

# ยางบวมน้ำจากยางธรรมชาติอีพอกไซด์และพอลิเมอร์ ดูดซึมน้ำได้มาก

ชัยวุฒิ วัตจิง\* ศศิวงศ์ บุญสิงห์ ธนากร คำสอน และ สราวุธ ประเสริฐศรี

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของปริมาณพอลิเมอร์ดูดซึมน้ำได้มาก (SAP) และพอลิเอทธิลีนไกลคอล (PEG) ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของยางบวมน้ำ (WSR) ที่เตรียมจากยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (ENR) โดยบดผสมยาง ENR กับ SAP และสารเคมีอื่นๆ ด้วยเครื่องผสมระบบปิดและเครื่องผสมสองลูกกลิ้ง โดยตัวแปรที่ศึกษาคือ ปริมาณของ PEG และ SAP ที่มีต่อสมบัติการคงรูป ความทนทานต่อแรงดึง ระยะยืด ณ จุดขาด ความแข็ง การเสียรูปหลังการกด การบวมพองและการขยายตัวในน้ำของ ENR/SAP WSR ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มปริมาณ PEG ส่งผลทำให้สมบัติแรงบิดต่ำสุด แรงบิดสูงสุด และผลต่างของแรงบิดมีแนวโน้มลดลง แต่ไม่มีผลต่อระยะเวลาเริ่มเกิดการคงรูปและเวลาในการคงรูปของยางคอมปาวด์ ENR/SAP WSR นอกจากนี้การเติม PEG ช่วยให้สมบัติการทนทานต่อแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาดของ ENR/SAP WSR ดีขึ้น แต่ว่าการเพิ่มขึ้นของ PEG ช่วยให้การดูดซึมน้ำและการขยายตัวในน้ำให้กับ ENR/SAP WSR เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ในขณะที่การเพิ่มปริมาณ SAP ช่วยให้การบวมพองน้ำและการขยายตัวในน้ำของ ENR/SAP WSR สูงขึ้น โดยปริมาณ SAP ที่ 50 phr ให้การบวมพองที่ 274% และการขยายตัวในน้ำที่ 376% แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มปริมาณ SAP กลับส่งผลให้สมบัติเชิงกลของ ENR/SAP WSR ต่ำลง

**คำสำคัญ:** ยางธรรมชาติ พอลิเมอร์ดูดซึมน้ำได้มาก ยางบวมน้ำ สมบัติเชิงกล

# Water Swellable Rubber from Epoxidized Natural Rubber and Superabsorbent Polymer

Chaiwute Vudjung\*, Sasiwong Bunsing, Thanakorn Kamson,  
and Sarawut Prasertsri

---

## ABSTRACT

This research studied the effects of superabsorbent polymer (SAP) and polyethylene glycol (PEG) content on the properties of water swellable rubber (WSR) prepared from epoxidized natural rubber (ENR). ENR was mixed with SAP and other ingredients by using internal mixer and two-roll mill. The effects of PEG and SAP contents on cure properties, tensile strength, elongation at break, hardness, compression set, water swelling and water expansion of ENR/SAP WSR were focused. The results showed that minimum torque ( $M_L$ ), maximum torque ( $M_H$ ) and the torque different ( $M_H - M_L$ ) of ENR/SAP WSR rubber compound trended to decrease with increasing PEG content, while scorch time and cure time of ENR/SAP WSR rubber compound were not affected. Additionally, tensile strength and elongation at break of ENR/SAP WSR were improved by incorporation of PEG. However, the water swelling and water expansion of ENR/SAP WSR slightly increased with increasing PEG content. On the other hand, the increasing of SAP contents raised the water swelling and water expansion of ENR/SAP WSR. The maximum of water swelling and water expansion was ca. 274% and 376%, respectively, at 50 phr of SAP. However, increasing the SAP content caused a decrease in mechanical properties of ENR/SAP WSR.

**Keywords:** Natural rubber, Superabsorbent polymer, Water swellable rubber, Mechanical properties

---

Major of Rubber Science and Technology, Department of Chemistry, Faculty of Science, Ubon Ratchathani University

\*Corresponding author, email: [chaiwute2110@gmail.com](mailto:chaiwute2110@gmail.com), [scchaivu@ubu.ac.th](mailto:scchaivu@ubu.ac.th)

## บทนำ

ยางบวมน้ำ (Water swellable rubber; WSR) เป็นวัสดุที่สามารถเกิดการบวมพองเมื่ออยู่ในน้ำ จึงสามารถหยุดการไหลและการซึมผ่านของน้ำ ซึ่งมีการนำยางบวมน้ำมาใช้ในการก่อสร้างทางโยธา วิศวกรรม การก่อสร้างใต้ดิน เช่น ห้องใต้ดิน รถไฟใต้ดิน ไซ้ป้องกันน้ำท่วม และในการอนุรักษ์น้ำ เป็นต้น [1-3] โดยวัสดุที่ใช้ในการเตรียมเป็นยางบวมน้ำจะเป็นพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่น เช่น พอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl chloride; PVC) ยางคลอโรพรีน (Chloroprene rubber; CR) ยางอะคริโลไนไตรล์บิวทาไดเอิน (Acrylonitrile butadiene rubber; NBR) ยางเอทิลีนพโรพิลีนไดเอิน (Ethylene propylene diene terpolymer; EPDM) ยางสไตรีนบิวทาไดเอิน (Styrene butadiene rubber; SBR) และ Chlorinated polyethylene (CPE) [1-5] ในทางการค้าจะนิยมใช้พอลิเมอร์ที่มีความเป็นขี้ เช่น PVC และ CR เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตาม ในการเตรียมยางบวมน้ำด้วยพอลิเมอร์ข้างต้นให้มีสมบัติเชิงกลที่ดีควบคู่ไปกับการบวมพองได้สูงนั้นเป็นไปได้ยาก จึงมีงานวิจัยนำยางธรรมชาติที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีมาใช้ เช่น งานวิจัยของ Saijun และคณะ [6] เตรียมยางบวมน้ำด้วยการผสม (Blend) ระหว่างพอลิอะคริลาไมด์-โค-โซเดียมอะคริเลต (Poly(acrylamide-co-sodium acrylate)) ที่ผ่านการเชื่อมขวางแล้วกับยางธรรมชาติในสถานะน้ำยาง และคงรูปด้วยระบบกำมะถัน โดยรายงานว่ สมบัติการดูดซึมน้ำของยางบวมน้ำเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณของพอลิอะคริลาไมด์-โค-โซเดียมอะคริเลตในยางบวมน้ำเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) และระยะยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) ลดลง สาเหตุเนื่องมาจากความแตกต่างของความเป็นขี้ระหว่างพอลิอะคริลาไมด์-โค-โซเดียมอะคริเลตและยางธรรมชาติ ทำให้การยึดติดระหว่างสองวัสดุของพอลิเมอร์สองชนิดเกิดขึ้นได้น้อย จึงส่งผลต่อสมบัติเชิงกล คือ ทำให้ความทนทานต่อแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาดลดลง ดังนั้นในการเตรียมยางบวมน้ำที่มีสมบัติเชิงกลดีควบคู่ไปกับการบวมพองได้สูงนั้นเป็นไปได้ยาก จึงมีแนวคิดนำยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (Epoxidized natural rubber; ENR) ซึ่งเป็นยางธรรมชาติที่มีการปรับปรุงโครงสร้างในตำแหน่งพันธะคู่เกิดเป็นวงแหวนอีพอกไซด์โดยผ่านปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน ENR ที่ได้จึงมีขี้สูงกว่ายางธรรมชาติทั่วไป นอกจากนี้ยังมีสมบัติทนต่อน้ำมัน การยึดเกาะขณะเปียก (Wet grip) ที่ดี แต่เนื่องจาก ENR เป็นพอลิเมอร์ที่ไม่ชอบน้ำจึงไม่สามารถบวมพองน้ำได้ จำเป็นต้องเติมสารที่ช่วยในการบวมพองน้ำ คือ พอลิเมอร์ดูดซึมน้ำได้มาก (Superabsorbent polymer; SAP) มาเตรียมยางบวมน้ำที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีในขณะที่การบวมพองสูงเช่นกัน ซึ่งจากงานวิจัยของ Nakason และคณะ [7] ได้เตรียมยางบวมน้ำจากยางธรรมชาติ ยางธรรมชาติอีพอกไซด์และยางธรรมชาติมาลีเอต (Maleated natural rubber; MNR) ด้วยการผสมกับแป้งมันสำปะหลังกราฟต์ด้วยพอลิอะคริลาไมด์ (Cassava starch-g-polyacrylamide) ที่ใช้เป็น SAP ในสถานะน้ำยางสำหรับกรณีของยางธรรมชาติ และยางแห้งในกรณีของ ENR และ MNR พบว่า ยางบวมน้ำที่มีสมบัติการดูดซึมน้ำสูง จะมีสมบัติเชิงกล เช่น ความทนทานต่อแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาดต่ำ เป็นผลมาจากความไม่เข้ากันระหว่างยางกับแป้งมันสำปะหลังกราฟต์ด้วยพอลิอะคริลาไมด์ ส่งผลให้เกิดความอ่อนแอของแรงยึดระหว่างวัสดุของยางธรรมชาติกับ SAP และอีกเหตุผลสำคัญ คือ เกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของ SAP ทำให้เกิดข้อบกพร่องในเฟสของยาง ส่งผลต่อความแข็งแรงของยางธรรมชาติที่เติม SAP โดยกลุ่มผู้วิจัยได้ยืนยันเหตุผลดังกล่าวด้วยหลักฐานวิทยาของยางบวมน้ำหลังการแช่น้ำ 14 วัน พบโพรงเป็นจำนวนมากในเฟสของยาง ดังนั้น แม้ว่าการเตรียมยางบวมน้ำจากยางธรรมชาติที่ปรับปรุงโครงสร้างทางเคมีให้มีความเป็นขี้สูงขึ้น เช่น ENR และ MNR แล้วก็ตาม

