



## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

**โครงการวิจัย** การเตรียมขมำดำจากเปลือกข้าวเพื่อใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ

โดย นางสาวสุวิมล ศิริวงศ์ และคณะ

มิถุนายน 2554

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัย การเตรียมเมล็ดดำจากเปลือกข้าวเพื่อใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ

| คณะผู้วิจัย  |             | สังกัด                 |
|--------------|-------------|------------------------|
| นางสาวสุวิมล | ศิริวงศ์    | มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี |
| นางสาวปราณี  | รวมวงศ์     | มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี |
| ดร.ปญญานิซ   | อินทรพัฒน์  | มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี |
| นายกวิชาติ   | กะเตื่องงาน | มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี |

ชุดโครงการวิจัยแห่งชาติ : ยางพารา

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)  
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว.ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

## สารบัญ

|                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------|----|
| สารบัญ                                                                  | i  |
| บทสรุปย่อรายงานสำหรับผู้บริหาร                                          | ii |
| บทคัดย่อ                                                                | v  |
| เนื้อหา                                                                 | 1  |
| ความสำคัญและที่มา                                                       | 1  |
| วัตถุประสงค์                                                            | 1  |
| ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง                                           | 1  |
| วิธีการทดลอง                                                            | 3  |
| การเตรียมผงเขม่าดำจากเปลือกข้าว                                         | 3  |
| การเตรียมยางคอมปาวด์และการขึ้นรูป                                       | 3  |
| การทดสอบสมบัติต่างๆ                                                     | 5  |
| ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง                                          | 8  |
| ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและโครงสร้างของเถ้าแกลบ                   | 8  |
| การคาร์โบไนซ์แกลบโดยไม่ใช้สารเคมีกระตุ้น                                | 8  |
| การคาร์โบไนซ์แกลบโดยใช้ $\text{ZnCl}_2$ และ $\text{KOH}$ เป็นตัวกระตุ้น | 10 |
| ผลของเถ้าแกลบต่อสมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนซ์                             | 13 |
| ผลของเถ้าแกลบต่อสมบัติความทนทานต่อแรงดึง                                | 13 |
| ผลของเถ้าแกลบต่อสมบัติความทนทานต่อการหักงอแบบ Ross Flexing              | 15 |
| ผลของเถ้าแกลบต่อสมบัติความแข็ง                                          | 16 |
| ผลของเถ้าแกลบต่อสมบัติความทนทานต่อการสึกหรอแบบ Akron                    | 17 |
| ผลของเถ้าแกลบต่อสมบัติความทนทานต่อตัวทำละลาย (Swelling)                 | 18 |
| ราคาของต้นทุนสูตรยาง                                                    | 21 |
| สรุปผลการทดลอง                                                          | 22 |
| เอกสารอ้างอิง                                                           | 23 |

## บทสรุปรายงานสำหรับผู้บริหาร

**ชื่อโครงการ** การเตรียมเขม่าดำจากเปลือกข้าวเพื่อใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ  
Preparation of Carbon Black from Rice Husk for Using as Filler in Natural Rubber

### ชื่อหัวหน้าโครงการ หน่วยงานที่สังกัด และที่อยู่

**ชื่อ-สกุล** นางสาวสุวิมล ศิริวงศ์  
**หน่วยงาน** ภาควิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี  
**ที่อยู่** 85 ถ.สถลมารค ต.เมืองศรีโค อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190  
**โทรศัพท์** 045-353400 ต่อ 4565 โทรสาร 045-288379  
**E-mail** [suwimonsiriwong@yahoo.com](mailto:suwimonsiriwong@yahoo.com)

**นักศึกษา/ผู้ร่วมวิจัย** นางสาวปรานี รอมวงค์  
ดร.บุญญานิซ อินทรพัฒน์  
นายกวิชาติ กะเตื่องงาน

**งบประมาณทั้งโครงการ** 130,000 บาท

**ระยะเวลาดำเนินการ** 12 เดือน ตั้งแต่วันที่ 15 สิงหาคม 2553 - 14 พฤษภาคม 2554

### ปัญหาที่ทำวิจัยและความสำคัญ

เขม่าดำเป็นสารตัวเติมเสริมแรงที่สำคัญที่สุดในอุตสาหกรรมยาง การเติมเขม่าดำลงไปนยาง ทำให้ผลิตภัณฑ์ยางมีสมบัติเชิงกลต่างๆ ดีขึ้นโดยเฉพาะความแข็ง โมดูลัส ความทนต่อแรงดึง ความทนต่อการฉีกขาด รวมถึงความทนทานต่อการขัดถูสูงขึ้น ด้วยเหตุนี้เขม่าดำจึงนำไปใช้เป็นสารตัวเติมเสริมแรงในอุตสาหกรรมมาเป็นเวลานาน แต่เขม่าดำที่ใช้เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของน้ำมันหรือก๊าซธรรมชาติซึ่งเป็นวัตถุดิบที่หมดไปและใช้พลังงานในการผลิตสูง หากสามารถหาวัตถุดิบธรรมชาติซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้มาทดแทนเขม่าดำจากน้ำมันหรือก๊าซธรรมชาติมาผลิตเขม่าดำแล้ว นอกจากจะได้สารตัวเติมชนิดใหม่แล้วยังสามารถเพิ่มมูลค่าให้กับวัตถุดิบเหลือใช้ในชุมชนได้มากขึ้น

### วัตถุประสงค์

1. เพื่อหาวิธีการผลิตเขม่าดำที่มีโครงสร้างสูง และมีขนาดอนุภาคเล็กจากเปลือกข้าวได้
  - 1.1 เพื่อหาสภาวะและเทคนิคที่เหมาะสมในการผลิตเขม่าดำจากเปลือกข้าว
  - 1.2 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการใช้ซิงค์คลอไรด์ และโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์กระตุ้น ที่ความเข้มข้นแตกต่างกันในการผลิตเขม่าดำจากเปลือกข้าว
2. เพื่อหาสมบัติเด่นของยางธรรมชาติจากการใช้เขม่าดำที่ผลิตจากเปลือกข้าวที่มีโครงสร้างสูง และมีขนาดเล็กแตกต่างกัน
3. เพื่อเปรียบเทียบสมบัติของยางผสมเขม่าดำที่ผลิตจากเปลือกข้าวกับเขม่าดำและซิลิกาที่มีใช้ในอุตสาหกรรมยางปัจจุบัน

### ผลการดำเนินงาน

ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเขม่าดำจากเปลือกข้าวเจ้า ข้าวเหนียว และข้าวเหนียวเก่าเปลือกดำ จากการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและโครงสร้างของถ่านแกลบ ได้ชนิดของถ่านและสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเขม่าดำจากเปลือกข้าวเพื่อใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติคือ เปลือกข้าวเหนียว ที่สภาวะเวลาเผา 60 นาที อุณหภูมิ 700 °C ซึ่งได้ค่า Iodine Adsorption Number เท่ากับ 88 mg/g ค่า DBP oil absorption เท่ากับ 153 cm<sup>3</sup> DBP/100 g และเมื่อทดลองกระตุ้นการคาร์บอนซ์เปลือกข้าวด้วยสารเคมี 2 ชนิดคือซิงค์คลอไรด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์พบว่า พื้นที่ผิวจำเพาะและโครงสร้างของถ่านแกลบที่กระตุ้นด้วยสารเคมี ได้สภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเขม่าดำเพื่อใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติคือการนำเปลือกข้าวมาแช่ในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 20 %w/w เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นระยะเวลา 60 นาที พบว่าถ่านแกลบที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์มี ค่า Iodine Adsorption Number เท่ากับ 198 mg/g และค่า DBP oil absorption เท่ากับ 139 cm<sup>3</sup> DBP/100 g ส่วนถ่านแกลบที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์มีค่า Iodine Adsorption Number เท่ากับ 96 mg/g และ ค่า DBP oil absorption เท่ากับ 194 cm<sup>3</sup> DBP/100 g นอกจากนี้เมื่อทดลองนำถ่านแกลบที่ได้ไปผสมกับยางสูตรต่างๆ แล้วทดสอบสมบัติของยางหลังจากวัลคาไนซ์พบว่าถ่านแกลบที่ไม่กระตุ้นสารเคมี ให้ค่าความทนทานต่อการสึกหรอ ค่าความทนทานต่อแรงดึง และความแข็งแรงมากกว่า ถ่านแกลบที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ค่าความทนทานต่อการสึกหรอและความทนทานต่อการหักงอดี แต่ยังคงน้อยกว่าเขม่าดำและซิลิกาทางการค้า นอกจากนี้การขยายตัวของรอยแตกของสูตรที่กระตุ้นด้วย KOH ให้ค่าที่ใกล้เคียงกับเขม่าดำและซิลิกาที่มีขายในทางการค้า ส่วนความทนทานต่อสารเคมีของยางวัลคาไนซ์ที่ใช้ถ่านแกลบเป็นสารตัวเติมพบว่าถ่านแกลบที่ไม่กระตุ้นสารเคมีและถ่านแกลบที่กระตุ้นสารเคมีด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์มีความทนทานต่อแก๊สโซลีนและเบนซินต่ำ แต่ทนต่ออะซิโตน เมื่อวิเคราะห์ราคาของยางแต่ละสูตร ถ่านแกลบที่ไม่กระตุ้นสารเคมีให้สมบัติความแข็งแรงที่สูงในขณะที่ราคาต่ำ ดังนั้นการทำผลิตภัณฑ์ยางบางประเภทที่ไม่ต้องคำนึงถึงสมบัติที่สูงมากนัก อาจใช้ถ่านแกลบเป็นทางเลือก เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติพอใช้ ในขณะที่ต้นทุนการผลิตต่ำ

### สรุปผลการวิจัย

ชนิดของเปลือกข้าวและสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเขม่าดำจากเปลือกข้าวเพื่อใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติคือ เปลือกข้าวเหนียว ที่สภาวะเวลาเผา 60 นาที อุณหภูมิ 700 °C ที่มีค่า Iodine Adsorption Number เท่ากับ 88 mg/g ค่า DBP oil absorption เท่ากับ 153 cm<sup>3</sup> DBP/100 g

ถ่านแกลบที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ได้สภาวะที่เหมาะสมคือการนำเปลือกข้าวมาแช่ในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 20 %w/w เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นระยะเวลา 60 นาที พบว่าได้ค่า Iodine Adsorption Number เท่ากับ 198 mg/g และค่า DBP oil absorption เท่ากับ 139 cm<sup>3</sup> DBP/100 g ส่วนถ่านแกลบที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์มีค่า Iodine Adsorption Number เท่ากับ 96 mg/g และ ค่า DBP oil absorption เท่ากับ 194 cm<sup>3</sup> DBP/100 g

สมบัติเชิงกลของยางที่ใช้ถ่านแกลบเป็นสารตัวเติมพบว่าความทนทานต่อการหักงอของถ่านแกลบที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ทนต่อการหักงอดีกว่าถ่านแกลบที่ไม่กระตุ้นสารเคมี ส่วนค่าความแข็งแรงของถ่านแกลบที่ไม่กระตุ้นสารเคมีให้ความแข็งแรงที่มากกว่าถ่านแกลบที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ในขณะที่ความต้านทานต่อการสึกหรอให้ผลใกล้เคียงกัน

**ข้อเสนอแนะที่คาดว่าจะควรวิจัยเพิ่มเติม และวิธีการที่ควรพัฒนาต่อยอดสู่ภาคปฏิบัติจริง**

ศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการปรับปรุงสภาพพื้นผิวสารตัวเดิมที่ผลิตได้ หรือหาสารช่วยการยึดเกาะระหว่างอนุภาคสารตัวเดิมและยางที่มีราคาถูกและมีประสิทธิภาพ

**ผลงานทางวิชาการที่คาดว่าจะเกิดขึ้น**

ได้วิธีในการผลิตเขม่าดำจากเปลือกข้าวที่มีโครงสร้างสูง และมีขนาดอนุภาคเล็ก นอกจากนี้ยังได้ผลการเปรียบเทียบระหว่างสมบัติของยางจากการใช้เขม่าดำที่เตรียมได้กับสมบัติที่ได้จากการใช้เขม่าดำ และซิลิกาที่มีใช้ในอุตสาหกรรม อีกทั้งได้สารตัวเดิมเสริมประสิทธิภาพที่มีราคาถูกที่ใช้เป็นสารตัวเดิมในยางธรรมชาติ

### บทคัดย่อ

ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการเตรียมเขม่าดำจากเปลือกข้าวเจ้า ข้าวเหนียว และข้าวเหนียวเก่าเปลือกดำจากการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและโครงสร้างของถ่านกัมมันต์ พบว่าเปลือกข้าวเหนียวให้ค่า Iodine Adsorption Number และค่า DBP oil absorption ที่ดีที่สุด ที่สภาวะเวลาเผา 60 นาที อุณหภูมิ 700 °C จากนั้นนำเปลือกข้าวเหนียวมากระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์แล้ววิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและโครงสร้างของถ่านกัมมันต์ได้ พบว่าที่ความเข้มข้น 20 %w/w ให้ค่า Iodine Adsorption Number และค่า DBP oil absorption ที่ดีที่สุด สมบัติเชิงกลของยางที่ใช้ถ่านกัมมันต์เป็นสารตัวเติมพบว่าความทนทานต่อการหักงอของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ทนต่อการหักงอดีกว่าถ่านกัมมันต์ที่ไม่กระตุ้นสารเคมี ส่วนค่าความแข็งของถ่านกัมมันต์ที่ไม่กระตุ้นสารเคมีให้ความแข็งที่มากกว่าถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ในขณะที่ความต้านทานต่อการสึกหรอให้ผลใกล้เคียงกัน

### Abstract

Preparation of carbon black from Jasmine rice (*Oryza sativa* L), White sticky rice (*Oryza sativa* var.*glutinosa*) and Black sticky rice (*Oryza sativa* var.*glutinosa*) were studied for analysis specific surface area and structure of rice husk. It was found that white sticky rice husk has the best iodine absorption number and DBP oil absorption when using 60 minutes and 700 °C carbonization. White sticky rice husk using 20%w/w ZnCl<sub>2</sub> and KOH as activator gave the highest iodine adsorption number and DBP oil absorption. Mechanical properties of vulcanized rubber which is using rice husk as filler were found that Ross flexing of rice husk activated with KOH better than non-activated rice husk filler, but hardness of non-activated rice husk filled in the vulcanizate rubber harder than KOH activating rice husk whereas abrasion resistant closed to each other

## 1. เนื้อหา

### 1.1 ความสำคัญและที่มา

เขม่าดำเป็นสารตัวเติมเสริมแรงที่สำคัญที่สุดในอุตสาหกรรมยาง การเติมเขม่าดำลงไปนยาง ทำให้ผลิตภัณฑ์ยางมีสมบัติเชิงกลต่างๆ ดีขึ้นโดยเฉพาะความแข็งแรง โมดูลัส ความทนต่อแรงดึง ความทนต่อการฉีกขาด รวมถึงความทนทานต่อการขัดถูสูงขึ้น ด้วยเหตุนี้เขม่าดำจึงนำไปใช้เป็นสารตัวเติมเสริมแรงในอุตสาหกรรมมาเป็นเวลานาน แต่เขม่าดำที่ใช้เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของน้ำมันหรือก๊าซธรรมชาติซึ่งเป็นวัตถุดิบที่หมดไปและใช้พลังงานในการผลิตสูง หากสามารถหาวัตถุดิบธรรมชาติซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้มาทดแทนเขม่าดำจากน้ำมันหรือก๊าซธรรมชาติมาผลิตเขม่าดำแล้ว นอกจากจะได้สารตัวเติมชนิดใหม่แล้วยังสามารถเพิ่มมูลค่าให้กับวัตถุดิบเหลือใช้ในชุมชนได้มากขึ้น

การใช้เขม่าดำผสมในยางเป็นที่ทราบกันดีว่าเขม่าดำยิ่งอนุภาคเล็กจะทำให้ความแข็งแรงของยางเพิ่มมากขึ้น การเตรียมเขม่าดำจากวัตถุดิบธรรมชาติที่เหลือใช้ในชุมชนนั้น แม้จะไม่สามารถเตรียมให้มีขนาดอนุภาคเล็กเท่ากับที่ผลิตได้จากน้ำมันหรือก๊าซธรรมชาติ แต่ก็สามารถทำให้คุ้มค่าต่อการลงทุนได้ เนื่องจากสามารถเติมลงในยางได้มากขึ้น จึงเป็นการเจือจางเนื้อยางทำให้ต้นทุนทางด้านวัตถุดิบต่อหน่วยลดลง นอกจากนี้หากสามารถเตรียมเขม่าดำจากวัตถุดิบธรรมชาติที่เหลือใช้ในชุมชนให้มีโครงสร้างสูงได้ก็จะทำให้มีความหลากหลายในการเลือกไปใช้งานมากยิ่งขึ้น

ข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีการปลูกมากที่สุดในประเทศไทย นอกจากจะได้ข้าวเป็นผลผลิตหลักแล้ว ผลพลอยได้เช่น ชีลิกาและคาร์บอนที่มีอยู่ในเปลือกข้าวก็ยังสามารถนำมาผลิตเป็นสารตัวเติมเสริมแรงให้กับผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติได้ หากเราสามารถหาวิธีในการผลิตเขม่าดำจากเปลือกข้าวและนำมาใช้ผสมกับยางธรรมชาติให้มีความเข้ากันได้ จะเป็นการใช้ประโยชน์จากวัตถุดิบเหลือใช้อีกทั้งเป็นการช่วยลดต้นทุนการทำผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติได้อีกด้วย

