

การเตรียมยางบวมน้ำจากยางธรรมชาติกราฟต์ด้วยโซเดียมอะคริเลต

Preparation of Water Swellable Rubber from Sodium Acrylate Grafted Natural Rubber

เสาวลักษณ์ บุญยอด* และชัยวุฒิ วัตจิ่ง

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ตำบลเมืองศรีไค อำเภวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี 34190

Saowaluk Boonyod* and Chaiwute Vudjung

Department of Chemistry, Faculty of Science, Ubon Ratchathani University,
Mueang Si Khai, Warin Chamrap, Ubon Ratchathani 34190

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติยางธรรมชาติ (NR) กราฟต์โคพอลิเมอร์โซเดียมอะคริเลต (NaAA) เตรียมโดยใช้โปแตสเซียมเปอร์ซัลเฟต (KPS) เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา ได้เป็น NR กราฟต์ด้วย NaAA (NR-g-NaAA) โดยแปรปริมาณ KPS และ NaAA ที่ 1-3 และ 20-60 phr ตามลำดับ ทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์โซเดียมอะคริเลตภายใต้สภาวะไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบว่าสูตรการสังเคราะห์ที่เหมาะสมที่สุด คือ การใช้ปริมาณ KPS ที่ 2 phr และ NaAA ที่ 40 phr ให้ผลของกราฟต์ดีพารามิเตอร์และประสิทธิภาพการกราฟต์ที่ให้ผลมีแนวโน้มสูงที่สุด ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค ATR FT-IR พบหมู่ $-COO^-$ ของ NaAA ตำแหน่งเลขคลื่นที่ 1680 cm^{-1} แสดงให้เห็นว่าเกิดการกราฟต์ NaAA ลงบน NR จากนั้นนำมาเตรียมเป็น NR-g-NaAA เชื่อมโยง โดยใช้ไดคิวมีลเปอร์ออกไซด์ (dicumyl peroxide, DCP) เพื่อใช้เป็นสารเชื่อมโยง ส่งผลให้ NR-g-NaAA มีสมบัติการดูดซึมน้ำได้ดีที่สุดประมาณ 130 เปอร์เซ็นต์ ภายในเวลา 720 ชั่วโมง จากการทดลองในครั้งนี้ได้ผลของไฮโดรเจลที่เตรียมจากการกราฟต์ แสดงให้เห็นว่ามีแนวโน้มของหมู่ชอบน้ำในโครงสร้างไฮโดรเจลสูงที่สุด ซึ่งส่งผลให้เกิดการดูดน้ำได้มากที่สุด สำหรับการประยุกต์ใช้ NR-g-NaAA ในการเตรียมเป็นยางบวมน้ำและพบว่ายางบวมน้ำมีสมบัติเชิงกลที่ดีและสามารถขยายตัวในน้ำได้

คำสำคัญ: ยางบวมน้ำ; โซเดียมอะคริเลต; ยางธรรมชาติ; การดูดซึมน้ำ

Abstract

The aim of this research was to study the water absorption and mechanical properties of hydrogel, obtained from grafted sodium acrylate (NaAA) onto natural rubber (NR) via graft copolymerization reaction at which this sample was identified as NR-g-NaAA. The reaction was

carried out by varying potassium persulfate (KPS) acted as initiator and NaAA used as monomer at 1-3 and 20-60 phr, respectively under nitrogen atmosphere at 70 °C for 4 h. The grafting efficiency was characterized by attenuated total Fourier transform infrared spectroscopy (ATR-FTIR). It was found that the absorption band at 1680 cm^{-1} was detected and attributed to $-\text{COO}^-$ stretching of NaAA. In addition an optimum grafting efficiency was obtained for 2 phr of KPS and 40 phr of NaAA. These samples were then cured by dicumyl peroxide (DCP) used as a cross-linking agent for water absorption and mechanical experiment. It was demonstrated that the greatest water absorption was enhanced at 130 % for 720 h and good mechanical properties of water swellable rubber (WSR) was also accompanied. It could be claimed that the increase in hydrophilic property resulting in improved wettability and mechanical properties of water swellable rubber (WSR).

Keywords: water swellable; sodium acrylate; natural rubber; water absorption

1. บทนำ

Super absorbent polymer (SAP) เป็นวัสดุอินทรีย์ที่มีโครงสร้างเชื่อมโยงใน 3 มิติ เพียงเล็กน้อยส่งผลให้การบวมพองเกิดขึ้นอย่างมหาศาลในสารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย ซึ่งทางการค้าจะนำ SAP มาเป็นวัตถุดิบในการผลิตเป็นผ้าอ้อมเด็กผลิตภัณฑ์ผ้าอนามัย และใช้เป็นสารเติมแต่งในการเตรียมยางบวมน้ำ (water swellable rubber, WSR) โดย SAP สามารถดูดซึมน้ำได้มากถึงร้อยละ 1,000-100,00 [1] โดย SAP ที่ใช้เป็นอนุพันธ์ของเกลือของกรดอะคริลิก (acrylic acid salt) หรือโคพอลิเมอร์ของเกลืออะคริลิกกับอะคริลาไมด์ เช่น starch graft, cellulose grafts, lithium acrylate และโซเดียมอะคริเลต [2,3] และจากงานวิจัยที่มีการนำ NaAA และกรดอะคริลิกมาใช้เตรียมเป็นวัสดุดูดซึมน้ำและไฮโดรเจล อาทิ Yong และคณะ [4] เตรียมวัสดุดูดซึมน้ำโดยการกราฟต์ carboxymethyl cellulose ด้วยกรดอะคริลิกและ inorganic gel พบว่าอัตราการดูดซึมสารละลายโซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้นจาก 64.5 กรัม/กรัม เป็น 103.4 กรัม/กรัม ในขณะที่การดูดซึมเต็มที่เร็วขึ้นจาก 3 ชั่วโมง เป็น 1.5 ชั่วโมง และ Okay และ

คณะ [5] พยากรณ์ความสมดุลของการบวมพองของทฤษฎี Flory-Rehner เปรียบเทียบกับข้อมูลจากการทดลองการบวมพองในน้ำและสารละลายเกลือ (NaCl) ของไฮโดรเจล poly(acrylamide-co-sodium acrylate) โดยใช้ปริมาณของสารเชื่อมโยง คือ *N,N'*-methylenebis (acrylamide) คงที่ พบว่าสัดส่วนการบวมพองของไฮโดรเจลเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อสัดส่วนโมลของ NaAA เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ Karadag และคณะ [6] เตรียมไฮโดรเจลจากอะคริลาไมด์/NaAA โดยการพอลิเมอไรเซชันผ่านอนุมูลอิสระ ใช้สารเชื่อมโยงในการพอลิเมอไรเซชันชนิดต่าง ๆ พบว่าการบวมพองของไฮโดรเจล acrylamide-NaAA จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ NaAA ที่เพิ่มขึ้นอีกด้วย ดังนั้นการใช้กรดอะคริลิกและ NaAA มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซึมน้ำ โดยเตรียมกราฟต์โคพอลิเมอร์โดยการเพิ่มปริมาณของกรดอะคริลิกและ NaAA ที่ใช้ส่งผลให้สมบัติการดูดซึมน้ำของกราฟต์โคพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น