แต่ยังไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการเข้ากันได้ระหว่างวัฏภาคของยางธรรมชาติและ SAP

พอลิเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol; PEG) เป็นสารประกอบพอลิอีเทอร์ (Polyether) ที่มีการนำมาใช้งานหลากหลายเป็นวัตถุดิบในโรงงานอุตสาหกรรม นอกจากนี้ PEG มีสมบัติที่ดี คือ มีความชอบน้ำ มีความเป็นพิษต่ำและสามารถนำไปผสมกับสารอื่นๆ ได้ จึงมีการนำ PEG มาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตภัณฑ์ด้านการแพทย์ เช่น เครื่องสำอาง ครีม โลชั่น เป็นต้น ยิ่งไปกว่านั้น มีการนำ PEG มาใช้งานที่เกี่ยวข้องกับพอลิเมอร์ด้วยเช่นกัน อาทิ การใช้ PEG เป็นสารลดประสิทธิภาพ (Deactivator) ของสารตัวเติมที่มีความเป็นขี้สูง เช่น ซิลิกา เพื่อลดการดูดซับสารคงรูปในยางคอมปาวด์ และการใช้เป็นสารช่วยในการกระจายตัว (Dispersing agent) ของสารตัวเติมที่มีความเป็นขี้สูงในยางธรรมชาติ Carretero-González และคณะ [8] ศึกษาอิทธิพลของ PEG ต่อการกระจายตัวของ Montmorillonite clay ในยางธรรมชาติ ซึ่งกลุ่มวิจัยได้รายงานว่าการเติม PEG ในการเตรียมนาโนคอมโพสิตระหว่างยางธรรมชาติและ Montmorillonite clay ช่วยเพิ่มความทนทานต่อแรงดึงของนาโนคอมโพสิตยางธรรมชาติและ Montmorillonite clay ได้ ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมยางบวมน้ำจาก ENR และ SAP โดยใช้ PEG เป็นสารช่วยให้ SAP กระจายตัวและเข้ากับเมทริกซ์ ENR ได้ดีขึ้น เพื่อให้ได้ยางบวมน้ำที่มีสมบัติการบวมพองและการขยายตัวในน้ำที่สูงควบคู่กับมีสมบัติเชิงกลที่ดี

## อุปกรณ์และวิธีทดลอง

### วิธีการทดลอง

เตรียมยางบวมน้ำจากยางธรรมชาติอีพอกไซด์และพอลิเมอร์ดูดซึมน้ำได้มาก (Epoxidation natural rubber/Superabsorbent polymer water swellable rubber; ENR/SAP WSR) โดยบดผสมยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีจำนวนโมลเปอร์เซ็นต์ของอีพอกไซด์ 25% (ENR) พอลิเมอร์ดูดซึมน้ำได้มาก (Superabsorbent Polymer; SAP) และ PEG (สูตรยางคอมปาวด์แสดงดังตารางที่ 1) ด้วยเครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) ชนิด Banbury mixer รุ่น FRN7.5G1S-4A ขนาด 1.2 ลิตร ใช้ Fill factor 0.75 ความเร็วโรเตอร์เท่ากับ 50 รอบ/นาที และผสมซิงค์ออกไซด์ กรดสเตียริก CBS และกำมะถันบนเครื่องผสมแบบเปิด (Two-roll mill) ผลิตจากบริษัท เจริญทัศน์ จำกัด มี Fiction ratio 1:1.2 ได้ยางคอมปาวด์ของ ENR/SAP WSR เก็บยางคอมปาวด์ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นทดสอบสมบัติการคงรูป (Cure properties) ของยางคอมปาวด์ด้วยเครื่องทดสอบเวลาการวัลคาไนซ์ของยาง (Moving die rheometer; MDR) ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส และขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบกดอัด (Compression mold) ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส และทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่ สมบัติเชิงกล สมบัติการบวมพองและการขยายตัวในน้ำ

ตารางที่ 1 สูตรยางคอมปาวด์ที่ใช้ในการเตรียมยางบวมน้ำจาก ENR และ SAP

วัตถุดิบ	ปริมาณ (phr)	ผู้จัดจำหน่าย
ENR	100.0	บริษัท เมืองใหม่กัททรี จำกัด (มหาชน) ประเทศไทย
ซิงค์ออกไซด์	3.0	บริษัท Global Chemical จำกัด ประเทศไทย
กรดสเตียริก	1.5	บริษัท เคมีคอล แอนด์ แมททีเรียลส์ จำกัด ประเทศไทย
PEG (% w/w ของ SAP)	20.0-100.0	บริษัท สวงชัยเคมี อิมพอร์ต จำกัด ประเทศไทย
SAP	10.0-50.0	บริษัท เคมีคอล แอนด์ แมททีเรียลส์ จำกัด ประเทศไทย
CBS	1.0	บริษัท เคมีคอล แอนด์ แมททีเรียลส์ จำกัด ประเทศไทย
กำมะถัน	0.5	บริษัท Global Chemical จำกัด ประเทศไทย

หมายเหตุ: ENR คือ ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีจำนวนโมลเปอร์เซ็นต์ของอีพอกไซด์ 25%

PEG คือ พอลิเอทิลีนไกลคอล (Polymethylene glycol) มีน้ำหนักโมเลกุล 4000

SAP คือ พอลิเมอร์ดูดซึมน้ำได้มาก (Superabsorbent Polymer)

CBS คือ *N*-cyclohexyl-2-benzothiazole sulfonamide

### 1. สมบัติเชิงกล

- การทดสอบความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ด้วย Tensile testing machine ตามมาตรฐาน JIS K6251 ใช้อัตราเร็วในการดึง  $500 \pm 50$  มิลลิเมตร/นาที ขึ้นทดสอบเป็นรูปดัมเบลกว้าง 6 มิลลิเมตรหนา 2.5 มิลลิเมตร

- การทดสอบความแข็ง (Hardness) ด้วยเครื่อง Shore A durometer ตามมาตรฐาน JIS K6253 ขึ้นทดสอบหนาประมาณ 6 มิลลิเมตร

- การทดสอบการเสีรูปหลังการกด (Compression set) เตรียมขึ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM-D395 ที่ความหนา  $12.50 \pm 0.50$  มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลาง  $29.50 \pm 0.50$  มิลลิเมตร คำนวณหาเปอร์เซ็นต์การเสีรูปหลังการกดด้วยสูตรคำนวณที่ (1)

$$\text{Compression set (\%)} = [(t_0 - t_f) / (t_0 - t_n)] \times 100 \quad \dots(1)$$

เมื่อ  $t_0$  คือ ความหนาของชิ้นทดสอบเริ่มต้น,  $t_f$  คือ ความหนาของชิ้นทดสอบที่เหลือหลังการกด และ  $t_n$  คือ ความหนาของแท่งเหล็กกันหรือแท่งขึ้น

### 2. สมบัติการบวมพองและการขยายตัวในน้ำ

- การทดสอบการบวมพองในน้ำ (Water swelling) และการสูญเสียน้ำหนัก (Weight loss ratio) โดยเตรียมขึ้นทดสอบสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด  $10 \times 10 \times 2$  มิลลิเมตร ชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง แช่น้ำกลั่นเป็นเวลา 28 วัน บันทึกน้ำหนักเพื่อคำนวณอัตราการบวมพองในน้ำเมื่อครบ 28 วัน หลังจากนั้น นำขึ้นทดสอบไปอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จนแห้งแล้วชั่งน้ำหนักคำนวณตามสูตรที่ (2) และ (3)

$$\text{การบวมพองในน้ำ (\%)} = [(B-A)/A] \times 100 \quad \dots(2)$$

$$\text{การสูญเสียน้ำหนัก (\%)} = [(A-C)/A] \times 100 \quad \dots(3)$$

เมื่อ A คือ น้ำหนักชิ้นทดสอบแห้งก่อนแช่น้ำ, B คือ น้ำหนักชิ้นทดสอบหลังแช่น้ำ และ C คือ น้ำหนักชิ้นทดสอบแห้งหลังแช่น้ำ

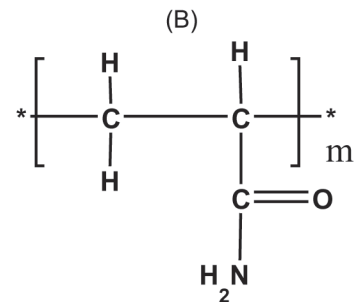
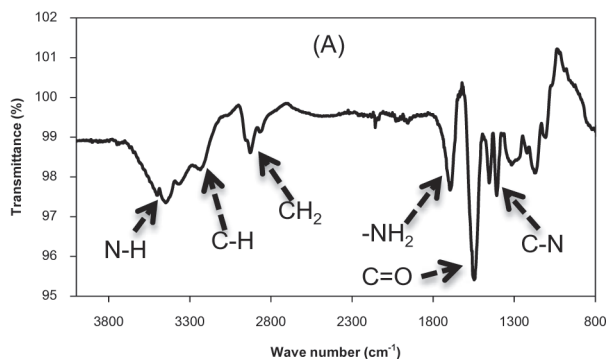
- การทดสอบการขยายตัว (Expansion) เตรียมชิ้นทดสอบสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด  $10 \times 10 \times 2$  มิลลิเมตร แช่ชิ้นทดสอบในน้ำกลั่นเป็นเวลา 28 วัน วัดความกว้าง ความยาวและความหนาด้วยเวอร์เนียร์คาลิปเปอร์แบบดิจิตอล คำนวณการขยายตัวในน้ำด้วยสูตรที่ (4)

$$\text{การขยายตัว (\%)} = [(B-A)/A] \times 100 \quad \dots(4)$$

เมื่อ A คือ ปริมาตรชิ้นทดสอบก่อนแช่น้ำ และ B คือ ปริมาตรชิ้นทดสอบหลังแช่น้ำ

### 3. สันฐานวิทยา

ศึกษาการกระจายตัวของสารเคมีและลักษณะโพรงของชิ้นทดสอบ เตรียมชิ้นทดสอบด้วยการเคลือบทองบริเวณผิวที่ต้องการศึกษาและทดสอบสันฐานวิทยาด้วยเครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป (Scanning Electron Microscope; SEM) ยี่ห้อ HITACHI รุ่น JEOL JSM 5410-LV



