ประสานรอยแตกที่เกิดขึ้นขณะทดสอบความต้านทานแรงดึง (M.H. Izmar, et al. 2012) เมื่อพิจารณาปริมาณแบริ่งที่เพิ่มขึ้น พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงของสูตรยางทุกสูตรมีค่าลดลง เนื่องจากเมื่อแบริ่งมากขึ้น มีส่วนที่ไม่ใช่ยางมากขึ้น ความแข็งแรงของยางลดลง ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงลดลงด้วย เมื่อฝังลงในดินเป็นระยะเวลาเพิ่มขึ้น พบว่าบางส่วนค่าความต้านทานแรงดึงสูงขึ้นได้แก่ สูตรยางที่เติมสารตัวเติมแข็งขาวจำพวกที่ปริมาณ 10 pbr หลังจากฝังดินเป็นเวลา 30 วัน เนื่องจากเมื่อเกิดการย่อยสลายจะเกิดการออกซิเดชัน ทำให้เกิดอนุมูลอิสระหรือ Radical โมเลกุลของยางจะสามารถกลับมาสร้างพันธะโควาเลนต์กันอีกครั้ง จึงทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงขึ้น (W. Stelte, et al. 2010) ส่วนค่าความต้านทานแรงดึงบางส่วนที่ลดลง อาจเนื่องมาจากเกิดการย่อยสลาย สายโซ่ของยางถูกตัดขาดโดยจุลินทรีย์ในดินจะช่วยย่อยสลาย ซึ่งแบริ่งเป็นพอลิเอทิลีนไฮดรอกไซด์ หากใส่เข้าไปในปริมาณน้อย (< 60%) แบริ่งจะเป็นแค่ตัวริเริ่มทำให้เกิดการย่อยสลาย (กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2553) จึงทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงของแผ่นยางวัลคาไนซ์ลดลงตามไปด้วย

จากภาพที่ 10 แสดงค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 300% ของสูตรยางที่เติมสารตัวเติมแข็งขาวจำพวกที่ปริมาณ 5, 10 และ 15 pbr หลังฝังดินระยะเวลา 10, 20 และ 30 วัน พบว่าสูตรยางทุกสูตรมีค่ามอดูลัสที่ระยะยืดที่ 300% เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับค่าก่อนฝังดิน เนื่องจากเมื่อเก็บยางไว้เป็นระยะเวลาที่นานขึ้นยางมีความแข็งแรงมากขึ้น เนื่องจากเกิดการออกซิเดชันกับออกซิเจนหรือ โอโซนที่มากจากน้ำที่อยู่ในดิน ประกอบกับในแบริ่งมีออกซิเจนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบ จึงเป็นผลทำให้เกิดการออกซิเดชันขึ้นได้ จึงส่งผลให้ค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 300% สูงตามไปด้วย หลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 10, 20 และ 30 วัน พบว่าค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 300% มีแนวโน้มลดลงเนื่องจากเมื่อฝังลงในดินเป็นระยะเวลาเพิ่มขึ้นเกิดการย่อยสลาย ความแข็งแรงของยางลดลง เมื่อพิจารณาปริมาณแบริ่งที่เพิ่มขึ้น ค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 300% มีค่าลดลง เนื่องจากเมื่อแบริ่งเพิ่มขึ้นมีส่วนที่ไม่ใช่ยางเพิ่มขึ้น ความแข็งแรงของยางลดลง เมื่อพิจารณาชนิดของแบริ่งหลังฝังดินระยะเวลา 10, 20 และ 30 วัน พบว่าแผ่นยางวัลคาไนซ์ที่เติมสารตัวเติมแข็งขาวจำพวกที่ปริมาณ 5, 10 และ 15 pbr มีค่าลดลงต่ำที่สุด ซึ่งค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากขณะคิสเพอร์ชันแบริ่งขาวจำพวกที่เติมแบริ่งขาวจำพวกที่ปริมาณ 5, 10 และ 15 pbr ทำให้โมเลกุลของน้ำแทรกเข้าไปในโมเลกุลยาง ปริมาณน้ำและแบริ่งเพิ่มขึ้น มีส่วนที่ไม่ใช่ยางเพิ่มมากขึ้น โมเลกุลของแบริ่งเข้าไปแทรกในโมเลกุลยาง ความแข็งแรงของยางลดลง ส่วนค่ามอดูลัสที่

ระยะยืด 300% ของสูตรยางที่เติมสารตัวเติม แป้งข้าวเจ้า และแป้งมันสำปะหลัง หลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 10, 20 และ 30 วัน พบว่า สูตรยางที่เติมสารตัวเติมแป้งข้าวเจ้าที่ปริมาณ 5 phr หลังจากฝัง 10 วันเป็น 20 วัน มีค่าลดลง เนื่องจากเมื่อฝังเกิดการย่อยสลาย สายโซ่โมเลกุลยางถูกทำลาย ความแข็งแรงของยางลดลง แต่เมื่อฝังครบ 30 วัน มีค่าสูงขึ้น เนื่องจากเมื่อเกิดการย่อยสลายจะเกิดออกซิเดชั่น ทำให้เกิดอนุมูลอิสระหรือ Radical ซึ่งโมเลกุลของยางจะสามารถกลับมาสร้างพันธะโควาเลนต์กันได้อีกครั้ง จึงทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงขึ้น (W. Stelte, et al. 2010) และสูตรยางที่เติมสารตัวเติมแป้งมันสำปะหลังที่ปริมาณ 5 phr หลังจากฝัง 10 วันเป็น 20 วัน มีค่าสูงขึ้น หลังจากฝังครบ 30 วัน มีค่าลดลง อาจเนื่องมาจากสาเหตุที่กล่าวมาข้างต้น

จากภาพที่ 11 แสดงระยะยืด ณ จุดขาดของสูตรยางที่เติมสารตัวเติมแป้งข้าวเจ้า แป้งมันสำปะหลัง และแป้งสาकुที่ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr หลังฝังดินที่ระยะเวลา 10, 20 และ 30 วัน เมื่อพิจารณาระยะเวลาในการฝังดินที่ 30 วัน พบว่าค่าระยะยืด ณ จุดขาดของยางที่เติมแป้งมีแนวโน้มลดลงทุกสูตร เนื่องจากจุลินทรีย์เข้าไปตัดสายโซ่โมเลกุลยาง แต่เมื่อพิจารณาระยะเวลาในการฝังดินที่ 20 วันนั้นค่าระยะยืด ณ จุดขาดมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอาจเนื่องมาจากเริ่มเกิดกระบวนการย่อยสลาย จุลินทรีย์เข้าไปทำลายสายโซ่โมเลกุลของยาง สายโซ่โมเลกุลยางยังสามารถเคลื่อนไหวได้ทำให้ค่าระยะยืด ณ จุดขาดเพิ่มสูงขึ้น ส่วนสูตรยางที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตค่าระยะยืด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการฝังดิน อาจเนื่องมาจากสาเหตุเดียวกับที่กล่าวมาข้างต้น ซึ่งอาจต้องใช้ระยะเวลาในการย่อยสลายมากกว่าสูตรยางที่เติมแป้ง (M.M. Afiq and A.R. Azura. 2013) นอกจากนี้เมื่อพิจารณาปริมาณแป้งแต่ละชนิดที่เพิ่มขึ้นในแต่ละสูตรพบว่า ค่าระยะยืด ณ จุดขาด สูงขึ้น เนื่องจากมีปริมาณอะไมโลสที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณแป้ง จึงทำให้มีปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลเพิ่มขึ้นสายโซ่อะไมโลสและอะโลเพคตินจึงกลับมาเชื่อมโยงกันได้มากขึ้น (T. Woggum, et al. 2014) ส่งผลทำให้ค่าระยะยืด ณ จุดขาดสูงขึ้นตามไปด้วย

และเมื่อพิจารณาอ้างอิงจากสมบัติการบวมพองหลังฝังดินของแผ่นยางวัลคาไนซ์ที่มีสารตัวเติมแป้งข้าวเจ้า แป้งมันสำปะหลัง และแป้งสาकुที่ปริมาณ 15 phr ที่ระยะเวลา 10, 20, และ 30 วัน ดังหัวข้อที่ 4.5.3 พบว่ามีเปอร์เซ็นต์การบวมพองเพิ่มขึ้น และความหนาแน่นการเชื่อมโยงลดลง ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับค่าระยะยืด ณ จุดขาด

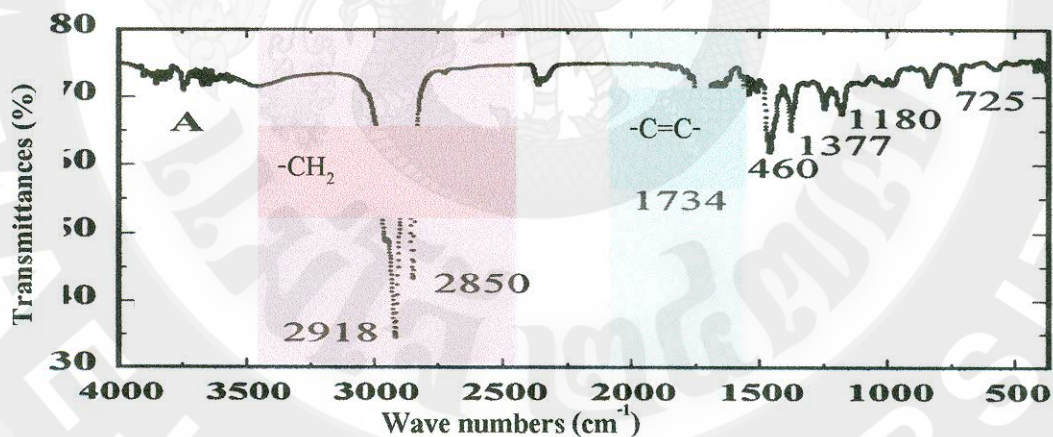
## 5. FTIR

จากการทดสอบวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันในน้ำยางวัลคาไนซ์ ดังวิธีการทดสอบในหัวข้อที่ 5.5.8 ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 16

ตารางที่ 16 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันในน้ำยางธรรมชาติ

Wave Number (cm <sup>-1</sup> )	Assignment
3000-2815	Methyl group -CH <sub>2</sub>
1645-1605	Vinyl group -C=C-