### 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อหาวิธีการผลิตเขม่าดำที่มีโครงสร้างสูง และมีขนาดอนุภาคเล็กจากเปลือกข้าวได้
  - 1.2.1.1 เพื่อหาสภาวะและเทคนิคที่เหมาะสมในการผลิตเขม่าดำจากเปลือกข้าว
  - 1.2.1.2 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการใช้ซิงค์คลอไรด์ และโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์กระตุ้น ที่ความเข้มข้นแตกต่างกันในการผลิตเขม่าดำจากเปลือกข้าว
- 1.2.2 เพื่อหาสมบัติเด่นของยางธรรมชาติจากการใช้เขม่าดำที่ผลิตจากเปลือกข้าวที่มีโครงสร้างสูง และมีขนาดเล็กลงแตกต่างกัน
- 1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบสมบัติของยางผสมเขม่าดำที่ผลิตจากเปลือกข้าวกับเขม่าดำและชีลิกาที่มีใช้ในอุตสาหกรรมยางปัจจุบัน

## 2. ทฤษฎี แนวคิดในการทำวิจัย และผลงานที่เกี่ยวข้อง

Helson *et al.*, 2007 ได้ศึกษาการเติมเถ้าแกลบขาว (White rice husk ash, WRHA) และเถ้าแกลบดำ (Black rice husk ash; BRHA) ในยางธรรมชาติเพื่อศึกษาสมบัติความทนทานต่อแรงดึงและสมบัติความต้านทานต่อการฉีกขาด เปรียบเทียบกับชีลิกาและเขม่าดำ จากการทดลองพบว่า WRHA, BRHA, เขม่าดำและชีลิกาที่เติมลงในยางคอมปาวด์ให้สมบัติคล้ายกันที่ปริมาณการเติมน้อยๆ ส่วนสมบัติความทนทานต่อแรงดึงพบว่า BRHA เป็นสารตัวเติมที่ไม่เสริมแรงสามารถเติมลงในยางคอมปาวด์ได้เพียง 20 phr ส่วน WRHA เป็นสารตัวเติมที่เสริมประสิทธิภาพ<sup>23</sup>

Ishak and Bakar, 1995 ได้ศึกษาผลของการเติมเถ้าแกลบขาว (White rice husk ash, WRHA) และเถ้าแกลบดำ (Black rice husk ash; BRHA) ในการเสริมแรงให้กับยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (50% อีพอกไซด์) ซึ่งเป็นยางธรรมชาติที่มีการดัดแปรให้มีความเป็นขี้ผึ้งมากขึ้น เปรียบเทียบผลกับการใช้ชีลิกาและเขม่าดำโดยมีการใช้และไม่ใช้สารคู่ควบไซเลน จากการทดลองพบว่าเถ้าแกลบขาวให้ค่าความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength, TS) สูงกว่าการใช้เถ้าแกลบดำ แต่มีค่าต่ำกว่า



การใช้ซิลิกา และเขม่าดำ และเมื่อมีการใช้สารคู่ควบไซเลนพบว่าค่าความทนทานต่อแรงดึงของเส้นใยเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก ในขณะที่เส้นใยที่เติมสารคู่ควบไซเลนสังเกตเห็นการเพิ่มขึ้นของค่าความทนทานต่อแรงดึงอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่สมบัติเชิงกลด้านอื่นๆ (ค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด ค่าความต้านทานการฉีกขาด และค่าความแข็งแรงของชิ้นงาน) ของชิ้นงานที่มีการใช้เส้นใยเส้นใย เส้นใยซิลิกา และเขม่าดำมีค่าไม่ต่างกันมากนัก<sup>24</sup>

Ismail *et al.*, 1999 ได้ศึกษาผลการเติมเถ้ากลบขาว (White rice husk ash, WRHA) ลงในยางธรรมชาติโดยการใช้สารคู่ควบที่มีหลายหมู่ฟังก์ชัน (Multifunctional additive, MFA) ซึ่งในการทดลองนี้หมายถึงหมู่ฟังก์ชัน n-1, 3-propane diamine salt ของกรดคาร์บอกซิลิกแอโนไอออน  $[RNH^+_2(CH_2)_3NH^+_3][R'COO^-]_2$  จากผลการทดลองพบว่าที่ปริมาณเถ้ากลบขาว 10 phr ให้สมบัติเชิงกลดีที่สุด การใช้ MFA ที่ 3 phr จะช่วยเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างยางและเถ้ากลบขาวมากขึ้น โดยสังเกตเห็นการกระจายตัวของเถ้ากลบขาวในยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น ทำให้สมบัติเชิงกลสูงขึ้นกว่าการใช้เถ้ากลบขาวเพียงอย่างเดียว<sup>25</sup>

Ismail *et al.*, 2001 ได้ศึกษาการเติมเถ้ากลบขาว (White rice husk ash, WRHA) ในยางธรรมชาติผสมโพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Natural rubber, NR / Linear low density polyethylene, LLDPE) ที่มีการเติมและไม่เติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ (Compatibilizer) ในการทดลองนี้ใช้ poly(propylene-ethylene-acrylic acid), PPEAA เพื่อศึกษาสมบัติความทนทานต่อแรงดึง โมดูลัส ความสามารถในการยืดจนขาด ความแข็งแรงและปริมาณการบวมพอง จากการทดลองพบว่าเมื่อเติม WRHA ใน NR/LLDPE ความทนทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาดและปริมาณการบวมพองลดลง แต่ค่าโมดูลัสและความแข็งแรงเพิ่มขึ้น และเมื่อเติม WRHA ร่วมกับ PPEAA ใน NR/LLDPE ผลที่ได้คือความต้านทานแรงดึง, โมดูลัส, ความแข็งแรงและความสามารถในการยืดจนขาดเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณการบวมพองลดลง เพราะ PPEAA จะช่วยเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างเมทริกซ์กับสารตัวเติมและช่วยให้สารตัวเติมกระจายตัวในเมทริกซ์เพิ่มขึ้น<sup>26</sup>

Phetphaisit *et al.*, 2008 ได้ศึกษาการเสริมแรงยางธรรมชาติด้วยเถ้ากลบดำ (Black rice husk ash; BRHA) โดยการผสมโดยตรงและการปรับสภาพผิวก่อนการผสม จากการทดลองพบว่า BRHA ที่ไม่ทำการปรับสภาพผิวที่ปริมาณ 10 phr ให้สมบัติเชิงกลดีที่สุด โดยปริมาณที่เติมมีข้อจำกัด อาจเนื่องมาจากผลของสัดส่วนของซิลิกาที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณของ BRHA ที่ใช้ และเมื่อทำการปรับสภาพผิว BRHA ด้วยสาร 2 ชนิด คือ ไซเลนและยางธรรมชาติเหลวดัดแปร (Liquid epoxidized natural rubber, LENR) พบว่าในปริมาณของสารที่เท่ากัน การใช้ LENR ที่มีการวัลคาไนซ์ร่วมกับ BRHA แสดงประสิทธิภาพในการเข้ากันได้กับยางธรรมชาติดีกว่าการใช้ไซเลน ทั้งนี้เนื่องจากมาจาก LENR นอกจากช่วยให้ซิลิกาที่มีผิวเข้ากันได้กับยางธรรมชาติที่ไม่ผิวได้มากขึ้นแล้ว LENR ยังสามารถวัลคาไนซ์ร่วมกับยางธรรมชาติได้อีกด้วย<sup>27</sup>

ธนัญญา เสาวภาคย์ (2010) ทดลองใช้เขม่าดำและซิลิกาเป็นสารตัวเติมเสริมแรงทำให้สมบัติเชิงกลและเชิงพลวัตของยางธรรมชาติดีขึ้น มีการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของซิลิกาและเขม่าดำที่จะทำให้ได้สมบัติที่ดีที่สุด การกระจายตัวของซิลิกาในยางธรรมชาติยากกว่าเขม่าดำ แต่จะสามารถเพิ่มความสามารถในการกระจายตัวของซิลิกาให้ดีขึ้นได้โดยการปรับปรุงพื้นผิวของซิลิกาด้วยวิธีทางเคมีโดยการใช้สารตัวเชื่อม (Coupling agent) เช่น bis(3-triethoxysilylpropyl) tetrasulfide หรือ Si-69 นอกจากนี้ยังพบว่ายางที่มีผิว เช่น ยางคลอโรพรีน (CR) และ ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (ENR) ก็สามารถช่วยเพิ่มการกระจายตัวของซิลิกาให้ดีขึ้นได้ เนื่องจากความมีผิวของยางทำให้เกิดแรงกระทำระหว่างยางและซิลิกามากขึ้น ดังนั้นจึงทำให้ยางธรรมชาติและซิลิกาเข้ากันได้ดีขึ้น ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษการเสริมแรงของยางธรรมชาติโดยการใช้สารตัวเติมผสมของซิลิกาและเขม่าดำที่อัตราส่วนต่างๆ เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมโดยปรับปริมาณของซิลิกาตั้งแต่ 0 ถึง 50 ส่วน โดยปริมาณรวมของสารตัวเติมทั้งสองชนิดคือ 50 ส่วน เมื่อเทียบกับปริมาณยางทั้งหมด 100 ส่วน ในการทดลองนี้ได้ทำการทดสอบสมบัติเชิงกลและเชิงพลวัต เช่น ความแข็งแรง ความทนทานต่อแรงดึง แรงต้านทานการฉีกขาด ความต้านทานต่อการสึกหรอ ความต้านทานต่อการหักงอ ความต้านทานต่อความร้อนสะสม และความต้านทานต่อการหมุ่น ผลการทดลองพบว่ายางธรรมชาติ ที่มีปริมาณซิลิกา 20 ส่วน และ เขม่าดำ 30 ส่วน แสดงสมบัติดีที่สุด การเติม CR หรือ ENR ในระบบสารตัวเติมผสมนี้ทำให้ความทนทานต่อแรงดึงหลังบ่มแรงและความต้านทานต่อการสึกหรอดีขึ้น ในขณะที่ทำให้สมบัติ

อื่นๆ ด้อยลง ในกรณีที่ในระบบไม่มี Si-69 พบว่าสมบัติโดยรวมด้อยลง เนื่องจากแรงกระทำระหว่างสารตัวเติมกับยางธรรมชาติน้อยลง เมื่อเปรียบเทียบระหว่างผลของ Si-69 กับยางที่มีข้อพบว่า การใช้ Si-69 จะให้สมบัติต่างๆ ที่ดีกว่าการใช้ยางที่มีข้อ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า Si-69 เป็นสารที่จำเป็นต่อการช่วยปรับปรุงสมบัติของยางธรรมชาติที่ใช้สารตัวเติมผสมของซิลิกาและเขม่าดำ เนื่องจาก Si-69 ทำให้แรงกระทำระหว่างสารตัวเติมกับยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น ช่วยให้การกระจายตัวของซิลิกาดีขึ้น นอกจากนั้น Si-69 ยังช่วยเพิ่มปริมาณโครงสร้างร่างแหในยางธรรมชาติด้วย อย่างไรก็ตามในกรณีที่ในระบบไม่มีการใช้ Si-69 พบว่า ENR ทำหน้าที่เป็นสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างยางธรรมชาติและสารตัวเติมผสมในยางธรรมชาติได้ดีกว่า CR <sup>22</sup>

### 3. วิธีการทดลอง

#### 3.1 การเตรียมผงเขม่าดำจากเปลือกข้าว

ในงานวิจัยนี้ใช้ สภาวะการเตรียม 3 ชนิด คือ

##### 3.1.1 การคาร์บอนซ์เปลือกข้าว (ไม่ใช้สารเคมีกระตุ้น)

ทำความสะอาดเปลือกข้าว นำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง บดย่อยขนาดและคัดขนาดให้มีขนาดประมาณ 1-5 มิลลิเมตร นำเปลือกข้าวที่คัดขนาดแล้วใส่ในถ้วยกระเบื้องแล้วนำไปเผาในเตาไฟฟ้าให้ความร้อนในเตาไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 500, 600, 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 60, 90, 120 และ 150 นาที บดเจ้ากลบที่ได้ให้ละเอียด นำมาวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะโดยใช้หลักการดูดซับไอโอดีน (ASTM D 1510-09) และวิเคราะห์โครงสร้างโดยใช้หลักการดูดซึมน้ำมัน Dibutyl phthalate (DBP)

##### 3.1.2 การคาร์บอนซ์เปลือกข้าว โดยการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ( $ZnCl_2$ )

นำเปลือกข้าวได้ แขนในสารละลาย  $ZnCl_2$  เข้มข้น 20% โดยน้ำหนัก นาน 12, 24, 36 และ 48 ชั่วโมง แล้วนำไปอบให้แห้ง นำไปเผาในเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิและเวลาที่เลือกจากข้อ 3.3.1.1 กล่าวคือเผาที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นเวลา 60 นาที ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนความเข้มข้นของ  $ZnCl_2$  เป็น 40%, 60% และ 80 % โดยน้ำหนัก บดเจ้ากลบที่ได้ให้ละเอียด นำมาวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะโดยใช้หลักการดูดซับไอโอดีน (ASTM D 1510-09) และวิเคราะห์โครงสร้างโดยใช้หลักการดูดซึมน้ำมัน Dibutyl phthalate (DBP)

##### 3.1.3 การคาร์บอนซ์เปลือกข้าว โดยการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)

นำเจ้ากลบเปลือกข้าวที่วิเคราะห์ที่ได้โครงสร้างสูงและอนุภาคเล็ก แขนในสารละลาย KOH เข้มข้น 20% โดยน้ำหนัก นาน 12, 24, 36 และ 48 ชั่วโมง แล้วนำไปอบให้แห้ง นำไปเผาในเตาไฟฟ้า ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนความเข้มข้นของ KOH เป็น 40%, 60% และ 80 % โดยน้ำหนัก บดเจ้ากลบที่ได้ให้ละเอียด นำมาวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะโดยใช้หลักการดูดซับไอโอดีน (ASTM D 1510-09) และวิเคราะห์โครงสร้างโดยใช้หลักการดูดซึมน้ำมัน Dibutyl phthalate (DBP)

#### 3.2 การเตรียมยางคอมปาวด์และการขึ้นรูป

ปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ในการเตรียมยางคอมปาวด์ ดังแสดงในตารางที่ 3.1, 3.2 และ 3.3 เตรียมยางธรรมชาติคอมปาวด์บดผสมด้วยเครื่องผสมสองลูกกลิ้งที่อุณหภูมิห้อง อัตราส่วนความเร็วลูกกลิ้งหน้าต่อลูกกลิ้งหลัง เท่ากับ 1:1.21 มีลำดับขั้นตอนการผสมและสารเคมีในยางธรรมชาติเริ่มจากการบดยางให้นิ่มเป็นเวลาประมาณ 3 นาที จากนั้นจึงเติมซิงค์ออกไซด์และกรดสเตียริก หลังจากการผสมเข้ากันดีแล้วจึงเติมสารตัวเติมจนเข้ากันดีแล้วเติมตัวเร่งปฏิกิริยา (MBTS, CBS และ DPG) จากนั้นเติมสารแอนต็อกซิแดนท์ สุดท้ายเติมซิลเฟอร์ตามลำดับ หลังจากการผสมเสร็จทั้งยางคอมปาวด์ไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำยางคอมปาวด์ที่ได้ไปทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ด้วยเครื่องวัดความหนืดมูนนี่ (Mooney Viscometer) ที่อุณหภูมิ 160°C จากนั้น นำยางคอมปาวด์ที่ได้ไปขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดยางเข้าแบบพิมพ์ ที่อุณหภูมิ 160°C

ทดสอบสมบัติความทนทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อสารละลาย ความแข็ง ความต้านทานต่อการสึกหรอ และความทนทานต่อการหักงอ

**ตารางที่ 3.1** สูตรการเตรียมยางคอมปาวด์ที่ดัดแปลงมาจาก ASTM D 5963 #1 (สูตรยางมาตรฐานสำหรับทดสอบความทนต่อการสึกหรอแบบ Akron)

| วัตถุดิบ                        | สูตร/ปริมาณ (phr) |     |     |     |     |
|---------------------------------|-------------------|-----|-----|-----|-----|
|                                 | A                 | B   | C   | D   | E   |
| NR                              | 100               | 100 | 100 | 100 | 100 |
| ZnO                             | 50                | 50  | 50  | 50  | 50  |
| N330                            | 36                | -   | -   | -   | -   |
| N550                            | -                 | 36  | -   | -   | -   |
| เถ้าแกลบ                        | -                 | -   | 36  | -   | -   |
| เถ้าแกลบกระตุ้น $\text{ZnCl}_2$ | -                 | -   | -   | 36  | -   |
| เถ้าแกลบกระตุ้น KOH             | -                 | -   | -   | -   | 36  |
| MBTS                            | 1.8               | 1.8 | 1.8 | 1.8 | 1.8 |
| 6PPD                            | 1                 | 1   | 1   | 1   | 1   |
| S                               | 2.5               | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 |

