



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การนำกระดองปลาหมึกมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติที่
ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันในระบบซัลเฟอร์

โดย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ และคณะ

เมษายน 2553

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การนำกระดูกปลาหมึกมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติที่
ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันในระบบชลเฟอร์

คณะผู้วิจัย

- ผศ. ดร. ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ
- นาย พนวิทย์ คลังสุวรรณ

สังกัด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชุดโครงการวิจัยขนาดเล็กเรื่องยางพารา

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทสรุปย่อรายงานสำหรับผู้บริหาร

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย)	การนำกระดูกปลาหมึกมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันในระบบซัลเฟอร์
(ภาษาอังกฤษ)	Cuttlebone as an additive for natural rubber vulcanizate in sulfur curing system

ชื่อหัวหน้าโครงการ หน่วยงานสังกัด และที่อยู่

ชื่อ-สกุล	ผศ.ดร. ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ
หน่วยงาน	ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่	ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ ๑๐๓๓๐
โทรศัพท์	02-218-7518, 086-090-2074 โทรสาร 02-255-5831
E-mail address	sirilux.p@chula.ac.th, spoompradub@yahoo.com
นักศึกษา/ผู้ร่วมวิจัย	นายพนรวิชัย คลังสุวรรณ

ระยะเวลาดำเนินงาน 9 เดือน ตั้งแต่วันที่ 15 กรกฎาคม 2552 ถึงวันที่ 14 เมษายน 2553

ปัญหาที่ทํารว้จยและความสำคัญ

ปัจจุบันการนำยางธรรมชาติไปใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ นิยมใส่สารตัวเติมเพื่อช่วยในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ให้ดีขึ้น สารตัวเติมที่นิยมใช้มีหลายประเภท ได้แก่ ผงเขม่าดำ ซิลิกา แคลเซียมคาร์บอเนต และดินขาว เป็นต้น แต่เนื่องจากจากกระบวนการเตรียมสารตัวเติมดังกล่าว นั้น ต้องอาศัยผลิตภัณฑ์ที่ได้จากน้ำมันปิโตรเลียมและปฏิกิริยาทางเคมีซึ่งเป็นมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องด้วยในสภาวะการณ์ปัจจุบันโลกกำลังประสบกับปัญหาภาวะโลกร้อน ด้วยเหตุนี้ได้มีการรณรงค์การนำวัสดุที่เหลือใช้จากธรรมชาติมาใช้เป็นสารตัวเติมให้กับผลิตภัณฑ์ยาง ประกอบกับข้อมูลงานวิจัยในอดีตสามารถนำวัสดุที่ได้จากธรรมชาติคือกระดูกปลาหมึกมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติในระบบเปอร์ออกไซด์วัลคาไนเซชัน เพื่อเป็นการต่อยอดจากงานวิจัยดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดนำกระดูกปลาหมึกมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติในระบบซัลเฟอร์วัลคาไนเซชันเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้ในทางการค้า เนื่องจากการวัลคาไนซ์ในระบบซัลเฟอร์นั้นเป็นที่นิยมในระดับอุตสาหกรรมและให้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าระบบเปอร์ออกไซด์ อีกทั้งเพื่อเป็นการลดต้นทุนในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางโดยการนำวัสดุเหลือใช้จากธรรมชาติมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ

วัตถุประสงค์

ศึกษาผลของปริมาณกระดูกปลาหมึกต่อสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันในระบบซัลเฟอร์

ผลการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้ศึกษาการนำอนุภาคกระดูกปลาหมึกมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติให้ดียิ่งขึ้น หรือเทียบเท่ากับการใช้สารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้า ซึ่งมีราคาสูงกว่า โดยกระบวนการในการศึกษาประกอบไปด้วยขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

1. การพิสูจน์เอกลักษณ์เบื้องต้นของอนุภาคกระดูกปลาหมึก

จากการตรวจสอบสมบัติด้านต่าง ๆ ของอนุภาคกระดูกปลาหมึกได้แก่ โครงสร้างผลึก ช่วงอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน และพื้นที่ผิวเปรียบเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้ในทางการค้า พบว่าโครงสร้างผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตเกิดการค้ำอยู่ในลักษณะของแคลไซต์ (Calcite) ในขณะที่แคลเซียมคาร์บอเนตที่มีอยู่ในอนุภาคกระดูกปลาหมึกมีลักษณะโครงสร้างของผลึกแบบอราโกไนต์ (Aragonite) ช่วงอุณหภูมิการสลายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนตเกิดการค้ำปรากฏช่วงเดียว คือที่อุณหภูมิ 748 องศาเซลเซียสและมีร้อยละโดยน้ำหนักลดลงประมาณร้อยละ 40 ในขณะที่อนุภาคกระดูกปลาหมึกปรากฏช่วงอุณหภูมิการสลายตัว 2 ช่วง คือช่วงแรกเป็นการสลายตัวที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นการสลายตัวของสารประกอบอินทรีย์ที่มีอยู่ในอนุภาคกระดูกปลาหมึก ช่วงที่สองเป็นช่วงการสลายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนตที่อุณหภูมิ 731 องศาเซลเซียสและมีร้อยละโดยน้ำหนักลดลงประมาณร้อยละ 40 พื้นที่ผิวโดย Brunauer-Emmett-Teller (BET) specific surface area พบว่าอนุภาคกระดูกปลาหมึกสามารถเกิดอันตรกิริยาและมีความเข้ากันกับตัวกลางยางธรรมชาติได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนตเกิดการค้ำ เนื่องจากค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของอนุภาคกระดูกปลาหมึกมีค่าสูงกว่าแคลเซียมคาร์บอเนตเกิดการค้ำคือ 18.02 และ 11.36 ตารางเมตร/กรัม ตามลำดับ

2. สมบัติการคงรูปยางธรรมชาติ

การวิเคราะห์สมบัติการคงรูปของยางคอมปาวด์เสริมแรงด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตเกิดการค้ำและอนุภาคกระดูกปลาหมึก ด้วยเครื่อง Moving Die Rheometer (MDR) ที่อุณหภูมิ 155 องศาเซลเซียส พบว่าการใช้อนุภาคกระดูกปลาหมึกเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติไม่ไปขัดขวางการดำเนินไปของปฏิกิริยาการวัลคาไนเซชันของยางธรรมชาติ นอกจากนี้การนำอนุภาคกระดูกปลาหมึกมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติสำหรับระบบชัลเฟอร์ วัลคาไนเซชัน มีผลให้สมบัติการคงรูปของยางธรรมชาติไม่แตกต่างจากการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเกิดการค้ำเป็นสารตัวเติม โดยมีผลทำให้เวลาที่ใช้ในการคงรูปยางคอมปาวด์มีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อปริมาณของสารตัวเติมทั้ง 2 ชนิดเพิ่มขึ้น

3. สมบัติทางกายภาพและเชิงกลของคอมพอสิตยางธรรมชาติ

เมื่อนำยางคอมปาวด์ไปทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดเบ้า (Compression molding) ที่อุณหภูมิ 155 องศาเซลเซียส ความดัน 150 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นนำคอมพอสิตยางธรรมชาติที่ได้มาทดสอบสมบัติเชิงกลด้านต่าง ๆ คือ ค่าโมดูลัสที่ 100 % (M_{100}) และ 300 % (M_{300}) ของระยะยืด ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Tensile strength) ระยะยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) ค่าความแข็ง (Hardness) และความต้านทานการฉีกขาด (Tear strength) ของคอมพอสิตยางธรรมชาติ จากการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่าค่าโมดูลัสที่ 100 % และ 300 % ของระยะยืด มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของสารตัวเติมเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับค่าความแข็ง ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดและค่าระยะยืด ณ จุดขาด คือค่าดังกล่าวมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณของสารตัวเติมเพิ่มขึ้น นอกจากนี้พบว่าการใช้สารตัวเติมประเภทแคลเซียมคาร์บอเนต มิได้ส่งผลต่อการปรับปรุงความต้านทานต่อการฉีกขาด โดยค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณของสารตัวเติมเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม ณ ปริมาณสารตัวเติม 20 phr จะให้ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดที่สูงที่สุด

4. ความทนทานและการเสื่อมสภาพทางความร้อน

เมื่อบ่มเร่งขึ้นงานด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 22 ± 2 ชั่วโมง แล้วนำคอมพอสิตยางธรรมชาติไปทดสอบสมบัติเชิงกลด้านต่าง ๆ คือ ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุด ระยะยืด ณ จุดขาด และค่าความแข็ง เทียบกับสมบัติเชิงกลของคอมพอสิตยางธรรมชาติก่อนการบ่มเร่ง พบว่าคอมพอสิตยางธรรมชาติมีความสามารถในการรักษาเสถียรภาพของสมบัติเชิงกล (Retention) ได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติที่ไม่มีการเติมสารตัวเติม โดยคอมพอสิตยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงกลหลังบ่มเร่งเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยอยู่ในช่วงประมาณ 10 – 20 % ในขณะที่ยางธรรมชาติที่ไม่มีการเติมสารตัวเติมใด ๆ มีการเปลี่ยนแปลงค่าสมบัติเชิงกลหลังการบ่มเร่งอยู่ในช่วง 30 – 40 %

5. ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของคอมพอสิตยางธรรมชาติ

ผลการทดสอบลักษณะการกระจายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนตเกิดการค้ำและอนุภาคกระดูกปลาหมึกในตัวกลางยางธรรมชาติ จากเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 500 เท่า พบว่าการกระจายตัวของ

สารตัวเติมทั้ง 2 ชนิด สามารถกระจายตัวได้ดีในตัวกลางยางธรรมชาติ แต่เมื่อปริมาณของสารตัวเติมเพิ่มสูงขึ้นพบว่าอนุภาคกระดองปลาหมึกสามารถเกิดอันตรกิริยากับตัวกลางยางธรรมชาติได้ดีกว่าแคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้า ซึ่งสอดคล้องกับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของอนุภาคกระดองปลาหมึกซึ่งมีค่าสูงกว่าแคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้า และการมีสารประกอบอินทรีย์ในอนุภาคกระดองปลาหมึกส่งผลให้การเข้ากันได้กับตัวกลางยางธรรมชาติเกิดขึ้นได้ดี

6. การวิเคราะห์ความคุ้มค่าต่อการพัฒนาเชิงพาณิชย์

การนำอนุภาคกระดองปลาหมึกที่ไม่ผ่านกระบวนการบดโดยใช้เครื่องจักร (ใช้กำลังคนในการบด) มาใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ ทำให้ต้นทุนในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยางลดลงเมื่อเทียบกับการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้ในทางการค้า โดยสามารถลดราคาค่าต้นทุนในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางลงได้ในช่วง 1.85 % - 15.95 % ขึ้นกับอัตราส่วนการใช้สารตัวเติมเกรดการค้า เมื่อพิจารณาในระดับอุตสาหกรรมที่มีกำลังการผลิตสูงขึ้นจำเป็นต้องใช้เครื่องบดนั้น ในงานวิจัยนี้ทำการคำนวณค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นในการเตรียมอนุภาคกระดองปลาหมึกโดยผ่านเครื่องบด (สำหรับใช้ในงานวิจัย) พบว่าราคาของผลิตภัณฑ์ยางจะมีราคาที่สูงขึ้นในช่วง 16.33 % - 142.94 % แต่อย่างไรก็ตามในระดับอุตสาหกรรมเครื่องจักรที่ใช้ในการบดจะแตกต่างออกไปจากที่ใช้ในงานวิจัย ส่งผลให้ต้นทุนในการบดที่เกิดขึ้นอาจจะถูกลงกว่าที่คำนวณ

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการนำอนุภาคกระดองปลาหมึกมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติในระบบซิลเฟอร์วัลคาไนเซชัน โครงสร้างผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีในอนุภาคกระดองปลาหมึกอยู่ในลักษณะของอราโกไนต์ และค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของอนุภาคกระดองปลาหมึกมีค่าประมาณ 18.02 กรัม/ตารางเมตร สมบัติการคงรูปของยางคอมปาวด์ที่มีการใช้อนุภาคกระดองปลาหมึกส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการคงรูปยางคอมปาวด์มีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อปริมาณอนุภาคกระดองปลาหมึกเพิ่มขึ้น การใช้อนุภาคกระดองปลาหมึกเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้านต่าง ๆ อาทิเช่น ค่าโมดูลัส และค่าความแข็งแรงของยางธรรมชาติได้ โดยค่าโมดูลัสและค่าความแข็งแรงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของสารตัวเติมเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดและค่าระยะยืด ณ จุดขาด มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณของสารตัวเติมเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติเชิงกลของการใช้สารตัวเติมชนิดแคลเซียมคาร์บอเนตเกรดทางการค้า การใช้สารตัวเติมประเภทแคลเซียมคาร์บอเนต มิได้ส่งผลต่อการปรับปรุงความต้านทานต่อการฉีกขาด คอมพอสิตยางธรรมชาติมีความสามารถในการรักษาเสถียรภาพของสมบัติเชิงกลลดลง เมื่อนำไปบ่มแรงที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จากข้อมูลลักษณะทางสัณฐานวิทยาสามารถอธิบายได้ว่าอนุภาคกระดองปลาหมึกสามารถเกิดอันตรกิริยากับตัวกลางยางธรรมชาติได้ดีกว่าแคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้า เนื่องจากสารประกอบอินทรีย์ที่มีอยู่ในอนุภาคกระดองปลาหมึกและค่าพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูงกว่าแคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้า นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองในด้านสมบัติเชิงกลที่ได้ในงานวิจัยนี้กับข้อมูลผลการวิจัยที่มีการใช้อนุภาคกระดองปลาหมึกเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติในระบบเปอร์ออกไซด์วัลคาไนเซชัน พบว่าให้ผลการทดลองไปในทางเดียวกัน จึงสรุปได้ว่าการใช้อนุภาคกระดองปลาหมึกเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติสามารถนำไปใช้ได้ทั้งระบบซิลเฟอร์วัลคาไนเซชันและเปอร์ออกไซด์วัลคาไนเซชัน

ข้อเสนอแนะ

- ควรมีการศึกษาพัฒนาเพิ่มเติมในส่วนของสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในกระดองปลาหมึก นอกเหนือจากองค์ประกอบหลักคือ แคลเซียมคาร์บอเนต เช่น ไคติน ว่ามีอิทธิพลช่วยให้ประสิทธิภาพในการเป็นสารตัวเติมของกระดองปลาหมึกในยางธรรมชาติอย่างไร

ผลงานทางวิชาการ

- นำเสนอในการประชุมวิชาการ “The Science Forum 2010” ครั้งที่ 18 ประจำปี 2553 ระหว่างวันที่ 11-12 มีนาคม 2553 ณ อาคารมหามกุฏ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติเชิงกลของคอมพอสิตยางธรรมชาติ โดยการนำกระดองปลาหมึกมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันในระบบซัลเฟอร์ โครงร่างผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีอยู่ในอนุภาคกระดองปลาหมึกอยู่ในรูปของอราโกไนต์ ส่วนค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของอนุภาคกระดองปลาหมึกมีค่าประมาณ 18.02 กรัม/ตารางเมตร จากการศึกษาสมบัติการคงรูปของคอมพอสิตยางธรรมชาติที่อัตราส่วนการเติมสารตัวเติมที่อัตราส่วนต่าง ๆ กัน พบว่าเวลาที่ยางเกิดการคงรูปก่อนกำหนดและเวลาที่เหมาะสมในการวัลคาไนเซชันของยางคอมพาวด์มีแนวโน้มที่ลดลง เมื่อปริมาณของสารตัวเติมเพิ่มขึ้น จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของ คอมพอสิตยางธรรมชาติ พบว่าการใช้อนุภาคกระดองปลาหมึกเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้านต่าง ๆ ของยางธรรมชาติได้และให้ผลการทดลองใกล้เคียงกับแคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้ในทางการค้า อย่างไรก็ตามการใช้สารตัวเติมประเภทแคลเซียมคาร์บอเนตมิได้ส่งผลให้การปรับปรุงความต้านทานต่อการฉีกขาด ดีขึ้น เมื่อคอมพอสิตยางธรรมชาติถูกนำไปป่นแรงด้วยความร้อน ความสามารถในการรักษาเสถียรภาพของสมบัติเชิงกล (Retention) มีแนวโน้มลดลงประมาณ 10 – 20 % ในขณะที่ความสามารถในการรักษาเสถียรภาพของสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่ไม่มีการเติมสารตัวเติม ลดลงประมาณ 30 – 40 % นอกจากนี้จากการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าอนุภาคกระดองปลาหมึกสามารถเกิดอันตรกิริยากับตัวกลางยางธรรมชาติได้ดีกว่าแคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้า

คำสำคัญ: ยางธรรมชาติ, คอมพอสิต, กระดองปลาหมึก

ABSTRACT

In this study, the mechanical properties of natural rubber (NR) composite materials using cuttlebone as an additive in the sulfur vulcanization system were studied. The crystal structure of the cuttlebone was an aragonite form of CaCO_3 and the specific surface area was about 18.02 g/m^2 . From the results of cure characteristics, the scorch time and cure time in NR composites decreased with increasing filler loading. The mechanical properties i.e., tensile strength and hardness, of NR composite materials using cuttlebone as the reinforcing filler were found to be comparable with those of the NR filled with commercial CaCO_3 . However, the CaCO_3 did not improve the tear resistance of NR composite materials. After thermal aging, the mechanical properties of the composites tend to slightly change resulting in the decrease of retention about 10 – 20 %, while the retention of NR vulcanizate was decreased 30 – 40 %. Subsequently, the morphology of composite materials was analyzed by using Scanning Electron Microscopy (SEM) showed that the interaction between cuttlebone particles and NR matrix must be stronger than that between commercial CaCO_3 and NR matrix.