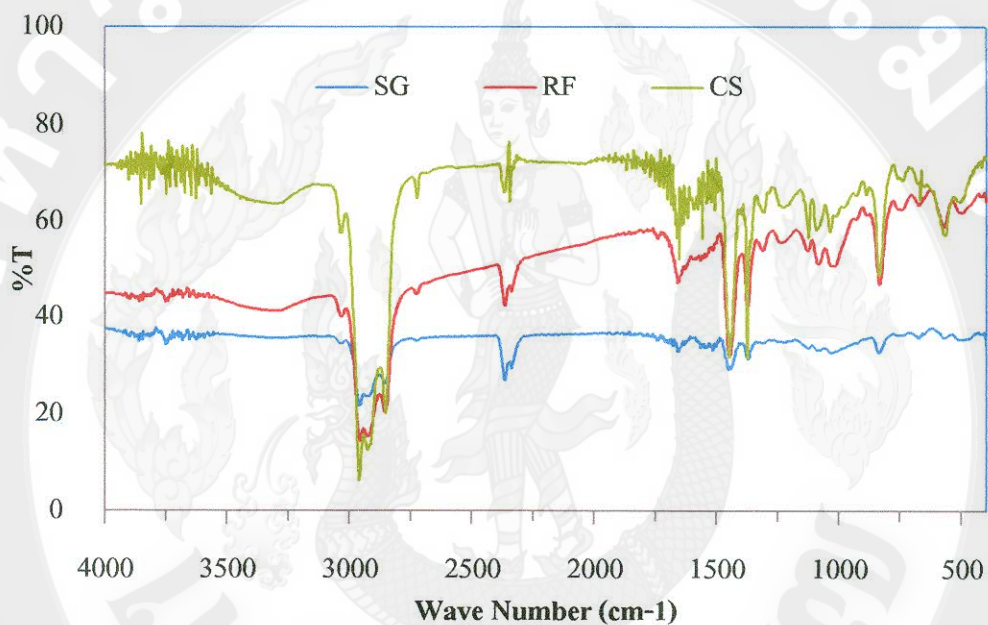
จากภาพที่ 12 แสดงสเปกตรัมของน้ำยางธรรมชาติโดยเลขคลื่นที่อยู่ในช่วง 3000-2500 cm<sup>-1</sup> เป็นการแสดงส่วนที่เป็นกิ่งก้านของหมู่ methyl (-CH<sub>2</sub>) ที่เป็นองค์ประกอบในสายโซ่หลักของยาง และเลขคลื่นที่อยู่ในช่วง 2000-1500 cm<sup>-1</sup> เป็นการแสดงหมู่ Vinyl group (-C=C-) ของพันธะคู่ของคาร์บอนในสายโซ่หลักของยาง (Kang *et al.*, 2000)



ภาพที่ 12 FTIR สเปกตรัมของน้ำยางธรรมชาติ (Kang *et al.*, 2000)

ตารางที่ 17 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันในน้ำยางวัลคาไนซ์

Wave Number ( $\text{cm}^{-1}$ )	Assignment
3200-3000	Hydroxyl group -OH
3000-2815	Methyl group $-\text{CH}_2$
1645-1605	Vinyl group $-\text{C}=\text{C}-$
1190-950	Carbon-Oxygen C-O

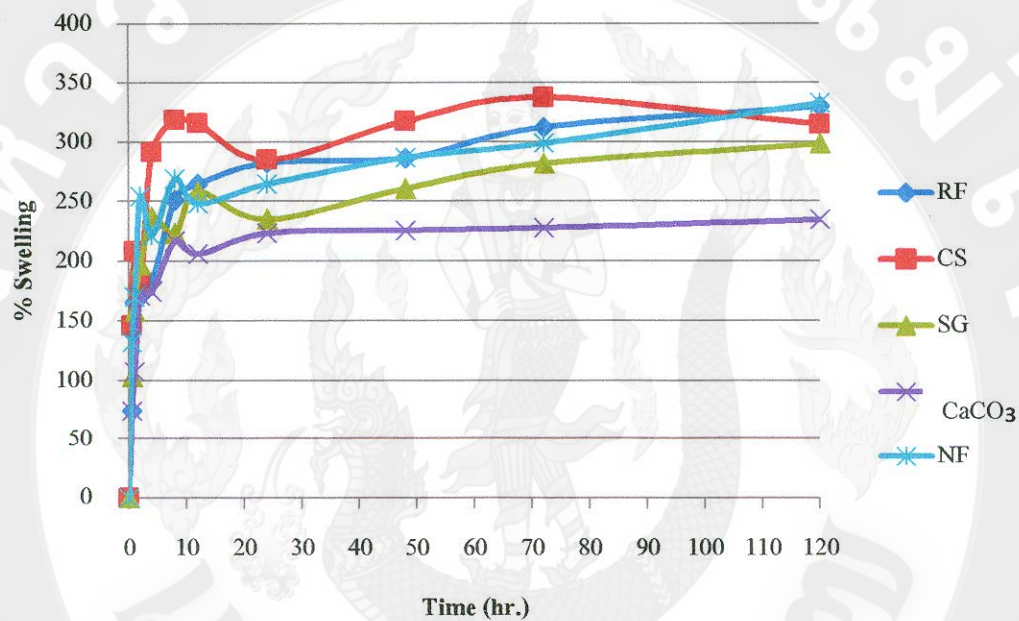


ภาพที่ 13 FTIR สเปกตรัมของน้ำยางวัลคาไนซ์ที่เติมสารตัวเติมแข็งชนิดต่างๆ

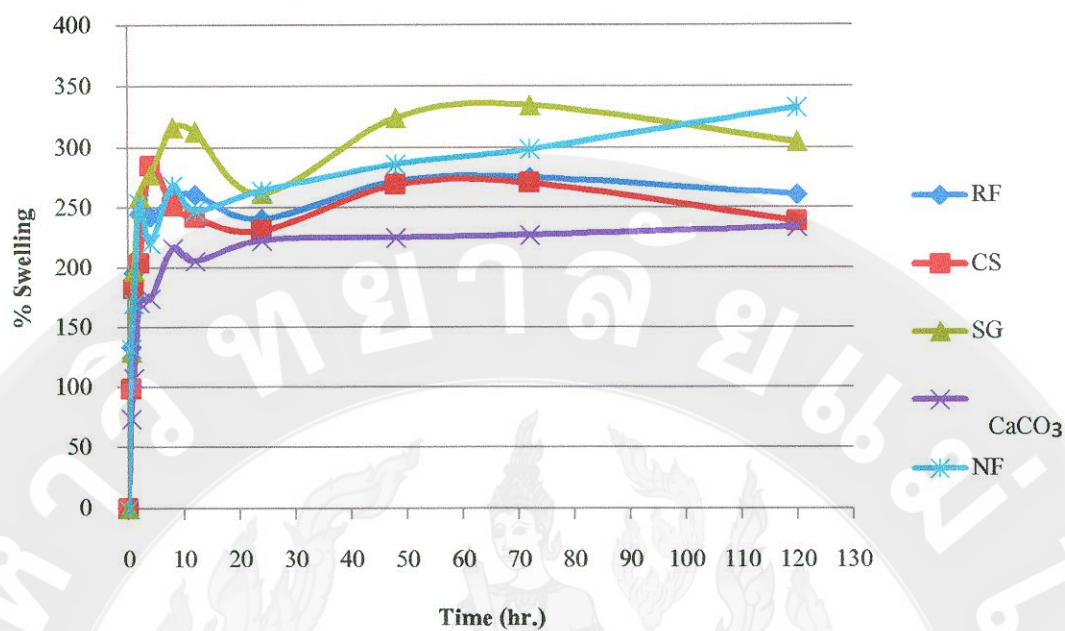
จากภาพที่ 13 แสดงสเปกตรัมของน้ำยางวัลคาไนซ์ที่เติมแข็งชนิดต่างๆ พบว่าประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบในน้ำยางและแข็ง โดยเลขคลื่นที่อยู่ในช่วง  $3200-3000 \text{ cm}^{-1}$  เป็นการแสดงของหมู่ไฮดรอกซิลหรือแอลกอฮอล์ ซึ่งเป็นองค์ประกอบของแข็ง เลขคลื่นที่อยู่ในช่วง  $3000-2815 \text{ cm}^{-1}$  เป็นการแสดงส่วนที่เป็นกิ่งก้านของหมู่ methyl ( $-\text{CH}_2$ ) ที่เป็นองค์ประกอบในสายโซ่หลักของยาง เลขคลื่นที่อยู่ในช่วง  $1645-1605 \text{ cm}^{-1}$  เป็นการแสดงหมู่ Vinyl group ( $-\text{C}=\text{C}-$ ) ของพันธะคู่ของคาร์บอนในสายโซ่หลักของยาง และเลขคลื่นที่อยู่ในช่วง  $1190-950 \text{ cm}^{-1}$  เป็นการแสดงส่วนของพันธะ Carbon-Oxygen ( $-\text{C}-\text{O}-$ ) ที่อยู่ในแข็ง ซึ่งจากช่วงคลื่นที่เกิดขึ้นทั้งหมดบ่งบอกว่าน้ำยางวัลคาไนซ์ประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชันที่มีองค์ประกอบของน้ำยาง และแข็ง

## 6. สมบัติการบวมพองก่อนฝังดิน

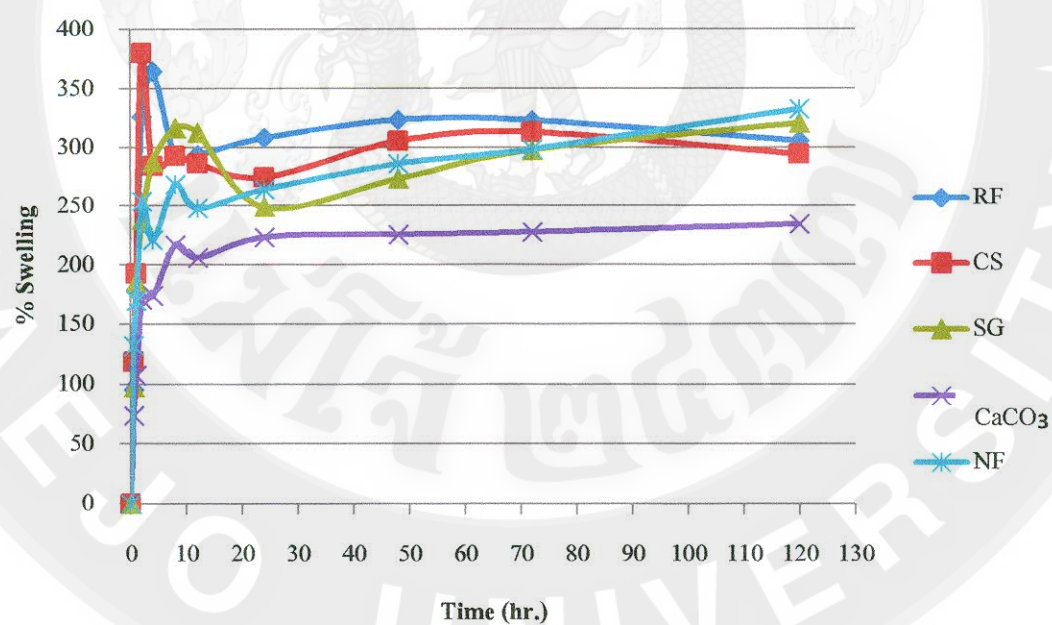
นำแผ่นยางวัลคาไนซ์ที่มีสารตัวเติมแป้งข้าวเจ้า แป้งมันสำปะหลัง และแป้งสาकुที่ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr มาทดสอบสมบัติการบวมพองตามมาตรฐาน ASTM D471-98 ดังวิธีการทดสอบในหัวข้อที่ 5.5.8 ได้ผลการทดลองดังภาพที่ 14-19



ภาพที่ 14 เปอร์เซ็นต์การบวมพองของแผ่นยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติผสมแป้งชนิดต่าง ๆ ที่ปริมาณ 5 phr