WSR เป็นวัสดุที่สามารถเกิดการบวมพองเมื่ออยู่ในน้ำ จึงสามารถหยุดการไหลและการซึมผ่านของน้ำ ซึ่งมีการนำ WSR มาใช้ในงานก่อสร้างทางโยธาวิศวกรรมการก่อสร้างใต้ดิน โดยวัสดุที่ใช้ในการเตรียม

WSR จะเป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติเชิงกลที่ดี แต่ไม่สามารถบวมพองน้ำ ดังนั้นจะต้องผสมกับสารที่ช่วยในการบวมพองน้ำ คือ SAP เพื่อให้ได้ WSR ที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีในขณะที่การบวมพองสูงขึ้นด้วย ซึ่งจากงานวิจัยของ ชัยวุฒิ และคณะ [7] ได้ศึกษาผลของปริมาณ SAP และพอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของ WSR ที่เตรียมจากยางธรรมชาติ อีพอกไซด์ พบว่าการเพิ่มปริมาณ SAP ช่วยให้การบวมพองน้ำและการขยายตัวในน้ำสูงขึ้น โดยปริมาณ SAP ที่ 50 phr ให้การบวมพองที่ร้อยละ 274 และร้อยละการขยายตัวในน้ำที่ 376 อย่างไรก็ตาม การเพิ่มปริมาณ SAP กลับส่งผลให้สมบัติเชิงกลด้อยลงและเมื่อแช่ในน้ำเป็นเวลานานขึ้น อนุภาค SAP ที่บริเวณพื้นผิวของ WSR เกิดการหลุดออกจากเมทริกซ์ ENR ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักสูงขึ้น จากปัญหาดังกล่าว ถ้าสามารถเตรียม NR ที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีและสามารถดูดซึมน้ำ พร้อมทั้งขยายตัวในน้ำได้ จะสามารถใช้ NR เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิต WSR โดยไม่จำเป็นต้องใช้ SAP จึงมีงานวิจัยที่มีการนำ NR ที่มีความไม่ชอบน้ำ (hydrophobic polymer) มาใช้เตรียมเป็น พอลิเมอร์ที่ชอบน้ำ (hydrophilic polymer) โดยการเติมหมู่ที่ชอบน้ำให้กับ NR ได้แก่ การกราฟต์โคพอลิเมอร์เซชัน หรือการเปลี่ยนจาก ENR ให้กลายเป็นหมู่ไฮดรอกซิล เป็นต้น ซึ่งมีความพยายามเติมหมู่ชอบน้ำให้กับ NR มากมาย เช่น S-N. Gan และคณะ [8] ศึกษาความเป็นไปได้ในการเกิดหมู่ไฮดรอกซิลและหมู่คาบอร์นิล โดยการทำปฏิกิริยาของ ENR ที่ละลายในโทลูอีนซึ่งเป็นของผสมของเตตระไฮโดรฟูแรน (tetrahydrofuran) ที่มีน้ำและกรดอะซิติก ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งปริมาณการเปลี่ยนแปลงจากอีพอกไซด์ไปเป็น diol เพิ่มขึ้นเป็น 23 โมลเปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้เวลา 24 ชั่วโมง Wongsa และคณะ [9] ศึกษาพฤติกรรมการบวมพองและการ

เสื่อมสภาพทางชีวภาพของไฮโดรเจลที่เตรียมจาก NR / แป้ง/พอลิอะคริลาไมด์ โดยใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (maleic anhydride) เป็นสารเชื่อมโยงด้วยไมโครเวฟ พบว่าเมื่อปริมาณของ NR เพิ่มขึ้นสัดส่วนการบวมพองของไฮโดรเจลลดลง Khongtong และคณะ [1] ดัดแปรโครงสร้าง NR โดยการกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็นสารเคมีที่สามารถดูดซึมน้ำได้ พบว่า NR กราฟต์ดังกล่าวสามารถดูดซึมน้ำได้ถึง 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แต่ต้องใช้เวลาในการแช่นานถึง 30 วัน

จากงานวิจัยข้างต้นจะเห็นได้ว่าการเตรียม NR เป็นพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำโดยการเติมหมู่ชอบน้ำให้กับโมเลกุลของ NR นั้น ความสามารถในการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชัน เช่น การเปลี่ยนหมู่อีพอกไซด์กลายเป็นหมู่ diol หรือแม้แต่การเติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ เกิดขึ้นได้น้อยมาก ทำให้ประสิทธิภาพในการใช้งาน เช่น อัตราเร็วในการดูดซึมน้ำน้อยตามไปด้วย สำหรับเทคนิคการกราฟต์ NR ด้วยไวนิลมอนอเมอร์หรือมอนอเมอร์ชนิดอื่น ๆ เพื่อช่วยปรับปรุงสมบัติบางประการของ NR ได้แก่ สไตรีน เมทิลเมทาคริเลต มาเลอิกแอนไฮไดรด์ เป็นต้น ซึ่งการกราฟต์ด้วยมอนอเมอร์เหล่านี้เพื่อช่วยเพิ่มสมบัติการเข้ากันระหว่าง NR และพลาสติก หรือใช้เป็นสารปรับปรุงแรงกระแทก (Impact modifier) สำหรับพลาสติกที่ต้องการปรับปรุงสมบัติความเปราะ ได้แก่ พอลิเมทิลเมทาคริเลต พอลิสไตรีน หรือพอลิไวนิลคลอไรด์ เป็นต้น ดังนั้นการดัดแปรโครงสร้างทางเคมีของ NR ด้วยการกราฟต์มอนอเมอร์ที่เหมาะสมในการเตรียมพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำ จึงมีความเป็นไปได้

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาเตรียม WSR โดยนำโซเดียมอะคริเลต ซึ่งเป็นเกลือของกรดอะคริลิกมอนอเมอร์ที่ใช้ในการเตรียมเป็น SAP มาใช้ในการเติมหมู่ชอบน้ำให้กับ NR ด้วยการกราฟต์ NaAA บนสายโซ่โมเลกุล NR เพื่อเพิ่มอัตราเร็วและความสามารถในการ