Keywords: *natural rubber, composite, cuttlebone*

สารบัญเรื่อง

หน้า

บทสรุปรายงานสำหรับผู้บริหาร	1
บทคัดย่อ	4
Abstract	5
สารบัญเรื่อง	6
สารบัญตาราง	7
สารบัญรูปภาพ	8
บทที่ 1 บทนำ	9
1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของโครงการ	9
1.2 วัตถุประสงค์	9
1.3 ทฤษฎี แนวคิดในการทำงานวิจัย และผลงานที่เกี่ยวข้อง	9
บทที่ 2 สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง	16
2.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	16
2.2 การดำเนินงานวิจัย	16
2.2.1 การเตรียมอนุภาคกระดองปลาหมึก	16
2.2.2 การศึกษาเอกลักษณ์เบื้องต้นของอนุภาคกระดองปลาหมึก	16
2.2.3 การเตรียมยางคอมปาวด์	16
2.2.4 การทดสอบสมบัติเชิงกลของคอมพอสิตยางธรรมชาติ	17
2.2.5 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของคอมพอสิตยางธรรมชาติ	18
บทที่ 3 ผลการวิจัย	19
บทที่ 4 วิเคราะห์ผลการทดลอง	27
4.1 เอกลักษณ์เบื้องต้นของอนุภาคกระดองปลาหมึก	27
4.2 สมบัติในการคงรูป	27
4.3 สมบัติทางกายภาพและเชิงกลของคอมพอสิตยางธรรมชาติ	28
4.4 ความทนทานและการเสื่อมสภาพทางความร้อน	29
4.5 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของคอมพอสิตยางธรรมชาติ	29
4.6 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าต่อการพัฒนาเชิงพาณิชย์	30
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ	32
เอกสารอ้างอิง	34
ภาคผนวก	35
ตอบคำถามต่อข้อคิดเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิ	37

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	สูตรในการเตรียมยางคอมปาวด์	17
3.1	อุณหภูมิการสลายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้าและอนุภาคกระตองปลาหมึก	21
3.2	การพิสูจน์เอกลักษณ์ของแคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้าและอนุภาคกระตองปลาหมึก	21
3.3	สมบัติการคงรูปของยางคอมปาวด์	22
4.1	ตัวอย่างการคำนวณราคาขายธรรมชาติผสมสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการวัลคาไนเซชัน	31
ก	สมบัติเชิงกลของคอมพอสิตยางธรรมชาติในด้านการต้านทานต่อการฉีกขาด	35
ข	สมบัติเชิงกลของคอมพอสิตยางธรรมชาติในด้านการต้านทานต่อแรงดึงทั้งก่อนและหลังการ ปมเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 22 ± 2 ชั่วโมง	36

สารบัญรูปภาพ

รูปที่		หน้า
1.1	โครงสร้างแสดงหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของผงเขม่าดำและซิลิกา	11
1.2	สูตรโครงสร้างทางเคมีของไคติน	12
1.3	โครงสร้างแสดงตำแหน่งของกระดูกปลาหมึก	12
3.1	ผลการทดสอบด้วยเทคนิค XRD ของแคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้าและอนุภาคกระดูกปลาหมึก	19
3.2	ผลการทดสอบสมบัติเชิงความร้อนด้วยเครื่อง Thermo Gravimetric Analysis (TGA) ของแคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้า และอนุภาคกระดูกปลาหมึก	20
3.3	ค่าโมดูลัส ที่ 100 % ของระยะยืด (M_{100}) ค่าโมดูลัส ที่ 300 % ของระยะยืด (M_{300}) ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Tensile strength) ระยะยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) และค่าความแข็ง (Hardness) ของคอมพอสิตยางธรรมชาติ	23
3.4	ความต้านทานต่อการฉีกขาดของคอมพอสิตยางธรรมชาติ	24
3.5	ค่า Retention ของสมบัติเชิงกลของคอมพอสิตยางธรรมชาติภายหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 22 ± 2 ชั่วโมง	25
3.6	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 500 เท่า ของพื้นผิวย่อยขาด (Fracture surface) ในตัวกลางยางธรรมชาติหลังผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันที่มีการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้า และอนุภาคกระดูกปลาหมึกเป็นสารตัวเติม	26
4.1	คอมพอสิตยางธรรมชาติที่มีการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้า และอนุภาคกระดูกปลาหมึกเป็นสารตัวเติม	28

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

ในปัจจุบันการนำยางธรรมชาติไปใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ นิยมใส่สารตัวเติม (Filler) เพื่อช่วยในการปรับปรุงสมบัติเชิงกล (Mechanical properties) ของผลิตภัณฑ์ยางให้ดีขึ้น สารตัวเติมที่นิยมใช้นั้นมีหลายประเภท ได้แก่ ผงเขม่าดำ (Carbon black) ซิลิกา (Silica) ทัลคัม (Talc) แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) และดินขาว (Clay) เป็นต้น ในบรรดาสารตัวเติมทั้งหมดผงเขม่าดำถือว่าเป็นสารตัวเติมที่นิยมใช้กันมากที่สุด เนื่องจากราคาถูกและช่วยในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ได้ดี เช่น ความต้านทานต่อการขัดถู ความทนทานต่อการฉีกขาด และสมบัติการต้านทานต่อแรงดึง แต่อย่างไรก็ตามผงเขม่าดำนั้นผลิตจากน้ำมันปิโตรเลียมซึ่งเป็นวัตถุดิบที่ใช้แล้วหมดไปและไม่สามารถนำกลับมาใช้ได้ รวมทั้งเมื่อนำไปผสมกับผลิตภัณฑ์ยางจะให้แต่สีดำเท่านั้น ทำให้การใช้งานค่อนข้างจำกัด ดังนั้นการใช้สารตัวเติมกลุ่มประเภทสีอ่อน เช่น ซิลิกา จึงกลายเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้ แต่การใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมนั้นมีข้อจำกัดในเรื่องของการกระจายตัว เนื่องจากซิลิกามีความเป็นขั้วสูง แต่ยางธรรมชาติมีความเป็นขั้วต่ำ ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติด้อยลง อีกทั้งขั้นตอนในการเตรียมซิลิกานั้นมีความยุ่งยากซับซ้อนและอาศัยปฏิกิริยาเคมีซึ่งเป็นมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม สารตัวเติมอีกประเภทหนึ่งที่น่าสนใจคือ แคลเซียมคาร์บอเนต เนื่องจากมีราคาถูกและหาได้ง่าย แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการเตรียมนั้นค่อนข้างยุ่งยาก เนื่องจากต้องอาศัยปฏิกิริยาเคมีประกอบกับในสถานการณ์ปัจจุบันโลกกำลังประสบกับปัญหาภาวะโลกร้อน ด้วยเหตุนี้ได้มีการรณรงค์การนำวัสดุที่ได้จากธรรมชาติหรือวัสดุที่เหลือใช้จากธรรมชาติมาใช้เป็นสารตัวเติมให้กับผลิตภัณฑ์ยางชนิดต่าง ๆ อาทิเช่น ไม้ไผ่ (Bamboo) ไม้ (Wood) ข้าวเปลือกขาว (White rice husk) ไคติน (Chitin) และกากมะพร้าว (Coir) เป็นต้น ข้อดีของการนำวัสดุที่เหลือใช้จากธรรมชาติมาใช้เป็นสารตัวเติมนั้น คือ ราคาถูก น้ำหนักเบา และที่สำคัญคือสามารถที่จะย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ (Biodegradable) ทำให้ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม เป็นการลดปริมาณขยะจากกระดองปลาหมึกที่ถูกโยนทิ้งในอุตสาหกรรมอาหาร และลดการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตสารตัวเติมเป็นการรักษาสีสิ่งแวดล้อมให้สะอาด ซึ่งน่าจะเป็นทางเลือกที่ดีทางหนึ่งในการช่วยลดปัญหาภาวะโลกร้อน ประกอบกับข้อมูลจากผลงานวิจัยก่อนหน้านี้ Poompradub et. al และคณะ [1] ศึกษาการนำกระดองปลาหมึกมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติในระบบเปอร์ออกไซด์วัลคาไนเซชันแล้ว พบว่าการนำกระดองปลาหมึกที่มีองค์ประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนตและไคตินมาใช้เป็นสารตัวเติมนั้นมีประสิทธิภาพที่ดีไม่ต่างจากการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้า เพื่อเป็นการต่อยอดจากงานวิจัยดังกล่าว ในงานวิจัยนี้ศึกษาผลการเติมกระดองปลาหมึกต่อสมบัติทางกายภาพและเชิงกลต่าง ๆ ในยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันในระบบซัลเฟอร์ เนื่องจากการวัลคาไนซ์ในระบบซัลเฟอร์นั้นเป็นที่นิยมในระดับอุตสาหกรรมมากกว่าระบบเปอร์ออกไซด์ และผลิตภัณฑ์ยางที่ได้ในระบบซัลเฟอร์วัลคาไนเซชันให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่า

1.2 วัตถุประสงค์

ศึกษาผลของกระดองปลาหมึกต่อสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันในระบบซัลเฟอร์

1.3 ทฤษฎีแนวคิดในการวิจัย และผลงานที่เกี่ยวข้อง

ยางดิบ (Raw rubber) มีข้อจำกัดในการใช้งานต่าง ๆ มากมาย เช่น สมบัติเชิงกลที่ไม่ดีและสมบัติเชิงกลเหล่านี้เปลี่ยนแปลงได้ง่ายไปตามอุณหภูมิ นอกจากนี้ยางดิบยังมีความทนทานต่อสารเคมีและตัวทำละลายอินทรีย์ต่ำ ด้วยเหตุนี้จึงมีความจำเป็นที่จะต้องปรับปรุงคุณภาพของยางให้เหมาะสมกับการใช้งาน โดยการปรับปรุงคุณภาพของ

ยางจะใช้สารทำให้ยางคงรูป (Vulcanizing agents) เป็นองค์ประกอบสำคัญที่ต้องผสมลงไปนยางเพื่อให้ยางเกิดปฏิกิริยาเคมีที่เรียกว่า ปฏิกริยวัลคาไนเซชัน (Vulcanization) หรือปฏิกิริยาการคงรูป เพื่อส่งผลทำให้โมเลกุลของยางเกิดการเชื่อมโยงกันเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ ทำใหยางเปลี่ยนสภาพจากอ่อนเหนียวไปเป็นยางคงรูปที่มีความยืดหยุ่นสูงและมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น โดยระบบการคงรูปยางที่ใช้แบ่งออกได้ เป็น 3 ระบบใหญ่ ๆ ได้แก่ ระบบที่ใช้กำมะถัน (Sulfur) ระบบที่ใช้เปอร์ออกไซด์ (Peroxide) และระบบที่ใช้สารเคมีอื่นๆ เช่น โลหะออกไซด์ (Metal oxide) ในงานวิจัยนี้สนใจที่จะใช้ระบบกำมะถันเป็นสารทำให้ยางคงรูป เนื่องจากว่าระบบกำมะถันเป็นระบบที่มีต้นทุนต่ำ การเกิดปฏิกิริยาการคงรูปเกิดได้เร็ว (เมื่อใช้กำมะถันร่วมกับสารตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณที่เหมาะสม) ยางคงรูปที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าระบบเปอร์ออกไซด์ และนิยมใช้กับยางทุกประเภทที่มีพันธะคู่อยู่ภายในโมเลกุลโดยเฉพาะยางธรรมชาติ เนื่องจากพันธะคู่เป็นตำแหน่งที่กำมะถันจะเข้าไปทำปฏิกิริยา [2] และทำให้เกิดการเชื่อมโยงทางเคมี ดังแสดงในสมการที่ 1.1

ในระบบการคงรูปด้วยกำมะถัน การเชื่อมโยงอาจเกิดขึ้นได้หลายรูปแบบคือ การเชื่อมโยงแบบเกิดผ่านพันธะมอนอซัลฟิดิก (Monosulfidic) ไดซัลฟิดิก (Disulfidic) หรือพอลิซัลฟิดิก (Polysulfidic) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของสารตัวเร่งปฏิกิริยาต่อกำมะถันที่ใช้ โดยระบบวัลคาไนเซชันยางโดยกำมะถันนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ขึ้นกับลักษณะการใช้กำมะถันในการเกิดพันธะเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยาง [3, 4] คือ

1. ระบบวัลคาไนซ์แบบปกติ (Conventional Vulcanized System, C.V.)

- นิยมใช้กำมะถันประมาณ 1.5-2.5 phr และใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาประมาณ 0.5-1.0 phr

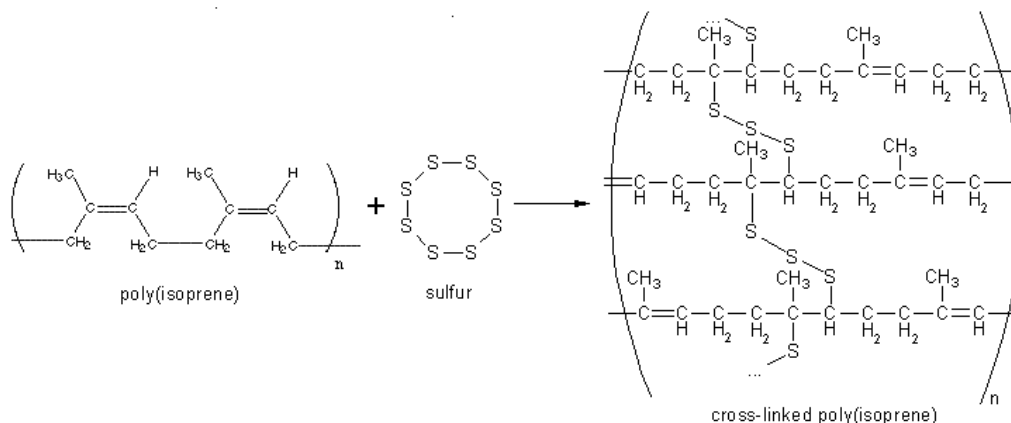
2. ระบบวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ (Semi-Efficiently Vulcanized System, Semi-E.V.)

- นิยมใช้กำมะถันประมาณ 0.5-1.2 phr และใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาประมาณ 1.5-2.5 phr

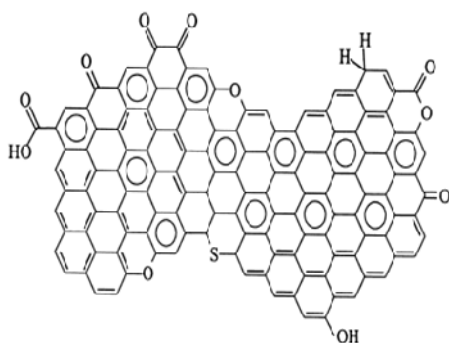
3. ระบบวัลคาไนซ์แบบมีประสิทธิภาพ (Efficiently Vulcanized System, E.V.)

- นิยมใช้กำมะถันประมาณ 0.0-0.2 phr และใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาประมาณ 2.5-3.5 phr

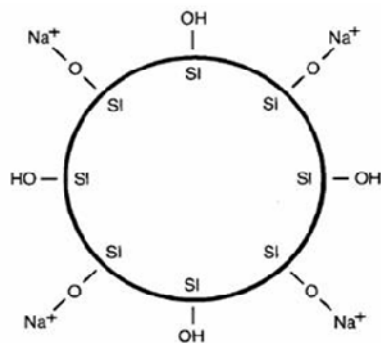
นอกจากสารทำให้ยางคงรูปแล้ว สารตัวเติมยังเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ช่วยให้สมบัติต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์ยางนั้นเป็นไปตามความต้องการ จากที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นว่าในงานวิจัยนี้สนใจนำแคลเซียมคาร์บอเนตมาใช้เป็นสารตัวเติม เนื่องจากว่ามีข้อได้เปรียบสารตัวเติมประเภทอื่นเช่น ผงเขม่าดำและซิลิกา คือผงเขม่าดำจะมีผลทำให้กระบวนการในการผลิตยางนั้นมีความยุ่งยาก เนื่องจากจะไปเพิ่มความหนืดของยางคอมปาวด์ อีกทั้งหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของผงเขม่าดำเช่น หมู่คาร์บอกซิลิกและฟีนอลิก (ดังแสดงในรูปที่ 1.1) มีสมบัติเป็นกรดทำให้ปฏิกิริยาการคงรูปได้ช้าลง ซึ่งตรงกันข้ามกับแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีสมบัติเป็นด่างจะ ช่วยกระตุ้นปฏิกิริยาการคงรูปได้ ในขณะเดียวกันบนพื้นผิวของสารตัวเติมประเภทซิลิกามีหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl: -OH) หรือหมู่ซิลานอล (Silanol: Si-OH) อยู่ในปริมาณมาก ส่งผลให้พื้นผิวของซิลิกามีความเป็นขี้



สมการที่ 1.1 ปฏิกริยวัลคาไนเซชันของยางธรรมชาติโดยใช้กำมะถันเป็นสารคงรูป [5]



(ก)



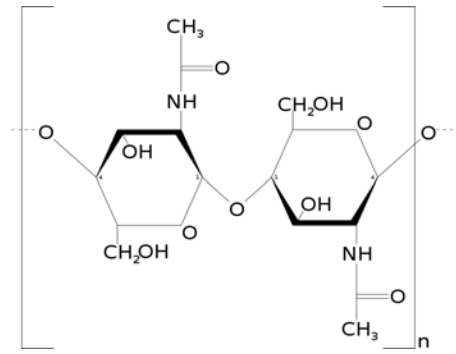
(ข)

รูปที่ 1.1 โครงสร้างแสดงหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของผงเขม่าดำ (ก) [4] และซิลิกา (ข) [6]

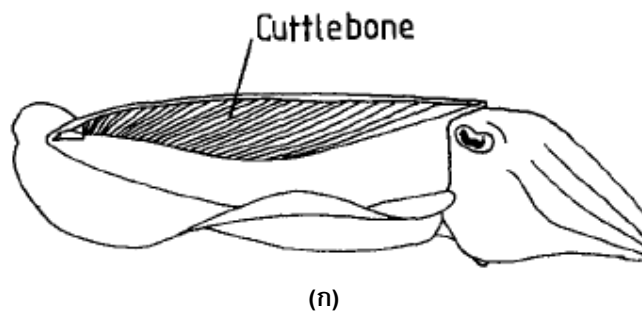
และมีความไวต่อปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ สูง รวมทั้งการดูดซับน้ำหรือความชื้นมาอยู่บนพื้นผิวได้ดี โดยความชื้นที่มากเกินบนพื้นผิวนี้อาจส่งผลโดยตรงต่อสมบัติของยางในระหว่างกระบวนการผลิตและกระบวนการขึ้นรูป คือถ้าปริมาณความชื้นในซิลิกาสูงการกระจายตัวของซิลิกาในตัวยางที่เกิดขึ้นได้ยาก รวมทั้งซิลิกาที่อึดตัวด้วยน้ำจะหน่วงปฏิกิริยาการคงรูป ทำให้ต้องใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณที่สูงขึ้น ข้อดีของการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถหาได้จากแหล่งธรรมชาติซึ่งไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมโดยนำมาจากกระดูกปลาหมึก (Cuttlebone) ของปลาหมึกกระดอง (Cuttlefish, *Sepia Officinalis*)