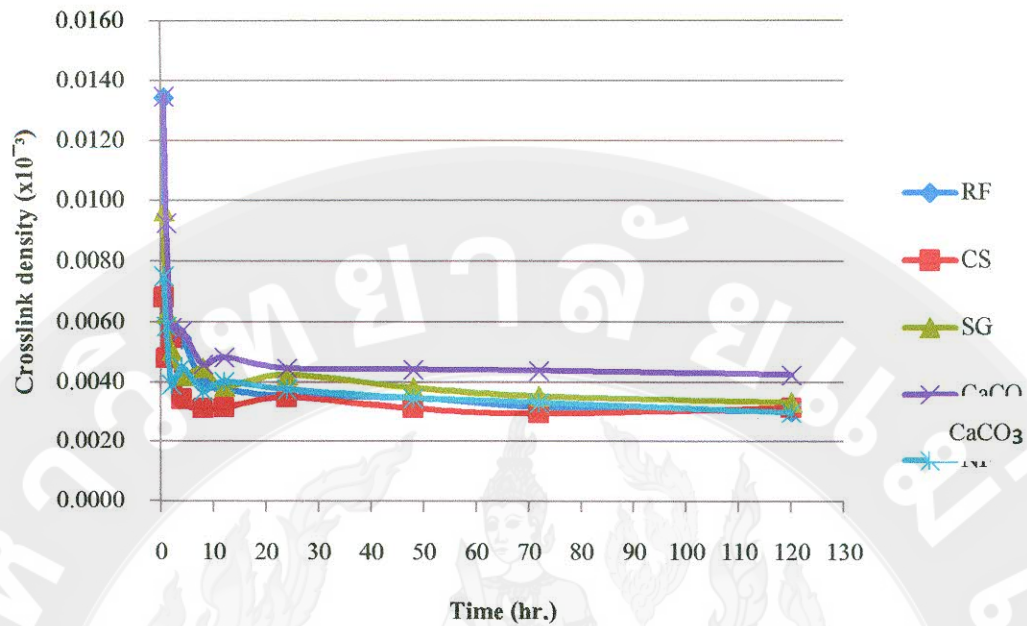


ภาพที่ 15 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การบวมพองของแผ่นยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติผสมแป้งชนิดต่าง ๆ ที่ปริมาณ 10 phr

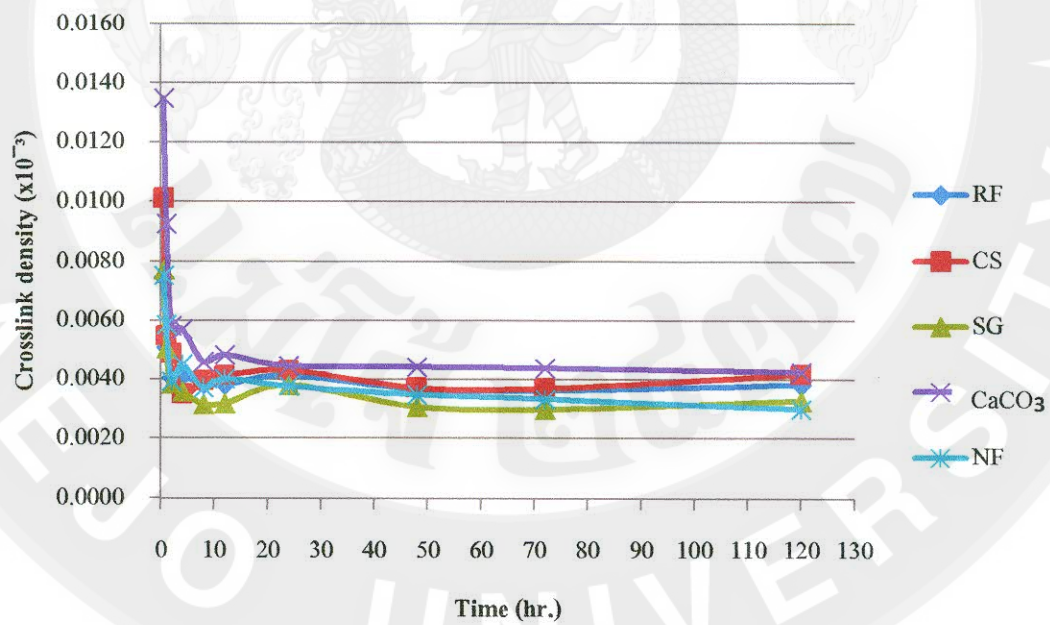


ภาพที่ 16 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การบวมพองของแผ่นยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติผสมแป้งชนิดต่าง ๆ ที่ปริมาณ 15 phr

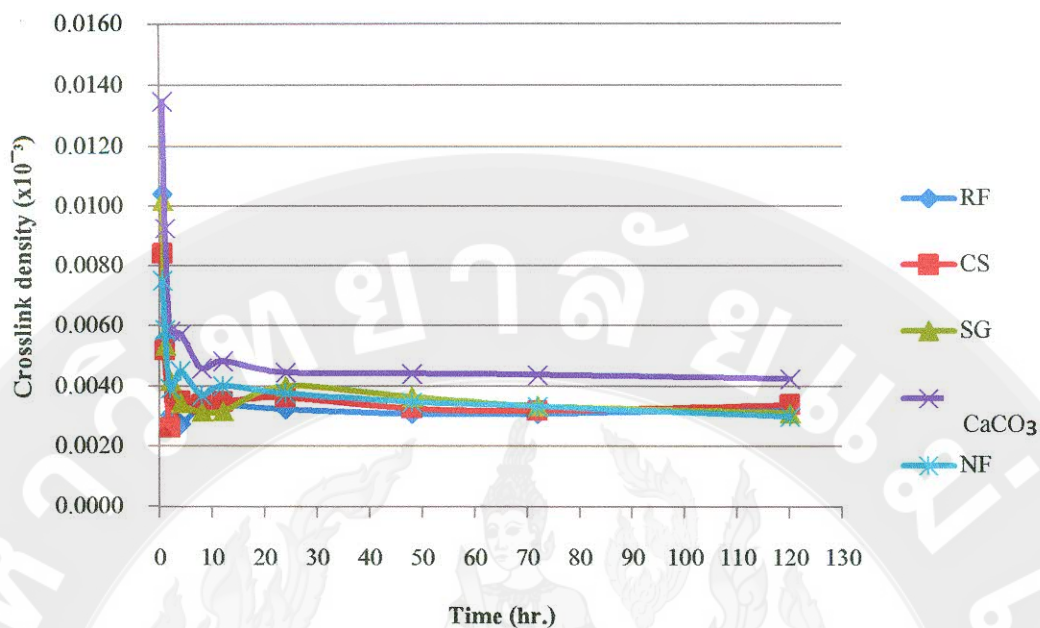




ภาพที่ 17 เปรียบเทียบความหนาแน่นการเชื่อมโยงของแผ่นยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจาก  
น้ำยางธรรมชาติผสมแป้งชนิดต่าง ๆ ที่ปริมาณ 5 phr



ภาพที่ 18 เปรียบเทียบความหนาแน่นการเชื่อมโยงของแผ่นยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจาก  
น้ำยางธรรมชาติผสมแป้งชนิดต่าง ๆ ที่ปริมาณ 10 phr



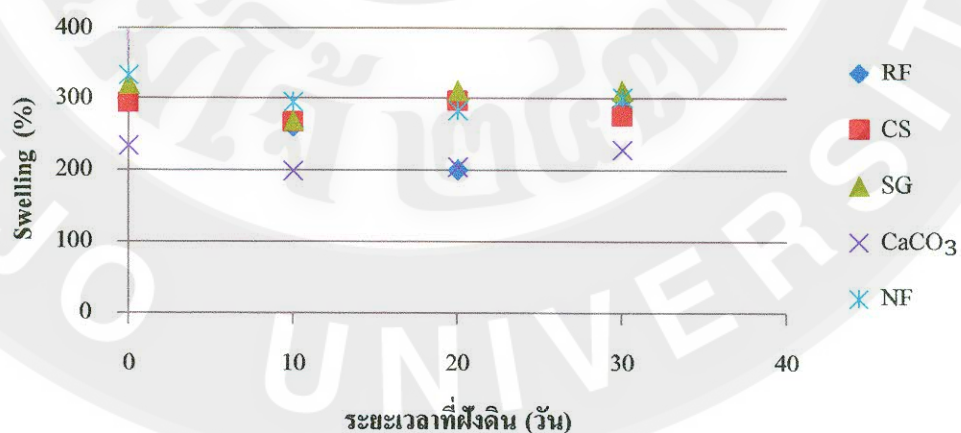
ภาพที่ 19 เปรียบเทียบความหนาแน่นการเชื่อมโยงของแผ่นยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติผสมแป้งชนิดต่าง ๆ ที่ปริมาณ 15 phr

จากภาพที่ 14-16 พบว่าเปอร์เซ็นต์การบวมพองของแผ่นยางที่ผสมสารตัวเติมแป้งข้าวเจ้า แป้งมันสำปะหลัง และแป้งสาคู มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลา เป็นผลเนื่องจากยางธรรมชาติและโพลูอีนมีค่าความสามารถในการละลาย (Solubility) ใกล้เคียงกัน นั่นหมายความว่ายางและโพลูอีนสามารถละลายเข้ากันได้ดี แผ่นยางจึงดูดซับโพลูอีนได้มาก ส่งผลให้โพลูอีนสามารถแทรกตัวเข้าไประหว่างสายโซ่โมเลกุลยางได้ขณะที่ยางมีการขยายออกอย่างรวดเร็ว ซึ่งการบวมพองนี้เป็นตัวบ่งชี้ถึงความหนาแน่นการเชื่อมโยง กล่าวคือ ยางที่เกิดการบวมพองสูงจะมีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงต่ำ (พงษ์ธร แชน้อย และ ชาคริต สิริสิงห. 2550) และเมื่อเวลาการแช่แผ่นยางในโพลูอีนเพิ่มขึ้น (> 20 ชั่วโมง) พบว่าอัตราการบวมพองของแผ่นยางที่เติมสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่ปริมาณ 30 phr มีอัตราการบวมพองที่คงที่ ซึ่งเป็นผลจากการที่โมเลกุลยางอิมมัลชันด้วยโพลูอีน ส่วนอัตราการบวมพองของแผ่นยางที่เติมสารตัวเติมแป้งข้าวเจ้า แป้งมันสำปะหลัง และแป้งสาคูมีแนวโน้มเริ่มลดลงที่เวลา 40 ชั่วโมง เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น เนื่องจากแป้ง ข้าวเจ้า และแป้งมันสำปะหลังเกิดการคืนตัว โมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน และโมเลกุลของน้ำกลับมาเชื่อมต่อกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจน ทำให้แป้งเกิดเป็นผลึกใหม่หรือเกิดการตกตะกอน (Izmar, et al., 2012)