**ตารางที่ 3.2** สูตรการเตรียมยางคอมปาวด์ที่ดัดแปลงจาก ASTM D 5963 #2 (สูตรยางมาตรฐานสำหรับทดสอบความทนต่อการสึกหรอแบบ Akron)

| วัตถุดิบ                        | สูตร/ปริมาณ (phr) |     |     |     |     |
|---------------------------------|-------------------|-----|-----|-----|-----|
|                                 | F                 | G   | H   | I   | J   |
| NR                              | 100               | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Stearic acid                    | 2                 | 2   | 2   | 2   | 2   |
| ZnO                             | 5                 | 5   | 5   | 5   | 5   |
| N330                            | 50                | -   | -   | -   | -   |
| N550                            | -                 | 50  | -   | -   | -   |
| เถ้าแกลบ                        | -                 | -   | 50  | -   | -   |
| เถ้าแกลบกระตุ้น $\text{ZnCl}_2$ | -                 | -   | -   | 50  | -   |
| เถ้าแกลบกระตุ้น KOH             | -                 | -   | -   | -   | 50  |
| CBS                             | 0.5               | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| 6PPD                            | 1                 | 1   | 1   | 1   | 1   |
| S                               | 2.5               | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 |

ตารางที่ 3.3 สูตรการเตรียมยางคอมปาวด์เปรียบเทียบกับซิลิกา<sup>27</sup>

| วัตถุดิบ                        | สูตร/ปริมาณ (phr) |      |      |      |
|---------------------------------|-------------------|------|------|------|
|                                 | K                 | L    | M    | N    |
| NR                              | 100               | 100  | 100  | 100  |
| Stearic acid                    | 3                 | 3    | 3    | 3    |
| ZnO                             | 5                 | 5    | 5    | 5    |
| Silica                          | 58.5              | -    | -    | -    |
| เถ้าแกลบ                        | -                 | 58.5 | -    | -    |
| เถ้าแกลบกระตุ้น $\text{ZnCl}_2$ | -                 | -    | 58.5 | -    |
| เถ้าแกลบกระตุ้น KOH             | -                 | -    | -    | 58.5 |
| MBTS                            | 0.8               | 0.8  | 0.8  | 0.8  |
| DPG                             | 1.2               | 1.2  | 1.2  | 1.2  |
| 6PPD                            | 1                 | 1    | 1    | 1    |
| S                               | 3                 | 3    | 3    | 3    |

### 3.3 การทดสอบสมบัติต่างๆ

#### 3.3.1 การทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์

นำยางคอมปาวด์ที่ได้ไปหาวงล้อสำหรับการวัลคาไนซ์ของยาง ตัดยางตัวอย่างเป็นรูปวงกลม จำนวน 2 ชิ้น ชิ้นหนึ่งให้เจาะรูตรงกลางไว้ให้สอดโรเตอร์ได้สะดวก นำโรเตอร์ขนาดใหญ่มาใส่ลงในเครื่อง ตั้งอุณหภูมิเครื่องทดสอบที่ 160 องศาเซลเซียส แล้วปิดแผ่นอัดลง เพื่ออุ่นโรเตอร์ให้มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิการทดสอบ จากนั้นนำโรเตอร์ที่ร้อนออกจากเครื่อง แล้วสอดยางชิ้นหนึ่งลงไปบนแกนของโรเตอร์อย่างรวดเร็ว ส่วนยางอีกชิ้นหนึ่งให้วางตรงกลางของโรเตอร์นั้น แล้วนำโรเตอร์ใส่เข้าไปในเครื่องอย่างรวดเร็ว ปิดเครื่องและเริ่มจับเวลา อุณหภูมิในเครื่องให้ได้เวลาเท่ากับ 1 นาทีพอดี แล้วเดินมอเตอร์ให้โรเตอร์หมุน ให้เริ่มต้นอ่านค่าความหนืดของยาง และหาค่าความหนืดต่ำสุด ( $t_m$ ), Mooney scorch time ( $t_5$ ) และ ค่าความหนืดต่างๆ ตามเวลาที่เพิ่มขึ้น

คำนวณหาเวลาการวัลคาไนซ์ได้จากสมการของ Juve ดังนี้

$$t_c = t_5 + 10t_{\Delta 30} \quad (3.1)$$

เมื่อ  $t_c$  = เวลา Optimum cure,  $t_c$   
 $t_5$  = ค่าความหนืดของยางที่สูงกว่าค่าต่ำสุด 5 หน่วย (Scorch time)  
 $t_{\Delta 30} = t_{35} - t_5$  (ค่า Cure index)  
 $t_{35}$  = ค่าความหนืดของยางที่สูงกว่าค่าต่ำสุด 35 หน่วย

#### 3.3.2 การทดสอบสมบัติความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength)

ทดสอบสมบัติความทนทานต่อแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D412 (2005) โดยขึ้นทดสอบเป็นรูปดัมเบล (Dumb-bell) ขนาดความยาว 115 มิลลิเมตร กว้าง  $6 \pm 0.4$  มิลลิเมตร หนาไม่ต่ำกว่า 1.5 มิลลิเมตร และไม่เกิน 3 มิลลิเมตร วัดความหนา 3 จุด นำไปทดสอบด้วยเครื่อง Tensile machine ที่อัตราการดึง  $500 \pm 50$  มิลลิเมตรต่อนาที รายงานผลเป็น  $\text{N/mm}^2$  หรือ MPa ใช้สูตรคำนวณดังนี้

$$\text{Tensile strength} = F/A \quad (3.2)$$

เมื่อ  $F$  = แรงที่ใช้ในการดึงจนชิ้นทดสอบขาด (นิวตัน, N)

$A$  = พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของชิ้นทดสอบ (ตารางมิลลิเมตร,  $\text{mm}^2$ )

### 3.3.3 การทดสอบสมบัติความแข็ง (Hardness)

ทดสอบสมบัติด้านความแข็งโดยใช้ Durometer แบบ Shore A ตามมาตรฐาน ASTM D2240-04 ตัวอย่างชิ้นทดสอบมีความหนาประมาณ 8 มิลลิเมตร กดให้เป็นของเครื่องทดสอบสัมผัสกับหน้ายางโดยตลอด ทำการวัด 5 จุด ใช้ค่ากลางของข้อมูล (Median) เป็นความแข็งของตัวอย่างที่ทดสอบ

### 3.3.4 การทดสอบความต้านทานต่อตัวทำละลาย (Solvent resistance)

การทดสอบความต้านทานต่อตัวทำละลาย โดยนำชิ้นทดสอบมาทดสอบการบวมพอง (Swelling test) ในน้ำมัน แก๊สโซลีน เบนซีนและอะซิโตน โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D471-98 โดยนำชิ้นทดสอบมาตัดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสให้มี ความกว้าง 10 มิลลิเมตร ยาว 10 มิลลิเมตร มีความหนาประมาณ 2 มิลลิเมตร ซึ่งน้ำหนักชิ้นทดสอบละเอียด 0.0001 กรัม แขนในตัวทำละลายชนิดต่างๆประมาณ 30 มิลลิลิตร ซึ่งบรรจุในปิกริดปิดภาชนะให้มิดชิด ตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชม. 72 ชม. และ 168 ชม. จากนั้นนำชิ้นทดสอบมาชั่งน้ำหนักอีกครั้ง คำนวณหาเปอร์เซ็นต์การบวมพองตามสมการ

$$\text{Swelling (\%)} = 100 \times (W_s - W_o) / W_o \quad (3.3)$$

เมื่อ  $W_s$  คือ น้ำหนักของชิ้นทดสอบหลังแช่ในตัวทำละลาย (กรัม)

$W_o$  คือ น้ำหนักของชิ้นทดสอบก่อนแช่ในตัวทำละลาย (กรัม)

### 3.3.5 การทดสอบความถ่วงจำเพาะของยางคอมปาวด์

ทดสอบความถ่วงจำเพาะ โดยชั่งขวดปิคโนมิเตอร์ (Pyknometer) ได้น้ำหนัก  $W$  กรัม ซึ่งขวดบรรจุน้ำกลั่นได้ น้ำหนัก  $W_1$  กรัม ซึ่งขวดที่เติมน้ำยางคอมปาวด์ที่จะหาค่าความถ่วงจำเพาะได้น้ำหนัก  $W_2$  กรัม และเมื่อเติมน้ำกลั่นเพิ่มเข้าไป ในขวดปิคโนมิเตอร์ที่มียางจนเต็มได้น้ำหนัก  $W_3$  กรัม คำนวณหาค่าความถ่วงจำเพาะของยางคอมปาวด์ ดังนี้

$$\text{ค่าความถ่วงจำเพาะของยางคอมปาวด์} = (W_2 - W) / ((W_1 - W) - (W_3 - W_2)) \quad (3.4)$$

### 3.3.6 การทดสอบความทนทานต่อการหักงอ

ทดสอบความทนทานต่อการหักงอตามมาตรฐาน ASTM D 1052-85 วัดและบันทึกความหนาของตัวอย่างยาง บริเวณกลางชิ้นงาน 3 ค่า และบันทึกค่ากลาง จัดเครื่องให้ที่จับยางอยู่ในลักษณะแนวนอน และเอาตัวอย่างยางสอดเข้าไป ให้รอยเจาะอยู่ตรงศูนย์กลางการโค้งงอพอดี กดลูกกลิ้งด้านบนลงมาเพื่อให้ยืดยาง ให้ระยะลูกกลิ้งนั้นเพียงแค่อสัมผัสกับผิวยาง ตรงเอาไว้ เดินเครื่องให้ครบ 250,000 รอบ แล้ว วัดระยะการแตกของตัวอย่างยางขณะขึ้นทดสอบถูกงอเป็นมุม 45 องศา

### 3.3.7 การทดสอบความต้านทานต่อการสึกหรอแบบ Akron

ทดสอบความทนทานต่อการสึกหรอแบบ Akron ตามมาตรฐาน B.S. 903: Part A 9 นำตัวอย่างยางตัดขอบที่เกิน จากการอัดเข้าให้เรียบร้อย ชั่งน้ำหนัก จากนั้นให้นำตัวอย่างยางดังกล่าวมาใส่เข้าไปในเครื่อง Akron abrader หมุนให้ครบ 500 รอบ นำตัวอย่างยางไปชั่ง คำนวณหาปริมาตรของยางที่หายไป จากปริมาตรที่หายไปนี้ให้นำยางดังกล่าวไปเดิน “Running-in” โดยเทียบจำนวนรอบดังแสดงในตารางที่ 3.4 หลังจากที่ได้ “Running-in” แล้วให้นำยางไปชั่งแล้วเดินเครื่อง 5 ครั้งติดต่อกันโดยแต่ละครั้ง ให้เดินเท่ากับรอบที่ได้ระบุไว้ในตารางที่ 3.4 บริเวณผิวของหินขัดจะต้องทำความสะอาดทุก

ครั้งด้วยแปรงลวดในขณะที่ได้นำยางออกไปซั้งเมื่อนำยางกลับมาทดสอบใหม่อีกครั้ง จะต้องใส่ยางเข้าไปในตำแหน่งเดิมทุกครั้ง ทดสอบ 5 ครั้งแล้วนำผลมาเฉลี่ยกัน ถ้าผลการทดสอบใดมีค่าแตกต่างไปจากค่าเฉลี่ย  $\pm 10 \%$  ให้ทดลองใหม่สำหรับค่า นั้น

**ตารางที่ 3.4** “Running-in” และระยะเดินเครื่องที่ต้องทดสอบจริง

| ปริมาตร (ลบ.ซม.) ที่หายไปจากการเดิน 500 รอบแรก | “Running-in” (รอบ) | ระยะเดินเครื่องที่ต้องทดสอบ (รอบ) |
|------------------------------------------------|--------------------|-----------------------------------|
| สูงกว่า 0.05 แต่ไม่เกิน 0.10                   | 4000               | 1000                              |
| สูงกว่า 0.10 แต่ไม่เกิน 0.20                   | 2000               | 500                               |
| สูงกว่า 0.20 แต่ไม่เกิน 0.40                   | 750                | 250                               |
| สูงกว่า 0.40                                   | 125                | 125                               |

จากค่าเฉลี่ยในการทดสอบ 5 ครั้ง ให้คำนวณหาปริมาตรของยางที่สูญเสียไปจากการเดินเครื่อง 1,000 รอบ นำปริมาตรของยางที่สูญเสียมาคำนวณหาค่า Abrasion index ดังนี้

$$\text{Abrasion index} = 100 \times (S/T) \quad (3.5)$$

เมื่อ  $S$  = ปริมาตรของยางมาตรฐานที่สูญเสียไปจากการหมุนหินขัด 1,000 รอบ โดยปริมาตรดังกล่าวเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการหมุน 5 ครั้ง

$T$  = ปริมาตรของยางตัวอย่างที่สูญเสียไปจากการหมุนหินขัด 1,000 รอบ โดยปริมาตรดังกล่าวเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการหมุน 5 ครั้ง

### 3.3.7 การทดสอบหาพื้นที่ผิวจำเพาะโดยใช้หลักการดูดซับไอโอดีน

การทดสอบหาพื้นที่ผิวจำเพาะโดยใช้หลักการดูดซับไอโอดีน ตามมาตรฐาน ASTM D1510-03 โดยการนำแก้วกลบไปอบที่อุณหภูมิ  $125^\circ\text{C}$  เวลา 1 ชั่วโมง ซั้งแก้วกลบลงในหลอดทดลอง ปิเปตสารละลาย  $\text{I}_2$  ความเข้มข้น  $0.0473 \text{ N}$   $25 \text{ cm}^3$  นำไปเข้าเครื่องเขย่า 1 นาที ความเร็ว 240 รอบ/นาที นำไปปั่นแยกด้วยเครื่องเซนตริฟิวส์ 4 นาที ปิเปตสารละลายที่เหลือ  $20 \text{ cm}^3$  ลงในขวดรูปชมพู่ หยดน้ำแบ่ง 3-5 หยด (อินดิเคเตอร์) ไตเตรทด้วยสารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟต ความเข้มข้น  $0.0394 \text{ N}$  จนสารละลายเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นน้ำเงิน บันทึกปริมาตรที่ใช้ คำนวณหาค่า Iodine Adsorption Number ดังนี้

$$\text{Iodine Adsorption Number} = [(B-S)/B](V/W)N \times 126.91 \quad (3.6)$$

เมื่อ  $B$  = ปริมาตรสารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟตที่ใช้ไตเตรทสารอ้างอิง ( $\text{cm}^3$ )

$S$  = ปริมาตรสารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟตที่ใช้ไตเตรทสารมาตรฐาน ( $\text{cm}^3$ )

$V$  = ปริมาตรสารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟตที่ใช้ไตเตรทสารตัวอย่าง ( $\text{cm}^3$ )

$W$  = น้ำหนักแก้วกลบ (g)

$N$  = ความเข้มข้นของสารละลาย  $\text{I}_2$  ( $0.0473 \text{ N}$ )

### 3.3.8 การทดสอบหาโครงสร้างโดยใช้หลักการดูดซึมน้ำมัน Dibutyl phthalate (DBP) <sup>8</sup>

การทดสอบหาโครงสร้างโดยใช้หลักการดูดซึมน้ำมัน Dibutyl phthalate (DBP) ใช้วิธีการวัดรูปทรงของอนุภาคเถ้าเคลือบต่อหน้าหนักของเถ้าเคลือบ โดยการเติมน้ำมัน DBP ลงไปในเถ้าเคลือบ กวณจนเถ้าเคลือบมีความหนืดสูงสุด วัดปริมาตรของน้ำมัน DBP ที่ใช้ แล้วคำนวณหาค่าปริมาตร DBP ที่ใช้เป็นลูกบาศก์เซนติเมตรต่อ 100 กรัมของเถ้าเคลือบ

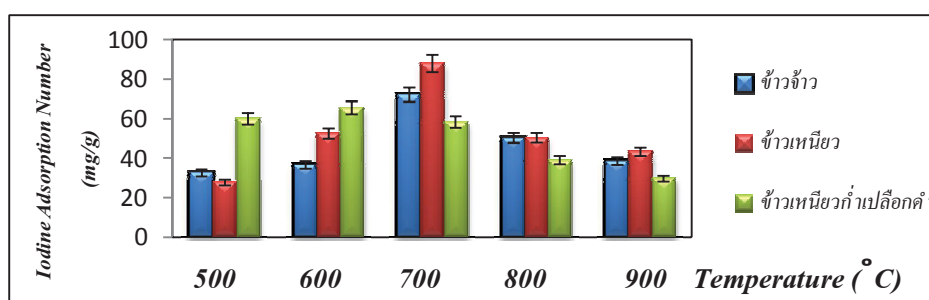
## 4. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

### 4.1 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและโครงสร้างของเถ้าเคลือบ

#### 4.1.1 การคาร์บอนไนซ์เถ้าเคลือบโดยไม่ใช้สารเคมีกระตุ้น

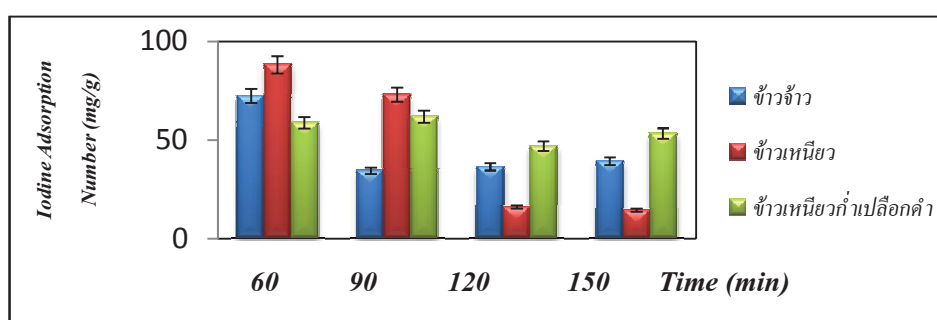
##### 4.1.1.1 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะโดยใช้หลักการดูดซับไอโอดีน