ดูดซึมน้ำให้กับ NR โดยใช้การกราฟต์ NaAA บนสายโซ่ NR ในสถานะน้ำยาง จากนั้นเตรียมเป็น WSR ซึ่งส่งผลทำให้ได้ WSR ที่มีการขยายตัวในน้ำสูงและมีสมบัติเชิงกลที่ดีด้วย โดยไม่จำเป็นต้องใช้ SAP

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 การเตรียม NR กราฟต์ NaAA

เตรียม NR กราฟต์ NaAA โดยนำน้ำยางชั้นชนิดแอมโมเนียสูง (high ammonia natural rubber latex concentrate ปริมาณเนื้อยางแห้งร้อยละ 60 จากบริษัท เคมีคอลแอนด์แมททีเรียลส์ จำกัด) ปรับสภาพความเป็นกรดต่าง ด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (potassium hydroxide, KOH จากบริษัท Laboratory Reagents & Fine Chemicals จำกัด) และเติมโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (sodium dodecyl sulphate, SDS จากบริษัท Laboratory Reagents & Fine Chemicals จำกัด) ใช้เป็นสารลดแรงตึงผิว แล้วผ่านแก๊สไนโตรเจน (N₂) เป็นเวลา 15 นาที เพื่อให้การทำปฏิกิริยาเกิดในระบบปิดที่ปราศจากออกซิเจน เติมกรดโอเลอิก (oleic acid จากบริษัท Panreac Quimica S.A.U. จำกัด) และสารริเริ่มปฏิกิริยาโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต (potassium persulfate, K₂S₂O₈ (KPS) จากบริษัท Laboratory Reagents & Fine Chemicals จำกัด) ตามลำดับ แล้วให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เติมโซเดียมอะคริเลต (sodium acrylate, NaAA) โดยแปรปริมาณ NaAA และ KPS ที่เวลาในการทำปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์เซชัน 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นตกตะกอนด้วยเมทานอล ทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ได้เป็นยางธรรมชาติกราฟต์ด้วยโซเดียมอะคริเลต (NR-g-NaAA) โดยปริมาณของสารเคมีที่ใช้ในการเตรียม NR-g-NaAA แสดงดังตารางที่ 1

2.2 ศึกษาสมบัติของ NR-g-NaAA

2.2.1 เอกลักษณะโครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิคแอทเทนนูเลตโททอลรีเฟล็กแตนซ์ (attenuated total reflectance) นำขึ้นตัวอย่างวางบน window cell กดขึ้นตัวอย่างให้แนบขึ้นตัวอย่างกับแท่นทดสอบมากที่สุด จากนั้นเปิดโปรแกรมเพื่อทดสอบโดยใช้เทคนิค ATR วัดการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดในช่วงความยาวคลื่น 4000-700 cm⁻¹

ตารางที่ 1 ปริมาณของสารเคมีที่ใช้ในการเตรียม NR-g-NaAA

ส่วนผสม	ปริมาณ (phr)
60 % HA Latex	100
water	200
Potassium hydroxide	1
Sodium dodecyl sulphate	1
Oleic acid	10
KPS	1, 2, 3
NaAA	20, 30, 40, 50, 60

phr = ส่วนในร้อยละโดยน้ำหนักของยาง

2.2.2 สมบัติการกราฟต์ NR-g-NaAA ด้วยเทคนิคการสกัดด้วยตัวทำละลาย (Soxhlet extraction) [10,11] นำ NR-g-NaAA ที่แห้ง ประมาณ 3 กรัม ใส่ลงใน extraction timble โดยสกัดยางธรรมชาติและโพลิเมอร์ของพอลิโซเดียมอะคริเลต [poly (sodium acrylate), poly NaAA] ด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์ (petroleum ether) และน้ำกลั่น ตามลำดับเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้ NR-g-NaAA บริสุทธิ์ หลังจากนั้นอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส โดยสามารถคำนวณหาค่าต่าง ๆ ได้ดังนี้

- ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของมอนอเมอร์ (% total conversio) = $[(W_a - W_0) / W_n] \times 100$... (1) เมื่อ W_a คือ น้ำหนัก NR-g-NaAA หลังทำ

ปฏิกิริยากราฟต์, W_0 คือ น้ำหนักแห้ง NR ก่อนทำปฏิกิริยากราฟต์ และ W_n คือ น้ำหนัก NaAA ที่ใช้ในปฏิกิริยากราฟต์

- ร้อยละยางธรรมชาติที่ไม่เกิดปฏิกิริยาหรือยางธรรมชาติอิสระ (% free NR) = $[(W_s - W_p)/W_s] \times 100 \dots (2)$ เมื่อ W_s คือ น้ำหนัก NR-g-NaAA เริ่มต้น และ W_p น้ำหนัก NR-g-NaAA หลังสกัดด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์

- ร้อยละโฮโมพอลิเมอร์อิสระ (free homopolymer) = $[(W_{p1} - W_{w1})/W_{p1}] \times 100 \dots (3)$ เมื่อ W_{p1} คือ น้ำหนัก NR-g-NaAA หลังสกัดด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์ และ W_{w1} คือ น้ำหนัก NR-g-NaAA หลังสกัดด้วยน้ำกลั่น

- ร้อยละ NR-g-NaAA หรือกราฟต์โคพอลิเมอร์ (grafting yield) = $[(W_{p1} - W_s)/W_s] \times 100 \dots (4)$ เมื่อ W_{p1} คือ น้ำหนัก NR-g-NaAA หลังสกัดด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์และ W_s คือ น้ำหนัก NR-g-NaAA เริ่มต้น

- ร้อยละประสิทธิภาพของปฏิกิริยาการกราฟต์ (grafting efficiency) = $(W_A)/W_M \times 100 \dots (5)$ เมื่อ W_A คือ น้ำหนัก NR-g-NaAA หลังปฏิกิริยาการกราฟต์ และ W_M คือ น้ำหนักมอนอเมอร์ที่นำมาทำปฏิกิริยากราฟต์

2.2.3 ศึกษาสมบัติการดูดซึมน้ำของ NR-g-NaAA นำ NR-g-NaAA ที่อบแห้งแล้ว ละลายในโทลูอีนและเติม DCP 0.25 phr เพื่อใช้เป็นสารเชื่อมโยงโมเลกุล NR-g-NaAA กวนจนกลายเป็นเนื้อเดียวกัน หลังจากนั้น ระบายโทลูอีนออกจากของผสมจนน้ำหนักคงที่ นำของผสมที่ได้ไปรีดด้วยเครื่องผสมสองลูกกลิ้ง (two roll mill) เป็นแผ่น จากนั้นอบในตู้อบลมร้อนด้วยอุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที ได้เป็น NR-g-NaAA เชื่อมโยง แล้วนำไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ ดังนี้