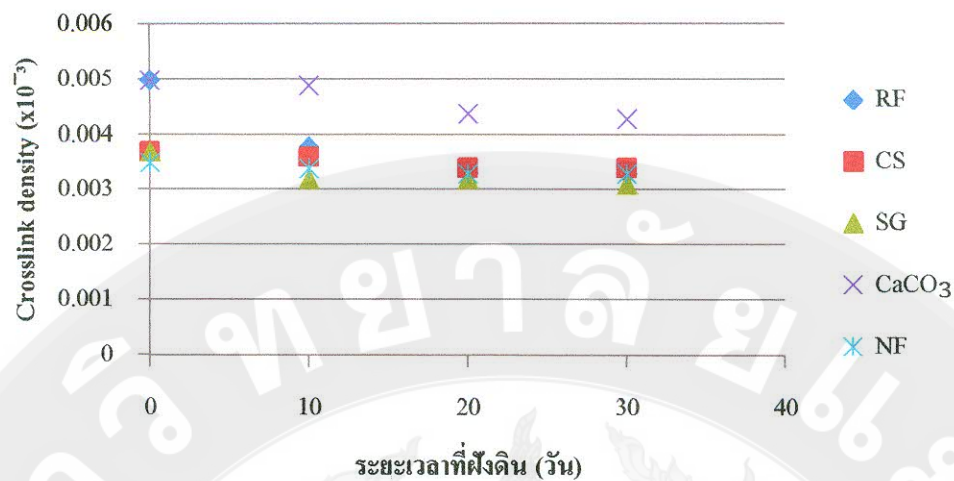
โมเลกุลของแป้งขัดขาวการแทรกซึมของโทลูอีนเข้าไปในเนื้อเยื่อ อัตราการบวมพองจึงมีค่าลดลง แต่ในทางตรงกันข้ามอัตราการบวมพองของแผ่นยางที่ไม่เติมสารตัวเติมมีอัตราการบวมพองที่เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น เนื่องจากพันธะการเชื่อมโยงของโมเลกุลยางไม่แข็งแรง โทลูอีนแทรกเข้าไประหว่างสายโซ่โมเลกุลยาง อัตราการบวมพองจึงเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาปริมาณสารตัวเติมแป้งที่เพิ่มมากขึ้น พบว่าอัตราการบวมพองของยางมีแนวโน้มที่ลดลง อาจเนื่องจากอนุภาคของแป้งที่ตกตะกอนและจับตัวกันเป็นก้อนไปขัดขวางการแทรกซึมของโทลูอีนเข้าไปในเนื้อเยื่อ อัตราการบวมพองจึงมีค่าลดลง และเมื่อพิจารณาความหนาแน่นการเชื่อมโยง (ภาพที่ 17-19) พบว่าความหนาแน่นการเชื่อมโยงมีค่าต่ำลงเมื่อระยะเวลาการฝังดินเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเกิดการย่อยสลายจุลินทรีย์ไปทำลายพันธะการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลยาง จึงส่งผลให้ความหนาแน่นการเชื่อมโยงต่ำ แต่ความหนาแน่นการเชื่อมโยงจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณแป้งสูงขึ้น เนื่องจากอนุภาคของแป้งจะเข้าไปขัดขวางการแทรกซึมของโทลูอีน จึงส่งผลให้ความหนาแน่นในการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น

#### 7. สมบัติการบวมพองหลังฝังดิน

นำแผ่นยางวัลคาไนซ์ที่มีสารตัวเติมแป้งข้าวเจ้า แป้งมันสำปะหลัง และแป้งสาकुที่ปริมาณ 15 phr มาทดสอบสมบัติการบวมพองตามมาตรฐาน ASTM D471-98 ดังวิธีการทดสอบในหัวข้อที่ 3.5.6 ได้ผลการทดลองดังภาพที่ 20



ภาพที่ 20 เปอร์เซ็นต์การบวมพองของแผ่นยางวัลคาไนซ์ผสมแป้งชนิดต่าง ๆ ที่ปริมาณ 15 phr ที่ฝังดินในระยะเวลาต่าง ๆ โดยแช่ในโทลูอีนเป็นเวลา 120 ชั่วโมง



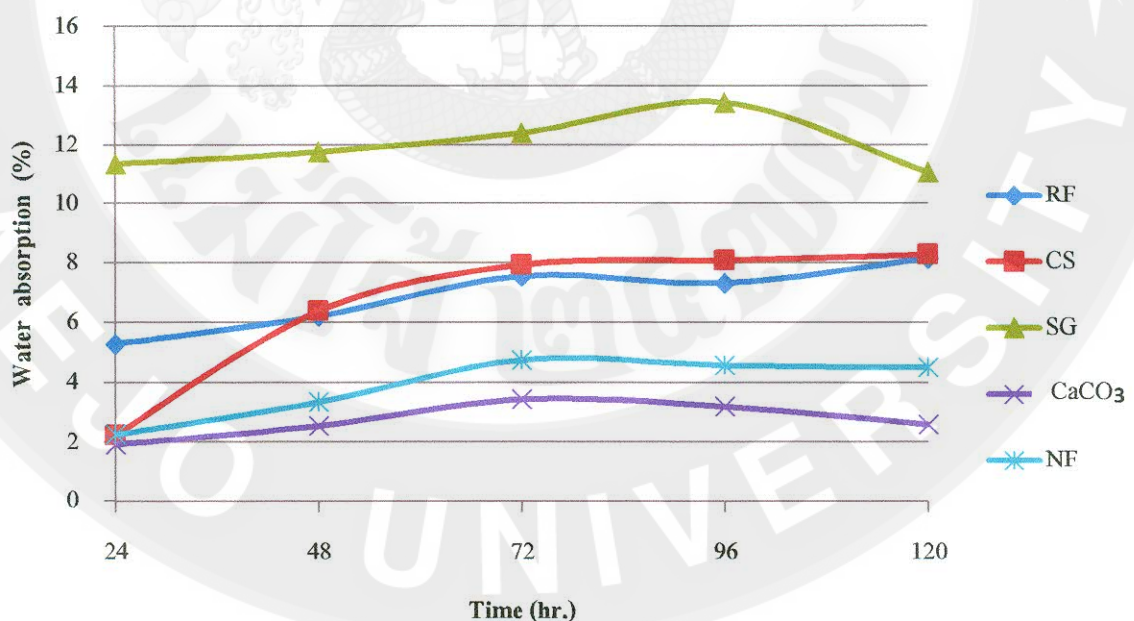
ภาพที่ 21 ความหนาแน่นการเชื่อมโยงของแผ่นยางวัลคาไนซ์ผสมแป้งแป้งชนิดต่าง ๆ ที่ปริมาณ 15 phr หลังฝังดินที่ระยะเวลาต่าง ๆ โดยแช่ในโทลูอีนเป็นเวลา 120 ชั่วโมง

จากภาพที่ 20 และ 21 แสดงเปอร์เซ็นต์การบวมพองและความหนาแน่นการเชื่อมโยงของแผ่นยางวัลคาไนซ์ที่ผสมแป้งชนิดต่าง ๆ ที่ปริมาณ 15 phr พบว่าแผ่นยางที่ไม่เติมสารตัวเติมมีเปอร์เซ็นต์การบวมพองสูงที่สุด เนื่องจากเกิดการย่อยสลาย จุลินทรีย์ไปทำลายพันธะการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยางจึงส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การบวมพองสูงที่สุด และพบว่าแผ่นยางที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตมีเปอร์เซ็นต์การบวมพองที่ต่ำที่สุด อาจเนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตมีอนุภาคมีขนาดใหญ่ โดยอนุภาคเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยางซึ่งไปขัดขวางการแทรกซึมของโทลูอีน เปอร์เซ็นต์การบวมพองจึงมีค่าต่ำที่สุด เมื่อพิจารณาชนิดของแป้ง พบว่าแผ่นยางที่ผสมสารตัวเติมแป้งสาขามีเปอร์เซ็นต์การบวมพองสูงกว่าแผ่นยางที่เติมแป้งข้าวเจ้าและแป้งมันสำปะหลัง ตามลำดับ เนื่องจากเม็ดแป้งสาขาก่อเกิดการเจลลาคีไนซ์ขึ้นในขณะที่เตรียมคิสเพอร์ชั้นพันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุล อะไมโลสและอะไมโลเพคตินที่อัดแน่นอยู่ในเม็ดแป้งถูกทำลายโครงสร้างเม็ดแป้งสาขุดแตก ประกอบกับแป้งสาขามีปริมาณอะไมโลสที่สูงกว่าแป้งข้าวเจ้า และแป้งมันสำปะหลัง (R. Pongsawatmanit, et al. 2002) จึงทำให้ความสามารถในการดูดซับและการพองตัวของเม็ดแป้งสาขุสูงกว่าเม็ดแป้งข้าวเจ้าและเม็ดแป้งมันสำปะหลัง และเมื่อฝังลงในดินเป็นระยะเวลาเพิ่มขึ้น เกิดกระบวนการย่อยสลาย จุลินทรีย์ทำลายสายโซ่โมเลกุลยางส่งผลให้โทลูอีนสามารถแทรกตัวเข้าไประหว่างสายโซ่โมเลกุลยางได้ แต่แป้งข้าวเจ้าและแป้งมันสำปะหลังมีปริมาณอะไมโลสที่ต่ำกว่าแป้งสาขุจึงทำให้มีความสามารถในการดูดซับน้ำต่ำกว่าเม็ดแป้งสาขุ หากเมื่อพิจารณาระยะเวลาการฝังดินที่เพิ่มขึ้น พบว่าเมื่อฝังดินเป็นระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นเปอร์เซ็นต์การบวมพองมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเกิดกระบวนการย่อยสลายสายโซ่โมเลกุลยางถูกทำลาย และเมื่อ

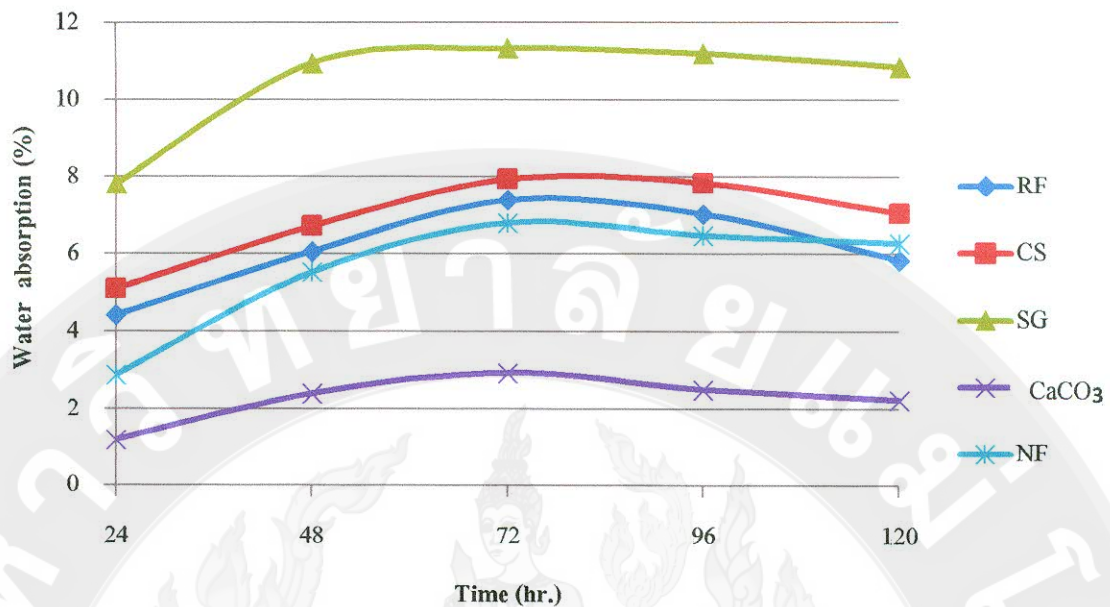
พิจารณาความหนาแน่นการเชื่อมโยงพบว่า สูตรยางที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตมีความหนาแน่นการเชื่อมโยงสูงสุด เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตมีอนุภาคขนาดใหญ่ โดยอนุภาคเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยางซึ่งไปขัดขวางการแทรกซึมของโพลีเมอร์เข้าไปในเนื้อยาง สำหรับสูตรยางที่ไม่เติมสารตัวเติมมีความหนาแน่นการเชื่อมโยงต่ำที่สุด อาจเนื่องมาจากพันธะการเชื่อมโยงของโมเลกุลยางถูกทำลาย จึงส่งผลให้ความหนาแน่นการเชื่อมโยงต่ำ เมื่อพิจารณาชนิดของแป้งพบว่า สูตรยางที่เติมแป้งสาครมีความหนาแน่นการเชื่อมโยงต่ำที่สุด ทั้งนี้เนื่องจาก เม็ดแป้งสาครเกิดการเจลาติไนซ์ขณะทำการคิสเพอร์ชันอะไมโลสและอะไมโลเพคตินถูกทำลาย เกิดหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระ โพลีเมอร์จึงสามารถแทรกเข้าไปในสายโซ่โมเลกุลยาง จึงส่งผลให้ความหนาแน่นการเชื่อมโยงต่ำ โดยเปอร์เซ็นต์การบวมพองและความหนาแน่นการเชื่อมโยงจะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับค่าความต้านทานแรงดึง