จากการนำเปลือกข้าวเจ้า ข้าวเหนียวและข้าวเหนียวเก่าเปลือกดำมาคาร์บอนไนซ์ที่ 700 °C ที่เวลาต่าง ๆ แล้วทดสอบการดูดซับไอโอดีน ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 Iodine Adsorption Number ที่เวลาการคาร์บอนไนซ์ต่าง ๆ ของเถ้าเคลือบจากเปลือกข้าวเจ้า ข้าวเหนียว และข้าวเหนียวเก่าเปลือกดำ

จากการเปรียบเทียบค่าไอโอดีนของเถ้าเคลือบจากเปลือกข้าวทั้งสามชนิด พบว่าส่วนใหญ่ข้าวเหนียวให้ผลการดูดซับไอโอดีนที่มากที่สุดที่เวลาในการคาร์บอนไนซ์น้อย และช่วงเวลาที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์ เพื่อให้ได้ค่า Iodine Adsorption Number สูงคือการคาร์บอนไนซ์ที่ 60 นาที



รูปที่ 4.2 Iodine Adsorption Number ที่อุณหภูมิคาร์บอนไนซ์ต่าง ๆ ของเถ้าเคลือบจากเปลือกข้าว

จากรูปที่ 4.2 พบว่าการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 700 °C ให้ค่า Iodine Adsorption Number ที่สูงโดยเฉพาะการใช้เปลือกข้าวเหนียวในการผลิตเถ้าเคลือบ

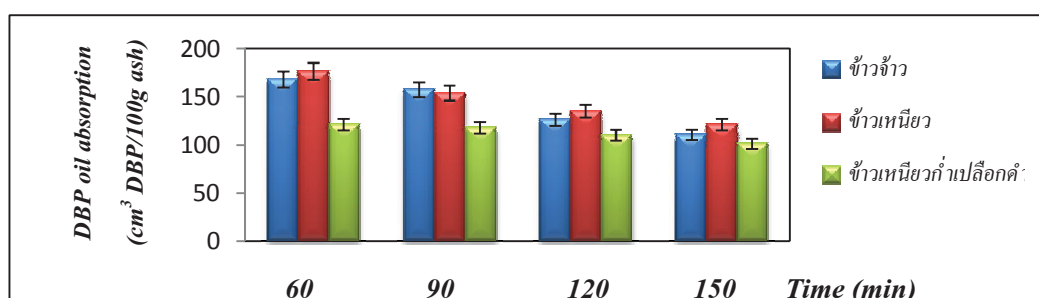
จากการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของเถ้าเคลือบทั้ง 3 ชนิดในรูปที่ 4.1 พบว่าเมื่อใช้เวลาในการเผาเปลือกข้าวเพิ่มขึ้น ค่า Iodine Adsorption Number มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเวลาที่เปลือกข้าวอยู่ในเตาเผาเป็นเวลานาน ทำให้เถ้าเคลือบเกิด



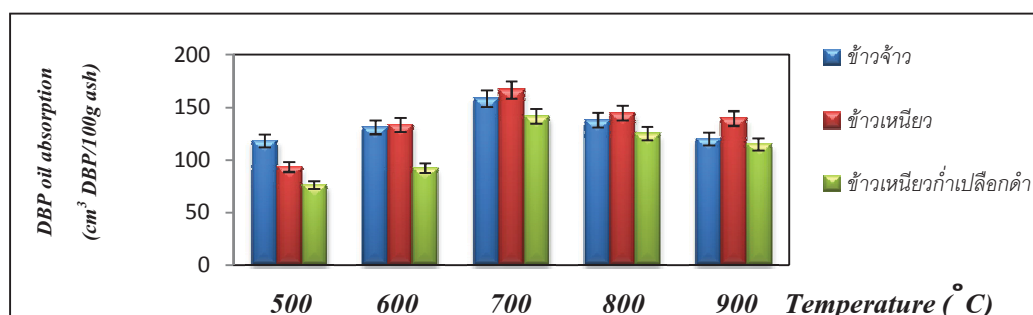
การรวมกันเป็นกลุ่มก้อนเพิ่มขึ้น เมื่อนำมาวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะด้วยด้วยหลักการดูดซึมของไอโอดีน ที่วัดปริมาณไอโอดีนที่เหลือหลังจากการผสมโดยการไตเตรท ถ้าแกลบมีพื้นที่ผิวน้อยการดูดซึมไอโอดีนจะทำให้ค่า Iodine Adsorption Number น้อยตาม ส่วนของอุณหภูมิในการเผาเปลือกข้าวดังรูปที่ 4.2 พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการคาร์โบไนซ์ เพิ่มขึ้นค่า Iodine Adsorption Number จะเพิ่มขึ้นเนื่องจากการมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นทำให้การเผามีประสิทธิภาพมากขึ้น กล่าวคือ แกลบแตกตัวให้อนุภาคที่เล็กลงส่งผลให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิการคาร์โบไนซ์ถึงจุด ๆ หนึ่ง (อุณหภูมิ 700 °C) แล้วจะลดลงเนื่องจากที่อุณหภูมิสูงกว่า 700 °C ทำให้อนุภาคแกลบรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ขึ้นซึ่งการที่อนุภาคแกลบรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนนี้จะทำให้มีพื้นที่ผิวในการดูดซึมไอโอดีนน้อยทำให้ค่า Iodine Adsorption Number ลดลงตามในอุณหภูมิการเผาที่เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาถึงชนิดของเปลือกข้าวที่นำมาวิเคราะห์นี้ ซึ่งมีเปลือกข้าวเจ้า เปลือกข้าวเหนียว และเปลือกข้าวเหนียวก่ำเปลือกดำ พบว่าเปลือกข้าวเหนียวจะให้ค่า Iodine Adsorption Number สูงกว่าเปลือกข้าวชนิดอื่นเมื่อวิเคราะห์ทั้งเวลาและอุณหภูมิในการคาร์โบไนซ์ ดังนั้นเมื่อพิจารณาแล้วสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเขม่าดำจากเปลือกข้าวคือที่เวลา 60 นาที อุณหภูมิ 700 °C ชนิดของเปลือกข้าวที่เลือกมาเตรียมเขม่าดำคือเปลือกข้าวเหนียว จึงเลือกชนิดของเปลือกข้าวและสภาวะที่เหมาะสมดังกล่าวเพื่อทำการทดลองต่อไป

#### 4.1.1.2 การวิเคราะห์โครงสร้างของเขม่าดำโดยใช้หลักการ Dibutyl phthalate (DBP)

นำแกลบข้าวเจ้า ข้าวเหนียว และข้าวเหนียวก่ำเปลือกดำมาบดย่อย ให้ได้ขนาดประมาณ 1-5 มม. จากนั้นคาร์โบไนซ์ที่เวลาต่าง ๆ กัน นำแกลบที่ได้วิเคราะห์การดูดซึมน้ำมัน Dibutyl phthalate (DBP) ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 DBP oil absorption ที่เวลาในการคาร์โบไนซ์ต่าง ๆ ของแกลบจากเปลือกข้าวเจ้า ข้าวเหนียว และข้าวเหนียวก่ำเปลือกดำ



รูปที่ 4.4 DBP oil absorption ที่อุณหภูมิคาร์โบไนซ์ต่าง ๆ ของแกลบจากเปลือกข้าวเจ้า ข้าวเหนียว และข้าวเหนียวก่ำเปลือกดำ

จากการวิเคราะห์โครงสร้างของแกลบทั้ง 3 ชนิดด้วยหลักการดูดซึมน้ำมัน Dibutyl phthalate (DBP) ที่ใช้การใส่น้ำมันลงในรูพรุนของแกลบ การทดลองนี้จะเป็นการหาปริมาณของ DBP ที่จะต้องเติมเข้าไปในรูพรุนของแกลบที่รู้

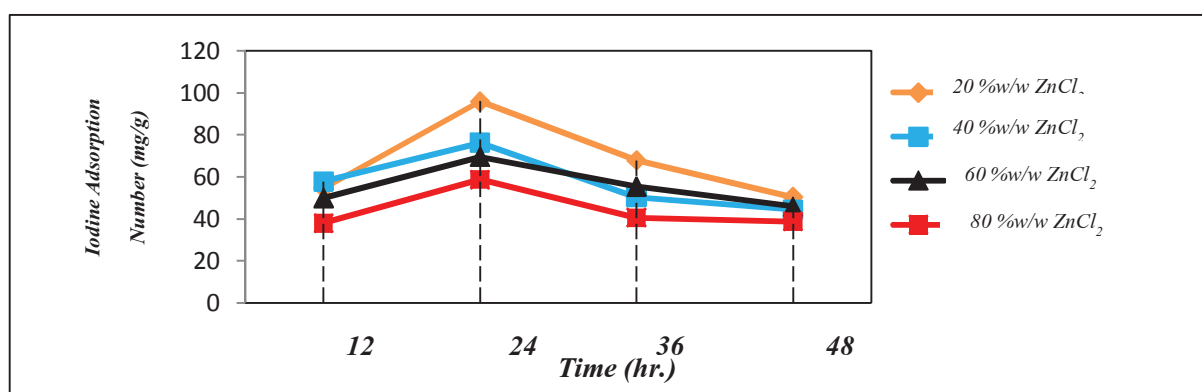


น้ำหนักแน่นอน แก้วกลบที่มีรูปทรงน้อยการดูดซับ DBP ก็จะน้อยตามทำให้ได้ค่า DBP oil absorption น้อย ในรูปที่ 4.3 พบว่าเมื่อใช้เวลาในการเผาเปลือกข้าวเพิ่มขึ้นค่า DBP oil absorption ลดลง เนื่องจากโครงสร้างของแก้วกลบเกิดการแตกออก ทำให้โครงสร้างต่ำลง จากรูปที่ 4.4 อุณหภูมิในการเผาเปลือกข้าวเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า DBP oil absorption เพิ่มขึ้นถึงจุด ๆ หนึ่ง (อุณหภูมิ 700 °C) แล้วจะลดลงเนื่องจากที่อุณหภูมิสูงกว่า 700 °C ทำให้โครงสร้างแก้วกลบแตกหัก โครงสร้างของแก้วกลบก็ต่ำไปด้วยทำให้การดูดซับ DBP ลดลง เมื่อพิจารณาถึงชนิดของเปลือกข้าวที่นำมาวิเคราะห์นี้ ซึ่งมีเปลือกข้าวเจ้า เปลือกข้าวเหนียวและเปลือกข้าวเหนียวเก่าเปลือกดำ พบว่าเปลือกข้าวเหนียวจะให้ค่าการดูดซับ DBP สูงกว่าเปลือกข้าวชนิดอื่นเมื่อวิเคราะห์ทั้งเวลาและอุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์

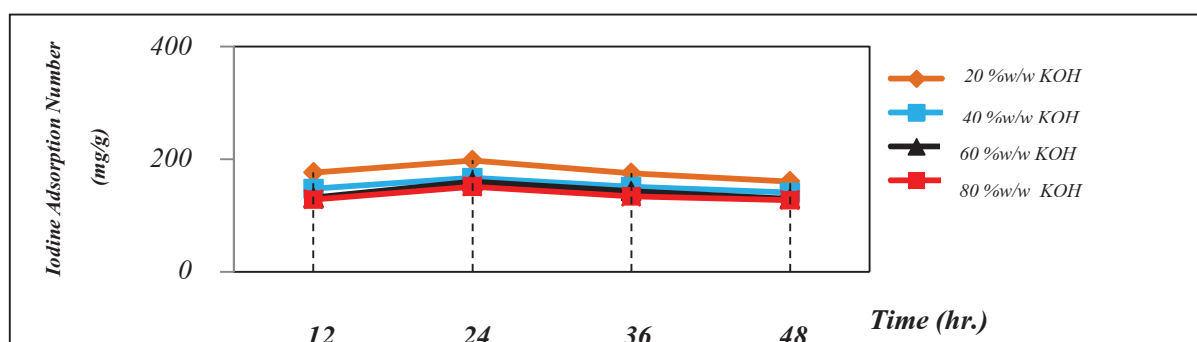
ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.1 - 4.4 แล้วสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเขม่าดำจากเปลือกข้าวที่เลือกมาคือที่สภาวะเวลาการคาร์บอนไนซ์ 60 นาที อุณหภูมิ 700 °C ชนิดของเปลือกข้าวที่เลือกมาเตรียมเขม่าดำคือเปลือกข้าวเหนียว เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเขม่าดำแล้ว จากนั้นก็จะนำสารเคมีเข้ามากระตุ้นการคาร์บอนไนซ์เปลือกข้าวแล้วนำไปใช้เป็นสารตัวเติมต่อไป

#### 4.1.2 การคาร์บอนไนซ์กลบโดยใช้ $ZnCl_2$ และ KOH เป็นตัวกระตุ้น

จากการนำเปลือกข้าวเหนียวมากระตุ้นด้วย  $ZnCl_2$  และ KOH ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กัน จากนั้นคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นเวลา 60 นาที ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.5



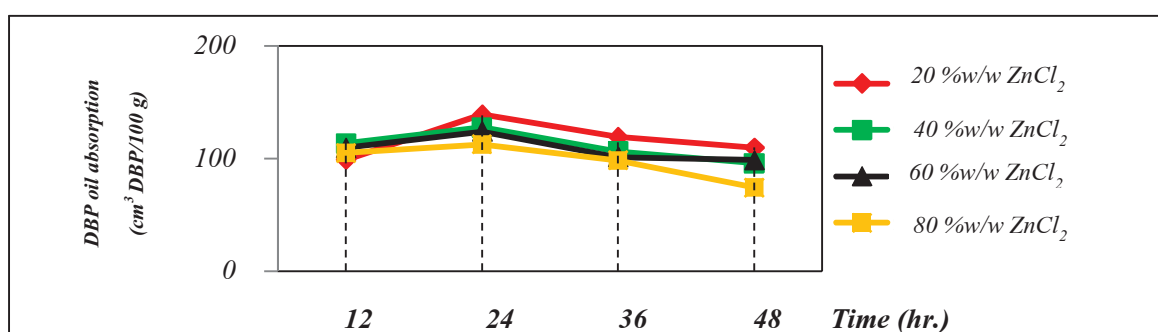
รูปที่ 4.5 Iodine Adsorption Number ของแก้วกลบเปลือกข้าวที่กระตุ้นการคาร์บอนไนซ์ด้วยซิงค์คลอไรด์



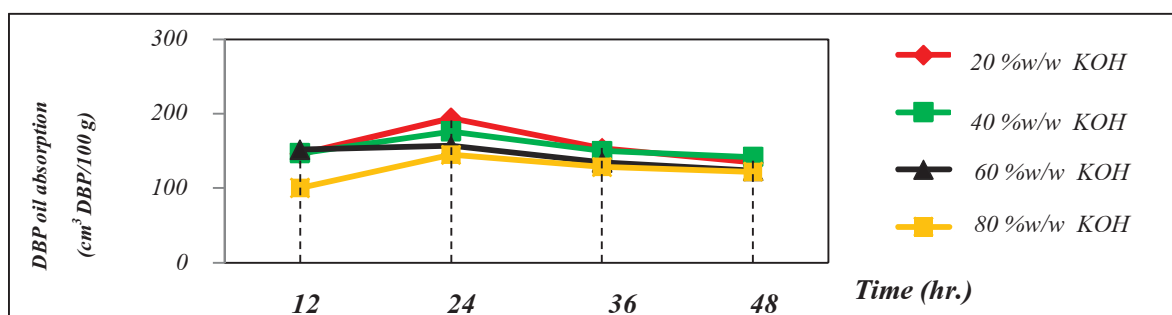
รูปที่ 4.6 Iodine Adsorption Number ของแก้วกลบเปลือกข้าวที่กระตุ้นการคาร์บอนไนซ์ด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

จากการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของแก้วกลบที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ได้ผลดังรูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6 พบว่าเมื่อใช้เวลาในการแช่เปลือกข้าวเพิ่มขึ้นทำให้ค่า Iodine Adsorption Number เพิ่มขึ้นถึงจุด ๆ หนึ่ง (แช่ที่เวลา 24 ชั่วโมง) จากนั้น ค่า Iodine Adsorption Number จะลดลงทุกความเข้มข้นที่ใช้กระตุ้น สาเหตุเนื่องจาก