- สมบัติการดูดซึมน้ำ [12] เตรียมชิ้นตัวอย่างขนาดกว้าง $10 \times 10 \times 0.4$ มิลลิเมตร ซึ่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง แขนในน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร บันทึกน้ำหนักเป็นเวลา 720 ชั่วโมง คำนวณดังนี้ ร้อยละการดูดซึมน้ำ (% water absorption) = $(W_2 - W_1)/W_1 \times 100 \dots (6)$ เมื่อ W_1 คือ น้ำหนักของไฮโดรเจลก่อน และ W_2 คือ น้ำหนักของไฮโดรเจลหลังแช่น้ำ

- สันฐานวิทยา เตรียมชิ้นทดสอบด้วยการเคลือบทองบริเวณที่ต้องการศึกษาและทดสอบสันฐานวิทยาด้วยเครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคปี (scanning electron microscopy, SEM) ยี่ห้อ HITACHI รุ่น JEOL JEM 5410-LV

2.3 การเตรียม WSR จาก NR-g-NaAA

เตรียม WSR จาก NR-g-NaAA โดยการบดผสม NR-g-NaAA ด้วยเครื่องผสมแบบปิด (internal mixer) ชนิด Banbury mixer รุ่น FRN7.5G1S-4A ขนาด 1.2 ลิตร ใช้ Fill factor 0.75 ความเร็วโรเตอร์เท่ากับ 50 รอบ/นาที และผสมซิงค์ออกไซด์ (ZnO) กรดสเตียริก (stearic acid) *N*-cyclohexyl-2-benzothiazole sulfonamide (CBS) และกำมะถัน (sulphur) บนเครื่องผสมแบบเปิด (two-roll mill) มี fiction ratio 1 : 1.2 ได้ยางคอมปาวด์ของ NR-g-NaAA เก็บยางคอมปาวด์ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นทดสอบสมบัติการคงรูป (cure property) ของยางคอมปาวด์ด้วยเครื่องทดสอบเวลาการวัลคาไนซ์ของยาง (moving die rheometer, MDR) ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส และขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบกดอัด (compression mold) ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส โดยศึกษาสมบัติของ WSR ดังนี้

- การทดสอบความแข็ง (hardness) ด้วยเครื่อง Shore A durometer ตามมาตรฐาน JIS K6253 ขึ้น ทดสอบหนาประมาณ 6 มิลลิเมตร

- การทดสอบความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) ด้วย Tensile testing machine ตามมาตรฐาน JIS K6251 ใช้อัตราเร็วในการดึง 500±50 มิลลิเมตร/นาที ขึ้นทดสอบเป็นรูปดัมเบล กว้าง 6 มิลลิเมตร หนา 2.5 มิลลิเมตร

- ทดสอบการขยายตัว (expansion) เตรียมชิ้นทดสอบสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 10×10×2 มิลลิเมตร แช่ชิ้นทดสอบในน้ำกลั่นเป็นเวลา 28 วัน วัดความกว้าง ความยาว และความหนาด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์แบบดิจิตอล คำนวณการขยายตัวในน้ำด้วยสูตร ร้อยละการขยายตัวในน้ำ (%) = [(B-A)/A] × 100 ... (7) เมื่อ A คือ ปริมาตรชิ้นทดสอบก่อนแช่ และ B คือ ปริมาตรชิ้นทดสอบหลังแช่

ตารางที่ 2 สูตรการเตรียมยางคอมปาวด์สำหรับเตรียม WSR จาก NR-g-NaAA

ยางและสารเคมี	ปริมาณ (phr)
NR-g-NaAA	100.0
CaCO ₃	10.0
DCP	1.0
NaAA	20.0
ZDA (zinc diacrylate)	2.5
Sulphur	0.5
CBS	1.0
ZnO	3.0
Stearic acid	1.5

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

3.1 สมบัติ NR-g-NaAA

NR-g-NaAA เตรียมจากกระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบอิมัลชัน โดยมี NR เป็นสายโซ่โมเลกุลหลัก และเติมมอนอเมอร์ NaAA เป็นสายโซ่กิ่ง มี KPS เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา ซึ่งสมบัติการกราฟต์ของ NR-g-

NaAA เช่น ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของมอนอเมอร์ ร้อยละ NR ที่ไม่เกิดปฏิกิริยา ร้อยละไฮโปลิเมอร์อิสระ ร้อยละ NR-g-NaAA และร้อยละประสิทธิภาพของปฏิกิริยาการกราฟต์ สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยเทคนิคการสกัดด้วยตัวทำละลายและการเปรียบเทียบพีคที่เปลี่ยนแปลงด้วยเทคนิค ATR FT-IR

ตารางที่ 3 แสดงสมบัติการกราฟต์ของ NR-g-NaAA ที่แปรปริมาณ KPS และปริมาณ NaAA พบว่า เมื่อใช้ KPS ปริมาณ 2 phr ให้ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของมอนอเมอร์สูงสุด คือ ร้อยละ 72 เมื่อนำมาสกัดด้วยตัวทำละลาย พบว่าที่ KPS ปริมาณ 3 phr จะมีร้อยละไฮโปลิเมอร์อิสระมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่ร้อยละกราฟต์โคพอลิเมอร์ลดลง เนื่องจากการเพิ่มสารริเริ่มปฏิกิริยาจะกระตุ้นให้เกิดพอลิโซเดียมอะคริเลตได้มากกว่าเกิด NR-g-NaAA [13] เพราะมอนอเมอร์ NaAA มีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันเป็นไฮโปลิเมอร์ได้ดีกว่า