รูปที่ 1 FT-IR สเปกตรัมของ SAP ที่ใช้ในการเตรียมยางบวมน้ำ รูปที่ 2 โครงสร้างทางเคมีของพอลิอะคริลาไมด์

### ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การเตรียมยางบวมน้ำจาก ENR และ SAP (ENR/SAP WSR) โดย SAP ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ นำมาวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค FT-IR แสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งวัดการเกิดอันตรกิริยาของการสั่นและการหมุนของอะตอมโมเลกุล ซึ่งปรากฏพิคการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชัน คือ ตำแหน่งเลขคลื่น  $3447 \text{ cm}^{-1}$  แสดงถึง N-H Stretching ตำแหน่งเลขคลื่น  $3224 \text{ cm}^{-1}$  แสดงถึง C-H Stretching เลขคลื่น  $2922 \text{ cm}^{-1}$  แสดงถึง  $\text{CH}_2$  Stretching ตำแหน่งเลขคลื่น  $1546 \text{ cm}^{-1}$  แสดงถึง C=O Stretching ตำแหน่งเลขคลื่น  $1634 \text{ cm}^{-1}$  แสดงถึง  $\text{NH}_2$  Bending และแสดง C-N Stretching ในตำแหน่งเลขคลื่น  $1404 \text{ cm}^{-1}$  ซึ่งโครงสร้างทางเคมีของ SAP มีลักษณะใกล้เคียงกับพอลิอะคริลาไมด์ (Polyacrylamide) [9, 10] โดยโครงสร้างทางเคมีของ พอลิอะคริลาไมด์แสดงดังรูปที่ 2 จึงยืนยันได้ว่า SAP จัดอยู่ในกลุ่มของพอลิอะคริลาไมด์

## 1. ผลของ PEG ที่มีต่อสมบัติของ ENR/SAP WSR

การเตรียมยางบวมน้ำจาก ENR กับ SAP 20 phr โดยศึกษาการแปรปริมาณ PEG 20, 40, 60, 80 และ 100% W/W ของ SAP ต่อแรงบิดต่ำสุด (Minimum torque;  $M_L$ ) แรงบิดสูงสุด (Maximum torque;  $M_H$ ) ผลต่างของแรงบิด (Torque difference;  $M_H - M_L$ ) ระยะเวลาที่ย่างเริ่มเกิดการคงรูป (Scorch time;  $T_{S1}$ ) และเวลาในการคงรูปยาง (Cure time;  $T_{C90}$ ) รวมทั้ง สมบัติต่างๆ ได้แก่ สมบัติความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ระยะยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) ความแข็ง (Hardness) การเสียรูปหลังการกด (Compression set) การบวมพองในน้ำ (Water Swelling) การขยายตัว (Expansion) และ สันฐานวิทยาของ ENR/SAP WSR

### 1.1 สมบัติการคงรูปและสมบัติเชิงกลของ ENR/SAP WSR ที่แปรปริมาณ PEG

สมบัติการคงรูปของ ENR/SAP WSR ที่แปรปริมาณ PEG แสดงดังตารางที่ 2 พบว่า ENR/SAP WSR ที่ไม่เติม PEG จะให้  $M_H$  และ  $M_H - M_L$  ต่ำกว่า Gum เนื่องจากประสิทธิภาพในการทำงานของสารคงรูป (Curing agent) ซึ่งเป็นชนิดเดียวกันและมีปริมาณเท่ากัน ในการเตรียมคอมปาวด์ของ Gum และ ENR/SAP WSR การเติม SAP ทำให้การเชื่อมขวางพันธะโมเลกุล ENR ของสารคงรูปมีประสิทธิภาพด้อยลง [11] แต่เมื่อเปรียบเทียบ ENR/SAP WSR ที่ไม่เติม PEG กับ ENR/SAP WSR ที่ PEG 20% พบว่าการเติม PEG 20% ทำให้  $M_H$  และผลต่างของแรงบิด ( $M_H - M_L$ ) ของ ENR/SAP WSR สูงขึ้น เนื่องจาก PEG ช่วยลดการดูดซับสารคงรูปของ SAP ทำให้สารคงรูปทำงานอย่างมีประสิทธิภาพส่งผลให้การเชื่อมขวางของยางสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณ PEG สูงกว่า 20% เป็นสาเหตุให้  $M_L$ ,  $M_H$  และ  $M_H - M_L$  มีแนวโน้มลดลง ตามปริมาณ PEG ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจาก PEG ทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) ทำให้ยางคอมปาวด์มีความหนืดลดลง ยิ่งไปกว่านั้น ยังส่งผลต่อความแข็งของยางคงรูปอีกด้วย แต่อย่างไรก็ตาม  $T_{S1}$  และ  $T_{C90}$  ของ ENR/SAP WSR ไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อเพิ่มปริมาณ PEG แสดงให้เห็นว่า PEG ไม่มีผลต่อการคงรูปของยาง

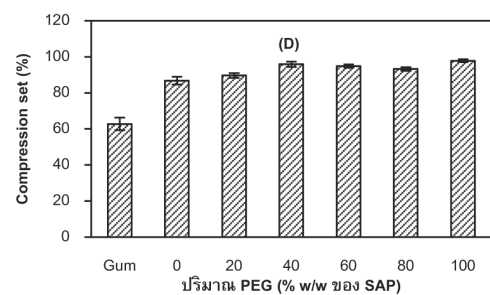
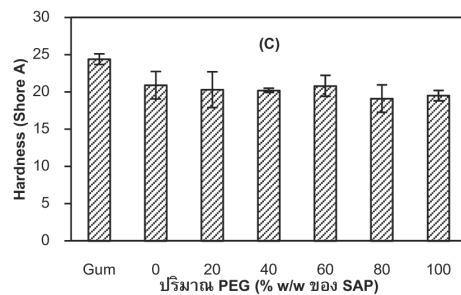
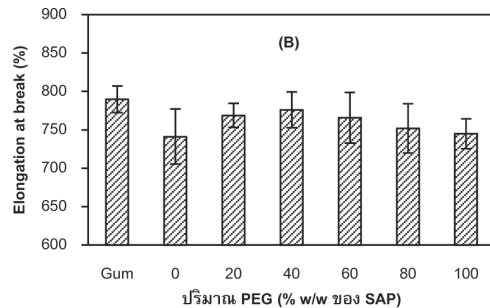
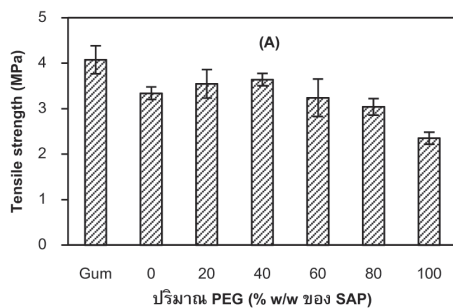
สมบัติความทนทานต่อแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาดของ ENR/SAP WSR ที่แปรปริมาณ PEG แสดงดังรูปที่ 3 (A) และ (B) พบว่า ENR/SAP WSR ที่ไม่เติม PEG จะให้ความทนทานต่อแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาดต่ำกว่า Gum เนื่องจาก SAP มีความเป็นขี้ผึ้งจึงทำให้ SAP เข้ากับยาง ENR ได้ยากและอีกปัจจัยที่สำคัญคือพันธะการเชื่อมขวางของ ENR/SAP WSR ที่ไม่เติม PEG ต่ำกว่า Gum เป็นผลจากการดูดซับสารคงรูปของ SAP ตามที่กล่าวมาแล้ว แต่เมื่อเปรียบเทียบ ENR/SAP WSR ที่ไม่เติม PEG กับ ENR/SAP WSR ที่ PEG 20% พบว่า การเติม PEG 20% ให้ความทนทานต่อแรงดึงสูงขึ้น เนื่องจาก PEG ช่วยให้ SAP เข้ากับยางได้ดีขึ้น และเพิ่มประสิทธิภาพในการเชื่อมขวางของยาง ส่งผลให้ความทนทานต่อแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาดสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มปริมาณ PEG ที่ 60, 80 และ 100% ตามลำดับ พบว่าความทนทานต่อแรงดึงลดลง เนื่องจาก PEG ทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ [12] เมื่อเติมในปริมาณมาก ทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางเคลื่อนที่ได้ง่าย นอกจากนี้ การเติมพลาสติกไซเซอร์มากเกินไป จะส่งผลต่อแรงเฉือน (Shear force) ในการบดผสมยางกับสารเคมีลดลง ทำให้การแตกตัวของสารเคมีเกิดได้น้อยลง การเกาะกลุ่มของสารเคมีในเมทริกซ์ยางเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความทนทานต่อแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาดลดลงได้อีกด้วย