ไคติน (Chitin) เป็นสารประกอบเชิงซ้อน ของ β -1, 4-N-acetyl-D-glucosamine จัดเป็นพอลิเมอร์อินทรีย์โมเลกุลยาวที่มีโครงสร้างคล้ายเซลลูโลส (cellulose) และมีปริมาณมากเป็นอันดับสองของโลกรองจากเซลลูโลสพบได้ในสัตว์ที่ไม่มีกระดูกสันหลัง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสัตว์ที่มีเปลือกและกระดอง เช่น หอย แมลง กุ้ง และปู (Crustacean) สูตรโครงสร้างของไคตินแสดงดังรูปที่ 1.2 ไคตินเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพซึ่งผลิตจากสิ่งเหลือจากอุตสาหกรรมสัตว์น้ำแช่แข็งสามารถสลายตัวได้ทางชีวภาพ (Biodegradable) จึงถือได้ว่าเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ในแง่ของวัสดุแล้วไคตินถือว่าเป็นสมบัติโดดเด่น เนื่องจากเปลือกของสัตว์ทะเลซึ่งเป็นแหล่งไคตินนั้นเป็นวัสดุเชิงประกอบที่นอกจากจะเหนียวฉีกขาดยากยังสามารถรับแรงได้สูงและไม่เปลี่ยนรูปร่างได้ง่าย ๆ ถ้าหากพิจารณาในเชิงโครงสร้างไคตินจะจัดเรียงตัวเป็นโครงสร้างผลึกเหลวแบบคอลเลสเทอริก (Cholesteric liquid crystal structure) ประกอบด้วยแท่งโมเลกุลที่เป็นชั้น ๆ ซ้อนกันโดยมีโปรตีนและปูนขาวแทรกทำให้วัสดุนี้ทนแรงได้ทุกทิศทาง (Isotropic strength) [7] ไคตินที่เกิดในธรรมชาติมีโครงสร้างของผลึกที่แข็งแรงมีการจัดตัวของรูปแบบของผลึกเป็น 3 ลักษณะได้แก่ แอลฟาไคติน (α -Chitin) บีตาไคติน (β -Chitin) และแกมมาไคติน (γ -Chitin)

ประเทศไทยถือเป็นประเทศเกษตรกรรมที่มีความอุดมสมบูรณ์ทั้งในแง่ธัญญาหารและการประมงน้ำจืด-น้ำเค็มตามชายฝั่งทะเลไม่ว่าจะเป็นทะเลฝั่งอ่าวไทยหรือฝั่งอันดามัน ชาวประมงจะทำการออกหา กุ้ง หอย ปู ปลา และปลาหมึก เป็นต้น เพื่อนำมาขายสร้างรายได้ให้แก่ครอบครัว เมื่อสัตว์ทะเลเหล่านี้ถูกจับขึ้นมาสามารถนำไปขายหรือประกอบการทำอาหารได้ทันที ยกเว้นในกรณีของปลาหมึกกระดองชาวประมงจะทำการเอาส่วนเนื้อปลาหมึกออกก่อนส่วนกระดองปลาหมึกจะถูกโยนทิ้งกลายเป็นขยะ กระดองปลาหมึกหรือลิ้นทะเลคือ แผ่นหินปูนแคลเซียมคาร์บอเนตที่อยู่ภายในบริเวณแกนกลางลำตัวของปลาหมึกกระดองซึ่งเป็นสัตว์ที่ไม่มีกระดูกสันหลังในไฟลัมมอลลัสกา (Phylum Mollusca) แสดงดังรูปที่ 1.3 กระดองปลาหมึกมีโครงสร้างลักษณะเป็นโพรง ภายในเรียงตัวเป็นแผ่นขนานกัน (Lamellae) ประกอบด้วยส่วนของของเหลวและก๊าซ ซึ่งช่วยให้ปลาหมึกนั้นสามารถที่จะลอยตัวอยู่ที่ระดับความลึกต่างๆ ได้น้ำทะเล โดยการปรับความหนาแน่นในส่วนของของเหลวที่มีภายในรูพรุนของกระดอง กระดองปลาหมึก



รูปที่ 1.2 สูตรโครงสร้างทางเคมีของไคติน [7]



รูปที่ 1.3 โครงสร้างแสดงตำแหน่งของกระดองปลาหมึก (ก) กระดองปลาหมึก (ข) และ อนุภาคกระดองปลาหมึก (ค)

มีน้ำหนักเบาและสามารถที่จะทนและรับแรงดันได้มากจากข้อมูลผลงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าองค์ประกอบหลักที่มีอยู่ในกระดองปลาหมึกและกระดองของสัตว์ทะเล คือแคลเซียมคาร์บอเนตและสารประกอบอินทรีย์ เช่น โปรตีน (Protein) และไคติน (Chitin) [8, 9, 10, 11] โดยแคลเซียมคาร์บอเนตสามารถนำมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติได้ ส่วนไคตินเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่คาดว่าจะสามารถเกิดอันตรกิริยาได้ดีกับยางธรรมชาติซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์เช่นเดียวกัน ผู้วิจัยจึงคาดการณ์ว่าการนำกระดองปลาหมึกมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติจะส่งผลให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น เนื่องจากความเข้ากันได้ดีระหว่างอนุภาคของกระดองปลาหมึกกับเนื้อยางธรรมชาติ ก่อนที่จะทำการนำกระดองปลาหมึกมาใช้ในการทดลองนั้นจะต้องนำกระดองปลาหมึกไปล้างน้ำให้สะอาดและตากแดดให้แห้งเพื่อกำจัด

ทราบสกรปรกและกลั่น หลังจากนั้นนำกระดองปลาหมึกที่ได้มาบดให้มือนุภาคขนาดเล็กเพียงพอที่จะทำให้ง่ายต่อการผสมเข้ากับยางธรรมชาติได้

1.3.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Ismail และคณะ [12] ศึกษาการนำผงข้าวเปลือกขาว (White rice husk) ซึ่งมีองค์ประกอบหลักคือซิลิกามาใช้เป็นสารเสริมแรงในยางธรรมชาติร่วมกับการใส่สารเติมแต่งที่มีหมู่ฟังก์ชันหลายหมู่ (Multifunctional additive: MFA) ลงไปในระบบซัลเฟอร์วัลคาไนเซชันแบบกึ่งประสิทธิภาพ (Semi-efficient sulfur vulcanization: semi-EV) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกระจายตัวของผงข้าวเปลือกขาว โดย MFA ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ n-fallow-1-3-propane diamine salt of a carboxylic acid $[RNH^+_2 (CH_2)_3NH^+_3] [R'COO^-]_2$ จากผลการทดลองพบว่า ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Tensile strength) และค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear strength) มีค่าเพิ่มขึ้นเทียบกับยางธรรมชาติที่ไม่ได้ใส่ผงข้าวเปลือกขาว เนื่องจากการใส่สารเสริมแรงส่งผลให้ยางธรรมชาติสูญเสียความยืดหยุ่น (Elasticity) แต่อย่างไรก็ตามจะมีผลทำให้ความแข็งแรงของวัสดุมีมากขึ้น ดังนั้นเมื่อปริมาณของผงข้าวเปลือกขาวมากขึ้น ค่ามอดุลัส (Modulus) และค่าความแข็ง (Hardness) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และปริมาณที่เหมาะสมของสารเสริมแรงผงข้าวเปลือกขาวที่ทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดและค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดมีค่าสูงสุดนั้นคือ 10 ส่วนในร้อยส่วนของยาง (part by weight per hundred part of rubber : phr) เนื่องจากในปริมาณผงข้าวเปลือกขาวที่สูงกว่านี้ การกระจายตัวของผงข้าวเปลือกขาวในยางธรรมชาติจะแย่ง นอกจากนั้นศึกษาอิทธิพลของการเติมสารเติมแต่ง MFA ในปริมาณต่างๆ คือ 0 1 3 5 และ 7 phr ตามลำดับลงไปในระบบยางที่มีสารเสริมแรงผงข้าวเปลือกขาวอยู่ 10 phr พบว่าการใส่ MFA ลงไปในระบบนั้นส่งผลให้ค่าสมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติมีการปรับปรุงดีขึ้นเมื่อเทียบกับก่อนใส่ MFA โดยปริมาณของ MFA ที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้สมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติดีขึ้นนั้นคือ 3 phr เนื่องจากว่า MFA เป็นสารที่ช่วยให้การกระจายตัวของผงข้าวเปลือกขาวนั้นเป็นไปอย่างสม่ำเสมอและยังช่วยเพิ่มปริมาณความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวาง แต่อย่างไรก็ตามการเติม MFA ในปริมาณที่มากกว่า 3 phr นั้น ส่งผลให้อันตรกิริยาระหว่างผงข้าวเปลือกขาวกับยางธรรมชาติลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ MFA นั้นเกิดการรวมตัวจับกันเอง ทำให้สมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ยางที่ได้มีค่าต่ำลง

Ismail และคณะ [13] ศึกษาสมบัติเชิงกลของการนำผงไม้จากต้นปาล์ม (Oil palm wood flour) เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติในระบบซัลเฟอร์วัลคาไนเซชัน พบว่าเมื่อใส่ผงไม้จากต้นปาล์มลงไปในยางธรรมชาติในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่ามอดุลัสและค่าความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด และระยะที่ดึงยืดวัสดุได้สูงที่สุดก่อนขาด (Elongation at break) มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากว่าการใช้ผงไม้จากต้นปาล์มเป็นสารตัวเติมจะเป็นการเสริมแรงด้วยเส้นใยสั้น (Short fibre) มีผลทำให้ยางคอมพอสิตที่ได้นั้นสูญเสียความยืดหยุ่นไปแต่จะมีความแข็งเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้การทำการทดสอบที่อัตราส่วนการดึงยืด (Extension ratio) สูงๆ รวมทั้งมีการใส่สารตัวเติมในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลให้วัสดุยางคอมพอสิตที่เตรียมได้มีค่าความล้าที่ลดลง (Fatigue life) เนื่องจากเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของสารตัวเติมเมื่อมีปริมาณสูงขึ้น ส่งผลให้เกิดความไม่เนื้อเดียวกันระหว่างสารตัวเติมกับวัสดุยางคอมพอสิต

Ismail และคณะ [14] ศึกษาผลกระทบของการเติมเส้นใยไผ่ (Bamboo fibre) เป็นสารตัวเติมและผลของการเติมสารเชื่อมประสาน (Bonding agent) สองชนิดได้แก่ ฟีนอลฟอมอลดีไฮด์ (Phenol formaldehyde) และเฮกซะเมทิลีนเตตระมีน (Hexamethylenetetramine) ต่อสมบัติการคงรูป (Cure characteristics) และสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติในระบบซัลเฟอร์วัลคาไนเซชัน พบว่าการเพิ่มปริมาณของเส้นใยไผ่ซึ่งมีองค์ประกอบหลักคือเส้นใยเซลลูโลส (Cellulose fibre) จะส่งผลให้ค่าระยะเวลาดังกล่าวที่เริ่มจะเกิดการคงรูป (Scorch time) และเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันที่อุณหภูมิที่กำหนด (Cure time) ลดลง การเพิ่มปริมาณของเส้นใยไผ่ส่งผลให้ค่ามอดุลัสและค่าความแข็งเพิ่มขึ้น แต่ระยะที่ดึงยืดวัสดุได้สูงที่สุดก่อนขาดนั้นลดลง นอกจากนี้ผลของการใส่สารเชื่อมประสานลงไปในระบบร่วมกับเส้นใยไผ่นั้นพบว่า การมีอยู่ของสารเชื่อมประสานจะมีผลช่วยทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างยางธรรมชาติและเส้นใยไผ่เข้ากันได้ดี ส่งผลให้ระยะเวลาที่เริ่มจะเกิดการคงรูป และเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา

วัลคาไนเซชันที่อุณหภูมิที่กำหนดและระยะที่ดึงยืดวัสดุได้สูงที่สุดก่อนขาดมีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับช่วงก่อนเดิม สารเชื่อมประสาน รวมทั้งมีผลทำให้ค่ามอดุลัสและค่าความแข็งแรงของยางธรรมชาติมีค่าสูงขึ้นกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ ก่อนเดิมสารเชื่อมประสาน

Gopalan Nair และคณะ [15] ศึกษาการนำสารไคตินวิสเกอร์ (Chitin whisker) จากกระดองปูเป็นสารตัวเติม ในยางธรรมชาติทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชัน โดยกระบวนการที่ใช้กับยางที่ไม่ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชัน ประกอบไปด้วย 2 วิธีคือ การหล่อ (Casting) การระเหย (Evaporation) และการทำแห้ง (Freeze-drying) ตามด้วยการอัดขึ้นรูปด้วยความดันภายใต้อุณหภูมิสูง (Hot pressing) ในขณะที่กระบวนการสำหรับยางที่ผ่าน กระบวนการวัลคาไนเซชันนั้นจะใช้เพียงวิธีการหล่อและการระเหยเท่านั้น การวิเคราะห์สมบัติเชิงพลวัต (Dynamic mechanical analysis) พบว่ามอดุลัสสะสมที่สถานะยาง (Rubbery modulus) ของยางที่ไม่ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันโดยวิธีการระเหยมีแนวโน้มที่ดีขึ้นถ้ามีการผสมด้วยไคตินวิสเกอร์ นอกจากนี้พบว่าการใช้สารไคตินวิสเกอร์มากกว่า 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักนอกจากจะช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้ดีขึ้นแล้ว ยังส่งผลให้สมบัติทางความร้อนของยางดีขึ้น โดยค่าความเสถียรทางความร้อนมีค่าประมาณ 220-230 องศาเซลเซียส สำหรับยางธรรมชาติที่ไม่ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันโดยวิธีการอัดขึ้นรูปด้วยความดันภายใต้อุณหภูมิสูงนั้น การมีสารไคตินวิสเกอร์ไม่ค่อยส่งผลต่อการเสริมแรงมากนักเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติที่ไม่ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันโดยวิธีการระเหย ทั้งนี้วิธีการระเหยเป็น กระบวนการที่เกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ส่งผลให้สารไคตินวิสเกอร์ในยางธรรมชาติมีเวลาเพียงพอที่จะทำการจัดเรียงตัวเกิด เป็นโครงสร้างร่างแหของไคติน (Chitin-chitin network) ทำให้เกิดความแข็งแรงขึ้นภายในเนื้อยาง ค่ามอดุลัสของยาง ธรรมชาติที่ไม่ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันโดยวิธีการระเหยมีค่าสูงกว่ายางธรรมชาติที่ผ่านการวัลคาไนเซชันโดย วิธีการระเหย (Vulcanized evaporated natural rubber) และยางธรรมชาติที่ไม่ผ่านการ วัลคาไนเซชันโดยวิธีการอัดขึ้น รูปด้วยความดันภายใต้อุณหภูมิสูง ตามลำดับ กระบวนการวัลคาไนเซชันก่อให้เกิดพันธะเชื่อมขวางทางเคมี (Chemical cross-linking) ขึ้น ส่งผลให้เกิดการขัดขวางการรวมตัวกันของสารไคตินให้เป็นร่างแหของไคติน (Chitin network) ทำให้ค่ามอดุลัสลดต่ำลง

Geethamma และคณะ [16] ศึกษาพฤติกรรมทางพลวัตได้แก่ค่าเทนเจนต์สูญเสีย (Loss tangent: $\tan \delta$) มอดุลัสสูญเสีย (Loss modulus: E'') และค่ามอดุลัสสะสม (Storage modulus: E') ของการใช้กาบมะพร้าว (Cair) ซึ่งเป็นสารตัวเติมที่มีส่วนประกอบของเซลลูโลสและลิกนิน (Lignocellulosic fibre) เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ ที่ ความถี่ 1.0 และ 10.0 เฮิรตซ์ (Hertz) ตามลำดับ พบว่าในกรณียางธรรมชาติที่ไม่ได้ผสมกาบมะพร้าว จุดสูงสุดของ กราฟเทนเจนต์สูญเสียและมอดุลัสสูญเสียมีความสอดคล้องกับจุดกึ่งกลางของกราฟมอดุลัสสะสม ส่วนในกรณีที่ยาง ธรรมชาติผสมรวมกับกาบมะพร้าวนั้น กราฟมอดุลัสสะสม มีแนวโน้มไม่สอดคล้องกับกราฟของค่าเทนเจนต์สูญเสีย และมอดุลัสสูญเสีย ทั้งนี้อาจมีผลเนื่องจากเส้นใยกาบมะพร้าวไปขัดขวางความสามารถในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลยาง ธรรมชาติ เมื่อพิจารณาที่กราฟเทนเจนต์สูญเสียเทียบกับอุณหภูมิพบว่าไม่มีปรากฏที่เด่นชัด 2 พีกคือ พีกที่ปรากฏที่ อุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิสูง ซึ่งทั้ง 2 พีกแสดงพฤติกรรมเชิงพลวัตของเมทริกซ์ที่เป็นยางธรรมชาติและเส้นใย กาบมะพร้าวตามลำดับ โดยพื้นที่บริเวณตรงกลางระหว่าง 2 พีกแสดงพันธะที่ผิวรอยต่อระหว่างยางธรรมชาติและเส้นใย กาบมะพร้าว การเพิ่มประสิทธิภาพของสารตัวเติมเส้นใยกาบมะพร้าวสามารถทำได้โดยการปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใย กาบมะพร้าวให้มีแรงยึดเหนี่ยวที่ผิวรอยต่อกับเมทริกซ์ยางธรรมชาติ โดยใช้สารเชื่อมประสานคือเรซอร์ซินอล (Resorcinol) และเฮกซะเมทิลซีนเตตระมีน นอกจากนี้พบว่าค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงสถานะเป็นของแข็งคล้ายแก้ว (Dynamic glass transition temperature: T_g) มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยกาบมะพร้าวเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ค่า T_g ของยางธรรมชาติสูงขึ้นเมื่อเส้นใยกาบมะพร้าวถูกปรับปรุงพื้นผิว

Poompradub และคณะ [1] ศึกษาสมบัติเบื้องต้นของกระดองปลาหมึกและผลของการนำกระดอง ปลาหมึก (Cuttlebone) มาใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติต่อสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติในระบบเปอร์ ออกไซด์วัลคาไนเซชัน พบว่าองค์ประกอบสำคัญที่มีอยู่ในอนุภาคกระดองปลาหมึกคือ แคลเซียมคาร์บอเนต 92% และไคติน 8% ค่าความหนาแน่น (Density) ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (Average size) และพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) ของอนุภาคกระดองปลาหมึกที่นำมาศึกษาในการทดลองนี้มีค่า 2.70 g/cm³ 19.5 μ m และ 5.6 m²/g