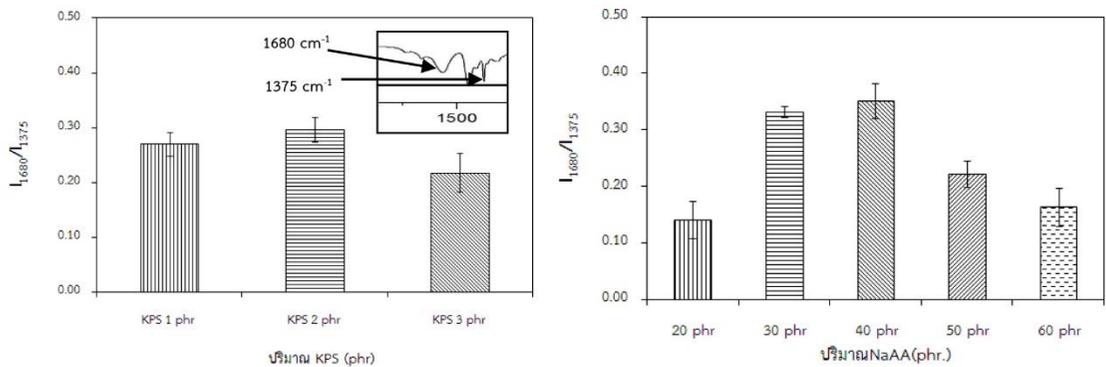
ส่วนผลการแปรปริมาณ NaAA ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยามีผลต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงของมอนอเมอร์ NaAA โดยร้อยละการเปลี่ยนแปลงของมอนอเมอร์เพิ่มขึ้นตามปริมาณ NaAA ที่เพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุด คือ ร้อยละ 72 ที่ปริมาณ NaAA 40 phr แต่เมื่อปริมาณ NaAA มากกว่า 40 phr ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของมอนอเมอร์ NaAA ลดลงแปรผกผันกับปริมาณ NaAA ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับร้อยละ NR-g-NaAA และร้อยละประสิทธิภาพของปฏิกิริยาการกราฟต์ที่การเพิ่มปริมาณ NaAA มากกว่า 40 phr จะส่งผลให้ร้อยละ NR-g-NaAA และร้อยละของประสิทธิภาพของปฏิกิริยาการกราฟต์ลดลง นอกจากนี้ ยังสอดคล้องกับผลการคำนวณหาปริมาณสัดส่วนการกราฟต์ของ NR-g-NaAA ด้วยเทคนิค ATR FT-IR โดยเทียบพีคของ CH₂ deformation (1375 cm⁻¹) กับพีคของ COO⁻ (1680 cm⁻¹) ที่สามารถบ่ง

บอกถึงการมีอยู่ของ NaAA [14] พบว่าปริมาณการกราฟต์เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของ NaAA เพิ่มขึ้นจนถึง 40 phr และเมื่อเพิ่มปริมาณของ NaAA เป็น 50 และ 60 phr ปริมาณการกราฟต์จะลดลง โดยการเพิ่มปริมาณ NaAA ที่มากกว่า 40 phr ส่งผลทำให้โอกาสที่ NaAA ทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันเป็นโฮโมพอลิไซเตียมอะครีเลตมากขึ้น (free homopolymer เพิ่มขึ้นตาม

ปริมาณ NaAA เพิ่มขึ้น) ทำให้โอกาสเกิดการกราฟต์บนสายโซ่โมเลกุลยางธรรมชาติลดลง เนื่องจากความหนาแน่นของมอนอเมอร์ NaAA ในระบบการกราฟต์มากเกินไป ทำให้มอนอเมอร์ NaAA ซึ่งมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันต่อกันมากกว่าทำปฏิกิริยาการกราฟต์บนสายโซ่โมเลกุลยางธรรมชาติจึงมีโอกาสเกิดเป็นโฮโมพอลิเมอร์เพิ่มมากขึ้น

ตารางที่ 3 สมบัติการกราฟต์ของ NR-g-NaAA ที่แปรปริมาณของ KPS และ NaAA

	ปริมาณ (phr)	Grafting parameter (%)				
		Total conversion	Free NR	Free homopolymer	Grafting yield	Grafting efficiency
KPS	1	67.24±7.41	16.24±9.09	13.12±5.14	75.82±6.05	24.71±5.63
	2	72.74±1.58	17.89±4.76	16.46±5.86	77.86±4.62	26.85±4.42
	3	68.84±7.15	21.18±2.95	17.79±7.52	69.78±6.73	21.70±7.48
NaAA	20	69.12±5.15	21.25±3.41	9.43±4.76	71.72±2.02	22.12±2.14
	30	71.72±2.11	12.62±5.48	14.10±4.15	73.58±5.25	26.53±5.62
	40	72.74±1.58	17.89±4.76	16.46±5.86	77.86±4.62	26.85±4.42
	50	67.43±4.78	22.15±3.57	17.47±4.50	64.07±3.59	21.32±2.58
	60	64.46±7.70	20.54±2.45	21.28±3.53	62.58±3.66	20.14±3.72



รูปที่ 1 สัดส่วนความหนาแน่นของ NR-g-NaAA ที่แปรปริมาณ KPS และ NaAA

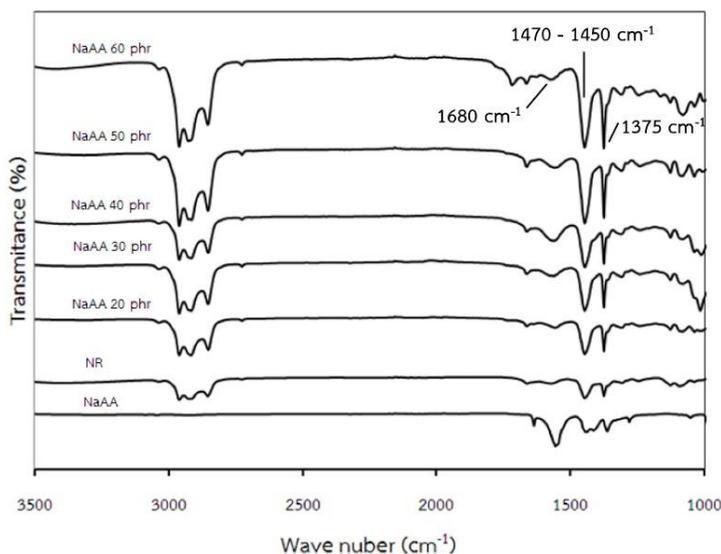
วิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของ NR, NaAA และ NR-g-NaAA ที่ปริมาณต่าง ๆ ด้วย ATR FT-IR ในช่วงความถี่คลื่น 4000-700 cm⁻¹ โดยแสดงผลการ

วิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของโมเลกุลของ NR และ NaAA ปรากฏการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันของ NR คือ ตำแหน่งเลขคลื่น 2962 cm⁻¹ แสดงถึง