เปลือกข้าวที่เวลา 24 ชั่วโมง ชิงค์คลอไรด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์กระตุ้นให้เปลือกข้าวมีขนาดที่เล็กลง เมื่อนำมาเผาจนได้เถ้าแกลบแล้วนำไปวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะด้วยหลักการดูดซับของไอโอดีน ที่วัดปริมาณไอโอดีนที่เหลือหลังจากการผสมโดยการไตเตรท พบว่าเถ้าแกลบมีพื้นที่ผิวมากทำให้ค่า Iodine Adsorption Number เพิ่มขึ้น แต่เมื่อเวลาแช่เปลือกข้าวเพิ่มขึ้นจะเห็นว่าค่า Iodine Adsorption Number มีแนวโน้มลดลงสาเหตุเนื่องมาจากการเพิ่มเวลาแช่เป็นการเพิ่มการย่อยสลายของเปลือกข้าวจนอาจทำให้ขนาดของเปลือกข้าวเล็กลงแล้วเกิดการจับตัวกันเป็นก้อน ดังนั้นเมื่อนำไปเผาจนได้เถ้าแกลบแล้วลักษณะขนาดอนุภาคที่เล็กจะรวมกลุ่มกันเป็นก้อนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อนำไปวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะด้วยหลักการดูดซับของไอโอดีน พบว่าเถ้าแกลบมีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยทำให้ค่า Iodine Adsorption Number น้อยตาม ส่วนของความเข้มข้นในการแช่เปลือกข้าวที่ 20, 40, 60 และ 80 %w/w จะทำให้ค่า Iodine Adsorption Number มีแนวโน้มลดลงตามความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการที่ความเข้มข้นของสารละลายชิงค์คลอไรด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นนี้ไม่ได้ช่วยกระตุ้นเปลือกข้าวแต่กลับทำให้ความหนืดที่เกิดจากสารละลายนี้ไปเกาะที่ผิวของเปลือกข้าวเพียงอย่างเดียว เพราะสารละลายมีความหนืดสูงการที่จะแทรกเข้าไปในเปลือกข้าวทำได้ยากขึ้นส่งผลให้ไม่สามารถเข้าไปกระตุ้นการคาร์บอนไนซ์ได้ดีนัก แต่ที่ความเข้มข้นต่ำ ๆ (20 %w/w) สารละลายมีความหนืดน้อยทำให้สามารถแทรกเข้าไปในเปลือกข้าวได้ดีกว่า ดังนั้นการกระตุ้นการแตกตัวและการเปียกผิวของเปลือกข้าวสูงขึ้นทำให้เมื่อนำไปเผาจะได้เถ้าแกลบที่มีอนุภาคเล็กออกมาและเมื่อนำไปวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะส่งผลให้ค่า Iodine Adsorption Number สูงขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากรูปดังกล่าวข้างต้นแล้วสถานะที่เหมาะสมในการเตรียมเถ้าจากเปลือกข้าวที่กระตุ้นด้วยสารเคมีคือเวลาแช่เปลือกข้าว 24 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้น 20 %w/w ในชิงค์คลอไรด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 4.7 DBP oil absorption ของเถ้าแกลบเปลือกข้าวที่กระตุ้นการคาร์บอนไนซ์ด้วยชิงค์คลอไรด์



รูปที่ 4.8 DBP oil absorption ของเถ้าแกลบเปลือกข้าวที่กระตุ้นการคาร์บอนไนซ์ด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

จากการวิเคราะห์โครงสร้างของเถ้าแกลบที่กระตุ้นด้วยสารเคมีทั้ง 2 ชนิด คือชิงค์คลอไรด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ได้ผลดังรูปที่ 4.7 และรูปที่ 4.8 พบว่าเมื่อใช้เวลาในการแช่เปลือกข้าวเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า DBP oil absorption เพิ่มขึ้นถึงจุด ๆ หนึ่ง (แช่ที่เวลา 24 ชั่วโมง) ค่า DBP oil absorption ก็จะลดลงทุกความเข้มข้นที่ใช้กระตุ้น สาเหตุเนื่องจากเปลือกข้าว

ที่เวลา 24 ชั่วโมง เป็นสภาวะที่ซิงค์คลอไรด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์แทรกเข้าไปในเปลือกข้าวได้สูงสุดทำให้สามารถกระตุ้นเปลือกข้าวให้มีขนาดที่เล็กลง เมื่อนำมาเผาจะได้เถ้าแกลบที่มีรูพรุนเพิ่มมากขึ้น เมื่อนำไปวิเคราะห์โครงสร้างของเถ้าแกลบด้วยการดูดซับของน้ำมัน Dibutyl phthalate (DBP) ปริมาณของน้ำมันที่ใส่เข้าไปจะมากขึ้นตามรูพรุนในเถ้าแกลบนั่น ส่งผลให้ค่า DBP oil absorption เพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่เมื่อเวลาแช่เปลือกข้าวเพิ่มขึ้นจะเห็นว่าค่า DBP oil absorption มีแนวโน้มลดลงสาเหตุเนื่องมาจากการเพิ่มเวลาแช่เป็นการเพิ่มการย่อยสลายของเปลือกข้าวจนอาจทำให้ขนาดของเปลือกข้าวเล็กลง ซึ่งเปลือกข้าวที่มีขนาดเล็กอาจเกิดการดูดซับเอาซิงค์คลอไรด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เข้าไปทำให้เกิดการจับตัวกันเป็นก้อนแน่นหนา ส่งผลให้รูพรุนหรือช่องว่างอากาศระหว่างอนุภาคมีน้อย เมื่อนำไปวิเคราะห์โครงสร้างของเถ้าแกลบด้วยการดูดซับของน้ำมัน Dibutyl phthalate (DBP) ปริมาณของน้ำมันที่ใส่เข้าไปจะใส่เข้าไปได้น้อย ส่งผลให้ค่า DBP oil absorption น้อยตาม ส่วนของความเข้มข้นในการแช่เปลือกข้าวที่ 20, 40, 60 และ 80 %w/w จะทำให้ค่า DBP oil absorption มีแนวโน้มลดลงตามความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการที่ความเข้มข้นของสารละลายซิงค์คลอไรด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นนี้ ไม่ได้ช่วยย่อยสลายเปลือกข้าวหรือเพิ่มความสามารถในการแทรกเข้าไปในเปลือกข้าวได้มากขึ้น แต่กลับทำให้ความหนืดที่เกิดจากสารละลายนี้ไปเกาะที่ผิวของเปลือกข้าวเพียงอย่างเดียว เพราะสารละลายมีความหนืดสูงการที่จะแทรกเข้าไปในเปลือกข้าวทำได้ยากขึ้นส่งผลให้ไม่สามารถย่อยสลายเปลือกข้าวได้ แต่ที่ความเข้มข้นต่ำ ๆ (20 %w/w) สารละลายมีความหนืดน้อยทำให้สามารถแทรกเข้าไปในเปลือกข้าวได้ดีกว่า ดังนั้นการย่อยสลายและการแทรกตัวเข้าไปในเปลือกข้าวสูง เมื่อนำไปเผาจะได้เถ้าแกลบที่มีช่องอากาศระหว่างอนุภาคและโครงสร้างเถ้าแกลบสูงออกมา เมื่อนำไปวิเคราะห์โครงสร้างจะได้ค่า DBP oil absorption สูงขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากรูปดังกล่าวข้างต้นแล้วสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเขม่าดำจากเปลือกข้าวที่กระตุ้นด้วยสารซิงค์คลอไรด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์คือที่สภาวะเวลาการแช่เปลือกข้าว 24 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้น 20 %w/w

ตารางที่ 4.1 ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของเขม่าดำเกรดต่าง ๆ<sup>8</sup>

| ชนิดของเขม่าดำ | ไอโอดีนนัมเบอร์ (mg/g ของเขม่าดำ) |
|----------------|-----------------------------------|
| ISAF (N220)    | 121                               |
| HAF (N330)     | 82                                |
| FEF (N550)     | 42                                |
| GPF (N660)     | 36                                |
| SRF (N358)     | 24                                |

ตารางที่ 4.2 ค่าการดูดซึมน้ำมัน DBP ของเขม่าดำเกรดต่างๆ<sup>15</sup>

| ชนิดของเขม่าดำ | โครงสร้าง (cm <sup>3</sup> DBP /100 g) |
|----------------|----------------------------------------|
| SAF-LS         | 95                                     |
| SAF            | 115                                    |
| SAF-HS (N-242) | 135                                    |
| ISAF-LS        | 80                                     |
| ISAF-LM        | 90                                     |
| ISAF           | 115                                    |
| ISAF-HS        | 130                                    |
| EPC            | 95                                     |
| MPC            | 95                                     |

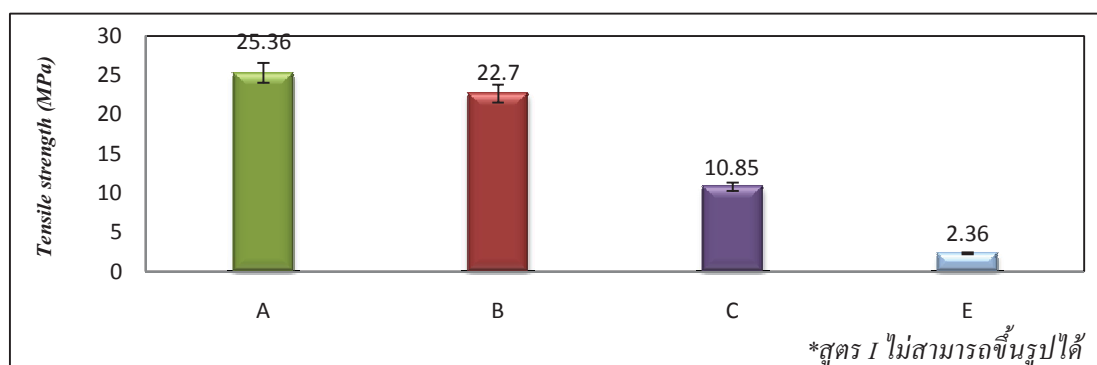
เมื่อเปรียบเทียบค่าไอโอดีนัมเบอร์ และค่าการดูดซึมน้ำมัน DBP ของเถ้าแกลบที่ผลิตได้กับเขม่าดำทางการค้าพบว่าเถ้าแกลบที่ไม่กระตุ้นสารเคมีมีค่า Iodine Adsorption Number ประมาณ 88 mg/g อยู่ใกล้เคียงกับเขม่าดำเกรด HAF (N330) ส่วนเถ้าแกลบที่กระตุ้นด้วย ZnCl<sub>2</sub> มีค่า Iodine Adsorption Number ประมาณ 96 mg/g ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับเขม่าดำเกรด HAF (N330) ถึง ISAF (N220) ส่วนเถ้าแกลบที่กระตุ้นด้วย KOH มีค่า Iodine Adsorption Number ประมาณ 198 mg/g ซึ่งมีค่าน้อยกว่าเขม่าดำเกรด ISAF (N220)

ส่วนค่าการดูดซึมน้ำมัน DBP ของเถ้าแกลบที่ผลิตได้กับเขม่าดำทางการค้าพบว่าเถ้าแกลบที่ไม่กระตุ้นสารเคมีมีค่า DBP oil absorption ประมาณ 153 cm<sup>3</sup> DBP/100 g ส่วนเถ้าแกลบที่กระตุ้นด้วย ZnCl<sub>2</sub> มีค่า DBP oil absorption ประมาณ DBP/100 g และเถ้าแกลบที่กระตุ้นด้วย KOH มีค่า DBP oil absorption ประมาณ 139 cm<sup>3</sup> DBP/100 g ซึ่งค่า DBP oil absorption ของทุกเถ้าแกลบให้ค่าที่สูงกว่า SAF-HS (N-242) ที่มีโครงสร้างสูงที่สุด

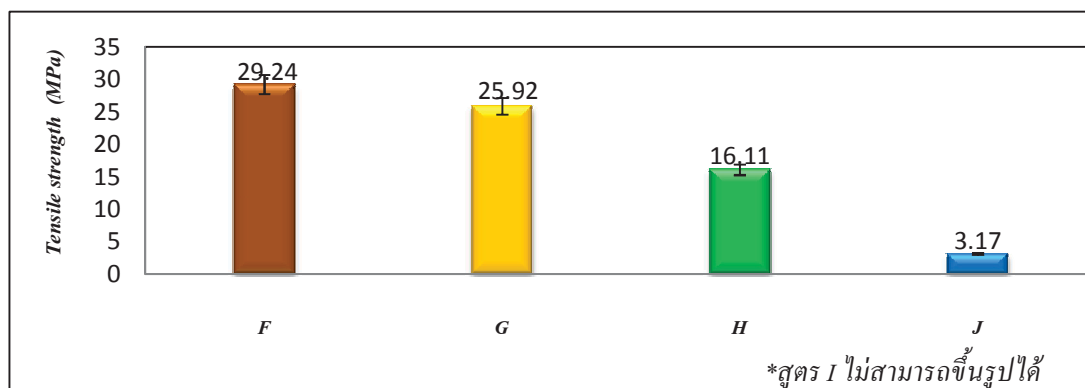
#### 4.2 ผลของเถ้าแกลบต่อสมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนซ์

##### 4.2.1 ผลของเถ้าแกลบต่อสมบัติความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength)

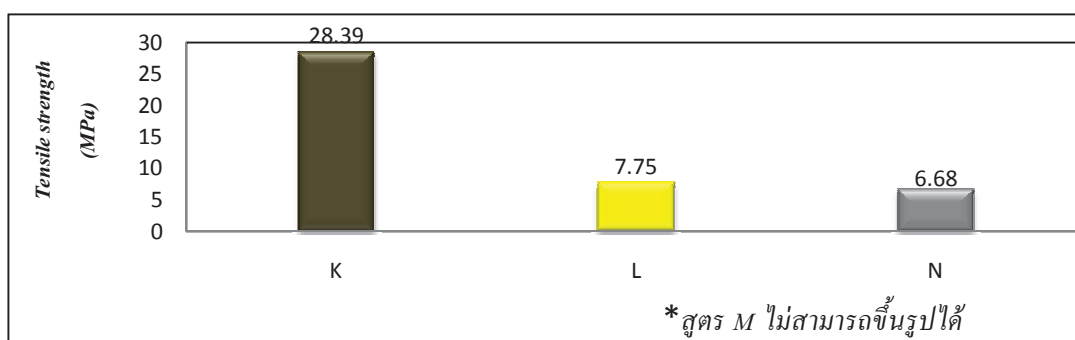
จากการนำเถ้าแกลบมาผสมในยางธรรมชาติตามสูตรในตารางที่ 3.1-3.3 แล้วนำไปทดสอบสมบัติความทนทานต่อแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D412 (2005) ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.9 – 4.11



รูปที่ 4.9 ความทนทานต่อแรงดึงตามสูตรในตารางที่ 3.1



รูปที่ 4.10 ความทนทานต่อแรงดึงตามสูตรในตารางที่ 3.2



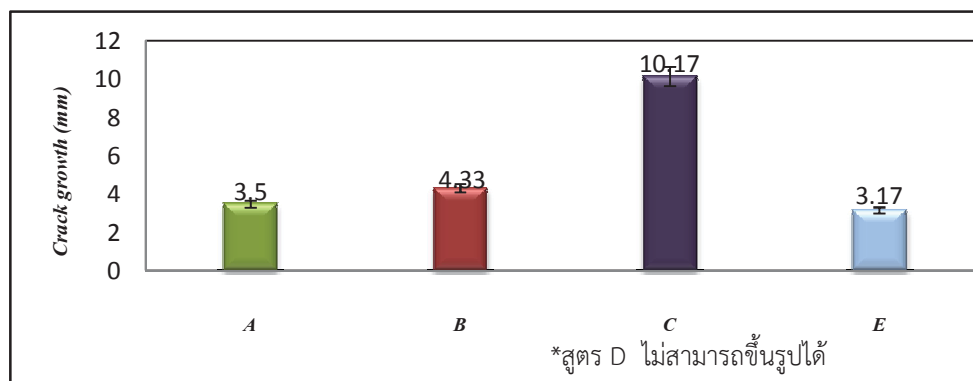
รูปที่ 4.11 ความทนทานต่อแรงดึงสูตรใช้เถ้าแกลบเทียบซิลิกา

ผลของเถ้าแกลบต่อสมบัติความทนทานต่อแรงดึงที่เปรียบเทียบกับสารตัวเติมทางการค้า จากรูปที่ 4.9 และรูปที่ 4.10 เป็นการเปรียบเทียบการใช้เถ้าแกลบกับเขม่าดำทางการค้าเกรด N330 และ N550 ผลที่ได้คือสูตรที่ใช้เขม่าดำเกรด N330 (สูตร A และสูตร F) ให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงที่สุดสาเหตุเนื่องมาจากเขม่าดำเกรดนี้มีขนาดอนุภาคที่เล็กและโครงสร้างเขม่าดำสูงเมื่อผสมในยางธรรมชาติแล้วทำให้ยางและเขม่าดำมีอันตรกิริยาต่อกันสูง เขม่าดำจึงช่วยเสริมแรงให้ยางมีความทนทานต่อแรงดึงสูง ส่วนเขม่าดำเกรด N550 (สูตร B และสูตร G) ให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงรองจากเกรด N330 เพราะว่าเขม่าดำเกรด N550 นี้มีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่า N330 ส่วนผลของเถ้าแกลบที่ไม่มีการกระตุ้นด้วยสารเคมี (C และ H) และเถ้าแกลบที่กระตุ้นด้วย KOH (สูตร E และสูตร J) จะให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงต่ำ แม้ในการทดลองหาพื้นที่ผิวจำเพาะและวัดโครงสร้างของเถ้าแกลบให้ค่าที่ดีกว่าเขม่าดำบางเกรดทางการค้า สาเหตุที่ทำให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงต่ำเนื่องมาจากอันตรกิริยาระหว่างยางและเถ้าแกลบ ลักษณะของเถ้าแกลบที่ดูดความชื้นทำให้เกาะกลุ่มรวมกันเป็นก้อนใหญ่เมื่อนำไปผสมกับยางธรรมชาติส่งผลให้การกระจายตัวในเนื้อยางทำได้ยากขึ้น ดังนั้นจึงทำให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงของยางวัลคาไนซ์ต่ำไปด้วย แต่เมื่อเปรียบเทียบเถ้าแกลบที่ไม่กระตุ้นด้วยสารเคมี (สูตร C และ H) ให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงดีกว่าเถ้าแกลบที่กระตุ้นด้วยสารเคมี (สูตร E และ J) สาเหตุเนื่องจากผิวของเถ้าแกลบมีความเป็นด่างที่เกิดจากโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ดังนั้นเมื่อนำไปวัลคาไนซ์ส่งผลให้เวลาการวัลคาไนซ์ต่ำลง พันธะการเชื่อมโยงก็น้อยตาม ทำให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงต่ำกว่า จากรูปที่ 4.11 ค่าความทนทานต่อแรงดึงของสูตรที่ใช้สารตัวเติมซิลิกา (สูตร K) ให้ค่าที่ดีกว่าการใช้เถ้าแกลบที่ไม่กระตุ้นสารเคมีและเถ้าแกลบที่กระตุ้นด้วยสาร KOH ในสูตร L และสูตร N ตามลำดับ ผลเนื่องมาจากซิลิกานับว่าเป็นสารตัวเติมเสริมประสิทธิภาพให้กับยางธรรมชาติได้ ดังนั้นจึงส่งผลให้สมบัติเชิงกลดีตามไปด้วย ส่วนเถ้าแกลบนั้นเมื่อผสมในยาง