ตามลำดับ อนุภาคของกระดองปลาหมึกไม่ขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางในระบบเปอร์ออกไซด์ นอกจากนี้สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติเสริมแรงด้วยอนุภาคกระดองปลาหมึกมีแนวโน้มใกล้เคียงกับยางธรรมชาติเสริมแรงโดยแคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้า การที่มีอนุภาคของไคตินในกระดองปลาหมึกคาดว่าจะส่งผลให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคกระดองปลาหมึกกับยางธรรมชาติได้ดี

บทที่ 2

สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

2.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

2.1.1 ยางธรรมชาติ STR-5L	: บริษัท พี ไอ อินดัสทรี จำกัด
2.1.2 แอ็กทีฟซิงก์ออกไซด์ (Active zinc oxide, ZnO)	: บริษัท พี ไอ อินดัสทรี จำกัด
2.1.3 กรดสเตียริก (Stearic acid)	: บริษัท พี ไอ อินดัสทรี จำกัด
2.1.4 โซโคโลเฮกซิลเบนโซไทโอะโซลซัลฟิनाไมด์ (N-cyclohexyl-2-benzothiazole sulfonamide, CBS)	: บริษัท พี ไอ อินดัสทรี จำกัด
2.1.5 กำมะถัน (Sulfur)	: บริษัท พี ไอ อินดัสทรี จำกัด
2.1.6 แคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้า (Commercial CaCO ₃ , Silver-W, Price ~50 baht/kg)	: บริษัท Shiraishi (Thailand) Co.,Ltd
2.1.7 กระดองปลาหมึก (Cuttlebone)	: บริษัท สยาม โอเชียน ฟู้ด จำกัด

2.2 การดำเนินงานวิจัย

2.2.1 การเตรียมอนุภาคกระดองปลาหมึก

นำวัตถุดิบกระดองปลาหมึกล้างด้วยน้ำสะอาด และตากแดดให้แห้งเพื่อกำจัดกลิ่นและสิ่งสกปรก จากนั้นนำกระดองปลาหมึกมาทำการบด คัดขนาด (ตะแกรงร่อนขนาด 37 ไมโครเมตร) และทำการอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงก่อนนำมาใช้งาน

2.2.2 การศึกษาเอกลักษณ์เบื้องต้นของอนุภาคกระดองปลาหมึก

นำอนุภาคกระดองปลาหมึกที่เตรียมได้มาทำการศึกษาสมบัติเบื้องต้นเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้า (Silver-W) โดยการทดสอบเอกลักษณ์ด้วยเทคนิคต่าง ๆ คือ

- โครงสร้างของผลึกโดยใช้เครื่อง X-Ray diffractometer (Bruker Axs Model D8 Discover)
- วิเคราะห์เชิงความร้อนโดยเทคนิค Thermal gravimetric analysis (TG/DTA Pyris Diamond, Perkin Elmer)
- พื้นที่ผิวโดย Brunauer-Emmett-Teller (BET) specific surface area (ASAP 2020 surface area and porosity analyzer, Micromeritics Instrument)

2.2.3 การเตรียมยางคอมปาวด์

สูตรในการเตรียมยางคอมปาวด์แสดงในตารางที่ 2.1 ยางธรรมชาติและสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการวัลคาไนเซชันถูกบดผสมโดยใช้เครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) ที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นทำการขึ้นรูปยางคอมปาวด์เป็นแผ่น (Sheet) หนาประมาณ 2 มิลลิเมตร ด้วยเครื่อง Two-plate hydraulic press ที่อุณหภูมิ 155 องศาเซลเซียสที่ความดัน 150 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ระยะเวลาในการขึ้นรูปได้จากการทดสอบโดยเครื่อง Moving Die Rheometer (MDR) ตามมาตรฐาน ASTM D5289 ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สูตรในการเตรียมยางคอมปาวด์ (ในหน่วยของ phr¹)

Sample code	NR ²	Active ZnO ³	Stearic acid	CBS ⁴	Sulfur	CTB ⁵	CaCO ₃ ⁶	Curing time ⁷ (Min)
NR	100	5	2	1	3	-	-	10
CA-10	100	5	2	1	3	-	10	10
CA-20	100	5	2	1	3	-	20	10
CA-40	100	5	2	1	3	-	40	10
CA-80	100	5	2	1	3	-	80	10
CA-100	100	5	2	1	3	-	100	10
CTB-10	100	5	2	1	3	10	-	10
CTB-20	100	5	2	1	3	20	-	10
CTB-40	100	5	2	1	3	40	-	10
CTB-80	100	5	2	1	3	80	-	10
CTB-100	100	5	2	1	3	100	-	10

¹ Part by weight per hundred part of rubber ² Natural rubber ³ Active zinc oxide ⁴ N-cyclohexyl-2-benzothiazole sulfenamide

⁵ Cuttlebone ⁶ Commercial calcium carbonate (Silver-W) ⁷ Curing temperature 155 °C

2.2.4 การทดสอบสมบัติเชิงกลของคอมพอสิตยางธรรมชาติ

2.2.4.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile strength) และระยะยืด ณ จุดขาด (Elongation at break)

ภายหลังจากการขึ้นรูปชิ้นงานแล้ว นำชิ้นงานมาทดสอบด้านการต้านทานแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาด โดยตัดให้เป็นรูปดัมเบลล์ตามมาตรฐาน ASTM D412 นำมาทดสอบแรงดึงด้วยเครื่อง Universal Testing Machine รุ่น LLOYD LR 10k วัดความหนาชิ้นงานด้วยไมโครมิเตอร์ที่อ่านละเอียด 0.01 มิลลิเมตร ทำการวัด 3 ตำแหน่ง คือ ตรงกลาง ตรงปลายสองข้างของระยะยัด (Gauge length) ใช้ค่าเฉลี่ยเลขคณิตสำหรับคำนวณค่า โดยในการทดสอบจะทำการทดสอบตัวอย่างละอย่างน้อย 5 ครั้ง และนำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย

2.2.4.2 การทดสอบความแข็ง (Hardness)

ทดสอบสมบัติเชิงกลด้านความแข็งของคอมพอสิตยางธรรมชาติโดยเตรียมตัวอย่างชิ้นงานจากยางคงรูป ที่ขึ้นรูปเป็นแผ่นด้วยเครื่องอัด (Compression moldings) ตัดชิ้นงานให้มีความหนา 6 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ASTM D2240 จากนั้นนำชิ้นตัวอย่างมาทดสอบด้วยเครื่อง Durometer Shore A REX 2000 โดยทำการทดสอบตัวอย่างละ 5 จุดและนำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย

2.2.4.3 การทดสอบความทนทานและการเสื่อมสภาพทางความร้อน

ทดสอบความทนทานต่อความร้อนของคอมพอสิตยางธรรมชาติ โดยนำชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปมาอบในตู้อบ (Hot air oven (FD-400, WTDBINDER)) ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 22 ± 2 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นงานมาทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง จากนั้นตัดเป็นรูปดัมเบลล์และทดสอบสมบัติเชิงกลด้านต่าง ๆ คือ การต้านทานแรงดึง ระยะยืด ณ จุดขาด และ ความแข็งตามมาตรฐาน ASTM D412 และ ASTM D2240 ตามลำดับ โดยสมบัติความทนทานต่อความร้อนแสดงผลในด้านความสามารถในการรักษาเสถียรภาพของสมบัติเชิงกลหรือค่า Retention คำนวณดังสมการ 2.1

$$\% \text{ Retention} = \frac{\text{Properties after aging}}{\text{Properties before aging}} \times 100 \quad (2.1)$$

2.2.4.4 การทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear strength)

ทดสอบสมบัติด้านการต้านทานการฉีกขาดของคอมพอสิตยางธรรมชาติโดยการขึ้นรูปชิ้นงานเป็นแผ่นด้วยเครื่องอัดหนาประมาณ 2 มิลลิเมตร ตัดชิ้นงานตามมาตรฐาน ISO 34 (Angle test piece) นำมาทดสอบการฉีกขาดด้วยเครื่อง LLOYD ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวจับ (Grip) 500 มิลลิเมตรต่อนาที

2.2.5 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของคอมพอสิตยางธรรมชาติ

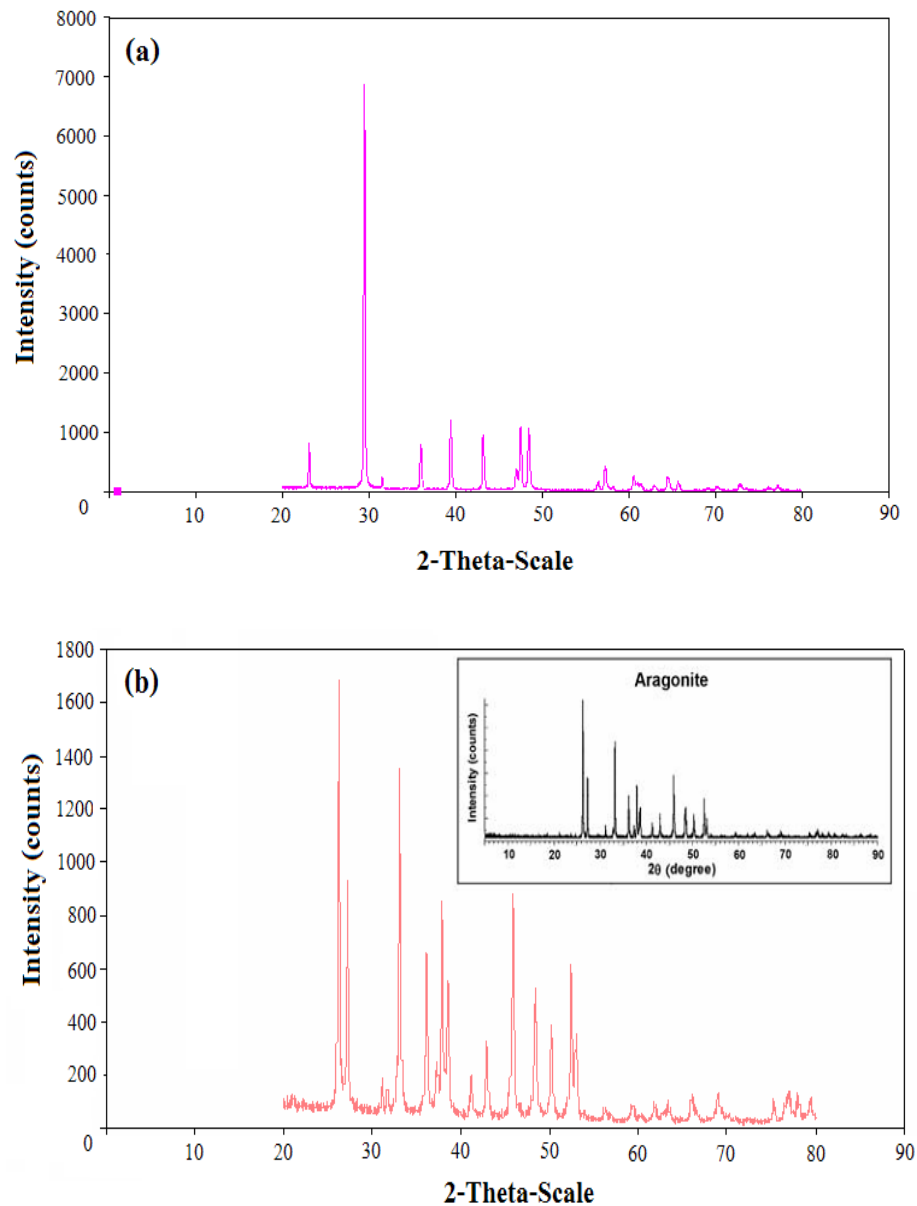
ชิ้นงานยางที่ผ่านการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงถูกนำมาจุ่มในไนโตรเจนเหลว จากนั้นนำชิ้นงานยางมาฉาบผิวด้วยทอง (Au) โดยเครื่อง Sputter coater เพื่อให้พื้นผิวของชิ้นงานมีคุณสมบัตินำไฟฟ้า และศึกษาลักษณะของการกระจายตัวของอนุภาคกระดองปลาหมึกและแคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้าในตัวอย่างธรรมชาติโดยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) รุ่น JSM-6480 LV ยี่ห้อ JEOL ที่กำลังขยาย 500 เท่า ภาวะการทำงานที่ความยาวคลื่น 10 ไมโครเมตร ความต่างศักย์ 15 กิโลโวลต์

บทที่ 3

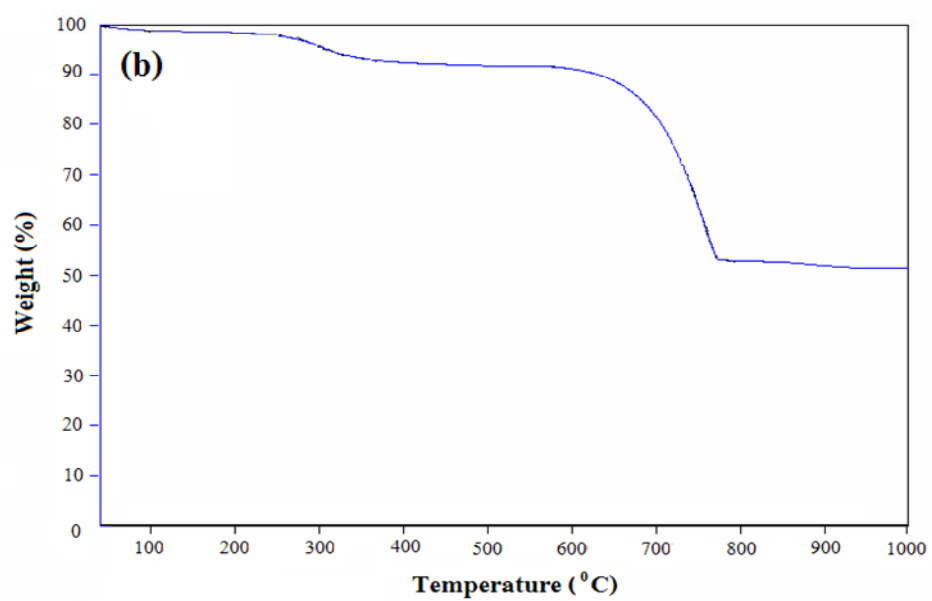
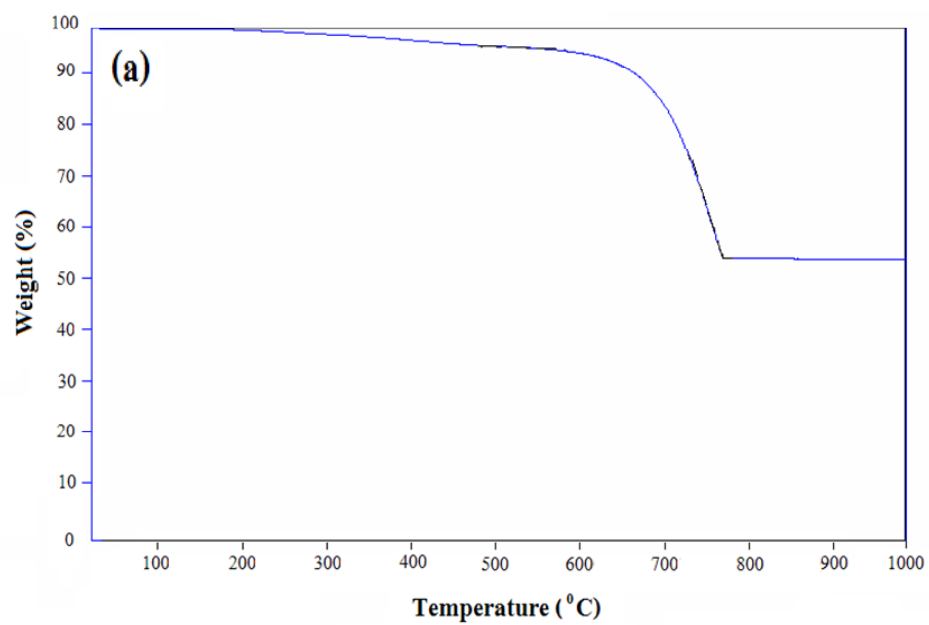
ผลการวิจัย

3.1 เอกลักษณะเบื้องต้นของอนุภาคกระดองปลาหมึก

จากการตรวจสอบสมบัติด้านต่าง ๆ ของอนุภาคกระดองปลาหมึกได้แก่ โครงร่างผลึก ช่วงอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน และพื้นที่ผิวเปรียบเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้ในทางการค้า ได้ผลดังนี้



รูปที่ 3.1 ผลการทดสอบด้วยเทคนิค XRD ของ (a) แคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้า และ (b) อนุภาคกระดองปลาหมึก



รูปที่ 3.2 ผลการทดสอบสมบัติเชิงความร้อนด้วยเครื่อง Thermo Gravimetric Analysis (TGA) ของ (a) แคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้า และ (b) อนุภาคกระดองปลาหมึก

ตารางที่ 3.1 อุณหภูมิการสลายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้าและอนุภาคกระดองปลาหมึก

Sample code	Weight loss (%) (1 st) ^a	Onset-Offset Temperature (°C) (1 st) ^b	Degradation temperature (°C) (1 st) ^c	Weight loss (%) (2 nd) ^a	Onset-Offset Temperature (°C) (2 nd) ^b	Degradation temperature (°C) (2 nd) ^c
CaCO ₃ (Silver-W)	39.9	710-787	748	-	-	-
Cuttlebone	4.3	266-331	298	40	690-770	731

(1st)^a, (2nd)^a: ร้อยละของการลดลงโดยน้ำหนักครั้งที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

(1st)^b, (2nd)^b: ช่วงอุณหภูมิเริ่มต้นถึงอุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัวครั้งที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

(1st)^c, (2nd)^c: อุณหภูมิการสลายตัวครั้งที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.2 ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ของแคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้าและอนุภาคกระดองปลาหมึก

Sample code	BET surface area (m ² /g)	Crystal form
CaCO ₃ (Silver-W)	11.36	Calcite (Hexagonal-rhombohedral)
Cuttlebone	18.02	Aragonite (Orthorhombic)

3.2 สมบัติการคงรูป (Cure characteristic)

การวิเคราะห์สมบัติการคงรูปของยางคอมปาวด์เสริมแรงด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้าและอนุภาคกระดองปลาหมึก ด้วยเครื่อง Moving Die Rheometer (MDR) ที่อุณหภูมิ 155 องศาเซลเซียส ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 สมบัติการคงรูปของยางคอมปาวด์