#### 8. การดูดซับน้ำ (Water Absorption) ของแผ่นยางวัลคาไนซ์

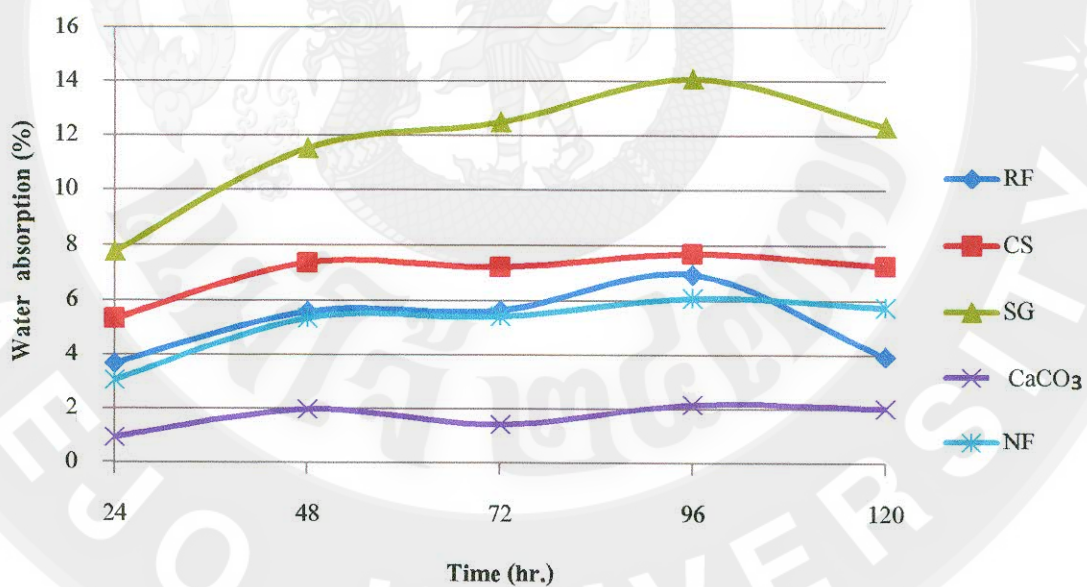
นำแผ่นยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ที่มีสารตัวเติมแป้งข้าวเจ้า แป้งมันสำปะหลัง และแป้งสาคร ที่ปริมาณ 15 phr มาทดสอบการดูดซับน้ำหลังทำการฝังดินเป็นระยะเวลา 10, 20 และ 30 วัน โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังหัวข้อที่ 5.5.8.3 ได้ผลการทดลองดังนี้



ภาพที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ (Water Absorption) ของยางแต่ละสูตร ที่ปริมาณ 15 phr หลังจากทำการฝังดินเป็นเวลา 10 วัน



ภาพที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ (Water Absorption) ของยางแต่ละสูตรที่ปริมาณ 15 phr หลังจากทำการฝังดินเป็นเวลา 20 วัน



ภาพที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ (Water Absorption) ของยางแต่ละสูตรที่ปริมาณ 15 phr หลังจากทำการฝังดินเป็นเวลา 30 วัน

จากภาพที่ 22 - 24 แสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ (Water Absorption) ของยางแต่ละสูตรที่ปริมาณ 15 phr หลังจากทำการฝังดินเป็นระยะเวลา 10, 20 และ 30 วัน พบว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากในระหว่างการฝังเกิดกระบวนการย่อยสลายขึ้นจุลินทรีย์ไป

ทำลายสายโซ่โมเลกุลยาง และพันธะการเชื่อมโยงระหว่างอนุภาคของแป้งและยาง ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคทั้งสอง โมเลกุลของน้ำจึงแทรกเข้าไปในสายโซ่โมเลกุลยาง ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำเพิ่มมากขึ้น เมื่อพิจารณาจากชนิดของแป้ง พบว่าแป้งสาคุมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำที่มากที่สุด เนื่องจากเม็ดแป้งสาคุเกิดการเจลาติไนซ์ขึ้นในขณะที่เตรียมดิสเพอร์ชันพันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุล อะไมโลสและอะไมโลเพคตินที่อัดแน่นอยู่ในเม็ดแป้งถูกทำลายโครงสร้างเม็ดแป้งสาคุแตก ประกอบกับแป้งสาคุมีปริมาณอะไมโลสที่สูงกว่าแป้งข้าวเจ้า และแป้งมันสำปะหลัง (R. Pongsawatmanit, et al. 2002) จึงทำให้ความสามารถในการดูดซับน้ำและการพองตัวสูงกว่าเม็ดแป้งข้าวเจ้าและเม็ดแป้งมันสำปะหลังจึงส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำมีค่าสูง นอกจากนี้ยังพบว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของยางที่เติมสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตจะมีค่าต่ำกว่ายางที่ไม่ใส่สารตัวเติม เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติมที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ อนุภาคของแคลเซียมจะเข้าไปแทรกระหว่างโมเลกุลของยางจึงไปขัดขวางการแทรกซึมของโมเลกุลน้ำ ซึ่งส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำต่ำที่สุด เมื่อพิจารณาระยะเวลาฝัดคืนที่เพิ่มขึ้นพบว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดการย่อยสลาย จุลินทรีย์ไปทำลายสายโซ่โมเลกุลยาง และพันธะการเชื่อมโยงระหว่างอนุภาคของแป้งและยาง ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคทั้งสอง โมเลกุลของน้ำจึงแทรกเข้าไปในสายโซ่โมเลกุลยาง ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำเพิ่มมากขึ้น

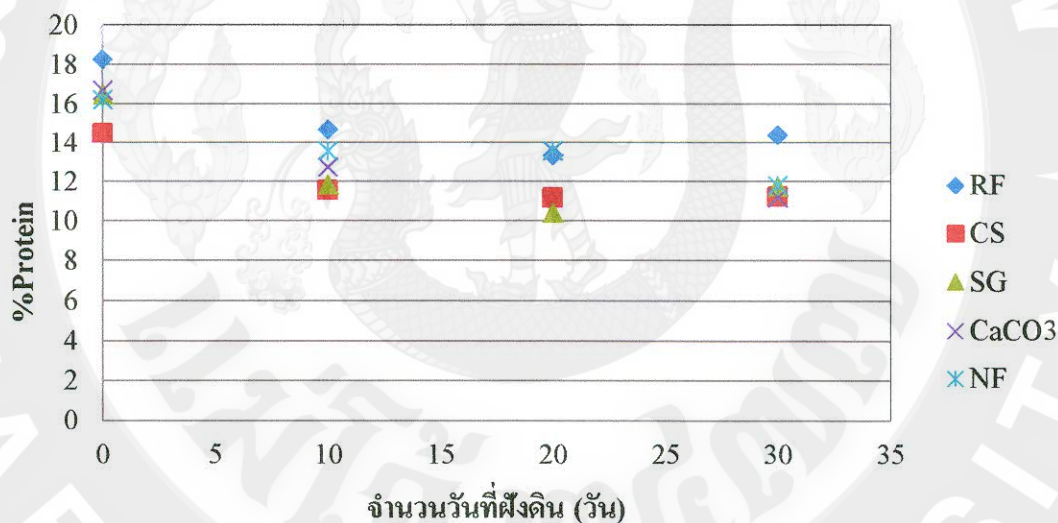
9. ปริมาณโปรตีนจากแบคทีเรียที่เกิดขึ้นหลังจากฝัดแผ่นยางวัลคาไนซ์ที่ระยะเวลา 10, 20 และ 30 วัน

นำแผ่นยางวัลคาไนซ์ที่มีสารตัวเติมแป้งข้าวเจ้า แป้งมันสำปะหลัง และแป้งสาคุที่ปริมาณ 15 phr มาทดสอบปริมาณโปรตีน ก่อนและหลังทำการฝัดคืนเป็นระยะเวลา 10, 20 และ 30 วัน โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังหัวข้อที่ 5.5.9 ได้ผลการทดลองดังนี้

ตารางที่ 18 ปริมาณโปรตีนในแผ่นยางวัลคาไนซ์ที่ฝังดินในระยะเวลา 0, 10, 20 และ 30 วัน

วัน/สูตรยาง	ปริมาณโปรตีน (%)				
	RF	CS	SG	CaCO <sub>3</sub>	NF
0	18.31	14.50	16.50	16.75	16.25
10	14.74	11.57	11.88	12.76	13.60
20	13.39	11.18	10.45	13.60	13.65
30	14.44	11.27	11.78	11.22	11.82

จากตารางที่ 18 นำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการฝังดินและปริมาณโปรตีนที่เกิดขึ้น ก่อนและหลังทำการฝังดินเป็นระยะเวลา 0, 10, 20 และ 30 วันของแผ่นยางแต่ละสูตร ได้ดังภาพที่ 25



ภาพที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการฝังดินและปริมาณโปรตีนที่เกิดขึ้น ก่อนและหลังทำการฝังดินที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของแผ่นยางที่ใส่แป้งที่ปริมาณ 15 phr

จากภาพที่ 25 แสดงปริมาณโปรตีนที่เกิดขึ้นก่อนและหลังทำการฝังดินเป็นระยะเวลา 0, 10, 20, และ 30 วัน ของแผ่นยางที่เติมแป้งปริมาณ 15 phr พบว่าปริมาณโปรตีนของสูตรยางทุกสูตร ก่อนฝังลงในดินมีปริมาณสูง แต่สำหรับสูตรยางที่เติมแป้งมันสำปะหลังมีปริมาณโปรตีนก่อนฝังดินลดลงต่ำกว่าสูตรอื่น ทั้งนี้เนื่องจากแป้งมันสำปะหลังมีปริมาณโปรตีนที่น้อยที่สุด (0.1 %) เมื่อพิจารณาจากยางที่ไม่เติมสารตัวเติม โดยปกติแล้วพบว่าในยาง มีโปรตีนจากธรรมชาติที่ห่อหุ้มอยู่