ความแข็งของ ENR/SAP WSR ที่แปรปริมาณ PEG แสดงดังรูปที่ 3 (C) พบว่าความแข็งของ ENR/SAP WSR ที่ไม่เติม PEG มีค่าความแข็งต่ำกว่า Gum เนื่องจาก Gum มีการพันธะเชื่อมขวางที่มากกว่า แสดงให้เห็นว่าการเติม SAP ทำให้ความแข็งของยางและพันธะเชื่อมขวางลดลง เมื่อเปรียบเทียบ ENR/SAP WSR ที่ไม่เติม PEG กับ ENR/SAP WSR ที่เติม PEG 20% พบว่า PEG 20% มีค่าความแข็งลดลง ยิ่งไปกว่านั้น การเพิ่มปริมาณ PEG ที่ 40, 60, 80 และ 100% ส่งผลให้ความแข็งของ ENR/SAP WSR มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณ PEG ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจาก PEG ทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ ดังนั้น การเติม PEG ในยางคอมปาวด์ทำให้ยางคงรูปมีความแข็งลดลง [13-14]

ตารางที่ 2 สมบัติการคงรูปของ ENR/SAP WSR ที่แปรปริมาณ PEG

ปริมาณ PEG (%)	สมบัติการคงรูป				
	$M_L$ (dN.m)	$M_H$ (dN.m)	$M_H - M_L$ (dN.m)	$T_{s1}$ (mins)	$T_{c90}$ (mins)
Gum	1.71 ± 0.07	5.33 ± 0.04	3.62 ± 0.10	1.24 ± 0.10	1.53 ± 0.09
0	1.62 ± 0.08	4.21 ± 0.07	2.58 ± 0.13	1.36 ± 0.07	1.44 ± 0.05
20	1.53 ± 0.10	5.51 ± 0.95	3.98 ± 1.05	1.24 ± 0.13	1.67 ± 0.08
40	0.92 ± 0.14	2.52 ± 0.10	1.60 ± 0.05	1.35 ± 0.07	1.68 ± 0.13
60	1.40 ± 0.12	2.90 ± 0.15	1.51 ± 0.26	1.37 ± 0.08	1.72 ± 0.10
80	1.01 ± 0.05	2.51 ± 0.08	1.50 ± 0.13	1.38 ± 0.08	1.65 ± 0.09
100	0.92 ± 0.10	2.12 ± 0.09	1.21 ± 0.17	1.44 ± 0.15	1.71 ± 0.09



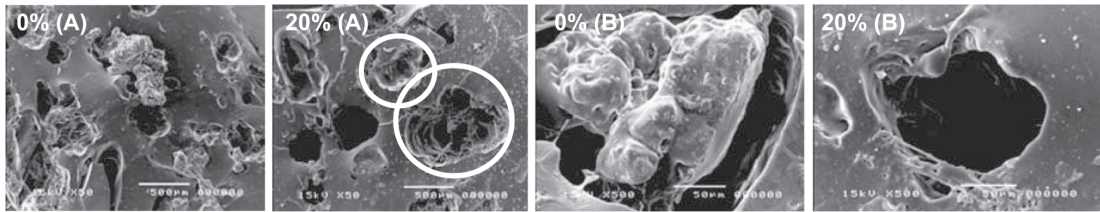
รูปที่ 3 สมบัติความทนทานต่อแรงดึง (A) ระยะยืด ณ จุดขาด (B) ความแข็ง (C) และการเสียรูปหลังการกด (D) ของ ENR/SAP WSR ที่แปรปริมาณ PEG



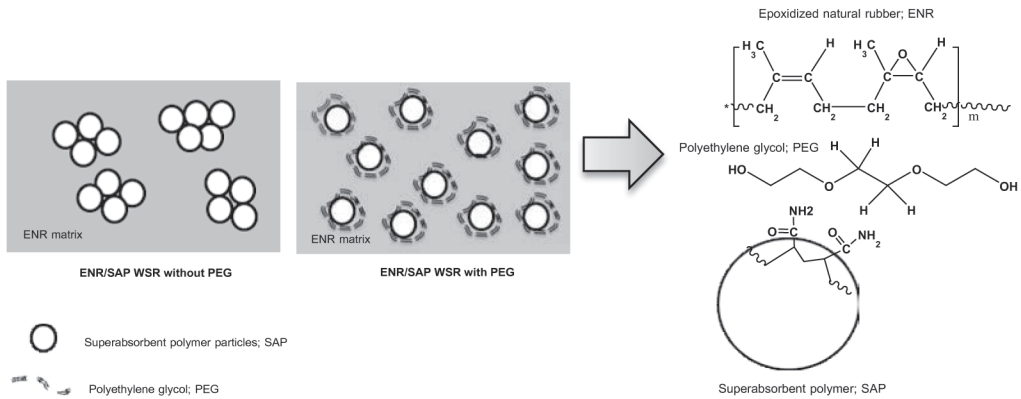
การเสีรูปหลังการกดของ ENR/SAP WSR ที่แปรปริมาณ PEG แสดงดังรูปที่ 3 (D) พบว่า ENR/SAP WSR ที่ไม่เติม PEG จะให้การเสีรูปหลังการกดสูงกว่า Gum เนื่องจาก Gum มีปริมาณความหนาแน่นของพันธะการเชื่อมขวางสูงกว่า ENR/SAP WSR ที่ไม่เติม PEG นอกจากนี้ สูตรยางคอมปาวด์ในงานวิจัยนี้ไม่มีการใช้สารตัวเติม จึงส่งผลต่อการเสีรูปหลังการกดของยางคงรูปที่เห็นได้ชัดเจน โดย Gum ไม่มีสารตัวเติมที่จะไปขัดขวางการคืนตัวของสายโซ่โมเลกุลยางทำให้การเสีรูปหลังการกดดีกว่า ENR/SAP WSR ที่ไม่เติม PEG อย่างไรก็ตาม การเพิ่มปริมาณ PEG ไม่มีผลต่อการเสีรูปหลังการกดของ ENR/SAP WSR

สัณฐานวิทยาของบริเวณรอยแตกของชิ้นทดสอบความทนทานต่อแรงดึงที่ก่อนแช่น้ำของ ENR/SAP WSR ที่ไม่เติมและเติม PEG 20% ที่กำลังขยาย 50 เท่า แสดงดังรูปที่ 4 พบว่า ENR/SAP WSR ที่เติม PEG 20% ทำให้อนุภาค SAP กระจายในเมทริกซ์ ENR หรือมีอันตรกิริยาระหว่าง SAP กับ ENR มากขึ้น ซึ่งทำให้เกิดการยึดเกาะของอนุภาค SAP กับเมทริกซ์ ENR จึงทำให้หลังจากชิ้นทดสอบได้รับแรงดึงจากการทดสอบความทนทานต่อแรงดึง หลงเหลือชิ้นส่วนของอนุภาค SAP ที่ขาดออก (แสดงดังรูปที่ 4 (20% (A)) ซึ่งมีชิ้นส่วนของอนุภาค SAP ในวงกลม) นอกจากนี้ อนุภาค SAP ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่ผ่านการเชื่อมขวางบางส่วน เมื่อแช่ในน้ำ จะไม่ละลายน้ำและจะหลงเหลืออยู่บนชิ้นตัวอย่าง ในขณะที่ PEG เป็นพอลิเมอร์ที่ละลายน้ำได้ ดังนั้น จึงศึกษาการหลุดออกของอนุภาค SAP หลังแช่น้ำโดยใช้กำลังขยายที่ 500 เท่า เมื่อเติม PEG พบโพรงจากการหลุดออกของอนุภาค SAP ที่เสีกลง แสดงดังรูปที่ 4 (0% (B) และ 20% (B)) แต่หาก ENR/SAP WSR ที่ไม่เติม PEG จะทำให้เกิดการเกาะกลุ่มของอนุภาค SAP เกิดเป็นโพรงขนาดใหญ่กว่า ซึ่งจะมีกลุ่มของอนุภาค SAP ขนาดใหญ่ติดอยู่บริเวณโพรงที่มีขนาดเล็กกว่า จากเหตุผลดังกล่าวจึงช่วยยืนยันผลของการช่วยให้อนุภาค SAP กระจายในเมทริกซ์ ENR ได้ดี โดยใช้ PEG รวมทั้ง ทำให้เข้าใจได้มากขึ้นว่าการใช้ PEG ช่วยให้ความทนทานต่อแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาดของ ENR/SAP WSR ดีขึ้นได้อีกด้วย