Sample code	Scorch time (Ts ₂) (Min)	Optimum cure time (T _{c90}) (Min)	Minimum torque (lb-in)	Maximum torque (lb-in)
NR	3.23	5.38	0.15	9.09
CA-10	3.15	5.08	0.14	9.49
CA-20	3.07	5.43	0.15	11.54
CA-40	2.49	4.48	0.20	12.61
CA-80	2.21	4.36	0.19	16.76
CA-100	2.17	4.25	0.25	19.74
CTB-10	2.57	4.39	0.17	8.97
CTB-20	2.52	5.03	0.18	10.40
CTB-40	2.32	5.01	0.20	12.67
CTB-80	2.24	5.19	0.31	16.53
CTB-100	1.59	4.34	0.27	19.28

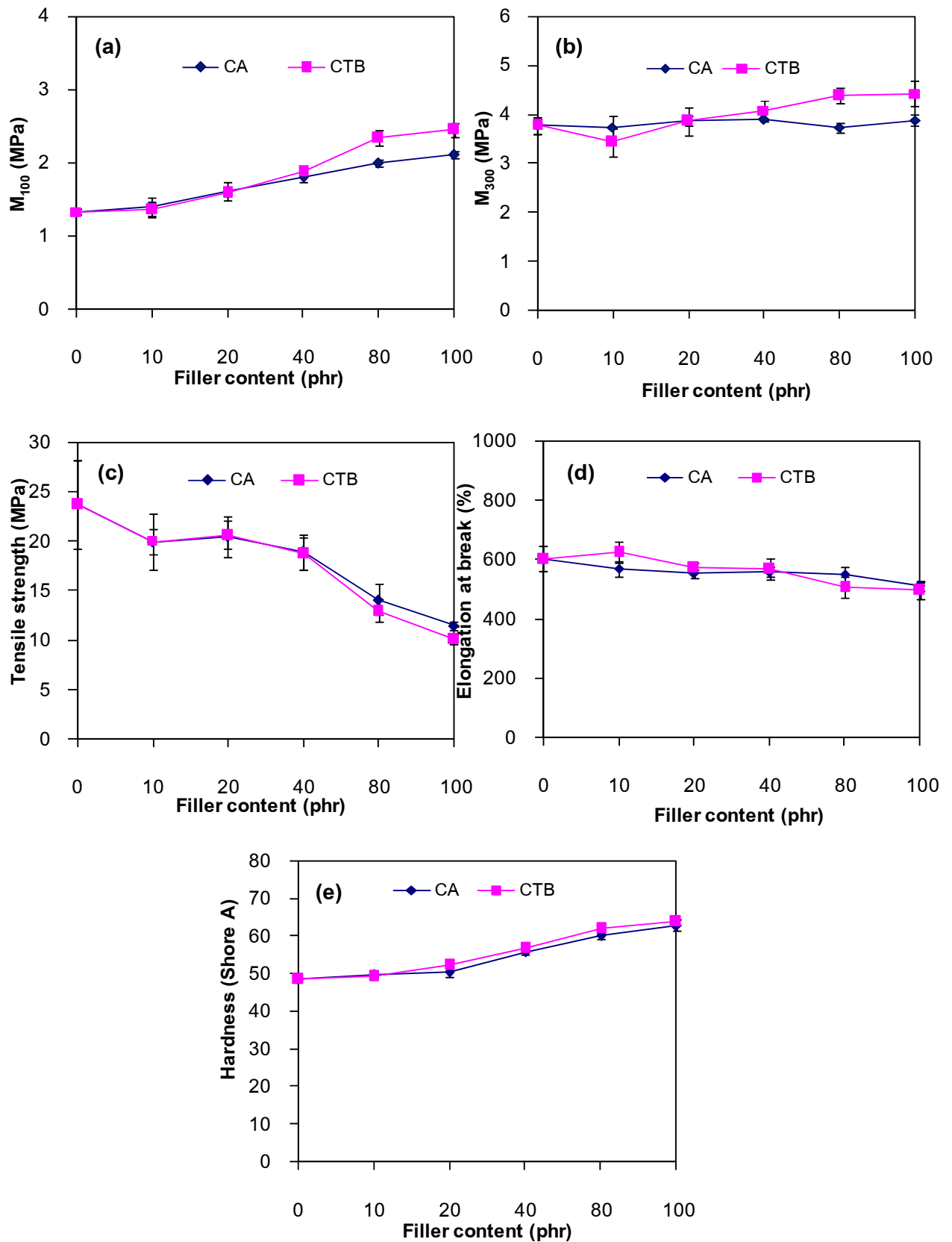
CA: Commercial calcium carbonate (Silver-W)

CTB: Cuttlebone

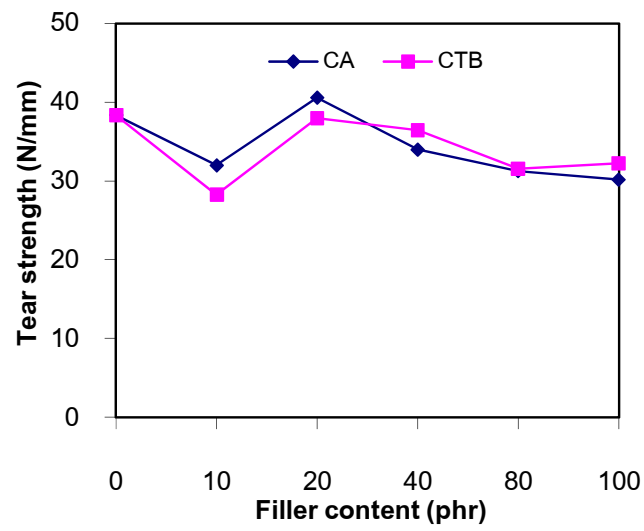
3.3 สมบัติเชิงกลของคอมพอสิตยางธรรมชาติ

เมื่อนำยางคอมปาวด์ไปทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดเป่า (Compression molding) ที่อุณหภูมิ 155 องศาเซลเซียส ความดัน 150 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นนำคอมพอสิตยางธรรมชาติที่ได้มาทดสอบสมบัติเชิงกลด้านต่าง ๆ ดังนี้

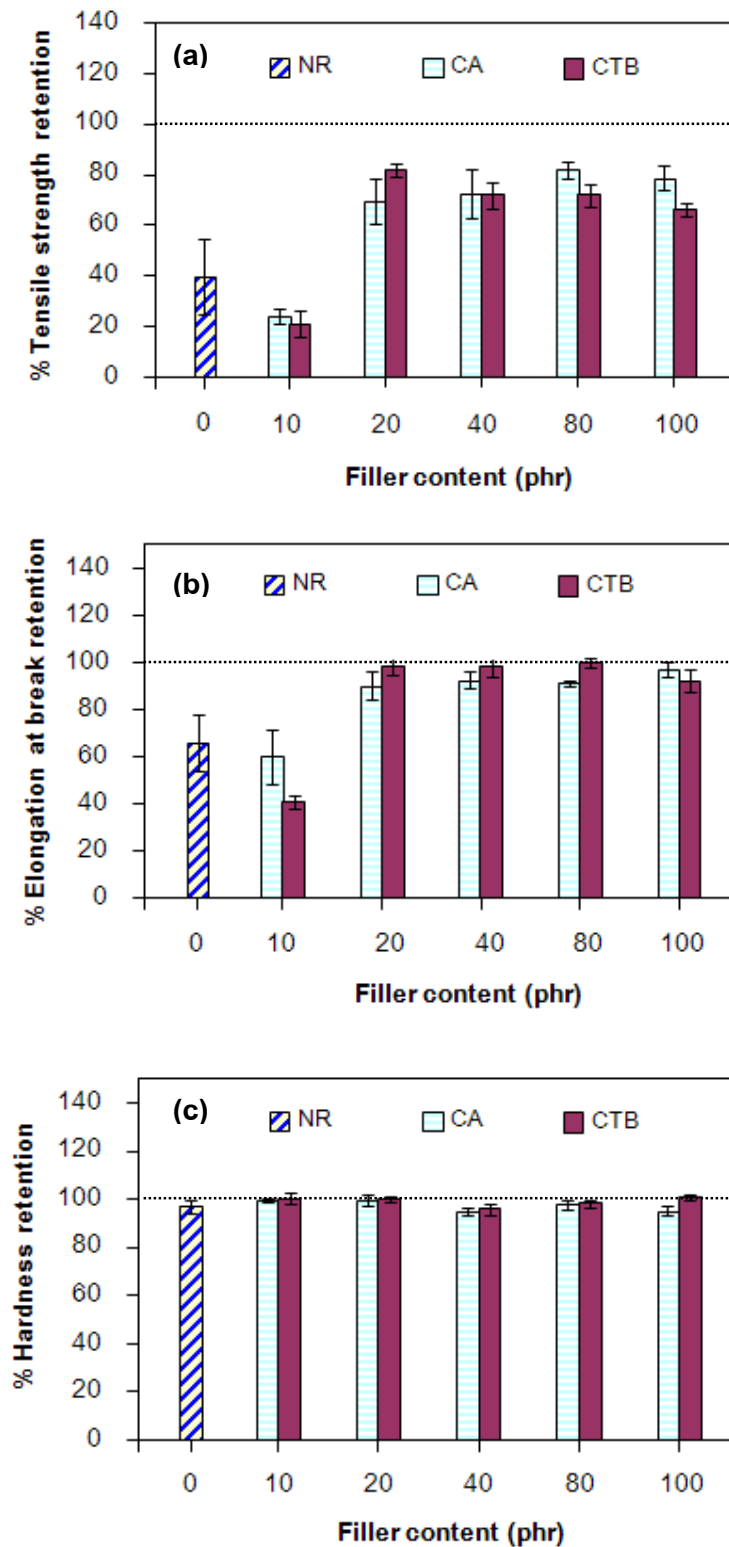
- ค่าโมดูลัสที่ 100 % (M₁₀₀) และ 300 % (M₃₀₀) ของระยะยืด
- ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Tensile strength) ระยะยืด ณ จุดขาด (Elongation at break)
- ความแข็ง (Hardness)
- ความต้านทานการฉีกขาด (Tear strength) ของคอมพอสิตยางธรรมชาติ
- ความทนทานและการเสื่อมสภาพทางความร้อนของคอมพอสิตยางธรรมชาติ



รูปที่ 3.3 สมบัติเชิงกล (a) ค่าโมดูลัส ที่ 100 % ของระยะยืด (M_{100}) (b) ค่าโมดูลัส ที่ 300 % ของระยะยืด (M_{300}) (c) ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Tensile strength) (d) ระยะยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) (e) ความแข็ง (Hardness) ของคอมพอสิตยางธรรมชาติ



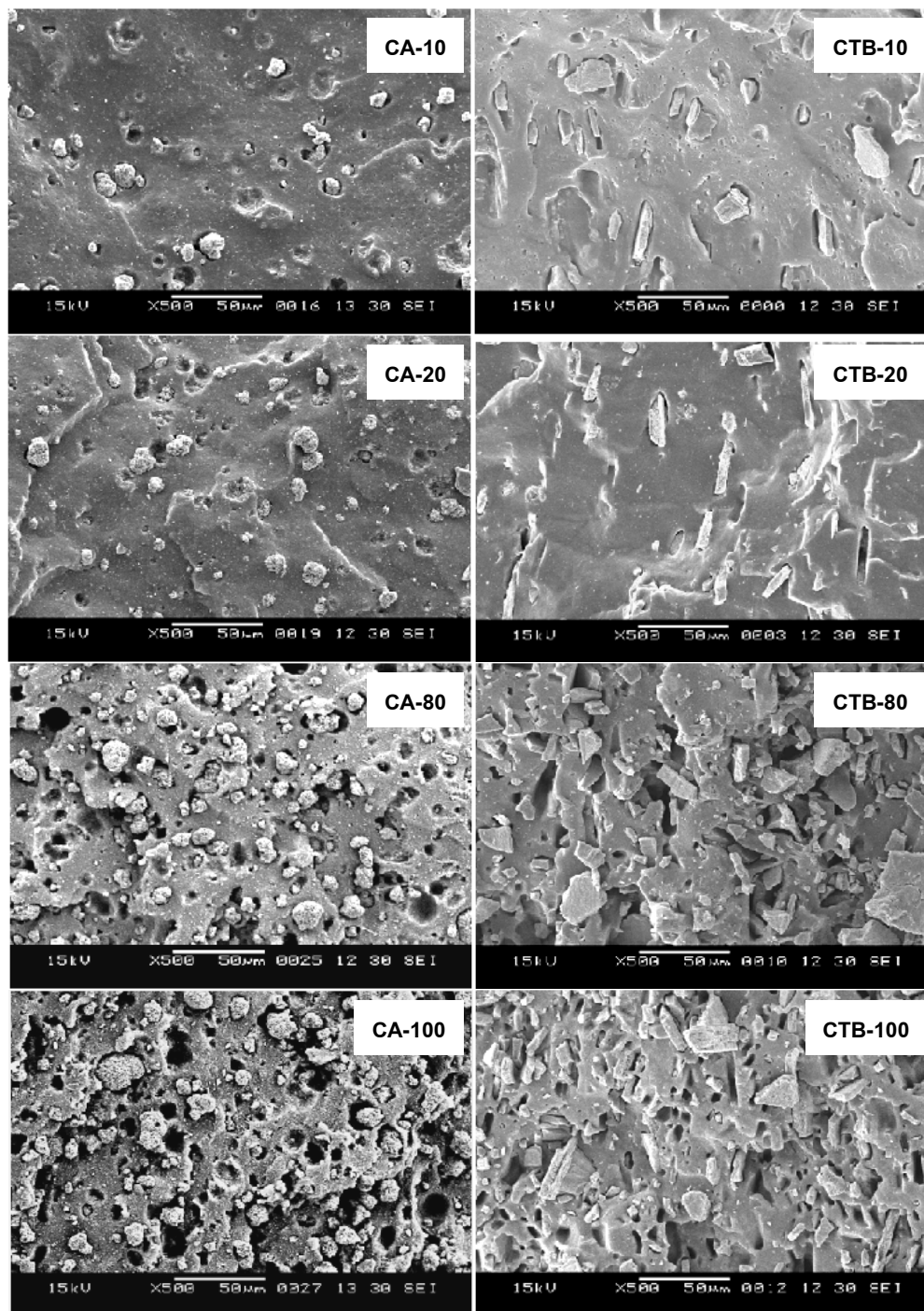
รูปที่ 3.4 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของคอมพอสิตยางธรรมชาติ



รูปที่ 3.5 ค่า Retention ของสมบัติเชิงกลของคอมพอสิตยางธรรมชาติภายใต้การบ่มแรงด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 22 ± 2 ชั่วโมง (a) ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (b) ระยะยืด ณ จุดขาด และ (c) ความแข็ง (% Retention = (สมบัติหลังการบ่มแรง / สมบัติก่อนการบ่มแรง) x 100)

3.4 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของคอมพอสิตยางธรรมชาติ

ผลการทดลองลักษณะการกระจายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการคั่วและอนุภาคกระดองปลาหมึกในตัวกลางยางธรรมชาติ แสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 500 เท่า ของพื้นผิวรอยขาด (Fracture surface) ในตัวกลางยางธรรมชาติหลังผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันที่มีการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการคั่ว (CA) และ อนุภาคกระดองปลาหมึก (CTB) เป็นสารตัวเติม

บทที่ 4

วิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาการนำอนุภาคกระดองปลาหมึกมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติให้ดียิ่งขึ้น หรือเทียบเท่ากับการใช้สารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้า ซึ่งมีราคาสูงกว่า โดยกระบวนการในการศึกษาเริ่มจากการวิเคราะห์เอกลักษณ์ของอนุภาคกระดองปลาหมึก นำอนุภาคกระดองปลาหมึกมาผสมร่วมกับยางธรรมชาติและสารเคมีในกระบวนการวัลคาไนเซชัน ยางคอมปาวด์ที่เตรียมได้ถูกนำไปขึ้นรูป หลังจากนั้นนำคอมพอสิตยางธรรมชาติที่ได้มาศึกษาสมบัติเชิงกลด้านต่าง ๆ เช่น สมบัติการดึงยืด ความแข็งแรง ความต้านทานต่อการฉีกขาด ความทนทานและการเสื่อมสภาพทางความร้อน ตลอดจนการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคกระดองปลาหมึกในตัวกลางยางธรรมชาติ

4.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์เบื้องต้นของอนุภาคกระดองปลาหมึก

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้เครื่อง X-Ray diffractometer พบว่าโครงสร้างผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้าอยู่ในลักษณะของแคลไซต์ (Calcite) และมีรูปผลึกเป็นแบบเฮกซะโกนอล-รอมโบฮีดรอล (Hexagonal-rhombohedral) ซึ่งเป็นโครงสร้างผลึกที่พบได้ทั่วไปในธรรมชาติ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 (a) ในขณะที่แคลเซียมคาร์บอเนตที่มีอยู่ในอนุภาคกระดองปลาหมึกมีลักษณะโครงสร้างของผลึกแบบอราโกไนต์ (Aragonite) และมีรูปผลึกเป็นแบบออโรโธมบิก (Orthorhombic) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 (b)

การวิเคราะห์เชิงความร้อนโดยเทคนิค Thermal gravimetric analysis (TGA) แสดงในรูปที่ 3.2 และตารางที่ 3.1 พบว่าแคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้า จะปรากฏช่วงอุณหภูมิการสลายตัวช่วงเดียว คือเริ่มต้นการสลายตัวที่ 710 องศาเซลเซียส ถึงช่วงอุณหภูมิที่สิ้นสุดการสลายตัวที่ 787 องศาเซลเซียส และมีร้อยละโดยน้ำหนักลดลงประมาณร้อยละ 40 และเมื่อพิจารณาช่วงอุณหภูมิการสลายตัวของอนุภาคกระดองปลาหมึกจะปรากฏช่วงอุณหภูมิการสลายตัว 2 ช่วง คือช่วงอุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียส มีร้อยละโดยน้ำหนักลดลงประมาณร้อยละ 4.3 ซึ่งเป็นการสลายตัวของสารประกอบอินทรีย์ ในส่วนช่วงอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวที่ 690 องศาเซลเซียสถึงช่วงอุณหภูมิที่สิ้นสุดการสลายตัวที่ 770 องศาเซลเซียส มีร้อยละโดยน้ำหนักลดลงประมาณร้อยละ 40 เช่นเดียวกับแคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้า ซึ่งเป็นช่วงการสลายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนตในอนุภาคกระดองปลาหมึกเกิดเป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ตามลำดับ

นำอนุภาคกระดองปลาหมึกและแคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้ามาทำการหาพื้นที่ผิวโดย Brunauer-Emmett-Teller (BET) specific surface area แสดงในตารางที่ 3.2 พบว่าค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของแคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้ามีค่า 11.36 ตารางเมตร/กรัม ในขณะที่พื้นที่ผิวจำเพาะของอนุภาคกระดองปลาหมึกมีค่า 18.02 ตารางเมตร/กรัม แสดงให้เห็นว่าอนุภาคกระดองปลาหมึกมีพื้นที่ผิวสูงกว่าแคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้า ส่งผลให้อนุภาคกระดองปลาหมึกสามารถเกิดอันตรกิริยาและความเข้ากันกับตัวกลางยางธรรมชาติได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้า ซึ่งจะส่งผลดีต่อสมบัติเชิงกลของคอมพอสิตยางธรรมชาติต่อไป