ตรงผิวรอบนอกของอนุภาคยาง (25%) อยู่ในชั้นน้ำ (50%) และปะปนอยู่ในส่วนของลูทอยด์ (25%) (เสาวนีย์ ก่อวุฒิกุลรังษี, 2547) เมื่อเติมสารตัวเติมแป้งข้าวเจ้า แป้งมันสำปะหลัง และแป้งสาคู จึงทำให้มีปริมาณโปรตีนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย พิจารณาจากชนิดของแป้ง พบว่าสูตรยางที่เตรียมจากน้ำยางวัลคาไนซ์ที่เติมสารตัวเติมแป้งข้าวเจ้า มีปริมาณโปรตีนที่เกิดขึ้นสูงที่สุด เนื่องจากแป้งข้าวเจ้าเป็นแป้งที่ได้มาจากธัญพืช ซึ่งจะมีปริมาณโปรตีน (7%) ที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งมันสำปะหลัง (0.1%) และแป้งสาคู (0.19-0.25%) ซึ่งเป็นแป้งที่ได้มาจากแป้งจากหัว หรือราก ประกอบกับในน้ำยางมีโปรตีนห่อหุ้มอยู่ตรงผิวรอบนอกของอนุภาคยางอยู่ในชั้นน้ำและปะปนอยู่ในส่วนของสาร ลูทอยด์จำนวนมาก โปรตีนที่อยู่ในแป้งและในน้ำยางอาจรวมเข้ากัน ปริมาณโปรตีนจึงสูงขึ้น และเมื่อพิจารณาระยะเวลาการฝังดิน พบว่าเมื่อระยะเวลาในการฝังดินเพิ่มขึ้น ปริมาณโปรตีนที่เกิดขึ้นจากแบคทีเรียและจุลินทรีย์มีแนวโน้มที่ลดลง อาจเนื่องมาจาก ในการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ จะเกิดการย่อยจากผิวของชิ้นงานเข้ามาภายใน เมื่อฝังดินครบกำหนดระยะเวลาที่กำหนดแล้ว ก่อนนำชิ้นงานมาทดสอบ ทำความสะอาดชิ้นงานโดย ล้างดินและสิ่งสกปรกออกจึงทำให้จุลินทรีย์บนผิวของชิ้นงานถูกล้างออกไปขณะล้าง จึงส่งผลให้ปริมาณโปรตีนที่ทดสอบได้มีค่าลดลงเมื่อฝังลงในดินนานขึ้น ประกอบกับ ช่วงระยะเวลาที่กำหนดในการฝังดินอาจจะยังไม่ทำให้เกิดแบคทีเรียและจุลินทรีย์ ปริมาณโปรตีนที่เกิดขึ้นจึงมีปริมาณที่ต่ำ

เมื่อพิจารณาปริมาณโปรตีนกับค่าความต้านทานแรงดึง จากตารางที่ 15 และ ภาพที่ 25 พบว่าปริมาณโปรตีนมีความสัมพันธ์กับค่าความต้านทานแรงดึง โดยค่าความต้านทานแรงดึงลดลงเมื่อปริมาณโปรตีนลดลง

## 7. สรุปผลการวิจัย

ชนิดและปริมาณของแป้งส่งผลต่อสมบัติต่างๆ ของยางแผ่นวัลคาไนซ์ เมื่อพิจารณา  
 ฐานฐานวิทยาพบว่า เม็ดแป้งสาकुที่ดิสเพอร์ชันแล้วมีขนาดอนุภาคไม่แตกต่างจากเม็ดแป้งข้าว  
 เจ้าและเม็ดแป้งมันสำปะหลัง ส่วนเม็ดแป้งสาकुที่ยังไม่ผ่านการดิสเพอร์ชันนั้นจะมีขนาดใหญ่กว่า  
 เม็ดแป้งข้าวเจ้าและเม็ดแป้งมันสำปะหลังตามลำดับ แผ่นยางวัลคาไนซ์ที่ผสมแป้งสาकुมีการฝังตัว  
 ของอนุภาคเม็ดแป้งอย่างสม่ำเสมอ และกระจายทั่วแผ่นยางได้ดีที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลความ  
 ด้านทานแรงดึงของแผ่นยางวัลคาไนซ์ที่ผสมแป้งสาकुมีค่าสูงที่สุด เนื่องจากมีการกระจายตัวของ  
 สาकुในยางที่ดี นอกจากนี้ค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) 300% มอดูลัส และระยะยืด ณ  
 จุดขาด (Elongation At Break) ของแผ่นยางวัลคาไนซ์มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณแป้งและ  
 ระยะเวลาการฝังคืนที่เพิ่มขึ้นค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) ของแผ่นยางวัลคาไนซ์มี  
 ความสัมพันธ์กับปริมาณโปรตีนที่เกิดขึ้น โดยค่าความต้านทานแรงดึงลดลงตามปริมาณโปรตีนที่  
 ลดลง จาก FTIR พบว่า สารตัวเติมแป้งเกิดการฝังตัวเข้ากับน้ำยางวัลคาไนซ์ โดยปรากฏหมู่ฟังก์ชัน  
 ที่อยู่ในน้ำยางวัลคา-ไนซ์ซึ่งประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบของน้ำยางและแป้ง ที่  
 ปริมาณสารตัวเติมแป้งแต่ละชนิดที่ 15 phr มีอัตราการบวมพองของแผ่นยางวัลคาไนซ์สูงที่สุด โดย  
 แผ่นยางวัลคาไนซ์ที่ผสมแป้งสาकुมีอัตราการบวมพองสูงที่สุด และค่าเหล่านี้จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณ  
 สารตัวเติมแป้งที่เพิ่มขึ้น แผ่นยางที่ผสมแป้งสาकुเป็นสารตัวเติมมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำสูงที่สุด  
 โดยเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาการฝังคืนที่เพิ่มขึ้น แผ่นยางที่  
 เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติ ผสมสารตัวเติมแป้งข้าวเจ้าก่อนฝังคืน มีปริมาณ โปรตีนที่เกิดขึ้นสูงที่สุด  
 แต่ปริมาณ โปรตีนจะมีค่าลดลงตามระยะเวลาการฝังคืนที่เพิ่มขึ้น

## 8. เอกสารอ้างอิง

- Azura A.R., M. M. Afiq and M.H. Izmar. 2010. Mechanical and biodegradation properties of sago starch natural rubber latex composites. **In: 7th Asian Australian Conference on Composite Materials**, Taipei, Taiwan, Nov.15-18, 2010.
- Buléon A., P. Colonna, V. Planchot and S. Ball. 1998. Starch granules: structure and biosynthesis. **Int. J. Biol. Macromol.** 23: 85–112.
- Guimarães J. L., F. Wypych, C.K. Saul, L.P. Ramos and K.G. Satyanarayana. 2010. Studies of the processing and characterization of corn starch and its composites with banana and sugarcane fibers from Brazil. **Carbohydr. Polym.** 80(1): 130–138.
- Izmar M.H., M.M. Afiq and A.R. Azura. 2012. Effects of different additions of sago starch filler on physical and biodegradation properties of pre-vulcanized NR latex composites, **Composites: Part B.** 43: 2746–2750.
- Kang H., M. Y. Kang, and K. H. Han. 2000. Identification of natural rubber and characterization of rubber biosynthetic activity in fig tree. **American Society of Plant Biologists.** 123(3): 1133-1142.
- Karim A.A., A.P.L. Tie, D.M.A. Manan and I.S.M. Zaidul. 2008. Starch from the sago (*Metroxylon sagu*) palm tree—properties, prospects, and challenges as a new industrial source for food and other uses. **Compr. Rev. Food Sci. Food Safety.** 7(3): 215–228.
- Riyajan S., Y. Sasithornsonti and P. Phinyocheep. 2012. Green natural rubber-g-modified starch for controlling urea release. **Carbohydrate Polymers.** 89: 251– 258.
- Roy, R.V., M. Das, Banerjee and A.K. Bhowmick. 2006. Comparative studies on rubber biodegradation through solid-state and submerged fermentation. **Process Biochem.** 41 (1): 181-186.
- Sung W. and ZL. Nikolov. 1992. Accelerated Degradation Studies of Starch-Filled Polyethylene Films. **Ind. Eng. Chem. Res.** 31 (10): 2332–2339.
- Wattanachant S., S.K.S Muhammad, M. Hashim and R.A. Rahman. 2002. Suitability of sago starch as a base for dual-modification. **Songklanakarin J. Sci. Technol.** 24: 431-438.

Wattanachant S., S.K.S Muhammad, M. Hashim and R.A. Rahman. 2002. Characterisation of hydroxypropylated crosslinked sago starch as compared to commercial modified starches.

*Songklanakarin J. Sci. Technol.* 24: 439-450.

Xie F., L. Yu., L. Chen and L. Li. 2008. A new study of starch gelatinization under shear stress using dynamic mechanical analysis. *Carbohydr. Polym.* 72(2): 229-34.

แก้วตา แก้วตาทิพย์. 2556. พลาสติกชีวภาพจากกลูเตนข้าวสาลี. *ว.วิทย์. มข.* 41(2) 309-319.

นิธิยา รัตนापนนท์ และพิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์. 2556. อุณหภูมิที่เกิดเจลลิตินในเซชัน จาก

<http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1009/gelatinization-temperature>.

[11 เมษายน 2557]

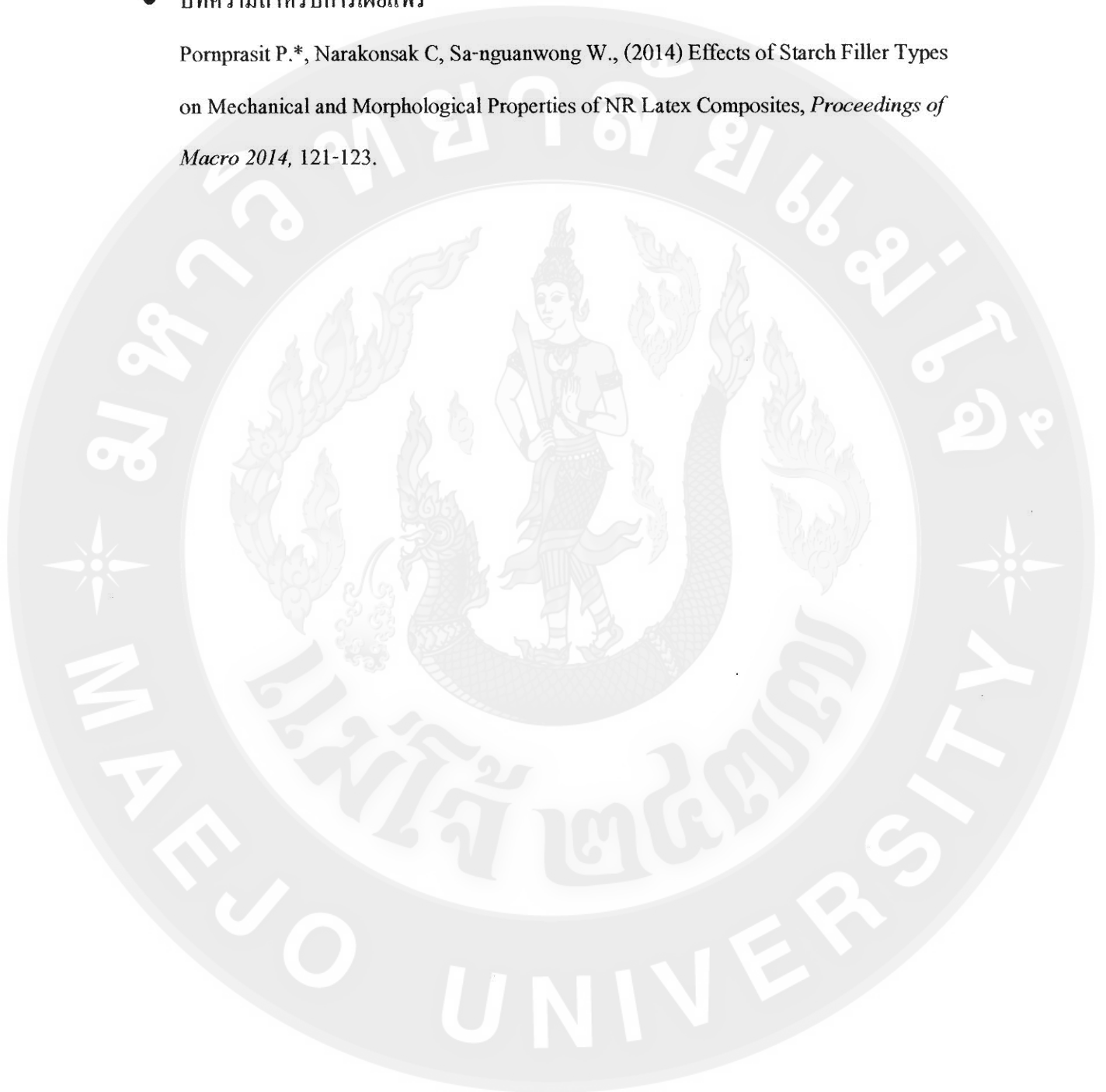
มงคล สุขวัฒนาสินิทธิ์. 2553. การขึ้นรูปและสมบัติของของผสมพอลิแลกติกแอซิดกับแป้งมันสำปะหลัง. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์. โครงการวิจัยแห่งชาติ: ยางพารา สกว.