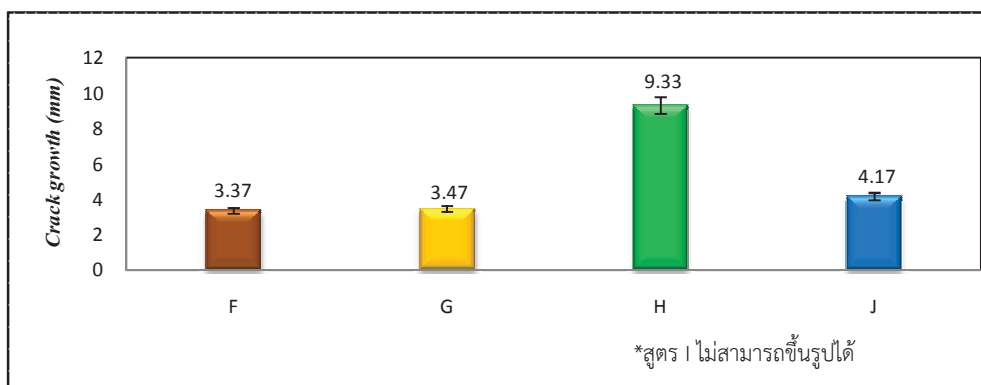
เกิดการกระจายตัวยากและถ้าเกิดรวมกันเป็นกลุ่มก้อน ทำให้เมื่อนำขึ้นยางวัลคาไนซ์ไปทดสอบจะเกิดจุดอ่อนแอบริเวณที่ถ้าเกิดรวมกันเป็นกลุ่มก้อนนั้น ส่งผลให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงต่ำไปด้วย

#### 4.2.2 ผลของเถ้ากลบต่อสมบัติความทนทานต่อการหักงอแบบ Ross flexing

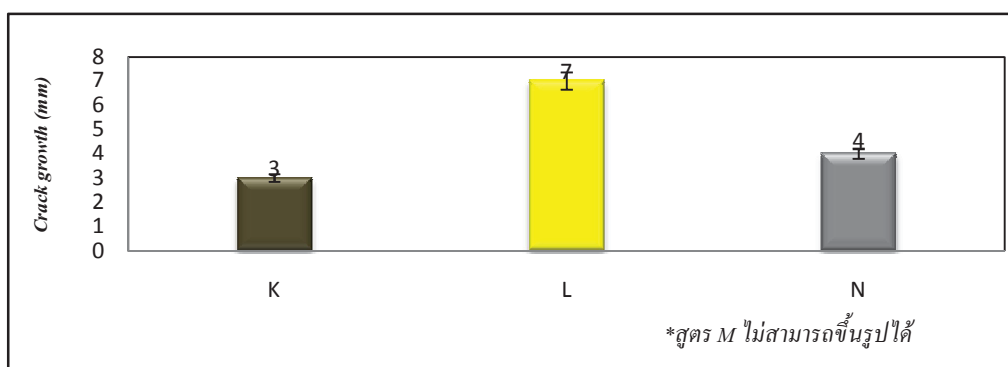
จากการนำเถ้ากลบมาผสมในยางธรรมชาติดังตารางที่ 3.1-3.3 แล้วนำไปทดสอบความทนทานต่อการหักงอตามมาตรฐาน ASTM D 1052-85 ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.12 – 4.14



รูปที่ 4.12 การขยายตัวของรอยแตกตามสูตรในตารางที่ 3.1



รูปที่ 4.13 การขยายตัวของรอยแตกตามสูตรในตารางที่ 3.2

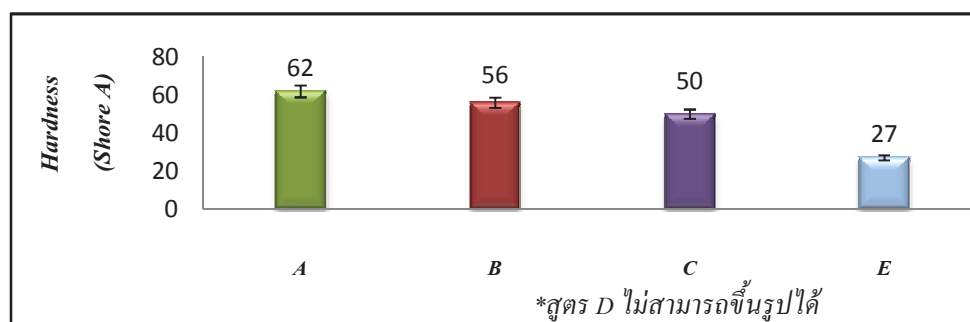


รูปที่ 4.14 การขยายตัวของรอยแตกสูตรที่ใช้เถ้ากลบเทียบกับซิลิกา

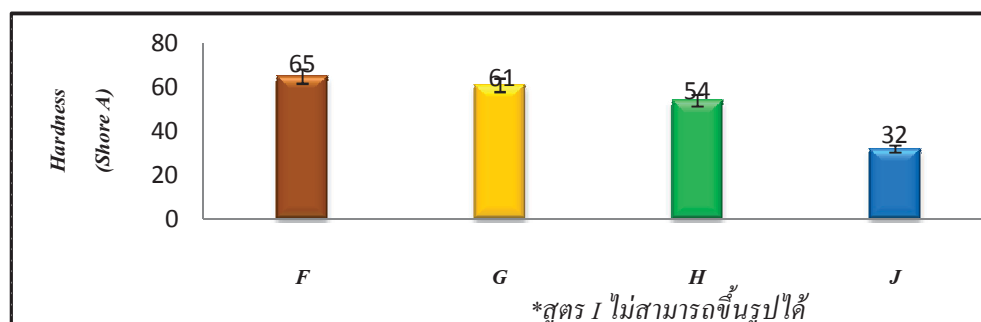
ผลของเก้าแถบต่อการขยายตัวของรอยแตกเปรียบเทียบกับสารตัวเติมทางการค้าแสดงในรูปที่ 4.12 4.13 และ 4.14 พบว่าสูตรที่ใช้เขม่าดำ (สูตร A, B, F และ G) มีค่าการขยายตัวของรอยแตกต่ำ สาเหตุส่วนมากเกิดจากการที่เขม่าดำมีขนาดอนุภาคเล็ก มีการกระจายตัวในยางได้ดี ไม่รวมตัวเป็นกลุ่มก้อน อีกทั้งอันตรกิริยาระหว่างเขม่าดำกับยางสูงจึงทำให้มีจุดอ่อนแอบนขึ้น ทดสอบน้อย เมื่อมีแรงกระทำจะเกิดการกระจายแรงทั่วทั้งชิ้นงานอย่างสม่ำเสมอ ทำให้เขม่าดำมีความทนทานต่อการหักงอ ส่วนซิลิกาที่เป็นสารตัวเติมเสริมประสิทธิภาพเช่นเดียวกับเขม่าดำทำให้การขยายตัวของรอยแตกต่ำ เช่นเดียวกับเขม่าดำ สาเหตุเนื่องมาจากซิลิกานี้แม้จะผสมในยางธรรมชาติได้ยากแต่เมื่อรวมเป็นเนื้อเดียวกันแล้ว ซิลิกาสามารถเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างยางกับซิลิกาได้ดีทำให้เมื่อรับแรงที่มากระทำแล้วกระจายแรงทั่วทั้งชิ้นงานได้ดี ส่วนเก้าแถบที่ไม่กระตุ้นสารเคมีในสูตร C, H และสูตร L นั้นจะเกิดการขยายตัวของรอยแตกสูง สาเหตุเนื่องมาจากเก้าแถบกระจายตัวในเนื้อยางไม่ค่อยดี แรงดึงดูระหว่างยางกับเก้าแถบต่ำ รวมทั้งการกระจายแรงของชิ้นทดสอบไม่ดี ทำให้การขยายรอยแตกเพิ่มขึ้นเมื่อมีแรงมากระทำซ้ำ ๆ เมื่อพิจารณาสูตร E, J และสูตร N ที่มีการใช้เก้าแถบที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ พบว่าการขยายตัวของรอยแตกต่ำ สาเหตุเนื่องมาจากชิ้นทดสอบมีความยืดหยุ่นสูงและความแข็งต่ำเพียง 25 Shore A ถึง 35 Shore A ทำให้โมเลกุลยางสามารถขยับได้ง่ายเมื่อมีแรงมากระทำ ทำให้ค่าการขยายตัวของรอยแตกมีค่าต่ำ

#### 4.2.3 ผลของเก้าแถบต่อสมบัติความแข็ง (Hardness)

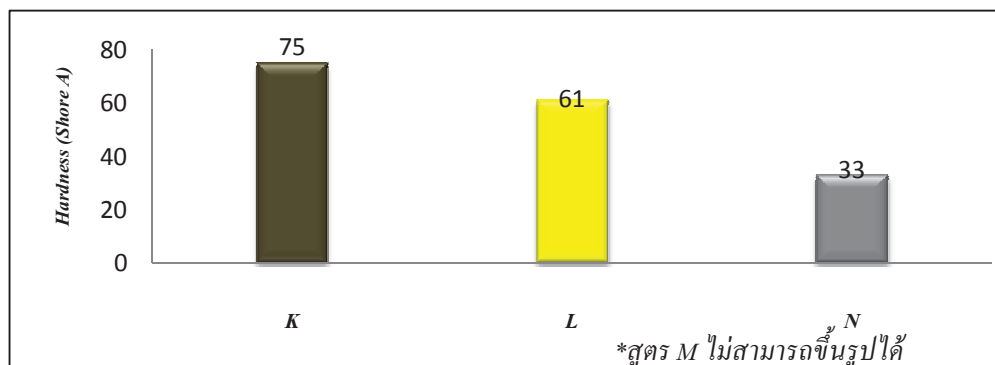
จากการนำเก้าแถบมาผสมในยางธรรมชาติตามตารางที่ 3.1-3.3 นำมาทดสอบสมบัติด้านความแข็งโดยใช้ Durometer แบบ Shore A ตามมาตรฐาน ASTM D2240-04 ตัวอย่างชิ้นทดสอบมีความหนาประมาณ 8 มิลลิเมตร ให้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.15 – 4.17



รูปที่ 4.15 ความแข็งตามสูตรในตารางที่ 3.1



รูปที่ 4.16 ความแข็งตามสูตรในตารางที่ 3.2

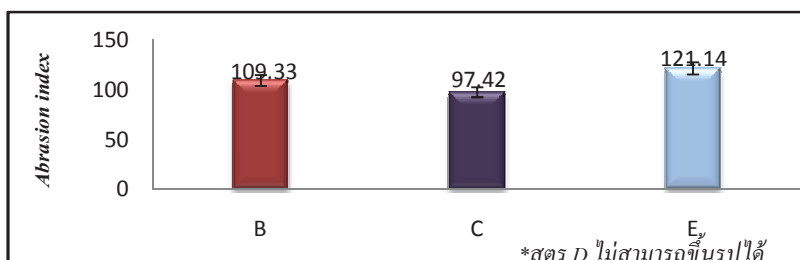


รูปที่ 4.17 ความแข็งของสูตรที่ใช้เถ้าแกลบเทียบกับสูตรที่ใช้ซิลิกา

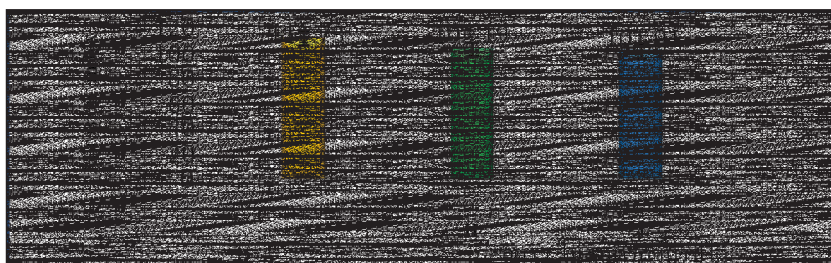
ผลของเถ้าแกลบต่อความแข็งของยางวัลคาไนซ์ในรูปที่ 4.15 4.16 และ 4.17 เปรียบเทียบกับเขม่าดำเกรด N330 N550 และ ซิลิกา พบว่าเมื่อเติมเขม่าดำและซิลิกาเข้าไปในยาง (สูตร A, B, F, G และ K) ทำให้ยางมีความแข็งสูงขึ้น เนื่องจากเขม่าดำและซิลิกามีขนาดอนุภาคเล็กเมื่อเติมลงในยางสามารถกระจายตัวในยางได้และเป็นการเติมส่วนที่เป็นของแข็งลงในยางทำให้ชิ้นทดสอบมีความแข็งสูง ส่วนเถ้าแกลบที่ไม่กระตุ้นด้วยสารเคมี (สูตร C, H และ L) สามารถเพิ่มความแข็งให้กับยางธรรมชาติได้มากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มสารที่เป็นของแข็งเข้าไปในยาง ซึ่งจะปลดปล่อยส่วนของยางลงไป ส่วนเถ้าแกลบที่กระตุ้นด้วยสารเคมีโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (สูตร E, J และ N) ที่เติมลงในยางสามารถเพิ่มความแข็งได้เล็กน้อย เนื่องจากเถ้าแกลบที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เกิดการดูดความชื้นได้ง่าย อาจเกาะกันเป็นกลุ่มก้อน ทำให้ยางเข้าไปเกิดอันตรกิริยาได้น้อย ส่วนของยางอยู่ในเมทริกซ์มาก ส่งผลให้มีความแข็งต่ำ

#### 4.2.4 ผลของเถ้าแกลบต่อสมบัติความทนทานต่อการสึกหรอแบบ Akron

นำเถ้าแกลบมาผสมในยางธรรมชาติตามสูตร ในตารางที่ 3.1-3.3 ทดสอบความทนทานต่อการสึกหรอแบบ Akron ตามมาตรฐาน B.S. 903: Part A 9 โดยใช้ชิ้นทดสอบในสูตร A F และ J เป็นยางมาตรฐานเปรียบเทียบเพื่อหาค่า Abrasion index ผลการทดลองที่ได้ดังรูปที่ 4.18 – 4.20

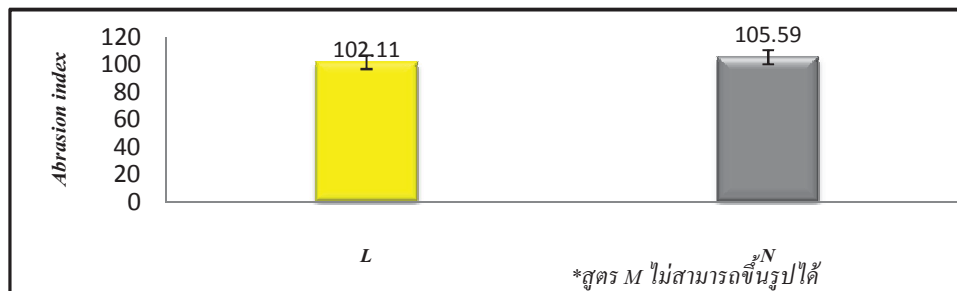


รูปที่ 4.18 ดัชนีความสึกหรอตามสูตรในตารางที่ 3.1



รูปที่ 4.19 ดัชนีความสึกหรอตามสูตรในตารางที่ 3.2





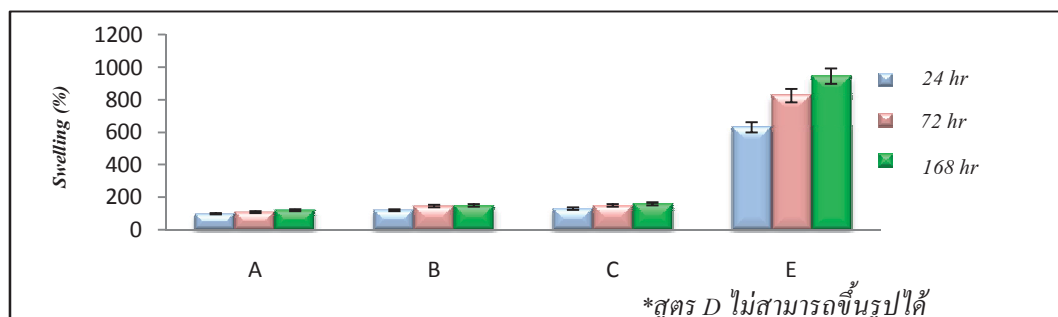
รูปที่ 4.20 ดัชนีความสึกหรอสูตรที่ใช้เถ้าแกลบเทียบกับซิลิกา