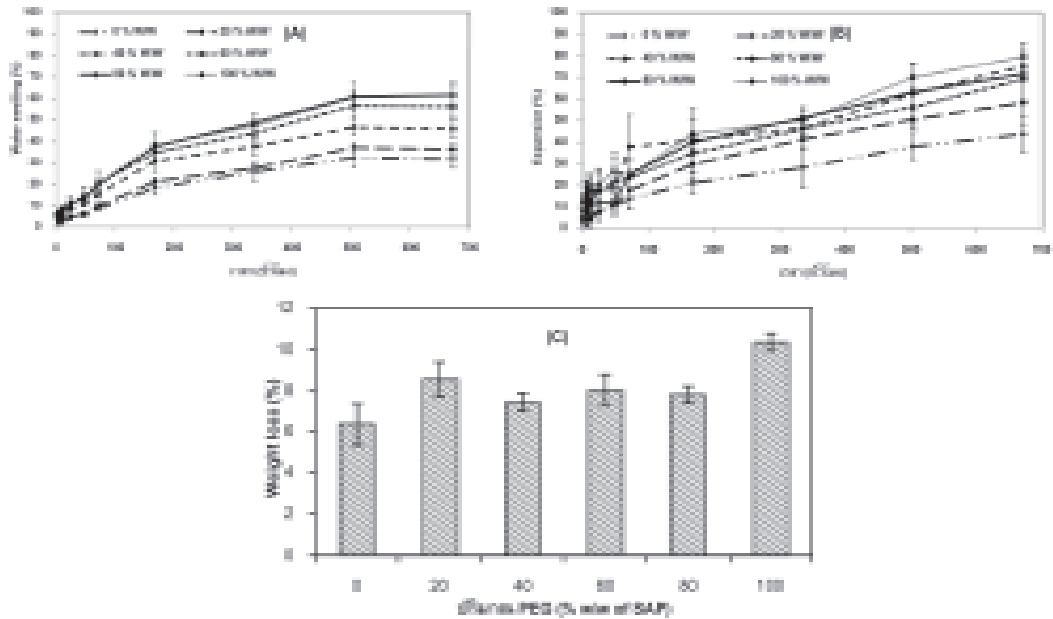
สำหรับกลไกการเข้ากันของอนุภาค SAP ในเมทริกซ์ ENR โดยใช้ PEG เป็นสารเพิ่มความเข้ากัน (Compatibilizer) แสดงดังรูปที่ 5 ซึ่งกลไกการทำงานของ PEG ในการทำให้เกิดความเข้ากันของอนุภาค SAP กับ ENR เกิดจากการลดการเกาะกลุ่มกันของอนุภาค SAP ในระหว่างการบดผสม เกิดการกระจายตัวของอนุภาค SAP ในเมทริกซ์ ENR ได้ดีมากขึ้น เนื่องจาก PEG ทำหน้าที่เป็นสารพลาสติกไซเซอร์ นอกจากนี้ PEG ซึ่งมีสมบัติไฮโดรฟิลิกต่ำกว่าอนุภาค SAP และมีสมบัติไฮโดรโฟบิกต่ำกว่า ENR ด้วยเช่นกัน ดังนั้น การเติม PEG ลงใน ENR/SAP WSR จะทำให้เกิดการเข้ากันและทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมประสานระหว่างวัฏภาคของอนุภาค SAP และ ENR นอกจากนี้ ในงานวิจัยของ Carretero-González และคณะ [8] ได้รายงานการใช้ PEG เป็นสารเพิ่มความเข้ากัน ระหว่าง Montmorillonite clay ที่มีสมบัติไฮโดรฟิลิกกับยางธรรมชาติที่มีสมบัติไฮโดรโฟบิก ทำให้เกิดการเข้ากันของสองวัฏภาคมากขึ้น ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่เติม Montmorillonite clay ดีขึ้น



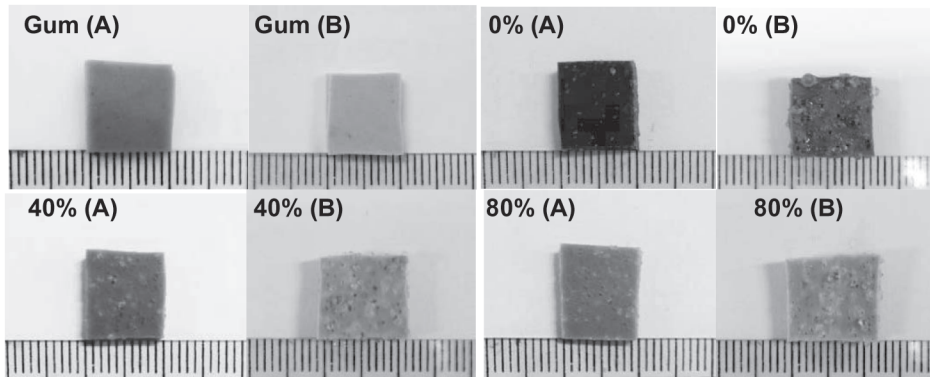
รูปที่ 4 ลักษณะวิทยาของ ENR/SAP WSR ที่เติมและไม่เติม PEG ตัวอย่างก่อนแช่น้ำ (A) ด้วยกำลังขยาย 50 เท่า และหลังแช่น้ำ (B) ด้วยกำลังขยาย 500 เท่า



รูปที่ 5 ความเป็นไปได้ของกลไกในการช่วยให้อนุภาค SAP กระจายในเมทริกซ์ ENR ของ PEG



รูปที่ 6 การบวมพอง (A) การขยายตัวในน้ำ (B) และการสูญเสียน้ำหนัก (C) ของ ENR/SAP WSR ที่แปรปริมาณ PEG

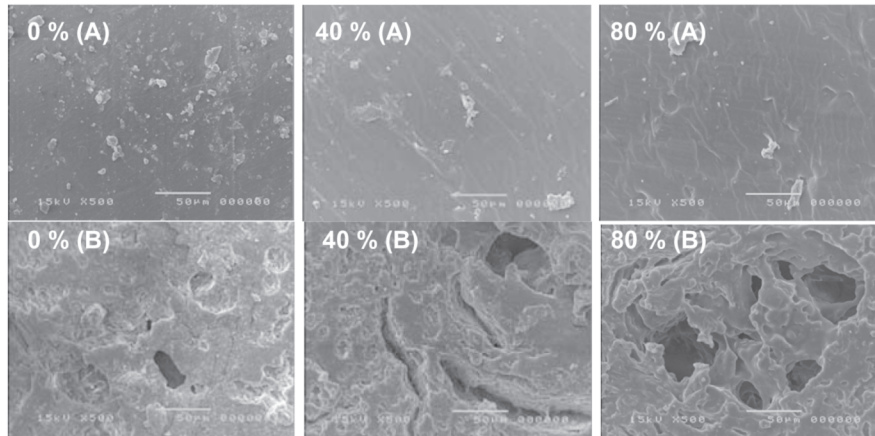


รูปที่ 7 ลักษณะการขยายตัวในน้ำของ ENR/SAP WSR ที่แปรปริมาณ PEG ก่อน (A) และหลัง (B) การแช่น้ำ

## 1.2 สมบัติการบวมพองและการขยายตัวในน้ำของ ENR/SAP WSR ที่แปรปริมาณ PEG

รูปที่ 6 (A) และ (B) แสดงการบวมพองและการขยายตัวในน้ำของ ENR/SAP WSR ที่แปรปริมาณ PEG ตามลำดับ พบว่า การเติม PEG ลงใน ENR/SAP WSR ทำให้การบวมพองและการขยายตัวในน้ำที่ดี จากปัญหาที่อนุภาค SAP ไม่มีความเป็นเนื้อเดียวกันหรือเข้ากันกับ ENR ได้ยากยิ่งไปกว่านั้น เมื่อ ENR/SAP WSR แช่น้ำเป็นเวลานานขึ้น อนุภาค SAP ที่บริเวณพื้นผิวของยางเกิดการหลุดออก แสดงดังรูป 7 และยืนยันผลด้วยสัณฐานวิทยาในรูปที่ 8 ซึ่งการเติม PEG ช่วยเพิ่มการบวมพองและการขยายตัวในน้ำของ ENR/SAP WSR และเมื่อเพิ่มปริมาณ PEG เป็น 40, 60, 80 และ 100% W/W ของ SAP ตามลำดับ พบว่า การบวมพองและการขยายตัวในน้ำของ ENR/SAP WSR สูงขึ้นเนื่องจาก PEG ทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ จึงช่วยให้ SAP กระจายตัวในเมทริกซ์ ENR ได้ดีขึ้นและนอกจากนี้ PEG ยังช่วยในการดูดซึมน้ำได้อีกด้วย เพราะในโครงสร้างของ PEG มีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) แต่อย่างไรก็ตาม ENR/SAP WSR ที่ปริมาณ PEG 100% มีการสูญเสียน้ำหนักสูงสุด คือ 10% ดังรูปที่ 6 (C) เนื่องจากการแช่ ENR/SAP WSR ในน้ำเป็นระยะเวลาจะทำให้ PEG ซึ่งสามารถละลายน้ำและหลุดออกจากเมทริกซ์ ENR ทำให้เปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักสูงขึ้น [15] ยืนยันผลด้วยสัณฐานวิทยาพื้นผิวของ ENR/SAP WSR หลังการแช่น้ำ ที่พบโพรงจากการหลุดออกของสารเคมีที่สามารถละลายน้ำได้มากขึ้นเมื่อปริมาณ PEG เพิ่มขึ้น (รูปที่ 8)

สัณฐานวิทยาของ ENR/SAP WSR ที่แปรปริมาณ PEG 0, 40, 80% W/W ของ SAP ก่อนและหลังแช่น้ำ แสดงดังรูปที่ 8 พบว่า ก่อนแช่น้ำของ ENR/SAP WSR ที่ไม่เติม PEG พื้นผิวมีความขรุขระมากกว่า PEG 40 และ 80% เนื่องจาก SAP มีอันตรกิริยากับ ENR ต่ำ เมื่อเปรียบเทียบ ENR/SAP WSR ที่ไม่เติม PEG กับ PEG 40% หลังแช่น้ำ พบว่า ENR/SAP WSR ที่มี PEG 40% มีโพรงขนาดใหญ่กว่า ENR/SAP WSR ที่ไม่เติม PEG และเมื่อเติม PEG สูงมากขึ้นถึง 80% พบว่ามีรูพรุนขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจาก PEG มีหมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำสูง คือ -OH ทำให้สามารถละลายในน้ำได้ [12] ดังนั้นเมื่อเพิ่ม PEG มากขึ้นส่งผลให้มีความชอบน้ำสูงขึ้นและขนาดของโพรงขยายใหญ่ขึ้น การบวมพองและการขยายตัวสูงขึ้น แสดงดังรูปที่ 6 (A) และ (B) ตามลำดับ



รูปที่ 8 สัณฐานวิทยาของ ENR/SAP WSR ที่แปรปริมาณ PEG ก่อน (A) และหลัง (B) แช่น้ำ

## 2. ผลของ SAP ที่มีต่อสมบัติของ ENR/SAP WSR

ศึกษาผลของการแปรปริมาณของ SAP 10, 20, 30, 40, และ 50 phr ต่อสมบัติการคงรูป สมบัติเชิงกล สมบัติการบวมพอง การขยายตัวในน้ำและสัณฐานวิทยาของ ENR/SAP WSR โดยใช้ PEG ที่ 40% W/W ของ SAP ซึ่งเป็นปริมาณ PEG ที่ให้สมบัติเชิงกลที่ดี พร้อมทั้งสมบัติการบวมพองและการขยายตัวในน้ำที่ดี