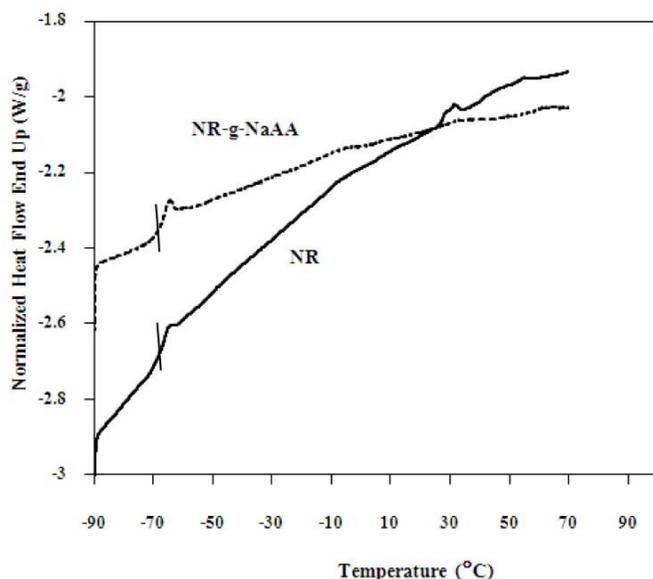
CH₃ stretching ตำแหน่งเลขคลื่น 2850 cm⁻¹ แสดงถึง CH₂ stretching ตำแหน่งเลขคลื่น 1665 cm⁻¹ แสดงถึง C=C stretching รวมทั้งตำแหน่งเลขคลื่น 1450, 1375, 1127 cm⁻¹ แสดงถึง CH₂ deformation, CH₃ deformation, C-H in plane bending และ =C-H plane bending ของ cis-1,4 ตามลำดับ [15, 16] และปรากฏการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของฟังก์ชันของ NaAA คือ ตำแหน่งเลขคลื่น 1651 cm⁻¹ แสดงถึง C-OH ตำแหน่งเลขคลื่น 1559 และ 1324 cm⁻¹ แสดงถึง COO⁻ แสดงในรูปที่ 2 หลังจากทำปฏิกิริยากราฟต์ NaAA ลงไปบนสายโซ่โมเลกุล NR โดย NR-g-NaAA จะแสดงตำแหน่งการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันเหมือนกับ NR แต่ปรากฏการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของ COO⁻ เพิ่มขึ้น ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1680 cm⁻¹ บน NR-g-NaAA [15] ซึ่งเป็นการยืนยันว่าเกิดจากปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์เชน NaAA บนสายโซ่โมเลกุล NR ได้สำเร็จ

เมื่อนำ NR และ NR-g-NaAA ที่ NaAA ปริมาณ 40 phr ซึ่งผ่านการสกัดด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์และน้ำกลั่น เพื่อกำจัด NR ที่ไม่เกิดปฏิกิริยา มอนอเมอร์ NaAA และไฮโดรพอลิเมอร์ของพอลิโซเดียม

อะคริเลตออกแล้ว มาทดสอบหาอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (the glass transition temperature, T_g) พบว่า NR มีค่า T_g เท่ากับ -67.03 องศาเซลเซียส และหลังจากทำปฏิกิริยาการกราฟต์ NaAA บนสายโซ่โมเลกุล NR ได้เป็น NR-g-NaAA ทำให้ค่า T_g ของ NR-g-NaAA สูงขึ้นที่เป็น -64.29 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 3 สาเหตุที่การกราฟต์ NaAA ลงบนสายโซ่โมเลกุลของ NR แล้วทำให้ค่า T_g เพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากขนาดของหมู่ข้างเคียง (side group) และความสามารถในการเคลื่อนไหวของโมเลกุลพอลิเมอร์ [16] ดังนั้นการกราฟต์พอลิโซเดียมอะคริเลตบนสายโซ่โมเลกุล NR ทำให้สายโซ่โมเลกุล NR เคลื่อนไหวได้ยากมากขึ้น เนื่องจากความแข็ง (stiffness) ของสายโซ่โมเลกุล NR เพิ่มขึ้น เมื่อมีโครงสร้างของ NaAA ปรากฏอยู่บนสายโซ่ เพราะโมเลกุล NaAA สามารถเพิ่มอันตรกิริยาของหมู่ฟังก์ชันมีขั้ว (polar group) เช่น COO⁻ ระหว่างสายโซ่โมเลกุลของ NR-g-NaAA ทำให้ต้องใช้พลังงานมากขึ้น เพื่อที่จะทำให้สายโซ่โมเลกุล NR-g-NaAA เคลื่อนไหว ส่งผลให้ค่า T_g ของ NR-g-NaAA สูงกว่า NR



รูปที่ 2 FT-IR สเปกตรัม ของ NR และ NR-g-NaAA ที่แปรปริมาณ NaAA



รูปที่ 3 ผลการทดสอบ differential scanning calorimetry(DSC) ของ NR และ NR-g-NaAA

พอลิเมอร์ชนิดชอบน้ำที่สามารถดูดซับน้ำไว้ภายในโครงสร้างได้ในปริมาณมาก โดยไม่ละลายในน้ำหรือตัวทำละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลายหรือสามารถคงรูปอยู่ได้ เนื่องจากในโครงสร้างของพอลิเมอร์มีการเชื่อมโยงในปริมาณที่เหมาะสม ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำ NR-g-NaAA มาเชื่อมโยงด้วย DCP ปริมาณ 0.25 phr ที่ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที โดยการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุล NR-g-NaAA ด้วย DCP คาดว่าเกิดที่บริเวณพันธะคู่ของ NR [17] ซึ่งจากตารางที่ 4 แสดงความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงของ NR-g-NaAA โดยแปรปริมาณ NaAA โดยคำนวณจากสมการของ Flory และ Rehner [17] พบว่าปริมาณของ NaAA เพิ่มขึ้น ไม่ส่งผลต่อความหนาแน่นของพันธะการเชื่อมโยง

จากรูปที่ 4 แสดงร้อยละการดูดซับน้ำของ NR-g-NaAA ที่แปรปริมาณ NaAA ที่ 20, 30, 40, 50, และ 60 phr โดยแช่ในน้ำกลั่นเป็นเวลา 720 ชั่วโมง พบว่า NR-g-NaAA ที่มี NaAA ปริมาณ 40 phr มีอัตราการดูดซับน้ำสูงสุด เนื่องจากในโมเลกุลของ NR-g-NaAA มีหมู่คาร์บอกซิล (-COO⁻) ซึ่งเป็นหมู่ที่ชอบน้ำ