จากรูปที่ 4.18 4.19 และ 4.20 เป็นผลของเถ้าแกลบต่อสมบัติความทนทานต่อการสึกหรอเมื่อให้สูตรที่มีเขม่าดำเกรด N330 เป็นสูตรมาตรฐาน พบว่าสูตรยางทั้งหมดมีค่าความทนทานต่อการสึกหรอใกล้เคียงกัน สาเหตุที่ทำให้เถ้าแกลบที่กระตุ้นสารเคมี (สูตร E, J และ N) มีค่า Abrasion index สูงอาจเนื่องมาจากความแข็งของชิ้นงานต่ำกว่ามาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ (มาตรฐาน B.S. 903: Part A 9 ใช้ความแข็ง 50–90 Shore) เมื่อเกิดการขัดด้วยหินขัดยางที่มีความยืดหยุ่นดีเศษชิ้นยางยังคงติดกับชิ้นทดสอบทำให้ค่าที่ได้สูง ส่วนเถ้าแกลบที่ไม่มีการกระตุ้นด้วยสารเคมี (สูตร C, H และ L) พบว่าค่าความทนทานต่อการสึกหรอที่ได้ไม่แตกต่างจากสูตรอื่นมากนัก

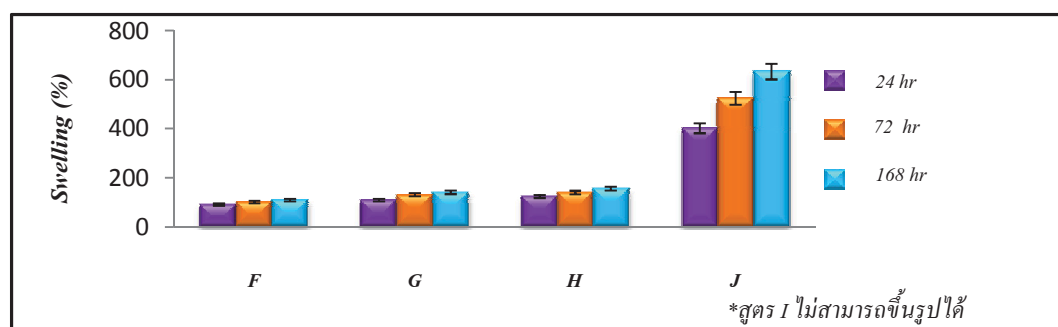
#### 4.3 ผลของเถ้าแกลบต่อสมบัติความทนทานต่อตัวทำละลาย (Swelling)

การนำเถ้าแกลบมาผสมในยางธรรมชาติตามสูตรในตารางที่ 3.1-3.3 นำมาทดสอบความต้านทานต่อตัวทำละลาย (Solvent resistance) โดยนำชิ้นทดสอบมาทดสอบการบวมพอง (Swelling test) ในแก๊สโซลีน เบนซีนและอะซิโตน ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D471-98

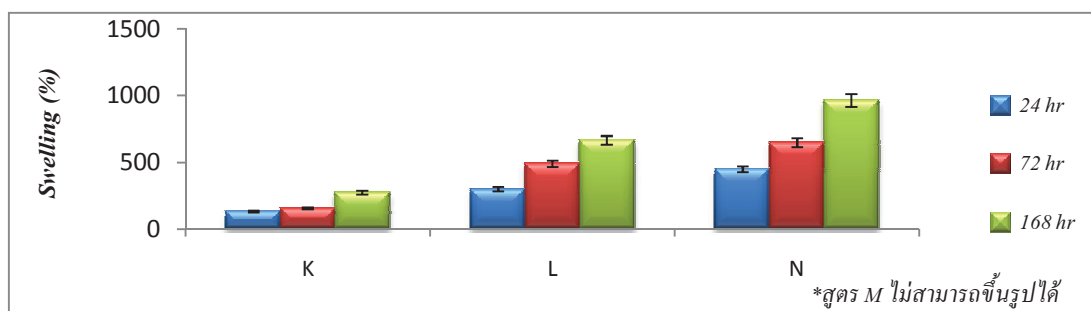
**4.3.1 แก๊สโซลีน** นำชิ้นทดสอบมาตัดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสให้มีความกว้าง 10 มิลลิเมตร ยาว 10 มิลลิเมตร มีความหนาประมาณ 2 มิลลิเมตร ซึ่งน้ำหนักชิ้นทดสอบละเอียด 0.0001 กรัม แช่ในแก๊สโซลีนประมาณ 30 มิลลิลิตร ซึ่งบรรจุในปิกรูปทรงแปดหน้าให้มิดชิด ทิ้งไว้เป็นเวลา 24, 72 และ 168 ชั่วโมง ได้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 4.21 การบวมพองในแก๊สโซลีนตามสูตรในตารางที่ 3.1



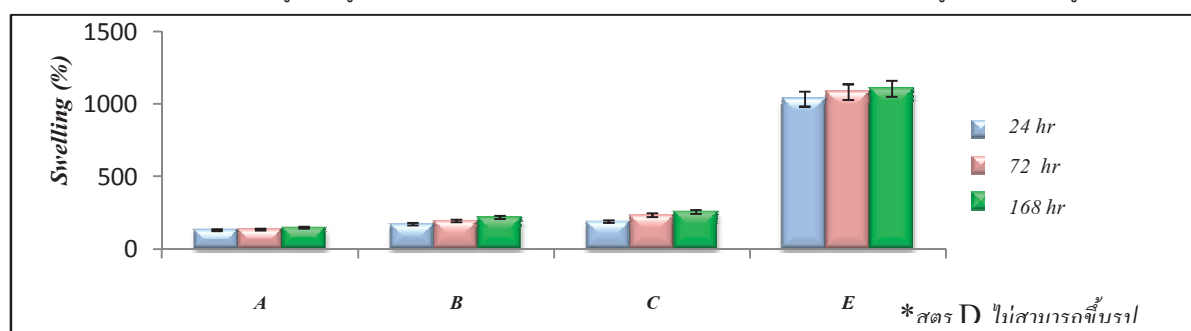
รูปที่ 4.22 การบวมพองในแก๊สโซลีนตามสูตรในตารางที่ 3.2



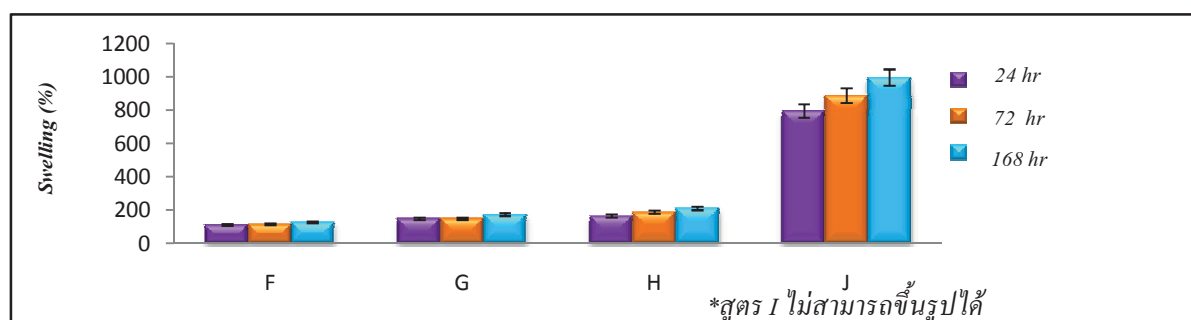
รูปที่ 4.23 การบวมพองในแก๊สโซลีนสูตรที่ใช้เถ้าแกลบเทียบกับซิลิกา

จากรูปที่ 4.21 ถึง รูปที่ 4.23 ผลของเถ้าแกลบต่อสมบัติความทนทานต่อตัวทำละลาย โดยสารละลายที่ใช้จะเป็น น้ำมันแก๊สโซลีน ทำการทดสอบเป็นเวลา 24, 72 และ 168 ชั่วโมง ผลที่ได้คือเมื่อเวลาผ่านไปเพิ่มขึ้นการบวมพองของยางวัลคาไนซ์ก็จะเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากว่าสูตรยางทุกสูตรนั้นมีส่วนที่ดูดซึมแก๊สโซลีนเข้าไป ส่วนที่บวมพองจะเป็นส่วนของโมเลกุลยางธรรมชาติที่เป็นไฮโดรคาร์บอนทำให้ไม่ทนต่อสารละลายที่ไม่มีขั้ว ซึ่งแก๊สโซลีนจัดอยู่ในกลุ่มที่ไม่มีขั้ว ทำให้สูตรยางนั้นมีค่าการบวมพองมาก โดยเฉพาะสูตรยางที่ใช้เถ้าแกลบที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (สูตร E, J และ N) พบว่าค่าการบวมพองมากที่สุด สาเหตุเนื่องมาจากอนุภาคของแข็งที่อยู่ในยางสูตรนั้นมีอนุภาคใหญ่และการจับตัวกันระหว่างยางกับสารตัวเติมไม่ดี ทำให้สารละลายและน้ำมันแทรกเข้าไปในโมเลกุลได้ง่ายขึ้น ค่าการบวมพองจึงสูงขึ้น

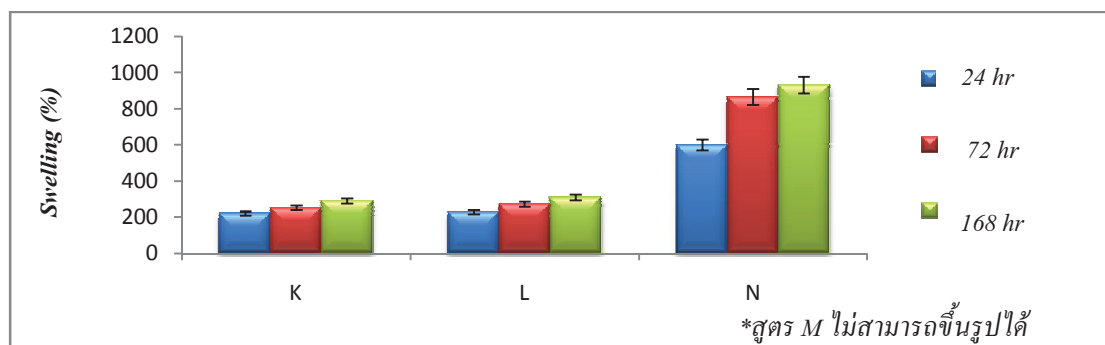
**4.3.2 เบนซิน** การทดสอบการบวมพองในเบนซินทำโดยนำชิ้นทดสอบแช่ในเบนซินประมาณ 30 มิลลิเมตร ปิดฝาขวดให้มิดชิดแล้วเก็บไว้ในตู้ไม่ให้อุณหภูมิเป็นเวลา 24 72 และ 168 ชั่วโมง ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.24 ถึงรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.24 การบวมพองในเบนซินตามสูตรในตารางที่ 3.1



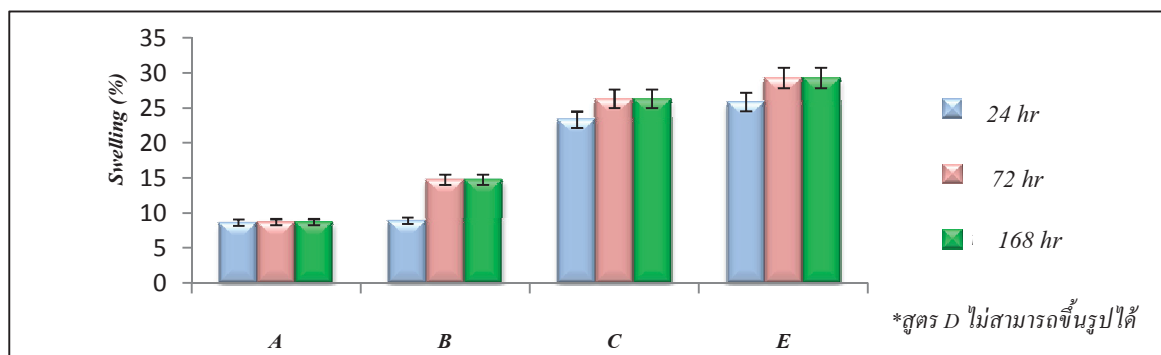
รูปที่ 4.25 การบวมพองในเบนซินตามสูตรในตารางที่ 3.2



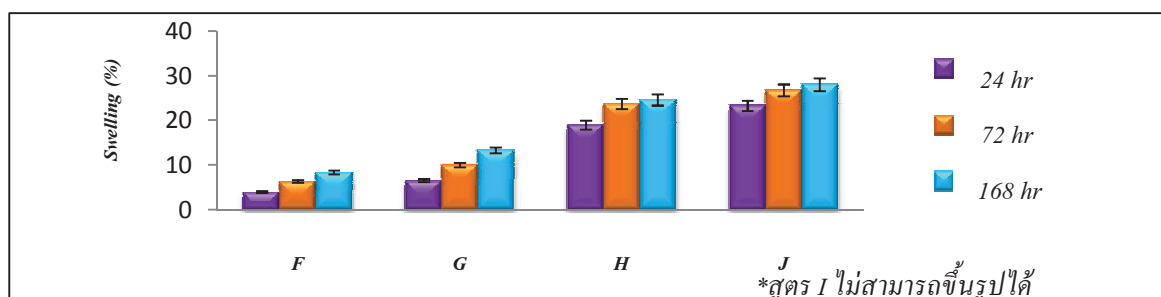
รูปที่ 4.26 การบวมพองในเบนซินสูตรที่ใช้แล้วกลับเทียบกับซิลิกา

จากรูปที่ 4.24 ถึง รูปที่ 4.26 ผลของเก้าแถบต่อสมบัติความทนทานต่อตัวทำละลาย โดยเบนซิน ทำการทดสอบเป็นเวลา 24, 72 และ 168 ชั่วโมง ผลที่ได้คือเมื่อเวลาแช่เพิ่มขึ้นการบวมพองเพิ่มขึ้นด้วยหมายความว่าสูตรยางทุกสูตรนั้นมีส่วนที่ดูดซึมเบนซินเข้าไป ส่วนที่บวมพองจะเป็นส่วนของโมเลกุลยางธรรมชาติที่มีสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในโครงสร้าง โมเลกุลยางทำให้ไม่ทนต่อสารละลายที่ไม่มีขั้ว ซึ่งเบนซิน ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มที่ไม่มีขั้ว ทำให้ยางมีค่าการบวมพองมาก โดยเฉพาะสูตรยางที่ใช้แล้วกลับที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (สูตร E, J และ N) พบว่าค่าการบวมพองมากที่สุด สาเหตุเนื่องมาจากอนุภาคของแข็งที่อยู่ในยางสูตรนั้นมีอนุภาคใหญ่และการจับตัวกันระหว่างยางกับสารตัวเติมไม่ดี ทำให้สารละลายและน้ำมันแทรกเข้าไปในโมเลกุลได้ง่ายขึ้น ค่าการบวมพองจึงสูงขึ้นตาม

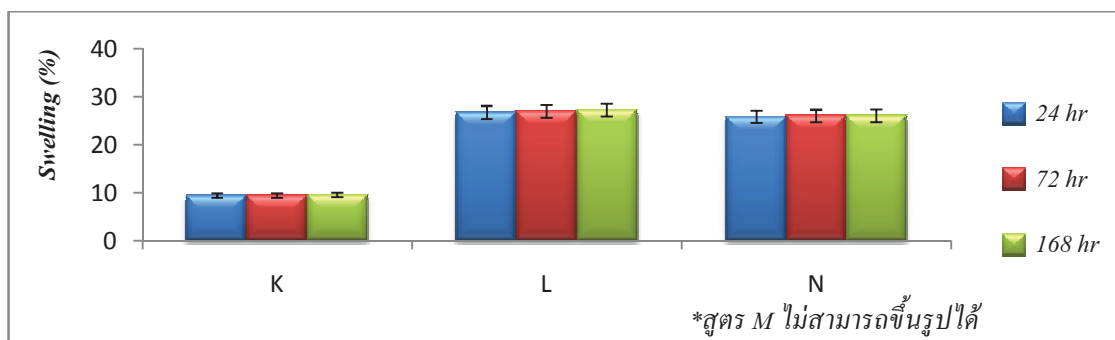
**4.3.3 อะซิโตน** นำชิ้นทดสอบกว้าง 10 มิลลิเมตร ยาว 10 มิลลิเมตร ความหนาประมาณ 2 มิลลิเมตร ซึ่งน้ำหนักแช่ในอะซิโตน 30 มิลลิลิตร ปิดภาชนะให้มิดชิด ตั้งทิ้งไว้ในที่มีดเป็นเวลา 24 72 และ 168 ชั่วโมง ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.27 4.28 และ 4.29