### 2.1 สมบัติการคงรูปและสมบัติเชิงกลของ ENR/SAP WSR ที่แปรปริมาณ SAP

จากตารางที่ 3 แสดงสมบัติการคงรูปของ ENR/SAP WSR ที่แปรปริมาณ SAP พบว่าการเติม SAP ที่ 10 phr ทำให้  $M_H$ ,  $M_L$  และ  $M_H-M_L$  ลดลง และเมื่อเพิ่มปริมาณ SAP เป็น 20, 30, 40, และ 50 phr ตามลำดับ สมบัติ  $M_H$ ,  $M_L$  และ  $M_H-M_L$  ลดลงตามปริมาณ SAP ที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่  $T_{c90}$  ของ ENR/SAP WSR ยาวขึ้น เนื่องจาก SAP สามารถดูดความชื้นและสารคงรูป ทำให้ปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันเกิดได้ช้าลง เพราะความชื้นและการดูดซับสารคงรูปของ SAP ชัดขวางและหน่วงปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันของยาง [16]

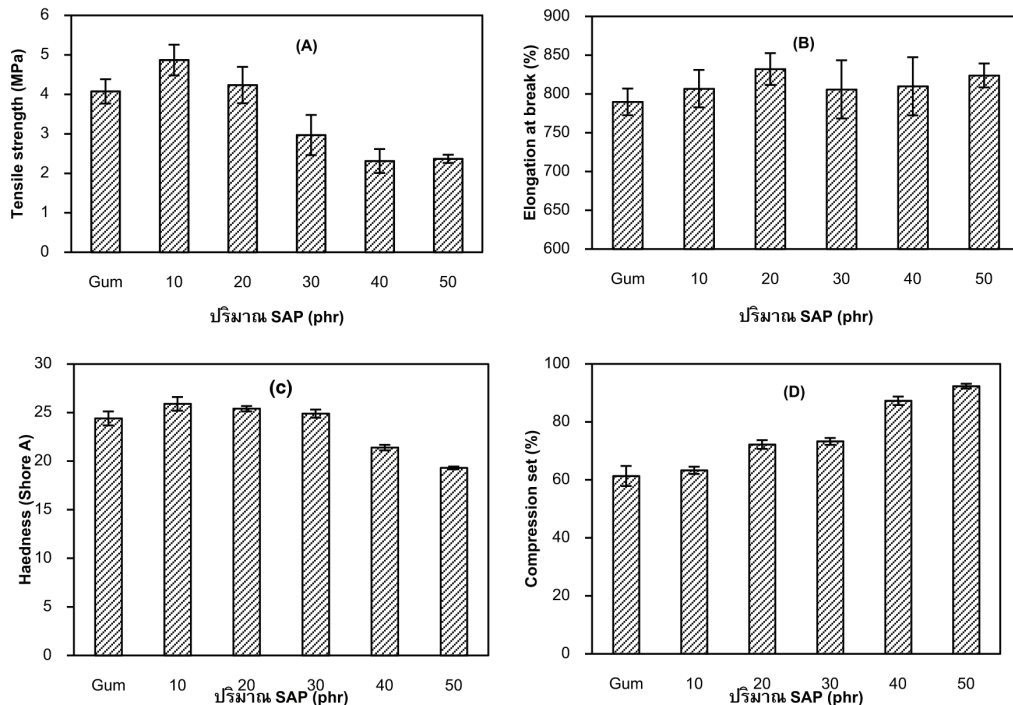
รูปที่ 9 (A) แสดงสมบัติความทนทานต่อแรงดึงของ ENR/SAP WSR ที่แปรปริมาณ SAP 10, 20, 30, 40 และ 50 phr พบว่า ความทนทานต่อแรงดึงของ ENR/SAP WSR ที่ SAP 10 phr จะให้ความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดที่ 4.87 MPa ในขณะที่ Gum มีความทนทานต่อแรงดึง 4.08 MPa เนื่องจากอนุภาค SAP เข้าไปขัดขวางสายโซ่โมเลกุล ENR ทำให้สายโซ่โมเลกุลของ ENR เคลื่อนที่ได้ยาก จึงจำเป็นต้องใช้แรงดึงสูงกว่าแรงดึงที่ใช้กับ Gum อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มปริมาณ SAP ที่ 20, 30, 40 และ 50 phr ตามลำดับ ความทนทานต่อแรงดึงของ ENR/SAP WSR มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากอนุภาค SAP เกิดการเกาะกลุ่มกันและไม่กระจายในเมทริกซ์ ENR ทำให้เกิดจุดบกพร่องในชิ้นทดสอบ

รูปที่ 9 (B) แสดงระยะยืด ณ จุดขาดของ ENR/SAP WSR ที่แปรปริมาณ SAP พบว่าการเพิ่มปริมาณ SAP ส่งผลให้ระยะยืด ณ จุดขาดสูงขึ้น เนื่องจากอนุภาค SAP เกิดอันตรกิริยาระหว่าง SAP กับ ENR โดยมี PEG เป็นสารเพิ่มความเข้ากัน ทำให้อนุภาค SAP มีการกระจายตัวในเมทริกซ์ของยางได้ดี โดย ENR/SAP WSR ที่ SAP 20 phr จะให้ระยะยืด ณ จุดขาดสูงสุดประมาณ 832% แต่

อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มปริมาณ SAP มากกว่า 20 phr ระยะยืด ณ จุดขาดของ ENR/SAP WSR ลดลงตามปริมาณของ SAP ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาค SAP มีโอกาสเกิดอันตรกิริยาระหว่าง SAP กับ SAP มากกว่าเกิดอันตรกิริยาระหว่าง SAP กับ ENR ทำให้อนุภาค SAP เกาะกลุ่มกันและเป็นกลุ่มก้อนใหญ่ขึ้น เมื่อปริมาณของ SAP เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เมื่อออกแรงดึงยืดขึ้นทดสอบเกิดการขาดได้ง่าย

ตารางที่ 3 สมบัติการคงรูปของ ENR/SAP WSR ที่แปรปริมาณ SAP

ปริมาณ SAP (phr)	สมบัติการคงรูป				
	$M_L$ (dN.m)	$M_H$ (dN.m)	$M_H - M_L$ (dN.m)	$T_{s1}$ (mins)	$T_{c90}$ (mins)
Gum	$1.41 \pm 0.07$	$5.33 \pm 0.04$	$3.62 \pm 0.10$	$1.24 \pm 0.10$	$1.53 \pm 0.09$
10	$1.33 \pm 0.05$	$4.11 \pm 0.10$	$2.78 \pm 0.12$	$1.05 \pm 0.06$	$1.80 \pm 0.13$
20	$1.23 \pm 0.11$	$3.02 \pm 0.06$	$1.79 \pm 0.17$	$1.27 \pm 0.10$	$1.78 \pm 0.14$
30	$1.05 \pm 0.09$	$2.27 \pm 0.07$	$1.22 \pm 0.15$	-	$1.65 \pm 0.09$
40	$0.95 \pm 0.09$	$2.17 \pm 0.11$	$1.22 \pm 0.14$	-	$1.81 \pm 0.11$
50	$1.00 \pm 0.03$	$1.92 \pm 0.09$	$0.92 \pm 0.06$	-	$1.91 \pm 0.11$



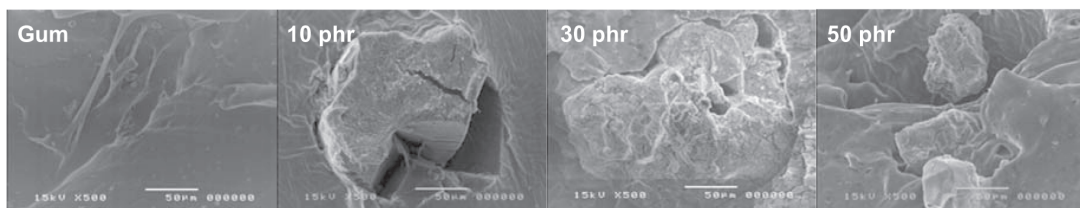
รูปที่ 9 ความทนทานต่อแรงดึง (A) ระยะยืด ณ จุดขาด (B) ความแข็ง (C) และการเสียรูปหลังการกด (D) ของ ENR/SAP WSR ที่แปรปริมาณ SAP