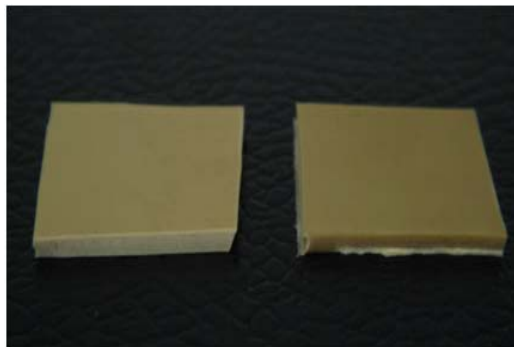
4.2 สมบัติในการคงรูปยางธรรมชาติ

นำอนุภาคกระดองปลาหมึกมาทำการบดผสมเข้ากับยางธรรมชาติร่วมกับสารเคมีโดยใช้เครื่องบดผสมสองลูกกลิ้งที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้ปริมาณของอนุภาคกระดองปลาหมึกที่อัตราส่วนต่าง ๆ คือ 10 20 40 80 และ 100 phr ตามลำดับ หลังจากนั้นนำยางคอมปาวด์ที่ได้ไปวิเคราะห์สมบัติการคงรูปโดยเครื่อง Moving Die Rheometer (MDR) ที่อุณหภูมิ 155 องศาเซลเซียส เพื่อหาเวลาที่ยางเกิดการคงรูปก่อนกำหนด (Scorch time, Ts₂) และเวลาที่เหมาะสมในการวัลคาไนเซชัน (Cure time, T₉₀) ได้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.3 พบว่าเวลาที่ยางเกิดการคงรูปก่อนกำหนดมีแนวโน้มลดลง เมื่อปริมาณของสารตัวเติมทั้ง 2 ชนิด (อนุภาคกระดองปลาหมึกและแคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้า)

เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการใช้สารตัวเติมประเภทแคลเซียมคาร์บอเนตมีสมบัติเป็นต่างจะสามารถกระตุ้นปฏิกิริยาการควบแน่นได้ [2] ในส่วนของเวลาที่เหมาะสมในการวัลคาไนเซชันของยางธรรมชาติมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อเติมสารตัวเติมทั้ง 2 ชนิด แต่อย่างไรก็ตามแนวโน้มการลดลงของเวลาที่เหมาะสมในการวัลคาไนเซชันของยางคอมปาวด์ทั้ง 2 ประเภทมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่าแรงบิด (Torque) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงพันธะเชื่อมขวางทางเคมีที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการวัลคาไนเซชัน พบว่าทั้งยางธรรมชาติที่มีการใช้อนุภาคกระดองปลาหมึกและแคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้าเป็นสารตัวเติม มีค่าแรงบิดเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของสารตัวเติมทั้ง 2 ชนิดเพิ่มขึ้น จากข้อมูลสมบัติการคงรูปสามารถสรุปได้ว่าการนำอนุภาคกระดองปลาหมึกมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติสำหรับระบบวัลคาไนเซชันให้สมบัติการคงรูปของยางธรรมชาติไม่แตกต่างจากการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้าเป็นสารตัวเติม และการใช้อนุภาคกระดองปลาหมึกเป็นสารตัวเติมไม่ไปขัดขวางการดำเนินไปของปฏิกิริยาการวัลคาไนเซชันของยางธรรมชาติ

4.3 สมบัติทางกายภาพและเชิงกลของคอมพอสิตยางธรรมชาติ

ยางคอมปาวด์ที่เตรียมได้ถูกนำไปขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดเบ้า (Compression molding) ที่อุณหภูมิ 155 องศาเซลเซียส ความดัน 150 กก./ตร.ซม. โดยเวลาในการขึ้นรูปเท่ากันทุกอัตราส่วนของสารตัวเติมทั้ง 2 ชนิดคือ 10 นาที (ตารางที่ 2.1) เพื่อควบคุมปริมาณของความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวางทางเคมี (Degree of crosslink density) ให้มีค่าเท่ากันในทุกตัวอย่าง ลักษณะภายนอกของยางธรรมชาติเมื่อผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันโดยมีอนุภาคกระดองปลาหมึกเป็นสารตัวเติม พบว่าสีของผลิตภัณฑ์ยางที่ได้มีความคล้ายคลึงกับสีของผลิตภัณฑ์ยาง ที่มีการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้าซึ่งมีสีเหลืองค่อนข้างน้ำตาลดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 คอมพอสิตยางธรรมชาติที่มีการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้า (ซ้าย) และอนุภาคกระดองปลาหมึก (ขวา) เป็นสารตัวเติม

รูปที่ 3.3 แสดงสมบัติเชิงกลของคอมพอสิตยางธรรมชาติที่ใช้สารตัวเติมชนิดแคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้าหรืออนุภาคกระดองปลาหมึก พบว่าค่าโมดูลัสที่ 100 % (M_{100}) และ 300 % (M_{300}) ของระยะยืดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของสารตัวเติมเพิ่มขึ้น การใส่สารตัวเติมชนิดอนุภาคกระดองปลาหมึกในปริมาณตั้งแต่ 40 phr จะให้ค่า M_{100} และ M_{300} ที่สูงกว่าการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้าเป็นสารตัวเติม ทั้งนี้อาจมีผลมาจากค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (ตารางที่ 3.2) ของอนุภาคกระดองปลาหมึกสูงกว่าแคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้า ส่งผลให้อนุภาคกระดองปลาหมึกสามารถเกิดอันตรกิริยาได้ดีกับตัวกลางยางธรรมชาติ นอกจากนี้สารประกอบอินทรีย์ที่มีอยู่ในกระดองปลาหมึก คือ ไคติน ยังอาจเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลให้อันตรกิริยาระหว่างอนุภาคกระดองปลาหมึกกับตัวกลางยางธรรมชาติเกิดขึ้นได้ดี [1] ซึ่งข้อมูลทางสัณฐานวิทยาสามารถยืนยันได้ว่าอนุภาคกระดองปลาหมึกสามารถเกิดอันตรกิริยากับตัวกลางยางธรรมชาติได้ดีกว่าแคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้าซึ่งจะกล่าวต่อไป

ค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุด (Tensile strength) ของคอมพอสิตยางธรรมชาติมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณการเติมสารตัวเติมทั้ง 2 ชนิดเพิ่มขึ้น เนื่องจากการใส่สารตัวเติมในปริมาณมากขึ้นทำให้คอมพอสิตยางธรรมชาติมีความแข็งเพิ่มขึ้น [13, 14] สมบัติความเป็นอียาสติกลดลง การถ่ายโอนแรงภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์มีประสิทธิภาพลดลง ส่งผลให้ค่าระยะยืด ณ จุดขาด มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณของสารตัวเติมเพิ่ม โดยการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุด และค่าระยะยืด ณ จุดขาดของสารตัวเติมทั้ง 2 ชนิด มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน สุดท้ายค่าความแข็งของคอมพอสิตยางธรรมชาติ (รูปที่ 3.3 (e)) มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณสารตัวเติมทั้ง 2 ชนิดเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุด

สมบัติเชิงกลในด้านความสามารถในการต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear strength) ของคอมพอสิตยางธรรมชาติแสดงดังรูปที่ 3.4 พบว่าการใช้สารตัวเติมประเภทแคลเซียมคาร์บอเนตมิได้ส่งผลให้การปรับปรุงความต้านทานต่อการฉีกขาดดีขึ้น ซึ่งจากข้อมูลในรูป 3.4 จะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณของสารตัวเติมเพิ่มสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการใส่สารตัวเติม (แคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้าหรืออนุภาคกระดองปลาหมึก) ในปริมาณ 20 phr จะให้ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดที่สูงที่สุด

4.4 ความทนทานและการเสื่อมสภาพทางความร้อน

เมื่อป้อนแรงขึ้นงานด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 22 ± 2 ชั่วโมง แล้วนำคอมพอสิตยางธรรมชาติไปทดสอบสมบัติเชิงกลด้านต่าง ๆ คือ ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุด ระยะยืด ณ จุดขาด และค่าความแข็ง ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลด้านต่าง ๆ ของคอมพอสิตยางธรรมชาติหลังการป้อนแรงเทียบกับสมบัติเชิงกลของคอมพอสิตยางธรรมชาติก่อนป้อนแรง แสดงในด้านความสามารถในการรักษาเสถียรภาพของสมบัติเชิงกล (Retention) ดังรูปที่ 3.5 (a) - (c) ตามลำดับ พบว่าคอมพอสิตยางธรรมชาติมีความต้านทานต่อแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาด ลดลงภายหลังการป้อนแรง แสดงว่าปฏิกิริยารีดอกซ์ในเซชันเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ในกระบวนการขึ้นรูป การเพิ่มปริมาณของสารตัวเติมในยางธรรมชาติมิได้ส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาด ภายหลังการป้อนแรงเปลี่ยนแปลงมากนัก ยกเว้นในกรณีการเติมสารตัวเติมที่ปริมาณ 10 phr ค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุด และระยะยืด ณ จุดขาด มีการลดลงอย่างมาก การลดลงของค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุด และระยะยืด ณ จุดขาด ของการเติมสารตัวเติมประเภทแคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้าในยางธรรมชาติ พบว่าจะมีการลดลงอยู่ในช่วง 10 – 20% และ 5 – 10% ตามลำดับ ส่วนกรณีการใช้อนุภาคกระดองปลาหมึกเป็นสารตัวเติม การลดลงของค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดอยู่ในช่วง 10 – 20% ส่วนการลดลงของระยะยืด ณ จุดขาดอยู่ในช่วง 1 – 5% ในขณะที่ค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุด และระยะยืด ณ จุดขาดในยางธรรมชาติที่ไม่มีการเติมสารตัวเติมมีการลดลงประมาณ 40% และ 30% ตามลำดับ จากข้อมูลนี้ทำให้ผู้วิจัยทราบว่า การเติมสารตัวเติมชนิดแคลเซียมคาร์บอเนตนั้นสามารถช่วยเพิ่มความทนทานและการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน (Heat resistance) ให้กับยางธรรมชาติได้ สุดท้ายค่าความแข็งของคอมพอสิตยางธรรมชาติหลังการป้อนแรงแทบจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติวิลลาในเซชัน

4.5 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของคอมพอสิตยางธรรมชาติ

ลักษณะทางสัณฐานวิทยา (Morphology) ของพื้นผิวชิ้นงานคอมพอสิตยางธรรมชาติที่ได้หลังจากการทดสอบการวัดค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด แสดงดังรูปที่ 3.6 พบว่าการกระจายตัวของสารตัวเติมทั้ง 2 ชนิดสามารถกระจายได้ดีในตัวกลางยางธรรมชาติ เมื่อปริมาณของสารตัวเติมเพิ่มขึ้นจะสังเกตเห็นการเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน (Aggregate) ของอนุภาคสารตัวเติม โดยขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้าที่ใช้เฉลี่ยเท่ากับ 15 ไมโครเมตร ส่วนขนาดของอนุภาคกระดองปลาหมึกเฉลี่ยเท่ากับ 30 ไมโครเมตร แม้ว่าการทดลองนี้ขนาดอนุภาค

ของอนุภาคกระดองปลาหมึกมีขนาดใหญ่กว่าแคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้า แต่ประสิทธิภาพการเสริมแรงสามารถเทียบเท่ากับแคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้าได้ รูปร่างของอนุภาคสารตัวเติมทั้ง 2 ชนิดให้ผลสอดคล้องกับผลการทดสอบโครงสร้างผลึกของสารตัวเติม (ตารางที่ 3.2) เช่นเดียวกันคือ แคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้ามีลักษณะกลมคล้ายรูปผลึกแบบเฮกซะโกนอล-รอมโบอีตรอล ในกรณีของอนุภาคกระดองปลาหมึกมีลักษณะเป็นแท่ง (Rod) ซึ่งรูปผลึกแบบออโรโมบิกนั้นจะมีลักษณะเป็นแท่งคล้ายเข็ม เมื่อเปรียบเทียบการกระจายตัวของอนุภาคสารตัวเติมทั้ง 2 ชนิด ในตัวกลางยางธรรมชาติ พบว่ามีความสามารถในการกระจายตัวในตัวกลางยางธรรมชาติได้ใกล้เคียงกัน แต่อย่างไรก็ตามอนุภาคกระดองปลาหมึกสามารถเกิดอันตรกิริยากับตัวกลางยางธรรมชาติได้ดีกว่าแคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้า ซึ่งสังเกตได้จากหลุมสีดำที่เกิดจากการหลุดออกของอนุภาคสารตัวเติมจากตัวกลางยางธรรมชาติ โดยจะพบหลุมดำในกรณีของการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้าในปริมาณที่สูงกว่าการใช้อนุภาคกระดองปลาหมึก และพบปริมาณหลุมดำมากขึ้นเมื่อปริมาณสารตัวเติมสูงขึ้น เหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากอนุภาคกระดองปลาหมึกมีพื้นที่ผิวมากสามารถเกิดอันตรกิริยากับยางธรรมชาติได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้า นอกจากนี้สารประกอบอินทรีย์ที่มีอยู่ในอนุภาคกระดองปลาหมึก เป็นอีกปัจจัยที่ส่งผลให้อนุภาคกระดองปลาหมึกสามารถเกิดอันตรกิริยากับตัวกลางยางธรรมชาติได้ดีกว่าแคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้าเช่นเดียวกัน

4.6 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าต่อการพัฒนาเชิงพาณิชย์

การวิเคราะห์ราคายางธรรมชาติและสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการวัลคาไนเซชันแสดงในตารางที่ 4.1 เมื่อพิจารณาราคาของคอมพอสิตยางธรรมชาติที่มีการใช้อนุภาคกระดองปลาหมึกเปรียบเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้าเป็นสารตัวเติมต่อกิโลกรัม ในกรณีของการใช้อนุภาคกระดองปลาหมึกจะแบ่งการพิจารณาราคาผลิตภัณฑ์ออกเป็น 2 กรณีคือ การบดอนุภาคกระดองปลาหมึกโดยไม่มีการใช้เครื่องจักรช่วยในขั้นตอนการบด (ใช้กำลังคนบด) และการใช้เครื่องจักร (Vibratory Mill) ช่วยในการบด พบว่าผลิตภัณฑ์ยางที่ใช้อนุภาคกระดองปลาหมึก (ใช้กำลังคนบด) เป็นสารตัวเติมมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้าได้ถึง 1.85 % - 15.95 % ขึ้นกับอัตราส่วนการใช้สารตัวเติมเกรดการค้า แต่เมื่อพิจารณาราคาผลิตภัณฑ์ยางที่มีการใช้อนุภาคกระดองปลาหมึกที่ได้จากการบดโดยใช้เครื่องบด (ตารางที่ 4.1) พบว่า ราคาผลิตภัณฑ์ยางมีราคาสูงกว่าเมื่อเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้าถึง 16.33 % - 142.94 % เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายในส่วนการบดเพิ่มเข้ามา โดยเครื่องบดที่ใช้เป็นระดับงานวิจัย (Lab-scale) ทำให้อาจมีผลทำให้ต้นทุนการผลิตสูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เครื่องบดในระดับอุตสาหกรรม ซึ่งกรรมวิธีและประเภทของเครื่องจักรที่ใช้จะแตกต่างออกไปจากในระดับงานวิจัยมีผลทำให้ใช้พลังงานในการบดลดลงแต่ได้ปริมาณการบดที่สูงขึ้น ส่งผลให้ราคาค่าผลิตภัณฑ์ยางที่ได้อาจมีราคาที่ไม่สูงเทียบเคียงได้กับผลิตภัณฑ์ยางที่ใช้อนุภาคกระดองปลาหมึกที่ได้จากการบดโดยใช้กำลังคน ซึ่งหากมีการขยายผลในเชิงอุตสาหกรรม จะเป็นการเพิ่มมูลค่าวัสดุจากธรรมชาติและเป็นการลดการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตสารตัวเติมทางการค้าเพื่อเป็นการรักษาสິงแวดล้อมอีกทางหนึ่งด้วย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาการนำอนุภาคกระดองปลาหมึกมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติให้ดียิ่งขึ้นหรือเทียบเท่ากับการใช้สารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้า โดยกระบวนการในการศึกษาในงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

5.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์เบื้องต้นของอนุภาคกระดองปลาหมึก

จากผลการพิสูจน์เอกลักษณ์เบื้องต้นในด้านต่าง ๆ ของสารตัวเติมทั้ง 2 ชนิด (แคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้าและอนุภาคกระดองปลาหมึก) พบว่า

- โครงสร้างผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้าอยู่ในลักษณะของแคลไซต์ (Calcite) ในขณะที่แคลเซียมคาร์บอเนตที่มีอยู่ในอนุภาคกระดองปลาหมึกมีลักษณะโครงสร้างของผลึกแบบอราโกไนต์ (Aragonite)
- ช่วงอุณหภูมิการสลายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้าปรากฏช่วงเดียว คือที่อุณหภูมิ 748 องศาเซลเซียสและมีร้อยละโดยน้ำหนักลดลงประมาณร้อยละ 40 ในขณะที่อนุภาคกระดองปลาหมึกปรากฏช่วงอุณหภูมิการสลายตัว 2 ช่วง คือช่วงแรกเป็นการสลายตัวที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นการสลายตัวของสารประกอบอินทรีย์ที่มีอยู่ในอนุภาคกระดองปลาหมึก ช่วงที่สองเป็นช่วงการสลายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนตที่อุณหภูมิ 731 องศาเซลเซียสและมีร้อยละโดยน้ำหนักลดลงประมาณร้อยละ 40
- ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของอนุภาคกระดองปลาหมึกมีค่า 18.02 ตารางเมตร/กรัม ในขณะที่แคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้ามีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ 11.36 ตารางเมตร/กรัม

5.2 สมบัติในการคงรูปร่างธรรมชาติ

การใช้อนุภาคกระดองปลาหมึกเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ จะไม่ไปขัดขวางการดำเนินไปของปฏิกิริยาการวัลคาไนเซชันของยางธรรมชาติ นอกจากนี้การนำอนุภาคกระดองปลาหมึกมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติสำหรับระบบซัลเฟอร์วัลคาไนเซชัน มีผลให้สมบัติการคงรูปของยางธรรมชาติไม่แตกต่างจากการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้าเป็นสารตัวเติม โดยมีผลทำให้เวลาที่ใช้ในการคงรูปร่างคอมพาวด์มีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อปริมาณของสารตัวเติมทั้ง 2 ชนิดเพิ่มขึ้น