พงษ์ธร แซ่ฮุย และ ชาคริต สิริสิงห. 2550. ยาง กระบวนการผลิตและการทดสอบ. สำนักพิมพ์ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC): กรุงเทพฯ

## 9. ภาคผนวก

- บทความสำหรับการเผยแพร่

Pornprasit P.\*, Narakonsak C, Sa-nguanwong W., (2014) Effects of Starch Filler Types on Mechanical and Morphological Properties of NR Latex Composites, *Proceedings of Macro 2014*, 121-123.



ลายเซ็นผู้วิจัย

1. นางพิไลวรรณ พรประสิทธิ์

พ.ว.ร.น. พ.พ.ร.น. 6/1/59

2. ....

.....

3. ....

.....

คำรับรองโดยที่ปรึกษางานวิจัย

ลงชื่อ

อ.ศุภันท์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จิตินันท์ รัตนพรหม)

วันที่

7 มี.ค. 59

คำรับรองโดยผู้บังคับบัญชาหน่วยงานต้นสังกัด

ลงชื่อ

อ.อุมาพร

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อุมาพร อุประ)

ตำแหน่ง คณบดีคณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร

วันที่

7 มี.ค. 59

**Effects of Starch Filler Types on Mechanical and Morphological Properties of NR Latex Composites**

Philaiwan Pornprasit\*, Chonlada Narakonsak, Wilaiwan Sanguanwong

Program in Rubber and Polymer Technology, Faculty of Engineering and Agro-Industry, Maejo University, Chiang Mai, 50290, Thailand

Phone: +66-5387-5540, Fax: +66-5387-8113, E-mail: philaiwan@mju.ac.th

**Introduction**

The green technology used in solving the solid waste disposal problem is attracting great interest on the level of global researching. Since 20% of materials found in solid waste are natural rubber latex (NRL) products [1], producing the biodegradable materials is one of the solutions in solid waste management. The microbial are the decomposer in spite of the fact that the polymer is resistant to microbial degradation. So, several researchers [2-4] have utilized starch as an additional medium in facilitating biodegradation process. Starch has been widely used in NR latex compounds due to its natural availability, biodegradability, and low cost. Starch can be easily subjected to chemical changes. In addition, it consists of an inextricable protein that resides in its granular structure. Soil microbes produce an enzyme for hydrolysis of amylose and amylopectin [5-7] which construct the backbone chain of NR latex composites. According to Buléon et al. [6], these macromolecules are compacted in a layered sphere shape, where the crystalline and amorphous layers are arranged alternately in stacking order.

In this study, starch fillers such as sago starch (SG), rice flour (RF) and cassava starch (CS) were added into the latex and stirred at room temperature. The compatibility of the different types of starch with NR latex on the mechanical and morphological properties of its composites was then investigated.

**Experimental**

**Materials:** Concentrated NR latex was supplied by Lucky Four Company (Nontaburi, Thailand). The latex was analyzed to ensure that the properties were in accordance with ASTM D1076-10. Dry rubber content (DRC) and total solid content (TSC) of the latex were 64.40% and 68.69%, respectively. Rice flour (amylose contents was 25%) was purchased from Prasopphol Company (Chiang Mai, Thailand). Cassava starch (amylose contents was 20%) was purchased from Bangkok Starch Industrial Company Limited (Nakomprathom, Thailand). Sago starch was purchased from S. U. V. Intertrade (Nakomprathom, Thailand). Sago starch (amylose contents was 55-75%) filler dispersion was prepared by grinding the mixture of sago powder and dispersing ingredients in a ball mill for 24 h. The dispersing ingredients were vultamol (1% wt/wt), bentonite clay (1% wt/wt), 10% potassium hydroxide, KOH (3% wt/wt), and distilled water (85% wt/wt). All other rubber ingredients used were commercial grade, supplied by Lucky Four Company (Nontaburi, Thailand).

**Preparation of NRL composites:** Table 1 shows the formulation of NR latex compounds used. All ingredients including the starch fillers were mixed simultaneously at room temperature for 1 h. The mixture was cast on glass plate and then dried in hot air oven at 80, 70 and 60°C for sago starch, rice flour and cassava starch, respectively, for 12 h. The formed composites were stripped off the plates and stored in a refrigerator for further testing.

**Characterization of NRL and its composites:**

**1) Viscosity measurement**

The viscosity of NRL compound was measured by Brookfield viscometer (LV-1 Spindle) at 20 rpm. The measurements were taken after addition of 15 phr of each starch.

**2) FTIR analysis**

FTIR analysis was conducted with a Perkin Elmer Spectrum One to recognize the functional group presented in NR latex composites. The wave number range from 4000- 550 cm<sup>-1</sup> was selected to

analyze the functional group of the composites filled with various types of starches.

**3) SEM analysis**

A scanning electron microscope (SEM - JSM5410-LV, JEOL, Japan) was used to analyze the surface morphology of the composites in order to provide insights on the interaction between filler and matrix, filler distribution and surface roughness of the composites. The composite sheets were immersed in liquid nitrogen and then broken to produce fracture surface specimens before coating with a layer of gold. The coated samples were then inserted into the microscope and images of the samples were taken at 500 magnification.

**4) Tensile test**

Tensile test was carried out using the Universal testing machine (INSTRON 3366) according to ASTM D412. The NRL composite sheets were cut into dumbbell shapes before subjected to the tensile machine. The crosshead speed for the tensile machine was set at 500 mm/min. Five samples were tested and the average of the values was taken.

**5) Degree of equilibrium water absorption measurement**

Cured test pieces were immerse in water for equilibrium water absorption. The percentage of water absorption was estimated from an equation (1):

$$\%Swelling = \left( \frac{W_2 - W_1}{W_1} \right) \times 100$$

(1)

W<sub>1</sub> is the original weight of the sample and W<sub>2</sub> is the weight of dried residual sample after immersion for 5 days.

**Table 1.** Compounding formulations of starch-NR composites.

Ingredients	Dry weight(phr)									
	RF 5	CS5	SG 5	RF 10	CF10	SG 10	RF 15	CS 15	SG 15	
64.4% Latex	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
25% RF	5.0	-	-	10.0	-	-	15.0	-	-	
20% CS	-	5.0	-	-	10.0	-	-	15.0	-	
10% SG	-	-	5.0	-	-	10.0	-	-	15.0	
10% KOH	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	
20% Potassium Oleate	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	
50% ZnO	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	
50% ZDEC	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	
50% ZMBT	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	
50% CPL	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	
50% S	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	

**Results and Discussion**

**1. Viscosity measurement**

Based on Figure 1, the viscosity of all starch filled lattice was lower than those of NRL due to the dispersion process which had more than 75-80% of water. Moreover, sago starch filled latex gave the highest viscosity than others because sago starch had more amylose content than rice flour and cassava starch, respectively. The higher amylose content in starch causing the absorption of water and resulted in the increase of starch swelling.

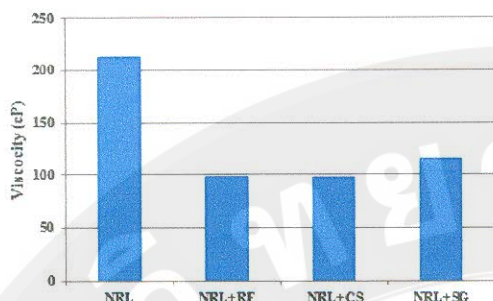


Figure 1. Viscosity of natural rubber latex with added 15 phr starches.

### 2. FTIR analysis

FTIR was used to analyze the chemical structures of the starch-NR composites, as shown in Figure 2. The characteristic peaks at  $2800\text{--}2960\text{ cm}^{-1}$  represent the stretching behavior of methyl and methane group. At  $1440\text{--}1500\text{ cm}^{-1}$ , there is the vibration of methane and methyl group. The vibration of double-bonded carbon in the rubber backbone chain is observed at  $780\text{--}920\text{ cm}^{-1}$ . The presence of the three types of bonding characteristics confirms the existence of isoprene monomer in the rubber backbone chain. For starch, the most significant characteristics are presented at  $1010\text{--}1190\text{ cm}^{-1}$  where the vibrations of an unsymmetrical C–O–C bond and C–O bond of primary alcohol are defined. At  $780\text{--}920\text{ cm}^{-1}$ , characteristics of the peaks are presented, as well as the vibration of methane group in starch. And the peaks at  $1600\text{--}1770\text{ cm}^{-1}$  represent the vibration of C–O chelate aldehyde group [8, 10]. These analyses confirm that all starches are similar in terms of molecular bonding presences.

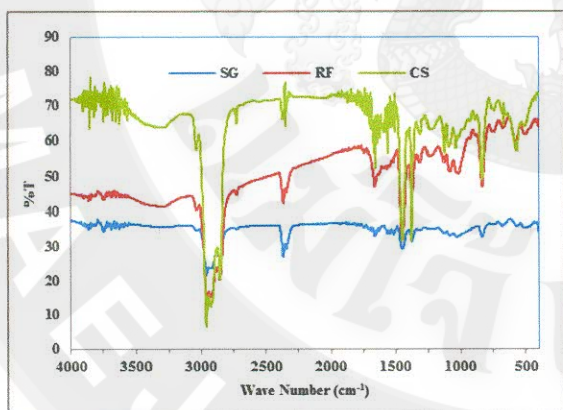


Figure 2. FTIR characteristics of starch-NRL composites.

### 3. SEM analysis

Based on Figure 3, the sago starch, rice flour and cassava starch showed the particle size of  $10\text{--}40\text{ }\mu\text{m}$ ,  $5\text{--}10\text{ }\mu\text{m}$  and  $5\text{--}15\text{ }\mu\text{m}$ , respectively. The SEM micrographs also revealed that the starch filler particles were embedded in NR matrix. The starch was applied to fuse and contribute into NR latex system and integrity which the starch granular would break and release the amylose and amylopectin. The chains of amylose and amylopectin will react with the amorphous and crystalline regions to generate the interaction with the rubber backbone chain.

For the starch to fuse and contribute to NR latex system and integrity, the starch itself must break its granular structure and release chains of amylose and amylopectin in the amorphous and crystalline regions to interact with the rubber backbone chain. By revealing further hydroxyl group in the chain, more hydrogen bonding can occur within the rubber chain, and more water molecules can be released. This will enhance the networking mesh

of rubber–filler bonding, and increase rubber–filler interactions [11]. Sago starch showed the better dispersion and tensile properties than rice flour and cassava starch due to the formation of sago starch's granular structure embedded into the latex film surfaces which acts as the reinforcement fillers upon application. The addition of rice flour and cassava starch contributed to the formation of sedimentation at the edge of composites.