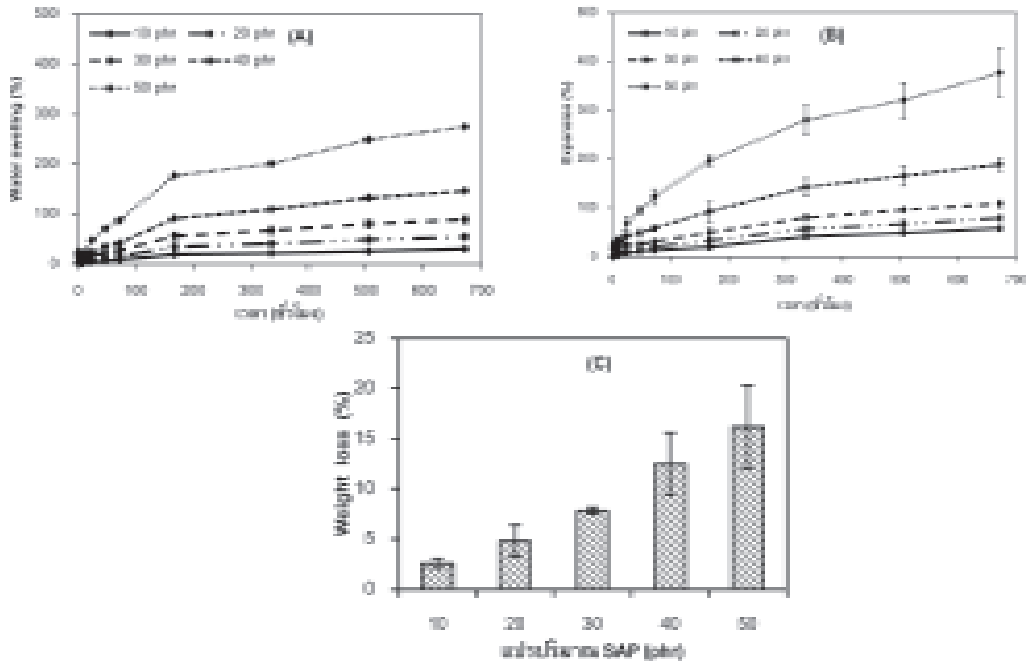
รูปที่ 9 (C) แสดงสมบัติความแข็งแรงของ ENR/SAP WSR ที่แปรปริมาณ SAP พบว่า การเพิ่มปริมาณ SAP ส่งผลให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคของ SAP เกิดการกระจายตัวในเมทริกซ์ ENR มากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณ SAP มากกว่า 20 phr ส่งผลให้ความแข็งแรงมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการเติม SAP ในปริมาณมากทำให้พันธะการเชื่อมขวางนั้นเกิดขึ้นได้น้อย เป็นผลมาจาก SAP ดูดซับสารคงรูปไว้ สันนิษฐานผลจากค่า  $M_H-M_L$  ซึ่งแสดงดังตารางที่ 3 และผลจากการเกาะกลุ่มกันของอนุภาค SAP ส่งผลให้เกิดจุดบกพร่องในชิ้นทดสอบ ทำให้ผลของความแข็งแรงของ ENR/SAP WSR ลดลงด้วย

รูปที่ 9 (D) แสดงการเสียรูปหลังการกดของ ENR/SAP WSR ที่แปรปริมาณ SAP พบว่า การเติม SAP ที่ 10 phr มีการเสียรูปหลังการกดที่สูงกว่า Gum เนื่องจากการเติม SAP ทำให้ความหนาแน่นของพันธะการเชื่อมขวางลดลงในช่วงการขึ้นรูป แต่ในระหว่างการทดสอบการเสียรูปหลังการกดที่มีการบ่มแรงที่สูงกว่าอุณหภูมิห้องอาจทำให้สารคงรูปที่ถูกดูดซับโดย SAP สามารถเกิดการคงรูปโมเลกุล ENR ที่ถูกกดเอาไว้ได้เพิ่มขึ้น การเกิดการเชื่อมขวางเพิ่มขึ้นจากเติมในระหว่างการทดสอบการเสียรูปหลังการกด จึงส่งผลให้ความสามารถในการคืนตัวกลับลดลง (การเสียรูปเกิดมากขึ้น) ยิ่งไปกว่านั้น เมื่อเพิ่มปริมาณ SAP ที่ 20, 30, 40, และ 50 phr ตามลำดับ ส่งผลให้ค่าการเสียรูปหลังการกดมีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจากสมบัติความยืดหยุ่นของ ENR/SAP WSR ลดลงตามปริมาณ SAP ที่เพิ่มขึ้น เพราะอนุภาค SAP เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดการเชื่อมขวางด้วยพันธะโคเวเลนต์บางส่วน เพื่อให้สามารถกักเก็บน้ำในโครงสร้างของ SAP ไว้ได้ จากปัจจัยเหล่านี้ทำให้การคืนตัวหลังการกดต่ำ [17] แสดงให้เห็นว่า SAP มีผลต่อสมบัติการเสียรูปหลังการกด

ลักษณะวิทยาของ ENR/SAP WSR ที่แปรปริมาณ SAP 10, 30, 50 phr แสดงในรูปที่ 10 พบว่า เมื่อเติม SAP ที่ 10 phr อนุภาค SAP สามารถกระจายในเมทริกซ์และมีความเข้ากับ ENR ได้ดี แต่เมื่อเพิ่มปริมาณ SAP ที่ 30 phr และ 50 phr ตามลำดับ ลักษณะวิทยาของ SAP/ENR WSR แสดงอันตรกิริยาระหว่าง SAP กับ SAP ที่สูงกว่าอันตรกิริยาระหว่าง SAP กับ ENR จึงทำให้เกิดการเกาะกลุ่มของอนุภาค SAP ที่ใหญ่ขึ้น ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของ ENR/SAP WSR เช่น ความทนทานต่อแรงดึง ระยะยืด ณ จุดขาด ความแข็งแรง และการเสียรูปหลังการกดด้วยลง [18]



รูปที่ 10 ลักษณะวิทยาของ ENR/SAP WSR ที่แปรปริมาณ SAP

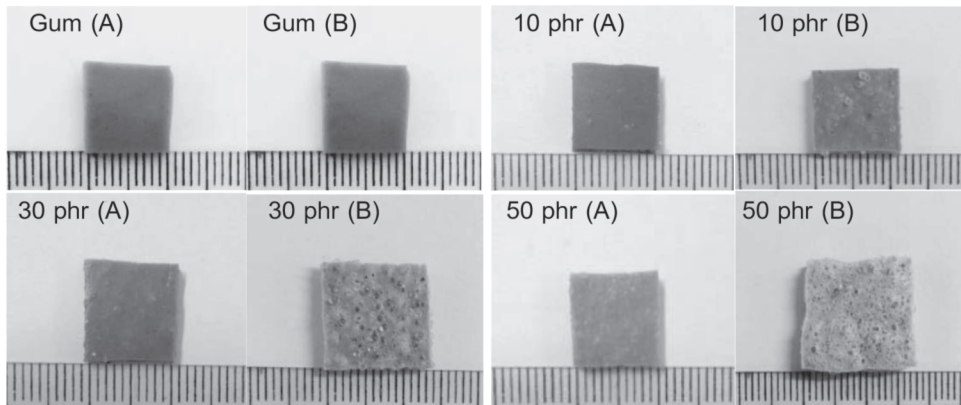


รูปที่ 11 การรวมพอง (A) การขยายตัวในน้ำ (B) และการสูญเสียน้ำหนัก (C) ของ ENR/SAP WSR ที่แปรปริมาณ SAP

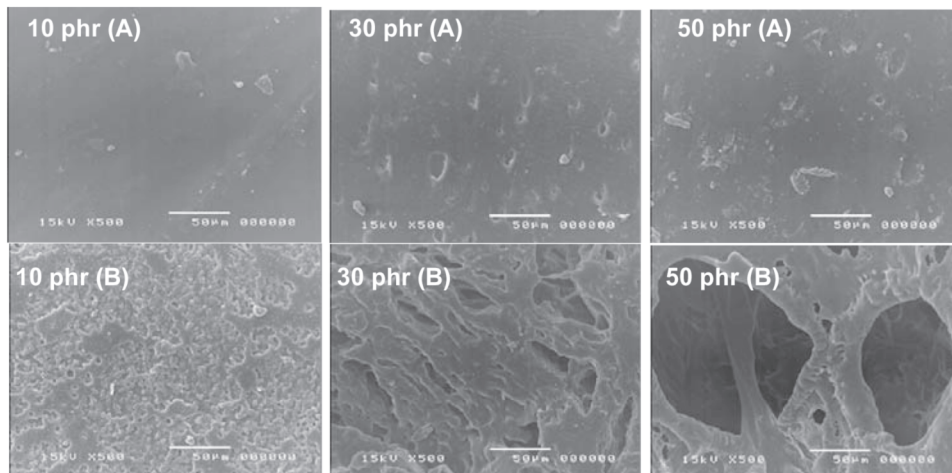
## 2.2 สมบัติการรวมพองและการขยายตัวในน้ำของ ENR/SAP WSR ที่แปรปริมาณ SAP

รูปที่ 11 (A) และ (B) แสดงการรวมพองและการขยายตัวในน้ำของ ENR/SAP WSR ที่แปรปริมาณ SAP พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ SAP ทำให้การรวมพองและการขยายตัวในน้ำของ ENR/SAP WSR สูงขึ้น โดย ENR/SAP WSR ที่มี SAP 50 phr ให้การรวมพองที่ 274% และอัตราการขยายตัวที่ 37.6% เนื่องจาก SAP สามารถกักเก็บโมเลกุลของน้ำไว้ภายในโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นโครงร่างตาข่ายของพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำ [18] จึงทำให้หลังการแช่น้ำของ ENR/SAP WSR มีการรวมพองและการขยายตัวสูง แสดงดังรูปที่ 12 และยืนยันผลด้วยสัณฐานวิทยาแสดงดังรูปที่ 13 โดยสัณฐานวิทยาพื้นผิวหลังแช่น้ำของ ENR/SAP WSR ที่แปรปริมาณ SAP ที่ 10, 30 และ 50 phr มีขนาดของโพรงเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ SAP แต่อย่างไรก็ตาม การแปรปริมาณ SAP ที่ 10, 30 และ 50 phr ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักสูงขึ้น ตามปริมาณของ SAP ที่เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน แสดงดังรูปที่ 11 (C) โดย ENR/SAP WSR ที่ SAP 50 phr มีการสูญเสียน้ำหนักสูงสุดที่ 16.18% เนื่องจากเมื่อแช่ ENR/SAP WSR ในน้ำเป็นเวลานาน อนุภาค SAP ที่อยู่บริเวณผิวของ ENR/SAP WSR จะหลุดออกมาจากเมทริกซ์ ENR เมื่อเติม SAP ลงไปในปริมาณเพิ่มมากขึ้นทำให้เปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักสูงขึ้นตามลำดับ [15, 19]