รูปที่ 4.27 การบวมพองในอะซิโตนตามสูตรในตารางที่ 3.1



รูปที่ 4.28 การบวมพองในอะซิโตนตามสูตรในตารางที่ 3.2



รูปที่ 4.29 การบวมพองในอะซิโตนสูตรที่ใช้เถ้าแกลบเทียบกับซิลิกา

จากรูปที่ 4.27 ถึง 4.29 ผลของเถ้าแกลบต่อสมบัติการบวมพองในอะซิโตน ผลที่ได้พบว่าเมื่อเวลาแช่เพิ่มขึ้นค่าการบวมพองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย สาเหตุเนื่องมาจากอะซิโตนนั้นภายในโครงสร้างมีออกซิเจนอยู่ทำให้มีความเป็นขี้ ซึ่งยางธรรมชาติสามารถทนต่อสารละลายที่มีขี้ได้จึงทำให้เมื่อเวลาแช่นั้นขึ้นการบวมพองเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อพิจารณาถึงอนุภาคสารตัวเติมที่เติมเข้าไปในยางธรรมชาติ พบว่าสูตรยางที่มีเถ้าแกลบจะเกิดการบวมสูง สาเหตุเนื่องจากความเป็นขี้ที่มีอยู่ในเถ้าแกลบ ทำให้อะซิโตนสามารถแทรกเข้าไปได้มากขึ้น ดังนั้นจึงทำให้สูตรที่มีการเติมเถ้าแกลบเข้าไปมีค่าการบวมพองสูงกว่าสูตรที่มีการเติมเขม่าดำและซิลิกา

#### 4.4 ราคาของต้นทุนของยาง

จากผลการทดลอง เถ้าแกลบที่ไม่มีการกระตุ้นสารเคมีจะช่วยเพิ่มความแข็งให้กับยางธรรมชาติได้ซึ่งผลิตภัณฑ์ยางส่วนใหญ่ก็จะพิจารณาจากความแข็งเป็นขั้นแรก ซึ่งเถ้าแกลบก็มีราคาถูกเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับเขม่าดำและซิลิกาทางการค้า

ตารางที่ 4.3 ราคาของยางและสารเคมีที่ใช้ในแต่ละสูตร

| สูตร         | A      | B      | C      | D      | F      | G      | H      | I      | K      | L      | M      |
|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| NR           | 182    | 182    | 182    | 182    | 182    | 182    | 182    | 182    | 182    | 182    | 182    |
| ZnO          | 3.25   | 3.25   | 3.25   | 3.25   | 0.33   | 0.33   | 0.33   | 0.33   | 0.33   | 0.33   | 0.33   |
| Stearic acid | -      | -      | -      | -      | 0.13   | 0.13   | 0.13   | 0.13   | 0.20   | 0.20   | .20    |
| N330         | 3.60   | -      | -      | -      | 5.00   | -      | -      | -      | -      | -      | -      |
| N550         | -      | 3.24   | -      | -      | -      | 4.50   | -      | -      | -      | -      | -      |
| Silica       | -      | -      | -      | -      | -      | -      | -      | -      | 1.64   | -      | -      |
| เถ้าแกลบ     | -      | -      | 0.14   | 0.14   | -      | -      | 0.20   | 0.20   | -      | 0.23   | 0.23   |
| KOH          | -      | -      | -      | 23.04  | -      | -      | -      | 30.72  | -      | -      | 34.53  |
| MBTS         | 0.24   | 0.24   | 0.24   | 0.24   | -      | -      | -      | -      | 0.10   | 0.10   | 0.10   |
| CBS          | -      | -      | -      | -      | 0.08   | 0.08   | 0.08   | 0.08   | -      | -      | -      |
| DPG          | -      | -      | -      | -      | -      | -      | -      | -      | 0.41   | 0.41   | 0.41   |
| 6PPD         | 0.19   | 0.19   | 0.19   | 0.19   | 0.19   | 0.19   | 0.19   | 0.19   | 0.19   | 0.19   | 0.19   |
| S            | 0.08   | 0.08   | 0.08   | 0.08   | 0.08   | 0.08   | 0.08   | 0.08   | 0.09   | 0.09   | 0.09   |
| ราคารวม      | 189.36 | 189.00 | 185.90 | 208.94 | 187.81 | 187.31 | 183.01 | 213.73 | 184.96 | 183.55 | 218.05 |

จากตารางที่ 4.3 จะเห็นว่าสูตรที่ใช้ถ้ำกลบ (สูตร C H และ L) เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ มีต้นทุนในการผลิตต่ำกว่าทุกสูตรเนื่องจากราคาของถ้ำกลบที่ไม่มีการกระตุ้นสารเคมีนั้นมีการเตรียมที่ง่ายวัสดุที่นำมาผลิตมีปริมาณมากในท้องถิ่นทำให้ต้นทุนการผลิตต่ำ

## สรุปผล

### 5.1 สรุปผลการทดลอง

#### 5.1.1 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและโครงสร้างของถ้ำกลบ

จากการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและโครงสร้างของถ้ำกลบทั้ง 3 ชนิด ได้สภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเขม่าดำจากเปลือกข้าวเพื่อใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติคือ เปลือกข้าวเหนียว ที่สภาวะเวลาเผา 60 นาที อุณหภูมิ 700 °C ซึ่งได้ค่า Iodine Adsorption Number เท่ากับ 88 mg/g และค่า DBP oil absorption เท่ากับ 153 cm<sup>3</sup> DBP/100 g

#### 5.1.2 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและโครงสร้างของถ้ำกลบที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

จากการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและโครงสร้างของถ้ำกลบที่กระตุ้นด้วยสารเคมี 2 ชนิดคือซิงค์คลอไรด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ได้สภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเขม่าดำเพื่อใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติคือการนำเปลือกข้าวมาแช่ในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 20 %w/w เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นระยะเวลา 60 นาที พบว่าถ้ำกลบที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์มีค่า Iodine Adsorption Number เท่ากับ 96 mg/g และ ค่า DBP oil absorption เท่ากับ 194 cm<sup>3</sup> DBP/100 g ส่วนถ้ำกลบที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์มีค่า Iodine Adsorption Number เท่ากับ 198 mg/g และค่า DBP oil absorption เท่ากับ 139 cm<sup>3</sup> DBP/100 g

#### 5.1.3 ผลของถ้ำกลบต่อสมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนซ์

จากผลการทดลองพบว่าถ้ำกลบที่ไม่กระตุ้นสารเคมี ให้ค่าความทนทานต่อการสึกหรอ ค่าความทนทานต่อแรงดึง และความแข็งแรงมากกว่าถ้ำกลบที่กระตุ้นสารเคมีด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ให้ค่าความทนทานต่อการสึกหรอและความทนทานต่อการหักงอเพิ่มขึ้น แต่ยังคงต่ำกว่าเขม่าดำและซิลิกาทางการค้า นอกจากนี้การขยายตัวของรอยแตกของสูตรที่กระตุ้นด้วย KOH ให้ค่าที่ใกล้เคียงกับเขม่าดำและซิลิกาที่มีขายในทางการค้า

#### 5.1.4 ผลของถ้ำกลบต่อสมบัติความทนทานต่อตัวทำละลาย (Swelling)

จากผลการทดลองถ้ำกลบที่ไม่กระตุ้นสารเคมีและถ้ำกลบที่กระตุ้นสารเคมีด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์มีความทนทานต่อแก๊สโซลีนและเบนซินต่ำ แต่ทนต่ออะซิโตน

#### 5.1.5 ราคาของสูตรยาง

จากการทดลองพบว่าถ้ำกลบที่ไม่กระตุ้นสารเคมีให้สมบัติความแข็งแรงที่สูงในขณะที่ราคาต่ำ ดังนั้นการทำผลิตภัณฑ์ยางบางประเภทที่ไม่ต้องคำนึงถึงสมบัติที่สูงมากนัก เช่น มือจับและที่พนักเก้าอี้ของรถจักรยานยนต์ ยางปูพื้น ยางในถังน้ำซักโครก ยางรองขาเก้าอี้ และยางที่ต้องใช้กับงานที่ทนต่อการสึกหรอและการหักงอ เป็นต้น อาจใช้ถ้ำกลบเป็นทางเลือกเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติพอใช้ ในขณะที่ต้นทุนการผลิตต่ำ

## เอกสารอ้างอิง

- [1] เสาวนีย์ ก่อวุฒิกุลรังษี. การผลิตยางธรรมชาติ. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี, 2541.
- [2] บุญธรรม นิธิอุทัย. ยางธรรมชาติ ยางสังเคราะห์และคุณสมบัติ. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี, 2530, 1-3.
- [3] พงษ์ธร แซ่ฮ้อย. ยาง : ชนิด สมบัติ และการใช้งาน. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2547.
- [4] <http://rubber.sc.mahidol.ac.th/rubbertech/NR.htm> วันที่สืบค้น 12/03/54
- [5] บุญธรรม นิธิอุทัย, พรพรรณ นิธิอุทัย และ ปรีชา ป้องภัย. เทคโนโลยีน้ำยางข้น. ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี, 2540.
- [6] <http://th.wikipedia.org/wiki> วันที่สืบค้น 12/03/54
- [7] บุญธรรม นิธิอุทัย. เทคโนโลยีน้ำยาง. ห้องปฏิบัติการเทคโนโลยียาง คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี, 2538.
- [8] พรพรรณ นิธิอุทัย. สารเคมีสำหรับยาง. ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี, 2528, 182-184.
- [9] พรพรรณ นิธิอุทัย. ยางเทคนิคการออกสูตร. ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี, 2540.
- [10] <http://th.wikipedia.org/wiki/ยางธรรมชาติ> วันที่สืบค้น 12/03/54
- [11] พรพรรณ นิธิอุทัย. สารเคมีสำหรับยาง. ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี, 2528, 176-209.
- [12] [www.rubbercenter.org](http://www.rubbercenter.org) วันที่สืบค้น 23/04/54
- [13] [www.rubbercenter.or/files/carbonblack\\_pdf](http://www.rubbercenter.or/files/carbonblack_pdf) วันที่สืบค้นข้อมูล 23/04/54
- [14] พรพรรณ นิธิอุทัย. สารเคมีสำหรับยาง. ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี, 2528, 205.
- [15] พรพรรณ นิธิอุทัย. สารเคมีสำหรับยาง. ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี, 2528, 209-220.
- [16] [www.navy.mi.th/sattahippase/unit/wfrock/rock2.php](http://www.navy.mi.th/sattahippase/unit/wfrock/rock2.php) วันที่สืบค้นข้อมูล 24/04/54
- [17] [www.kr.ac.th/tech/det48m2/soil10.htm](http://www.kr.ac.th/tech/det48m2/soil10.htm) วันที่สืบค้นข้อมูล 24/04/54
- [18] [www.wikipedia.org/wiki/](http://www.wikipedia.org/wiki/) แกลบ สืบค้นข้อมูล 25/04/54
- [19] [www.charcoal.snmcenter.com/charcoalthai/husk.php](http://www.charcoal.snmcenter.com/charcoalthai/husk.php) สืบค้นข้อมูล 26/04/54
- [20] [www.riceproduct.org/index.php?option=com](http://www.riceproduct.org/index.php?option=com) สืบค้นข้อมูล 26/04/54
- [21] <http://www.manager.co.th/Campus/ViewNews.aspx?NewsID9530000115964&CommentReferID=16818982&CommentReferNo=1&> วันที่สืบค้นข้อมูล 2/05/54
- [22] ธัญญา เสาวภาคย์. การเสริมแรงยางธรรมชาติโดยใช้สารตัวเติมผสมของซิลิกาและผงเขม่าดำ. Thesis, 2010.
- [23] Helson, M.D., Valéria,D.R., Leila, L.Y. and Cristina,R. G. 2007. Design and analysis of single-factor experiments: Analysis of variance of the effect of rice husk ash and commercial fillers in NR compounds. Polymer Bulletin. 58. 597–610.

- [24] Ishak, Z.A.M. and Bakar, A.A. 1995. An investigation on the potential of rice husk ash as fillers for epoxidized natural rubber (ENR). *Eur Polym J.* 31. 259-269.
- [25] Ismail, H., Nasaruddin, M.N. and Rozman, H.D. 1999. The effect of multifunctional additive in white rice husk ash filled natural rubber compounds. *Eur Polym J.* 35. 1429-1437.
- [26] Ismail, H., Nizam, J.M and Khalil, H.P.S.A. 2001. The effect of a compatibilizer on the mechanical properties and mass swell of white rice husk ash filled natural rubber/linear low density polyethylene blends. *Polymer Testing.* 20. 125–133.
- [27] Helson, M.D., Valéria, D.R., Leila, L.Y. and Cristina, R. G. 2007. Design and analysis of single-factor experiments: Analysis of variance of the effect of rice husk ash and commercial fillers in NR compounds. *Polymer Bulletin.* 58. 597–610.

ภาคผนวก



### เอกสารคำชี้แจงข้อคิดเห็น/ข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ

โครงการ การเตรียมเขม่าดำจากเปลือกข้าวเพื่อใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ

หัวหน้าโครงการ น.ส.สุวิมล ศิริวงศ์

| ข้อคิดเห็น/ข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | การชี้แจง ปรับปรุงและแก้ไข                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>ความเห็นด้านการพิมพ์ (Editorial)</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. วัตถุประสงค์และ output ที่เขียนในรายงานนั้น ควรสอดคล้องกับ วัตถุประสงค์และ output ที่ได้เสนอไว้ในสัญญาบริบท</li> <li>2. ตรวจสอบรูปแบบการเขียนเล่มรายงาน เช่น ควรแยกหน้าบทคัดย่อไว้ใน 1 หน้า ควรเน้นหัวข้อโดยการพิมพ์ตัวหนาหรือตัวใหญ่ เป็นต้น</li> <li>3. การเขียนบทคัดย่อ/abstract ควรให้รายละเอียดที่สะท้อนคำตอบหรือ สอดคล้องกับวัตถุประสงค์และ output ของงานวิจัย เป็นข้อมูลที่มุ่งใจให้ ผู้อ่านติดตามเนื้อหาของรายงาน ไม่ควรเขียนสั้นจนไม่สามารถประเมิน ความสำเร็จของงานวิจัยได้</li> <li>4. ตรวจสอบการเขียนเอกสารอ้างอิงในท้ายเล่มรายงาน <ul style="list-style-type: none"> <li>- บางรายการไม่สามารถหาได้ว่าอ้างอิงไว้ที่ไหน (เอกสารลำดับที่ 1-22)</li> <li>- ระบุเลขที่หน้าอ้างอิงในเอกสารทุกรายการ</li> <li>- ตรวจสอบปี พ.ศ.ที่จัดพิมพ์ (ไม่ใช่จัดถ่ายสำเนา) ของเอกสารอ้างอิงใน ส่วนของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานีให้ถูกต้อง</li> <li>- ตรวจสอบรายการอ้างอิงลำดับที่ 12</li> </ul> </li> </ol> | <p>-นักวิจัยได้ปรับแก้ให้สอดคล้องกับสัญญาบริบทแล้วใน หน้าที่ 1</p> <p>-นักวิจัยได้ปรับแก้ตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิแล้ว</p> <p>-นักวิจัยเห็นว่าบทคัดยอดังกล่าวกระชับและครบถ้วน ดีแล้ว</p> <p>-เอกสารบางรายการ นักวิจัยนำมาอ่านประกอบแต่ ไม่ได้ยกคำมาอ้างอิงจึงไม่สามารถระบุหน้าที่อ้างอิงได้</p> <p>-นักวิจัยได้ตรวจสอบและแก้ไขตามคำแนะนำของ ผู้ทรงคุณวุฒิแล้ว</p> |
| <p><b>ความเห็นด้านวิชาการ (Technical)</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. หน้า 4 อ้างอิงถึงสูตรยางคอมปาวด์ที่ดัดแปลงจาก ASTM D 5963#1 และ ASTM D 5963#2 นั้น ควรระบุว่าเป็นมาตรฐานสำหรับเตรียม compound เพื่อผลิตภัณฑ์ใดให้ผู้อ่านทั่วไปได้มีความเข้าใจมากขึ้น</li> <li>2. การสรุปผลที่ได้ระบุว่าเป็นสภาวะที่เหมาะสม หรือค่าที่ดีที่สุดนั้นควรมี สภาวะหรือค่าที่เป็น benchmark ประกอบเพิ่มเติมในการสรุปด้วย</li> </ol>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | <p>-นักวิจัยได้ปรับแก้ตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิแล้ว ในหน้าที่ 4</p> <p>-นักวิจัยได้ระบุแล้วในหน้าที่ 22</p>                                                                                                                                                                                                                                                       |
| <p><b>ความเห็นเพิ่มเติม/ข้อเสนอแนะ/ข้อสังเกต</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. ควรคำนึงถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการผลิต เพื่อไม่ให้ด้อยคุณภาพ มากเกินไป</li> <li>2. วิธีการเตรียมแลบก่อนข้างยุ่งยาก การใช้อุณหภูมิในการเตรียมสูงถึง 700°C นั้น ในทางปฏิบัติจริงจะทำการเตรียมได้อย่างไรหากไม่ใช้เตาเผา</li> <li>3. ควรระบุเพิ่มเติมถึงวัตถุประสงค์ในการเติมถ้าแลบว่าจะสามารถนำไปผลิต เป็นผลิตภัณฑ์อะไรได้บ้างพอสังเขป โดยเฉพาะในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ ที่ ไม่ต้องการคุณภาพสูงมากนัก</li> </ol>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | <p>-จากสมบัติบางประการของยางที่ผสมถ้าแลบไม่ถึง ว่าด้อยคุณภาพ</p> <p>-ในทางปฏิบัติแม้การเผาแลบแบบชาวบ้านเผาก้นก็ สามารถทำอุณหภูมิการเผาให้สูง 700 °C ได้</p> <p>-นักวิจัยได้ปรับแก้ตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิแล้ว</p>                                                                                                                                               |