5.3 สมบัติทางกายภาพและเชิงกลของคอมพอสิตยางธรรมชาติ

ลักษณะภายนอกของยางธรรมชาติเมื่อผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันโดยมีอนุภาคกระดองปลาหมึกเป็นสารตัวเติม มีความคล้ายคลึงกับสีของผลิตภัณฑ์ยางที่มีการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้าซึ่งมีสีเหลือง ก่อนไปทางน้ำตาล จากการวิเคราะห์ข้อมูลการทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่า ค่าโมดูลัสที่ 100 % และ 300 % ของระยะยืด มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของสารตัวเติมเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับค่าความแข็งแรงของคอมพอสิตยางธรรมชาติ ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดและค่าระยะยืด ณ จุดขาด คือค่าดังกล่าวมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณของสารตัวเติมเพิ่มสูงขึ้น การใช้สารตัวเติมประเภทแคลเซียมคาร์บอเนต มิได้ส่งผลให้การปรับปรุงความต้านทานต่อการฉีกขาดดีขึ้น

5.4 ความทนทานและการเสื่อมสภาพทางความร้อน

เมื่อทำการตรวจสอบสมบัติเชิงกลด้านต่าง ๆ ของคอมพอสิตยางธรรมชาติหลังการบ่มเร่งเทียบกับสมบัติเชิงกลของคอมพอสิตยางธรรมชาติก่อนการบ่มเร่ง พบว่าคอมพอสิตยางธรรมชาติมีเสถียรภาพของสมบัติเชิงกลเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยอยู่ในช่วงประมาณ 10 – 20 % เมื่อเทียบกับยางธรรมชาติที่ไม่มีการเติมสารตัวเติม มีการเปลี่ยนแปลงค่าสมบัติเชิงกลหลังการบ่มเร่งอยู่ในช่วง 30 – 40 % แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ในกระบวนการการขึ้นรูป นอกจากนี้ยังสามารถสรุปได้ว่าการผสมสารตัวเติมประเภทแคลเซียมคาร์บอเนตเข้ากับยางธรรมชาติ ส่งผลให้ยางธรรมชาติมีความทนทานและการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนดีขึ้น

5.5 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของคอมพอสิตยางธรรมชาติ

จากการศึกษาข้อมูลทางสัณฐานวิทยาของคอมพอสิตยางธรรมชาติพบว่า การกระจายตัวในตัวยางธรรมชาติของสารตัวเติมทั้ง 2 ชนิดสามารถกระจายตัวได้ดีในตัวยางธรรมชาติ แต่เมื่อปริมาณของสารตัวเติมเพิ่มขึ้นพบว่า อนุภาคกระดองปลาหมึกสามารถเกิดอันตรกิริยากับตัวยางธรรมชาติได้ดีกว่าแคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้า ซึ่งสอดคล้องกับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของอนุภาคกระดองปลาหมึกซึ่งมีค่าสูงกว่าแคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้า และการมีสารประกอบอินทรีย์ในอนุภาคกระดองปลาหมึกส่งผลให้การเข้ากันได้กับตัวยางธรรมชาติเกิดขึ้นได้ดี

5.6 ความคุ้มค่าต่อการพัฒนาเชิงพาณิชย์

ผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติที่มีการใช้อนุภาคกระดองปลาหมึกเป็นสารตัวเติม มีต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่าลงกว่าเมื่อเทียบกับการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้า ในกรณีที่ไม่ใช่เครื่องจักรในการบดอนุภาคกระดองปลาหมึก โดยสามารถลดราคาของผลิตภัณฑ์ยางได้ในช่วง 1.85 % - 15.95 % ขึ้นกับอัตราส่วนการใช้สารตัวเติมเกรดการค้า แต่อย่างไรก็ตามราคาผลิตภัณฑ์ยางที่มีการใช้อนุภาคกระดองปลาหมึกที่ใช้เครื่องจักรในขั้นตอนการบดเป็นสารตัวเติม มีราคาของผลิตภัณฑ์ที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้าประมาณ 16.33 % - 142.94 %

จากข้อมูลที่ได้ในงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ว่า การนำอนุภาคกระดองปลาหมึกมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้านต่าง ๆ และความสามารถในการรักษาเสถียรภาพของสมบัติเชิงกล (Retention) ของยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันในระบบซัลเฟอร์ได้และให้ผลการทดลองใกล้เคียงกับแคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้ในทางการค้า นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองในด้านสมบัติเชิงกลที่ได้ในงานวิจัยนี้กับข้อมูลผลการวิจัยที่มีการใช้อนุภาคกระดองปลาหมึกเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติในระบบเปอร์ออกไซด์วัลคาไนเซชัน [1] พบว่าให้ผลการทดลองไปในทางเดียวกัน จึงสรุปได้ว่าการใช้อนุภาคกระดองปลาหมึกเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติสามารถนำไปใช้ได้ทั้งระบบซัลเฟอร์วัลคาไนเซชันและเปอร์ออกไซด์วัลคาไนเซชัน

ข้อเสนอแนะ

- ควรมีการศึกษาพัฒนาเพิ่มเติมในส่วนของสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในกระดองปลาหมึก นอกเหนือจากองค์ประกอบหลักคือ แคลเซียมคาร์บอเนต เช่น ไคติน ว่ามีอิทธิพลช่วยให้ประสิทธิภาพในการเป็นสารตัวเติมของกระดองปลาหมึกในยางธรรมชาติอย่างไร

เอกสารอ้างอิง

1. Poompradub S., Ikeda Y., Kokubo Y., Shiono T., "Cuttlebone as reinforcing filler for natural rubber" *Eur. Polym. J.*, 2008, 44, 4157-4164.
2. ดร.พงษ์ธร แซ่ฮุย. สารเคมียาง. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, ปทุมธานี, 2548.
3. พรพรรณ นิธิอุทัย. สารเคมีสำหรับยาง. ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี, 2528
4. Mark, J. E., Erman, B. and Eirich, F. Science and technology of rubber. 3rd ed. Academic Press, London, 2005.
5. Sulfur vulcanization. [Online]. Available from: <http://images.google.co.th/images?um=1&hl=th&tbs=isch:1&q=sulfur+vulcanization&sa=N&start=84&ndsp=21> [2009, Oct. 11]
6. Retention: The key to efficient papermaking. [Online]. Available from: <http://www.csi.unian.it/educa/inglese/retentio.html> [2009, Oct. 15]
7. Thailabonline: Mediserv Laboratory Equipment & Supplies. [Online]. Available from: <http://www.thailabonline.com/chitin-chitosan.htm> [2009, Oct. 15]
8. Birchall J.D., Thomas N.L., "On the architecture and function of cuttlefish bone" *J. Mater. Sci.*, 1983, 18, 2081–2086.
9. Lavall R., Assis O., Campana-Filho S., " β -Chitin from the pens of *Loligo* sp.: Extraction and characterization" *Bioresource Technology*, 2006, 98, 2465-2472.
10. Entsar S. Abdou, Khaled S.A. Nagy, Maher Z. Elsabee, "Extraction and characterization of chitin and chitosan from local sources" *Bioresource Technology*, 2008, 99, 1359-1367.
11. Al Sagheer F.A., Al-Sughayer M.A., Muslim S., Elsabee M.Z., "Extraction and characterization of chitin and chitosan from marine sources in Arabian Gulf" *Carbohydrate Polymers*, 2009, 77, 410-419.
12. Ismail H., Nasaruddin M.N., Rozman H.D., "The effect of multifunctional additive in white rice husk ash filled natural rubber compounds" *Eur. Polym. J.*, 1999, 35, 1429-1437.
13. Ismail H., Jaffri R.M., "Physico-mechanical properties of oil palm wood flour filled natural rubber composites" *Polym. Test.*, 1999, 18, 381–388.
14. Ismail H., Edyham M.R., Wirjosentono B., "Bamboo fibre filled natural rubber composites: the effects of filler loading and bonding agent" *Polym. Test.*, 2002, 21, 139–144.
15. Gopalan Nair K., Dufresne A., "Crab shell chitin whisker reinforced natural rubber nanocomposites. 2. Mechanical behavior" *Biomacromolecules*, 2003, 4, 666–674.
16. Geethamma V.G., Kalaprasad G., Groeninckx G., Thomas S., "Dynamic mechanical behavior of short coir fiber reinforced natural rubber composites" *Composites: Part A*, 2005, 36, 1499–1506.

ภาคผนวก

“การนำการนำกระดองปลาหมึกมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันในระบบซัลเฟอร์” สัญญาเลขที่ RDG5250024

ตารางที่ ก สมบัติเชิงกลของคอมพอสิตยางธรรมชาติในด้านการต้านทานต่อการฉีกขาด

Sample code	Tear strength (N/mm)
NR	38.4
CA-10	32.0
CA-20	40.6
CA-40	34.0
CA-80	31.3
CA-100	30.2
CTB-10	28.3
CTB-20	38.0
CTB-40	36.5
CTB-80	31.6
CTB-100	32.3

ตารางที่ ข สมบัติเชิงกลของคอมพอสิตยางธรรมชาติในด้านการต้านทานต่อแรงดึงทั้งก่อนและหลังการบ่มแรงด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 22 ± 2 ชั่วโมง

Sample code	Before aging					After aging				
	M ^a ₁₀₀ (MPa)	M ^b ₃₀₀ (MPa)	T _B ^c (MPa)	E _B ^d (%)	Hardness (Shore A)	M ^a ₁₀₀ (MPa)	M ^b ₃₀₀ (MPa)	T _B ^c (MPa)	E _B ^d (%)	Hardness (Shore A)
NR	1.33 (±0.04)	3.78 (±0.17)	23.83 (±4.45)	604.11 (±43.43)	48.6 (±0.54)	1.46 (±0.07)	4.42 (±0.14)	9.49 (±3.38)	397.19 (±46.50)	47.6 (±1.08)
CA-10	1.40 (±0.13)	3.74 (±0.24)	19.98 (±1.44)	571.77 (±25.44)	49.8 (±0.45)	1.21 (±0.01)	3.08 (±0.55)	4.81 (±0.97)	343.06 (±55.44)	49.6 (±0.54)
CA-20	1.61 (±0.12)	3.86 (±0.30)	20.51 (±2.06)	554.43 (±13.21)	50.6 (±1.14)	1.74 (±0.11)	4.39 (±0.59)	14.21 (±1.03)	500.37 (±29.63)	50.4 (±0.65)
CA-40	1.80 (±0.06)	3.90 (±0.02)	19.02 (±1.79)	559.63 (±16.96)	56.0 (±0.70)	1.79 (±0.09)	3.67 (±0.10)	13.76 (±1.18)	518.33 (±5.02)	53.2 (±0.44)
CA-80	1.99 (±0.05)	3.74 (±0.10)	14.13 (±1.57)	552.14 (±26.27)	60.2 (±0.83)	2.00 (±0.21)	3.76 (±0.18)	11.57 (±0.70)	504.22 (±5.50)	58.1 (±0.74)
CA-100	2.11 (±0.05)	3.88 (±0.12)	11.53 (±0.42)	513.79 (±17.61)	63.0 (±1.51)	1.88 (±0.05)	3.25 (±0.25)	9.07 (±0.48)	499.29 (±20.06)	59.5 (±0.35)
CTB-10	1.36 (±0.10)	3.43 (±0.30)	20.04 (±2.86)	626.04 (±36.46)	49.4 (±0.89)	1.80 (±0.06)	2.31 (±0.00)	4.22 (±0.19)	255.27 (±10.18)	49.4 (±0.54)
CTB-20	1.59 (±0.04)	3.87 (±0.09)	20.71 (±1.45)	574.43 (±15.87)	52.4 (±0.89)	1.66 (±0.13)	4.05 (±0.10)	17.01 (±0.91)	564.10 (±21.13)	52.4 (±0.54)
CTB-40	1.88 (±0.06)	4.08 (±0.22)	18.87 (±1.65)	570.47 (±35.86)	57.0 (±0.70)	1.81 (±0.06)	3.86 (±0.04)	13.57 (±2.18)	560.32 (±20.26)	54.6 (±0.65)
CTB-80	2.34 (±0.11)	4.38 (±0.16)	13.01 (±1.12)	507.56 (±36.03)	62.2 (±0.44)	2.30 (±0.02)	4.15 (±0.15)	9.37 (±0.81)	474.94 (±22.70)	61.0 (±0.93)
CTB-100	2.45 (±0.09)	4.43 (±0.26)	10.15 (±0.51)	496.86 (±29.00)	64.0 (±0.70)	2.33 (±0.11)	4.15 (±0.18)	6.73 (±0.44)	458.16 (±0.90)	64.5 (±0.50)

^a Stress at 100% elongation.

^b Stress at 300% elongation.

^c Tensile strength at break.

^d Elongation at break.

ตอบคำถามต่อข้อคิดเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิ

“การนำการนำกระดองปลาหมึกมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันในระบบซัลเฟอร์” สัญญาเลขที่ RDG5250024

ข้อคิดเห็น/ข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ	ชี้แจงโดยนักวิจัย
<u>ความเห็นด้านการพิมพ์ (Editorial)</u> - คำว่า “คอมพอสิตยางธรรมชาติ” น่าจะเป็น “ยางผสมสารเคมี (compound rubber)” - คำว่า “Tensile strength” ในรายงานบางครั้งใช้คำว่า “ความต้านแรงดึง” บางครั้งก็ใช้คำว่า “ความต้านแรงดึงสูงสุด” ขอให้ใช้เหมือนกันทุกที่ในรายงาน	- ยางผสมสารเคมี (compound rubber) หมายถึงยางที่ผสมสารเคมีต่างๆ เช่น สารทำให้ยางคงรูป สารช่วยในกระบวนการผลิต เป็นต้น พร้อมทั้งจะนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ ส่วนคอมพอสิตยางธรรมชาติหมายถึง การนำยางธรรมชาติมาผสมเข้ากันกับสารเคมีต่างร่วมกับสารตัวเติมเพื่อให้มีสมบัติต่าง ๆ ดีขึ้น แล้วนำไปผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันเป็นผลิตภัณฑ์ยาง ดังนั้นความหมายของคำทั้ง 2 มีความหมายที่ต่างกัน จึงไม่สามารถใช้แทนกันได้ - ได้ดำเนินการแก้ไขแล้วโดยเปลี่ยนเป็น “ความต้านทานแรงดึงสูงสุด” ทุกที่ในรายงาน
<u>ความเห็นด้านวิชาการ (Technical)</u> - ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง หากจะสรุปว่า ลดลง, เพิ่มขึ้น หรือไม่มีผลกระทบ ควรใช้สถิติเป็นตัวอ้างอิง เพื่อแสดงความแตกต่างว่ามีนัยสำคัญหรือไม่ - ควรอ้างอิงมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบเช่น ISO หรือ ASTM เป็นต้น	- ได้ดำเนินการแก้ไขแล้วโดยเพิ่มข้อมูลทางสถิติ (error bar) ลงไปในกราฟข้อมูลการทดสอบในหน้า 23 และ 25 ตามลำดับ - การทดลองทั้งหมดได้อ้างอิงตามมาตรฐาน ISO หรือ ASTM ตามที่ระบุไว้ในบทที่ 2

ข้อคิดเห็น/ข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ	ชี้แจงโดยนักวิจัย
3. ควรทบทวน CaCO_3 ทางการค้าที่นำมาเป็น control เปรียบเทียบกับ CaCO_3 จากกระดองปลาหมึก เกรดที่ระบุปริมาณ 50 บาท ไม่น่าจะใช้เกรดปกติที่ใช้กับยาง เพราะราคาแพงเกินไป ควรตรวจสอบว่าเกรดดังกล่าว มี spec. อย่างไร แนะนำให้ใช้กับงานใด 4. จากผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของยางคงรูปที่ผสม CaCO_3 จากกระดองปลาหมึกไม่สามารถเรียกว่า สารตัวเติมนี้เป็น “สารเสริมแรง” (reinforcing filler) ได้ เพราะผล tensile และ tear ลดลงทั้งหมด ชื่อเรื่องและทุกที่ของรายงานคำว่า “สารเสริมแรง” ควรแก้ไขเป็น “สารตัวเติม” เพราะ reinforcing filler และ extender มีความหมายต่างกัน นักวิจัยควรทบทวนความหมายของ reinforcing filler ด้วย 5. การประเมินด้านความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ไม่น่าจะเหมาะสม ด้วยเหตุผลที่เลือกชนิด CaCO_3 ทางการค้าที่ไม่เหมาะสม และกระดองปลาหมึกต้องผ่านกระบวนการซึ่งใช้แรงงานและพลังงาน ก่อนจะมาเป็นผงละเอียดที่สามารถผสมเข้าไปในยางได้ จึงมีต้นทุนด้วย	3. CaCO_3 เกรดการค้า (silver-W) ที่ใช้ในงานวิจัยเป็น CaCO_3 เกรดเสริมแรงที่ใช้กับผลิตภัณฑ์ยาง ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1.5 μm ดัง spec. ที่ได้แนบมาในท้ายรายงาน ซึ่งแตกต่างจาก CaCO_3 เกรดทั่วไป อาทิเช่น Omya crab 2, Omya crab 3 และ Omya crab 15 มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่สูงกว่าอยู่ในช่วง 3-16, 5-25 และ 16-70 μm ตามลำดับ ซึ่ง CaCO_3 ทั้ง 3 เกรดดังกล่าวที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมนั้นเป็นเกรดที่ไม่เสริมแรง และใช้เป็นสารตัวเติมเพื่อเพิ่มปริมาณของยางผสม จึงมีราคาถูกประมาณ 2-7 บาทต่อกิโลกรัม ส่วนใหญ่ประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมด้านต่าง ๆ เช่น หมึกพิมพ์ กระดาษ สี ยาง เป็นต้น ดัง spec. ที่ได้แนบมาในท้ายรายงาน 4. ได้ดำเนินการแก้ไขแล้วโดยเปลี่ยนเป็น “สารตัวเติม” ทุกที่ในรายงาน 5. ได้ดำเนินการแก้ไขการประเมินด้านความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ โดยเพิ่มการคำนวณในส่วนของต้นทุนในการบดกระดองปลาหมึก ไว้ในตารางที่ 4.1 จะเห็นว่าราคาผลิตภัณฑ์ยางรวมของการใช้กระดองปลาหมึกที่มีการใช้เครื่องจักรช่วยในขั้นตอนการบดเป็นสารตัวเติม มีราคาสูงกว่าการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเกรด

ข้อคิดเห็น/ข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ	ชี้แจงโดยนักวิจัย
6. หากมีผู้สนใจงานนี้ ต้องการกระดองปลาหมึกมาทำเองหรือไม่ โรงงานที่มีขนาดใหญ่จะดำเนินการอย่างไร	การค้า (ประมาณ 16.33 - 142.94 %) แต่อย่างไรก็ตามค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นเป็นการคำนวณในระดับงานวิจัย ถ้านำไปประยุกต์ใช้จริงในระดับอุตสาหกรรม ต้นทุนการบดที่เกิดขึ้นอาจจะถูกลงกว่าที่คำนวณ 6. เนื่องจากในอุตสาหกรรมอาหารแช่แข็ง หลังจากที่เราเอาส่วนเนื้อปลาหมึกออกไปแล้ว กระดองปลาหมึกจะถูกโยนทิ้งกลายเป็นขยะจำนวนมาก ซึ่งไม่ได้นำไปใช้ประโยชน์ใด ๆ โดยโรงงานที่มีขนาดใหญ่สามารถติดต่อขอซื้อได้ในราคาที่ถูก (100 บาท ต่อ 1000 กิโลกรัม)

Spec. ของแคลเซียมคาร์บอเนตเกรดต่าง ๆ

1. Silver-W

Item Grade	Particle Shape	Appearance	Typical values			Notes		Other Applications		
			Whiteness (Kett) (%)	BET Specific Surface Area(m ² /g)	PH (—)	Surface Coating Agents	Diameter of a primary particle (nm)	Rubber	Plastics	Others
Brilliant-1500	Cubic	White Powder	98	11.0	9.6	-	150		○	○
Silver-W	Spindle	White Powder	92	5.5	10.3	-	1500	○		
Vigot-10	Cubic	White Powder	97	13.0	9.2	Fatty Acids	100		○	
HAKUENKA CG	Cubic	White Powder	93	26.0	9.3	Fatty Acids	50	○		○
HAKUENKA CCR	Cubic	White Powder	95	16.5	9.2	Fatty Acids	80		○	○
HAKUENKA DD	Cubic	White Powder	91	26.0	9	Rosin Acids	50	○		○
HAKUENKA O	Cubic	White Powder	89	52.0	8.7	Rosin Acids	30	○		○
HAKUENKA U	Cubic	White Powder	92	24.0	9.2	Tertiary Ammonium Salt	50	○		

<http://www.shiraishi.co.jp/kogyo/english/applications/index.html>

2. Omyacarb 2

04-OCT-2010 15:23 FROM SURINT OMYA

TO 02255531

P.01

PRODUCT INFORMATION



SurintOmya

Thailand
Surint Omya Chemicals (Thailand) Co., Ltd.
603 Ramkhamhaeng Road
Solex Wangthongplang
Bangkok, Thailand 10310
Tel + 662 934 7470 to 80
Fax + 662 634 7415

ATTN : อ. น. ก. ย. ๓๑

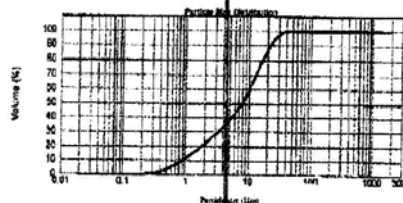
OMYACARB 2

PRODUCTION PLANT:	LOBBURI / THAILAND																		
SHORT DESCRIPTION OF THE PRODUCT:	Ultra-fine, high purity, very white lime stone powder with pigimentary qualities and very good dispersion properties. Selected fine, high purity white ground Calcium Carbonate powder.																		
CHEMICALS ANALYSIS OF THE RAW MATERIAL:	<table> <tr> <td>CaCO₃</td><td>98.50 % Min.</td></tr> <tr> <td>MgCO₃</td><td>0.80 % Max.</td></tr> <tr> <td>Fe₂O₃</td><td>0.02 % Max.</td></tr> <tr> <td>HCl Insoluble content</td><td>1.00 % Max.</td></tr> </table>	CaCO ₃	98.50 % Min.	MgCO ₃	0.80 % Max.	Fe ₂ O ₃	0.02 % Max.	HCl Insoluble content	1.00 % Max.										
CaCO ₃	98.50 % Min.																		
MgCO ₃	0.80 % Max.																		
Fe ₂ O ₃	0.02 % Max.																		
HCl Insoluble content	1.00 % Max.																		
SPECIFIC PRODUCT DATA:	<table> <tr> <td>Particle Size:</td><td></td></tr> <tr> <td>• Top Cut (d 98 % / Mastersizer 2000)</td><td>16 µm Max.</td></tr> <tr> <td>• Mean particle Size (d 50% / Mastersizer 2000)</td><td>3 µm Max.</td></tr> <tr> <td>Fineness:</td><td></td></tr> <tr> <td>• Fineness Pass 325 mesh wet sieve (ISO 787 / 7)</td><td>99.99 % Min.</td></tr> <tr> <td>• Residue on 325 mesh wet sieve (ISO 787 / 7)</td><td>0.10 % Max.</td></tr> <tr> <td>Whiteness:</td><td></td></tr> <tr> <td>• Whiteness (Elrepho 3000, Ry, DIN 53163)</td><td>93 - 96 %</td></tr> <tr> <td>• Moisture Ex-work (ISO 787 / 2)</td><td>0.20 % Max.</td></tr> </table>	Particle Size:		• Top Cut (d 98 % / Mastersizer 2000)	16 µm Max.	• Mean particle Size (d 50% / Mastersizer 2000)	3 µm Max.	Fineness:		• Fineness Pass 325 mesh wet sieve (ISO 787 / 7)	99.99 % Min.	• Residue on 325 mesh wet sieve (ISO 787 / 7)	0.10 % Max.	Whiteness:		• Whiteness (Elrepho 3000, Ry, DIN 53163)	93 - 96 %	• Moisture Ex-work (ISO 787 / 2)	0.20 % Max.
Particle Size:																			
• Top Cut (d 98 % / Mastersizer 2000)	16 µm Max.																		
• Mean particle Size (d 50% / Mastersizer 2000)	3 µm Max.																		
Fineness:																			
• Fineness Pass 325 mesh wet sieve (ISO 787 / 7)	99.99 % Min.																		
• Residue on 325 mesh wet sieve (ISO 787 / 7)	0.10 % Max.																		
Whiteness:																			
• Whiteness (Elrepho 3000, Ry, DIN 53163)	93 - 96 %																		
• Moisture Ex-work (ISO 787 / 2)	0.20 % Max.																		
GENERAL PRODUCT DATA:	<table> <tr> <td>Loose / Packed bulk density (ISO 787 / 11)</td><td>0.70 / 1.00 g/cc</td></tr> <tr> <td>Specific Gravity</td><td>2.7 g/cm³</td></tr> <tr> <td>Oil Absorption (Pareffin Oil No. 107105, ISO 787 / 5)</td><td>45 g/100g Max.</td></tr> <tr> <td>pH value (ISO 787 / 9)</td><td>8-10</td></tr> <tr> <td>International Marine Line Organization (IMO)</td><td>Non Dangerous</td></tr> </table>	Loose / Packed bulk density (ISO 787 / 11)	0.70 / 1.00 g/cc	Specific Gravity	2.7 g/cm ³	Oil Absorption (Pareffin Oil No. 107105, ISO 787 / 5)	45 g/100g Max.	pH value (ISO 787 / 9)	8-10	International Marine Line Organization (IMO)	Non Dangerous								
Loose / Packed bulk density (ISO 787 / 11)	0.70 / 1.00 g/cc																		
Specific Gravity	2.7 g/cm ³																		
Oil Absorption (Pareffin Oil No. 107105, ISO 787 / 5)	45 g/100g Max.																		
pH value (ISO 787 / 9)	8-10																		
International Marine Line Organization (IMO)	Non Dangerous																		

MAIN APPLICATIONS:

- Printing and Writing Paper
- Printing Ink
- Adhesive and sealing compounds
- Interior and Exterior Emulsion paints
- Oil and Synthetic Resin System
- PVC Plastisols, PVC-Floor tile, PVC-Sheet
- Polyurethanes, Polyester and Epoxy Resins
- EVA-Foam
- Rubber and Rubber Compound

PARTICLE SIZE DISTRIBUTION (Mastersizer 2000):



The information contained in this Technical Data Sheet relates only to the specific material designated herein and does not relate to use in combination with any other material or in any process. The information provided herein is based on technical data that Surint Omya Chemicals believes to be reliable, however Surint Omya Chemicals makes no representation or warranty as to the completeness or accuracy thereof and Surint Omya Chemicals assumes no liability resulting from its use or for any claims, losses, or damages of any third party. Recipients receiving this information must exercise their own judgment as to the appropriateness of its use, and it is the user's responsibility to assess the material's suitability (including safety) for a particular purpose prior to such use.

PC-00001 Rev.00 Nov 1, 2009

3. Omyacarb 3

CT-2010 15:24 FROM SURINT OMYA

00000001

P.02

PRODUCT INFORMATION



Surint Omya
Thailand

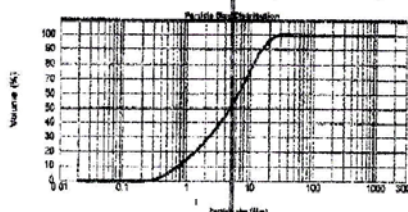
Surint Omya Chemicals (Thailand) Co., Ltd.
603 Ramkhamhaeng Road
Sri 49 Wangthonglang,
Bangkok, Thailand 10310
Tel : 662 934 7470 to 80
Fax : 662 934 7415



OMYACARB 5

PRODUCTION PLANT :	LOPBURI / THAILAND																		
SHORT DESCRIPTION OF THE PRODUCT :	Selected fine, high purity marble, and white ground Calcium Carbonate powder with pigmentary qualities and very good dispersion properties.																		
CHEMICALS ANALYSIS OF THE RAW MATERIAL :	<table> <tr> <td>CaCO₃</td><td>98.50 % Min.</td></tr> <tr> <td>MgCO₃</td><td>0.80 % Max.</td></tr> <tr> <td>Fe₂O₃</td><td>0.02 % Max.</td></tr> <tr> <td>HCl Insoluble content</td><td>1.00 % Max.</td></tr> </table>	CaCO ₃	98.50 % Min.	MgCO ₃	0.80 % Max.	Fe ₂ O ₃	0.02 % Max.	HCl Insoluble content	1.00 % Max.										
CaCO ₃	98.50 % Min.																		
MgCO ₃	0.80 % Max.																		
Fe ₂ O ₃	0.02 % Max.																		
HCl Insoluble content	1.00 % Max.																		
SPECIFIC PRODUCT DATA:	<table> <tr> <td>Particle Size :</td><td></td></tr> <tr> <td>• Top Cut (d 90 % / Mastersizer 2000)</td><td>25 µm Max.</td></tr> <tr> <td>• Mean particle Size (d 50% / Mastersizer 2000)</td><td>6 µm Max.</td></tr> <tr> <td>Fineness :</td><td></td></tr> <tr> <td>• Fineness Pass 325 mesh wet sieve (ISO 787 / 7)</td><td>99.99 % Min.</td></tr> <tr> <td>• Residue on 325 mesh wet sieve (ISO 787 / 7)</td><td>0.01 % Max.</td></tr> <tr> <td>Whiteness :</td><td></td></tr> <tr> <td>• Whiteness (Elrepho 3000, Ry, DIN 53153)</td><td>92.5-95.5 %</td></tr> <tr> <td>• Moisture Ex-work (ISO 787 / 2)</td><td>0.20 % Max</td></tr> </table>	Particle Size :		• Top Cut (d 90 % / Mastersizer 2000)	25 µm Max.	• Mean particle Size (d 50% / Mastersizer 2000)	6 µm Max.	Fineness :		• Fineness Pass 325 mesh wet sieve (ISO 787 / 7)	99.99 % Min.	• Residue on 325 mesh wet sieve (ISO 787 / 7)	0.01 % Max.	Whiteness :		• Whiteness (Elrepho 3000, Ry, DIN 53153)	92.5-95.5 %	• Moisture Ex-work (ISO 787 / 2)	0.20 % Max
Particle Size :																			
• Top Cut (d 90 % / Mastersizer 2000)	25 µm Max.																		
• Mean particle Size (d 50% / Mastersizer 2000)	6 µm Max.																		
Fineness :																			
• Fineness Pass 325 mesh wet sieve (ISO 787 / 7)	99.99 % Min.																		
• Residue on 325 mesh wet sieve (ISO 787 / 7)	0.01 % Max.																		
Whiteness :																			
• Whiteness (Elrepho 3000, Ry, DIN 53153)	92.5-95.5 %																		
• Moisture Ex-work (ISO 787 / 2)	0.20 % Max																		
GENERAL PRODUCT DATA :	<table> <tr> <td>Loose / Packed bulk density (ISO 787 / 11)</td><td>0.75 / 1.25 g/cc</td></tr> <tr> <td>Specific Gravity</td><td>2.7 g/cm³</td></tr> <tr> <td>Oil Absorption (Paraffin Oil No. 107108, ISO 787 / 5)</td><td>40 g/100g Max.</td></tr> <tr> <td>pH value (ISO 787 / 9)</td><td>8-10</td></tr> <tr> <td>International Maritime Organization (IMO)</td><td>Non Dangerous</td></tr> </table>	Loose / Packed bulk density (ISO 787 / 11)	0.75 / 1.25 g/cc	Specific Gravity	2.7 g/cm ³	Oil Absorption (Paraffin Oil No. 107108, ISO 787 / 5)	40 g/100g Max.	pH value (ISO 787 / 9)	8-10	International Maritime Organization (IMO)	Non Dangerous								
Loose / Packed bulk density (ISO 787 / 11)	0.75 / 1.25 g/cc																		
Specific Gravity	2.7 g/cm ³																		
Oil Absorption (Paraffin Oil No. 107108, ISO 787 / 5)	40 g/100g Max.																		
pH value (ISO 787 / 9)	8-10																		
International Maritime Organization (IMO)	Non Dangerous																		
MAIN APPLICATIONS :	• Printing and Writing Paper • Printing Ink • Adhesive and sealing compounds • Interior and Exterior Emulsion paints • Oil and Synthetic Resin System • PVC Plastics, PVC-Floor tile, PVC-Sheet • Polyurethanes, Polyester and Epoxy Resins • EVA-Foam																		

PARTICLE SIZE DISTRIBUTION (Mastersizer 2000) :



The information contained in this Technical Data Sheet relates only to the specific material designated herein and does not relate to use in combination with any other material or in any process. The information provided herein is based on technical data that Surint Omya Chemicals believes to be reliable, however Surint Omya Chemicals makes no representation or warranty as to the completeness or accuracy thereof and Surint Omya Chemicals assumes no liability resulting from its use or for any claims, losses, or damages of any third party. Recipients receiving the information must exercise their own judgment as to the appropriateness of its use, and it is the user's responsibility to assess the material's suitability (including safety) for a particular purpose prior to such use.

PT-M6-02 Rev.00 Nov 1, 2005

4. Omyabrab 15

OCT-2010 15:24 FROM SURINT OMYA

TO 022555831

P.03

PRODUCT INFORMATION



Surint Omya
Thailand
Surint Omya Chemicals (Thailand) Co., Ltd.
803 Pankhamhaeng Road
Sai 8 Wangnonglang
Bangkok, Thailand 10310
Tel : 662 834 7470 to 80
Fax : 662 834 7415

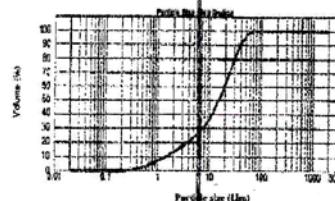
OMYACARB 15

PRODUCTION PLANT:	LOPBURI / THAILAND								
SHORT DESCRIPTION OF THE PRODUCT:	Selected fine, high purity white ground Calcium Carbonate powder								
CHEMICALS ANALYSIS OF THE RAW MATERIAL:	<table> <tr> <td>CaCO₃</td><td>98.50 % Min.</td></tr> <tr> <td>MgCO₃</td><td>0.80 % Max.</td></tr> <tr> <td>Fe₂O₃</td><td>0.02 % Max.</td></tr> <tr> <td>HCl insoluble content</td><td>1.00 % Max.</td></tr> </table>	CaCO ₃	98.50 % Min.	MgCO ₃	0.80 % Max.	Fe ₂ O ₃	0.02 % Max.	HCl insoluble content	1.00 % Max.
CaCO ₃	98.50 % Min.								
MgCO ₃	0.80 % Max.								
Fe ₂ O ₃	0.02 % Max.								
HCl insoluble content	1.00 % Max.								
SPECIFIC PRODUCT DATA:	Particle Size : - Top Cut (d 98 % / Mastersizer 2000) 70 µm Max. - Mean particle Size (d 50% / Mastersizer 2000) 16 µm Max. Fineness : - Fineness Pass 325 mesh wet sieve (ISO 787 / 7) 98.5 % Min. - Residue on 325 mesh wet sieve (ISO 787 / 7) 1.5 % Max. Whiteness : - Whiteness (Elrepho 3000, Ry, DIN 53153) 90 - 93 % - Moisture Ex-work (ISO 787 / 2) 0.20 % Max.								
GENERAL PRODUCT DATA:	Loose / Packed bulk density (ISO 787 / 11) 0.95 - 1.50 g/cc Specific Gravity 2.7 g/cm³ Oil Absorption (Paraffin Oil No. 107106, ISO 787 / 5) 34 g/100g Max. pH value (ISO 787 / 9) 8 - 10 International Maritime Organization (IMO) Non Dangerous								

MAIN APPLICATIONS :

- Adhesive and sealing compounds
- Interior and Exterior Emulsion paints
- Oil and Synthetic Resin System
- PVC Plastics
- PVC-Floor tile, PVC-Sheet
- EVA-Foam
- Rubber and Rubber Compound
- Animal feed

PARTICLE SIZE DISTRIBUTION (Mastersizer 2000) :



The information contained in this Technical Data Sheet relates only to the specific material designated herein and does not relate to use in combination with any other material or in any process. The information provided herein is based on technical data that Surint Omya Chemicals believes to be reliable, however Surint Omya Chemicals makes no representation or warranty as to the completeness or accuracy thereof and Surint Omya Chemicals assumes no liability resulting from its use or for any claims, losses, or damages of any third party. Recipients receiving this information must exercise their own judgment as to the appropriateness of its use, and it is the user's responsibility to assess the material's suitability (including safety) for a particular purpose prior to such use.

PFMK-04 Rev.00 Nov 1, 2009

TOTAL P.03