**รูปที่ 12** ลักษณะการขยายตัวในน้ำของ ENR/SAP WSR ที่แปรปริมาณ SAP ก่อน (A) และหลัง (B) การแช่น้ำ



**รูปที่ 13** สัณฐานวิทยาของ ENR/SAP WSR ที่แปรปริมาณ SAP ก่อน (A) และหลัง (B) แช่น้ำ

สัณฐานวิทยาของ ENR/SAP WSR ที่แปรปริมาณ SAP 10, 30 และ 50 phr ก่อนและหลังแช่น้ำแสดงดังรูปที่ 13 พบว่า สัณฐานวิทยาก่อนแช่น้ำของ ENR/SAP WSR ที่ปริมาณ SAP 10 phr มีพื้นผิวที่เรียบ เนื่องจาก SAP มีการกระจายตัวที่ดีกว่า ENR/SAP WSR ที่มี SAP 30 และ 50 phr ซึ่งมีพื้นผิวที่ขรุขระ เป็นผลมาจากการเกาะกลุ่มของอนุภาค SAP สำหรับสัณฐานวิทยาพื้นผิวของ ENR/SAP WSR หลังแช่น้ำ พบว่า ขนาดของโพรงเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ SAP เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณ SAP มากขึ้น ความสามารถในการดูดซึมน้ำและการขยายตัวในน้ำของ ENR/SAP WSR เพิ่มขึ้นตามไปด้วย จึงทำให้มีปริมาณโพรงซึ่งเป็นช่องทางการซึมของโมเลกุลน้ำเข้าสู่ภายในโครงสร้าง ENR/SAP WSR แต่อย่างไรก็ตาม สาเหตุที่ ENR/SAP WSR ที่ SAP 50 phr จะมีขนาดโพรงที่ใหญ่มาก เนื่องมาจากการเกาะกลุ่มกันของอนุภาค SAP [7, 20] เมื่ออนุภาค SAP หลุดออกหลังจากแช่น้ำ จึงเกิดโพรงขนาดใหญ่ตามขนาดของการกลุ่มก้อนของอนุภาค SAP ที่เกาะกันนั่นเอง

## สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการเตรียมยางขมมน้ำจากยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (ENR) และพอลิเมอร์ดูดซึมน้ำได้มาก (SAP) (ENR/SAP WSR) โดยใช้พอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) เป็นสารช่วยให้ SAP กระจายตัวในเมทริกซ์ ENR ได้ดีขึ้น โดยตัวแปรที่ศึกษาคือ ปริมาณของ PEG และ SAP ที่มีต่อสมบัติของ ENR/SAP WSR พบว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณ PEG มีผลทำให้สมบัติแรงบิดต่ำสุด แรงบิดสูงสุด และผลต่างของแรงบิดมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณ PEG ที่เพิ่มขึ้น แต่ไม่มีผลต่อระยะเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูปและเวลาในการคงรูปยางคอมปาวด์ ENR/SAP WSR รวมทั้ง การเติม PEG ในการเตรียม ENR/SAP WSR ช่วยให้มีสมบัติความทนทานต่อแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาด ของ ENR/SAP WSR ดีขึ้น แต่การเพิ่มขึ้นของ PEG ช่วยให้การดูดซึมน้ำและการขยายตัวในน้ำของ ENR/SAP WSR เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ในขณะที่ การเพิ่มขึ้นของปริมาณ SAP ทำให้เกิดการหน่วงการคงรูปและส่งผลกระทบต่อ การดูดซึมน้ำและการขยายตัวในน้ำให้กับ ENR/SAP WSR สูงขึ้น โดยปริมาณ SAP ที่ 50 phr ให้การบวมพองที่ 274% และการขยายตัวในน้ำที่ 376% แต่อย่างไรก็ตาม ปริมาณ SAP ที่เพิ่มขึ้น มีผลให้สมบัติเชิงกลของ ENR/SAP WSR ต่ำลงตามปริมาณ SAP ที่เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับเงินสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ในโครงการวิจัยเรื่อง “การเตรียมยางขมมน้ำจากยางธรรมชาติ” RDG5750106 และขอขอบคุณ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี สำหรับการอำนวยความสะดวกในการทำวิจัยในครั้งนี้

## เอกสารอ้างอิง

1. Ji, C., Song, S. S., Zhang, L. Q. and Wu, Y. P. 2011. The Role of Dicumyl Peroxide in the Preparation of Chloroprene Rubber/Starch/Sodium Acrylate Water-swallowable Composites. *Carbohydrate Polymers* 86: 581-586.
2. Ren, W., Zhang, Z., Peng, Z. and Zhang, Y. 2004. Investigation on the Water-swelling Properties of Chlorinated Polyethylene Modified by in situ Formed Sodium Acrylate. *Polymer Testing* 23: 809-816.
3. Choi, S. S. and Ha, S. H. 2010. Water Swelling Behaviors of Silica-reinforced NBR Composites in Deionized Water and Salt Solution. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 16: 238-242.
4. Zhang, S., Li, X., Chen, Y., Xia, Y. and Jiao, S. 1998. Water State in SBR Based Water Swelling Rubber. *Chinese Journal of Polymer Science* 16(4): 345-350.
5. Dehbari, N. and Tang, Y. 2015. Water Swallowable Rubber Composites: An Update Review from Preparation to Properties. *Journal of Applied Polymer Science*. 132: 1-11.

6. Saijun, D., Nakason, C., Kaesaman, A. and Klinpituksa, P. 2009. Water Absorbtion and Mechanical Properties of Water-Swellable Natural Rubber. *Songklanakarin Journal of Science Technology* 5: 561-565.
7. Nakason, C., Nakaramontri, Y., Kaesaman, A., Kangwanskpamonkon, W. and Kiatkamjornwong, S. 2013. Synthesis and Characterization of Water Swellable Rubber Vulcanizates. *European Polymer Journal* 49: 1098-1110.
8. Carretero-González, J., Valentín, J. L., Arroyo, M., Saalwächter, K. and Lopez-Manchado, M. A. 2008. Natural Rubber/Clay Nanocomposites: Influence of Poly(Ethylene Glycol) on the Silicate Dispersion and Local Chain Order of Rubber Network. *European Polymer Journal* 44: 3493-3500.
9. Kumar, P., Choonara, Y. E., du Toit, L. C., Modi, G., Naidoo, D and Pillay, V. 2012. Novel High-Viscosity Polyacrylamidated Chitosan for Neural Tissue Engineering: Fabrication of Anisotropic Neuro durable Scaffold via Molecular Disposition of Persulfate-Mediated Polymer Slicing and Complexation. *International Journal of Molecular Sciecnes* 13: 13966-13984.
10. Zhu, G., Liu, J., Yin, J., Li, Z., Ren, B., Sun, Y., Wan, P. and Liu, Y. 2016. Functionalized Polyacrylamide by Xanthate for Cr (VI) Removal from Aqueous Solution. *Chemical Engineering Journal* 288: 390-398.
11. Ahmad, H. S., Ismail, H. and Rashid, A. A. 2016. Tensile Properties and Morphology of Epoxidized Natural Rubber/Recycled Acrylonitrile-Butadiene Rubber (ENR 50/NBRr) Blends. *Procedia Chemistry* 19: 359-365.
12. Tangudom, P., Thongsang, S., Sombatsompop, N. 2014. Cure and Mechanical Properties and Abrasive Wear Behavior of Natural Rubber, Styrene-butadiene Rubber and Their Blends Reinforced with Silica Hybrid Fillers. *Materials and Design*. 53: 856-864.
13. Da Costa, H. M., Abrantes, T. A. A., Nunes, R. C. R., Visconte, L. L. Y. and Furtado, C. R. G. Loos, Design and Analysis of Experiments in Silica Filled Natural Rubber Compounds. Effect of Castor Oil. *Polymer Testing*. 22: 769-777.
14. Ortega-Toro, R., Munoz, A., Talens, P. and Chiralt, A. 2016. Improvement of Properties of Glycerol Plasticized Starch Films by Blending with a Low Ratio of Polycaprolactone and/or Polyethylene Glycol. *Food Hydrocolloids* 56: 9-19.
15. Messer, C. N. P. F and Davies, H. A. 2008. Application of Polyethylene Glycol and Polymethyl Methacrylate as a Binder for Powder Injection Moulding of Hardmetals. *Chiang Mai Journal of Science* 35: 188-195.

16. Shukla, N. B. and Madras, G. 2011. Reversible Swelling/Deswelling Characteristics of Ethylene Glycol Dimethacrylate Cross-Linked Poly(acrylic acid-co-sodium acrylate co-acrylamide) Superabsorbents. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 50: 10918-10927.
17. Yu, Y., Carvalho, L., De Andrade, C., Fang, L., Ma, J., Zhang, W. and Tang, Y. 2015. Graphene Oxide and Hyperbranched Polymer-toughened Hydrogels with Improved Absorption Properties and Durability. *Journal of Materials Science* 50: 3457-3466.
18. Jafari, H. A., Kazemian, A., Rahimi, M., Yahia, A. 2016. Effects of Pre-Soaked Super Absorbent Polymers on Fresh and Hardened Properties of Self-consolidating Lightweight Concrete. *Construction and Building Materials* 113: 215-220.
19. Kabiri, K., Omidian, H., Hashemi, S. A., Zohuriaan-Mehr, M. J. 2003. Synthesis of Fast-Swelling Superabsorbent Hydrogels: Effect of Crosslinker Type and Concentration on Porosity and Absorption Rate. *European Polymer Journal* 39: 1341-1348.
20. ชัยวุฒิ วัชจิ่ง. 2558. การปรับปรุงสมบัติไฮโดรฟิลิกของยางธรรมชาติ: การเตรียม และการวิเคราะห์. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มทร. รัษฎบุรี* 5(2): 1-16.

ได้รับบทความวันที่ 5 กรกฎาคม 2559

ยอมรับตีพิมพ์วันที่ 19 ตุลาคม 2559