### 4. Tensile test

Figure 4(a) shows the effects of starch contents (0, 5, 10 and 15 phr) and starch types on tensile strength of the NR composites. It was observed that the tensile strength of unfilled NR composite was 27.2 MPa. Addition of starches, the tensile strength abruptly decreased because the strain-induced crystallization was hindered from starch particles. However, SG 5 showed the highest tensile strength and Elongation at break due to the SG having better interaction with NR than those of CS and RF, respectively. The interaction between starch and latex was depended on amylose content. The amylose was responsible for bonding formation between latex molecular structure particles and hence contributes to latex-starch compatibility [9]. The elongation at break seemed to decrease with an increase in the starch content. It was found that the increase in filler content resulted in the reduction of the deformability of a rigid interface between the filler and rubber matrix [10].

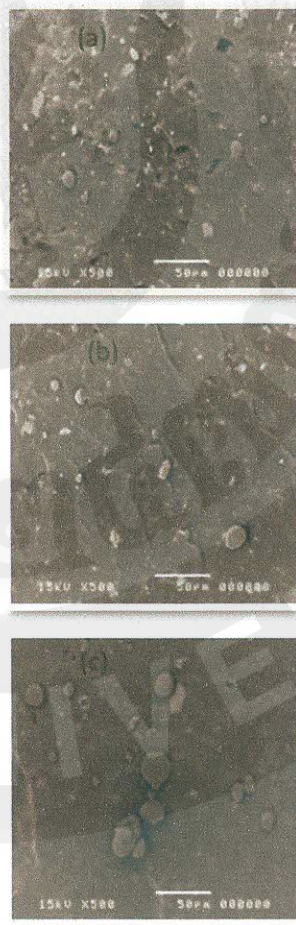


Figure 3. SEM analysis of starch-NR composites; (a) Sago starch (b) Rice flour and (c) cassava starch



### 5. Swelling behavior

The water absorption of the 15 phr starch-NR composites is shown in Figure 5. The water absorption of unfilled NR showed the lowest value compared to other samples due to the absence of hydroxyl group from starches. After adding the starches in NR composites, the water absorption were increased due to hydroxyl group with hydrophilic starch on molecule of water. The highest water absorption was observed in samples in the presence of RF and SG after immersing in water for 4 days. This explains that RF at the edge of sample (from SEM) exhibits good water solubility and leads to excellent absorb the water. In the case of SG, it can be explained similarly in viscosity measurement. SG has highest amylose content. The higher amylose content in starch causing the absorption of water and resulted in the increase of starch swelling.

### Conclusions

The types and contents of starch offered different properties. For types of starch, based on SEM analysis of the disruption of sago granular surfaces, the NR latex composites showed the good interaction between rubber and Sago. The good interaction was represented by the high value of viscosity measurement and the highest tensile strength was observed. The phenomenon was observed through SEM, which showed that the addition of rice flour and cassava starch contributed to the formation of sediment at the edge of composites. FTIR analysis showed the similarity of molecular bonding presented in all compounds, although the composites were prepared using different types of starch. In medium water, the water absorption of starch NR composites increased as hydroxyl group from amylose in starch. The starch NR composites displays easily degrade in soil.

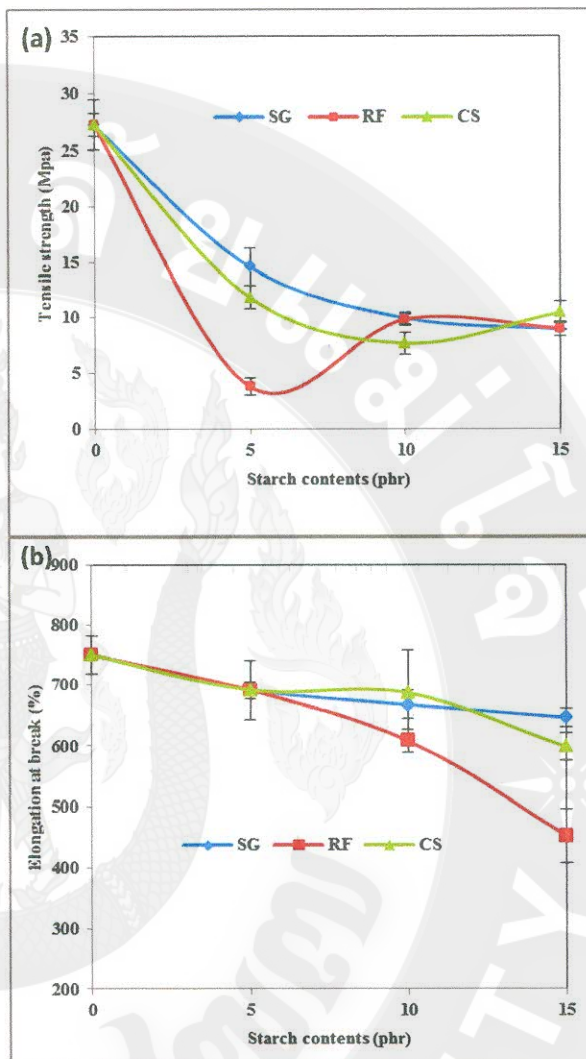


Figure 4. Effects of various fillers on (a) tensile strength and (b) elongation at break of starch-NRL composites.

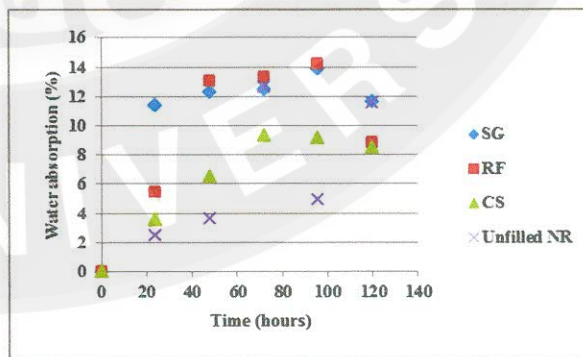


Figure 5. Water absorption of starch-NRL composites.

**Acknowledgement.** The authors gratefully acknowledge the financial support from The Office of Agricultural Research and Extension, Maejo University, and would like to thank the Rubber and Polymer Technology Program, Faculty of Engineering and Agro-Industry, Maejo University, Thailand, for supporting laboratories and facilities.

#### References

- (1) Roy, R.V.; Das, M.; Bancrjcc, R.; Bhowmick, A.K. *Process Biochem.* **2006**, *41(1)*, 181.
- (2) Sung, W.; Nikolov, Z.L.; *Ind. Eng. Chem. Res.* **1992**, *31(10)*, 2332.
- (3) Lopez-Llorca, L.V.; Colom Valiente, M.F. *Micron.* **1993**, *24(5)*, 457.
- (4) Xie, F.; Yu, L.; Chen, L.; Li, L.; *Carbohydr. Polym.* **2008**, *72(2)*, 229.
- (5) Guimarães, J.L.; Wypych, F.; Saul, C.K.; Ramos, L.P.; Satyanarayana, K.G. *Carbohydr. Polym.* **2010**, *80(1)*, 130.
- (6) Buléon, A.; Colonna, P.; Planchot, V.; Ball, S. *Int. J. Biol. Macromol.* **1998**, *23(2)*, 85.
- (7) Karim, A.A.; Tie, A.P.L.; Manan, D.M.A.; Zaidul, I.S.M. *Compr. Rev. Food. Sci. Food Safety.* **2008**, *7(3)*, 215.
- (8) Dzulkefly, K.; Koon, S. Y.; Kassim, A.; Sharif, A.; Abdullah, A.H. *Malaysian. J. Anal. Sci.* **2007**, *11(2)*, 395.
- (9) Junko, M.; Takeshi, Y.; Kauru, K.; Tomoko, S. *Cereal Chemistry.* **2003**, *80(4)*, 476.
- (10) Wang, Z.F.; Peng, Z.; Li, S.D.; Lin, H.; Zhang, K.X.; She, X.D. *Compos. Sci. Technol.* **2009**, *69(11-12)*, 1797.
- (11) Iznar, M.H.; Afiq, M.M.; Azura, A.R. *Composites: Part B.* **2012**, *43*, 2746.

348

#### The Potential of Perlite as an Odour-adsorbing Fillers in Natural Rubber Vulcanizates

Tithinun Rattanaprome<sup>1\*</sup>, Philaiwan Pornprasit<sup>1</sup>, and Napat Chantaramce<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Rubber and Polymer Technology Program, Faculty of Engineering and Agro-Industry, Maejo University, Chiang Mai, 50290, Thailand

<sup>2</sup>Materials science Program, Faculty of science, Maejo University, Chiang Mai, 50290, Thailand

Phone: +66-053-878119, Fax : +66-053-878113,

\*E-mail: tithinun@mju.ac.th

#### Introduction

Despite the fact that natural rubber (NR) is well known to exhibit outstanding properties, such as superior elasticity and resilience, offensive odour emitted from natural rubber products and from their materials during drying, storage, mastication, and curing has been a major cause of unbearable environment. Many researchers reported that chemical components of offensive odour or obnoxious odour were aliphatic and aromatic hydrocarbons, derivatives containing nitrogen or sulphur, aldehydes, and ketones. Especially, low molecular weight volatile fatty acids were believed to be the major cause of offensive odour. They explained that obnoxious odour was due to incomplete degradation during storage and thermal degradation during the processing of non-rubber components, such as carbohydrates, proteins, and lipids.<sup>[1-2]</sup>

Hoven et al.<sup>[1]</sup> studied the reduction of offensive odour from natural rubber by using odour-reducing substances, such as chitosan, zeolite13x, and activated carbon black, to adsorb physically and/or chemically. From gas chromatography and gas chromatography-mass spectrometry investigation, they reported the significant reduction of the quantity of low molecular weight volatile fatty acids, such as acetic acid, in the presence of chitosan and zeolite13x. They also concluded from an olfactometry test that activated carbon black was a potential odour-reducing agent due to a highly porous structure and large surface area. Since those odour-reducing materials were expensive, they were unpopular in rubber processing.

Perlite is a generic term for naturally occurring siliceous rock that is able to expand that has increased porosity upon heating. It is evident from an x-ray diffractometer that perlite has the basic composition of about 72 wt% SiO<sub>2</sub>, 14 wt% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and a few wt% of other metal oxides and alkalis.<sup>[3]</sup> Expanded perlite is cheap and used widely in the construction industry and in agriculture, and can be used as an adsorbent for environmental protection.<sup>[3,4]</sup> In the present work, the reduction of the unpleasant smell from natural rubber vulcanizates was investigated using perlite as an odour-adsorbing filler. Perlite was incorporated into highly odorous Standard Thai Rubber 20 (STR20) and Ribbed Smoke Sheet 5 (RSS5). Perlite content was varied at 0, 10, 20 and 30 phr. A sensory method and the GC-MS technique were used to qualitatively measure the efficiency of odour reduction. The effect of perlite content on mechanical properties of cured rubber, such as tensile strength, elongation at break, hardness and abrasion resistance was investigated. Comparative properties of natural rubber vulcanizates filled with perlite and clay were also examined.

#### Experimental

**Materials.** All formulations of NR compounds had the same composition, except for the amounts and types of fillers. The amount of perlite ranged from 0 to 30 phr. Thus, the samples were named as control, P10, P20, and P30, respectively. For comparative studies, loading of 30 phr china clay, commercial filler, was denoted as Clay30. The other ingredients in the rubber compound were (in phr): rubber, 100; stearic acid, 2; ZnO, 4; tetramethylthiuram disulphide (TMTD), 0.5; dibenzothiazyl disulphide (MBTS), 1; Lowinox<sup>®</sup> CPL, 1; and sulphur, 2.5. All mixing ingredients were used as received and purchased from Lucky Four Co. Ltd. (Thailand), except for RSS5 obtained from