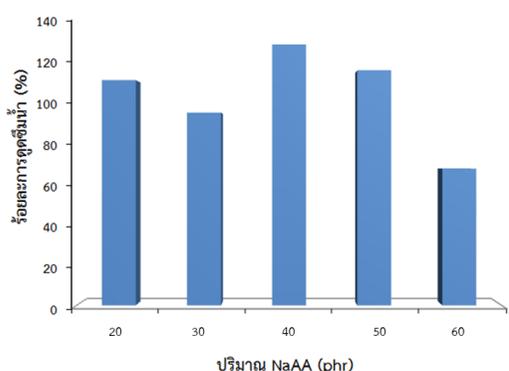
ในปริมาณที่สูงสุด (ร้อยละ NR-g-NaAA สูงสุด แสดงดังตารางที่ 3) จึงสามารถดูดซับน้ำเข้าสู่โครงสร้าง NR-g-NaAA ได้มาก [17] จากผลการทดลองสังเกตว่า เมื่อปริมาณของ NaAA เพิ่มมากขึ้น จะส่งผลทำให้การดูดซับน้ำของ NR-g-NaAA สูงขึ้น เนื่องจากมีหมู่คาร์บอกซิล (-COO⁻) อยู่ในโครงสร้างโมเลกุลมากขึ้น และการคงรูปด้วยเพอร์ออกไซด์ที่มีการเชื่อมโยงระหว่างพันธะแบบ C-C จึงส่งผลทำให้น้ำสามารถแทรกเข้าไปในโครงสร้างของ NR-g-NaAA และถูกกักเก็บไว้ได้มาก [12] แต่เมื่อเพิ่มปริมาณ NaAA เป็น 50 และ 60 phr ตามลำดับ ร้อยละการดูดซับน้ำของ NR-g-NaAA จะลดต่ำลง สาเหตุมาจากการใช้ปริมาณของ NaAA มากเกินไป จึงทำให้เกิดไฮโดรพอลิเมอร์เป็นพอลิไฮดรอกซีอะคริเลตมากกว่ากราฟต์โคพอลิเมอร์บนสายโซ่โมเลกุลของ NR ดังนั้นร้อยละการดูดซับน้ำจึงต่ำลง [18]

จากรูปที่ 5 สัมฐานวิทยาของ NR และ NR-g-NaAA ที่เชื่อมโยงแล้ว ที่แปรปริมาณ NaAA 20, 40 และ 60 phr ก่อนและหลังแช่น้ำ พบว่าพื้นผิวของตัวอย่างทุกตัวอย่างก่อนแช่น้ำจะไม่มีรูพรุน แต่เมื่อแช่

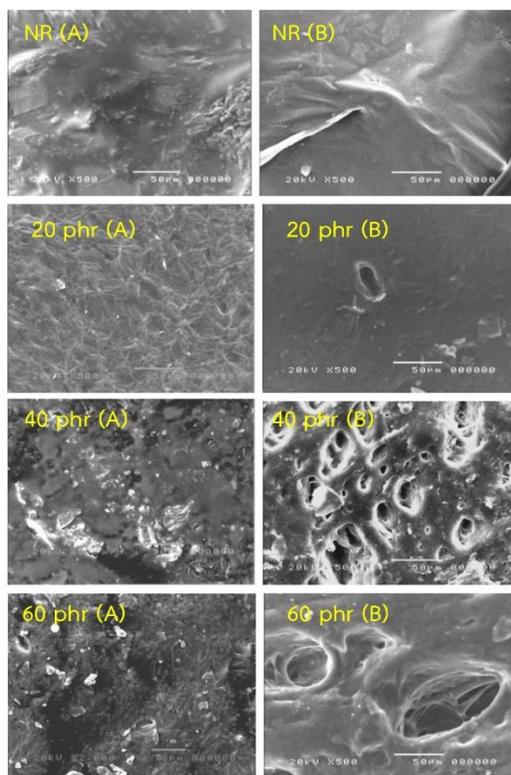
น้ำกลั่นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำให้เกิดรูพรุนขึ้น ซึ่งเป็นช่องว่างที่เกิดจากโมเลกุลน้ำถูกดูดซึมเข้าสู่โครงสร้างภายใน NR-g-NaAA และเมื่อปริมาณ NaAA เพิ่มขึ้นทำให้รูพรุนเกิดเพิ่มมากขึ้นด้วย โดยปริมาณที่เหมาะสมของ NaAA ที่ใช้ในการเตรียม NR-g-NaAA คือ 40 phr ซึ่งจะให้สมบัติในการดูดซึมน้ำได้ดีที่สุด [12] และเมื่อปริมาณ NaAA มากกว่า 40 phr รูพรุนบนพื้นผิว NR-g-NaAA มีจำนวนลดลง เนื่องจากร้อยละ NR-g-NaAA ลดลงผกผันกับปริมาณ NaAA ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงในตารางที่ 2 ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซึมน้ำลดลง จำนวนรูพรุนบนพื้นผิว NR-g-NaAA มีจำนวนลดลงตามไปด้วย

ตารางที่ 4 ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงของ NR-g-NaAA ที่แปรปริมาณ NaAA

ปริมาณ NaAA (phr)	ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยง (mol./m ³)
0	0.33±0.1
20	0.34±0.1
30	0.30±0.1
40	0.31±0.4
50	0.33±0.2
60	0.32±0.2

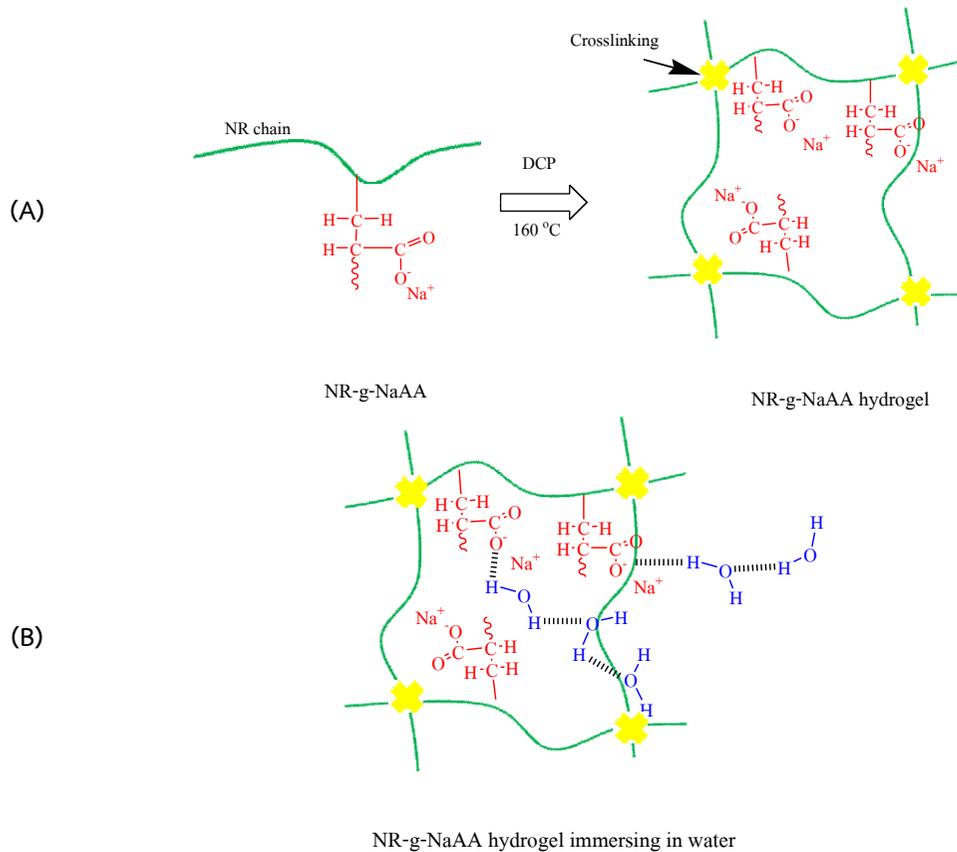


รูปที่ 4 ร้อยละการดูดซึมน้ำของไฮโดรเจล NR-g-NaAA ที่แปรปริมาณ NaAA



รูปที่ 5 สัณฐานวิทยาของ NR และ NR-g-NaAA ที่เชื่อมโยงแล้ว ก่อน (A) และ หลัง (B) แช่น้ำ

NR-g-NaAA ผ่านการเชื่อมโยงด้วย DCP ที่ 160 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 6A ซึ่งการเชื่อมโยงพอลิเมอร์ชนิดชอบน้ำให้มีโครงสร้างเป็นร่างตาข่าย 3 มิติ เพื่อให้สามารถรักษารูปร่างเอาไว้ได้ หลังจากดูดซึมน้ำเข้าสู่โครงสร้างของ พอลิเมอร์ โดยกลไกการดูดซึมน้ำของ NR-g-NaAA เริ่มต้นจากโมเลกุลน้ำจะเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลน้ำกับคู่อิเล็กตรอนโดดเดี่ยว (lone pair electron) ของอะตอมออกซิเจนของหมู่คาร์บอกซิล (-COO⁻) จากโครงสร้างของ NaAA ที่กราฟต์บนสายโซ่โมเลกุล NR จากนั้น โมเลกุลของน้ำจะดึงดูดน้ำโมเลกุลอื่น ๆ เข้ามาใน NR-g-NaAA ที่ผ่านการเชื่อมโยงแล้ว ด้วยการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของน้ำด้วยกันเอง ดังรูปที่ 6B



รูปที่ 6 ความเป็นไปได้ (A) กระบวนการเตรียม NR-g-NaAA เชื่อมโยง และ (B) กลไกการดูดซึมน้ำของ NR-g-NaAA เชื่อมโยง

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบสมบัติของ WSR ที่เตรียมจาก NR-g-NaAA

สมบัติยางบวมน้ำ	ENR	NR-g-NaAA	NR-g-NaAA-N*
ความแข็ง (shore A)	40.70±0.80	46.7±0.42	45.70±0.28
ความทนทานต่อแรงดึง (MPa)	11.26±1.12	13.27±1.27	17.11±1.12
ร้อยละการยืด ณ จุดขาด	611.20±38.56	500±23.87	580±25.28
ร้อยละอัตราการขยายตัว	207.35±19.14	237.43±8.17	86±7.07

*NR-g-NaAA-N คือ NR-g-NaAA ไม่เติม NaAA

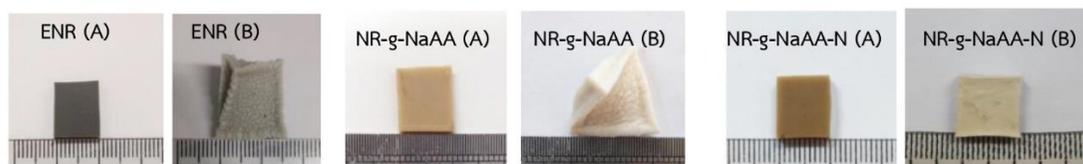
3.2 สมบัติยางบวมน้ำที่จาก NR-g-NaAA

จากการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติของการเตรียม WSR ที่แปรชนิดของยางคือ ENR, NR-g-NaAA และ NR-g-NaAA แต่ไม่เติม NaAA (NR-g-NaAA-N)

โดยใช้ NaAA เป็น SAP พบว่า WSR จาก NR-g-NaAA-N มีอัตราการขยายตัวในน้ำน้อยกว่า WSR จาก ENR และ NR-g-NaAA ซึ่งอาจจะไม่เหมาะสมในการใช้งานเป็น WSR ในโครงสร้างทางวิศวกรรมอูโมงค์ใต้ดิน

อย่างเช่น WSR ที่เตรียมจาก ENR และ NR-g-NaAA ที่เติม NaAA เป็น SAP แต่สามารถนำไปต่อยอดเตรียมเป็น Water swelling sealant ที่ไม่ต้องการสมบัติการบวมพองในน้ำสูง ซึ่งสามารถใช้ปิดผนึกโครงสร้างหรือท่อได้เช่นกัน หรือสามารถต่อยอดไปใช้เป็นสารช่วยในการเข้ากันระหว่างพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้วกับวัสดุที่มีขั้วสูงได้ในอนาคต ในขณะที่ WSR ที่เตรียมจาก NR-g-NaAA

และเติม NaAA เป็น SAP มีอัตราการขยายตัวและมีสมบัติเชิงกลดีที่สุด เมื่อเทียบกับยางบวมน้ำจาก ENR และ NR-g-NaAA-N เนื่องจาก NR-g-NaAA มีความเป็นขั้วมากขึ้น เมื่อนำมาผสมกับ NaAA จึงสามารถเข้ากันได้ดีกว่า ENR ทำให้ยางบวมน้ำที่ได้มีสมบัติขึ้นดังตารางที่ 5



รูปที่ 7 การขยายตัวในน้ำของยางบวมน้ำก่อน (A) และ หลัง (B) แช่น้ำ

4. สรุป

ผลจากการเตรียม NR-g-NaAA ที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 ชั่วโมง โดย KPS ปริมาณ 2 phr และ NaAA ปริมาณ 40 phr เป็นสูตรที่ดีที่สุด เนื่องจากผลการทดสอบสัดส่วนความหนาแน่นของ NaAA ที่กราฟต์บนโมเลกุล NR และร้อยละ NR-g-NaAA สูงสุดเมื่อเทียบกับปริมาณต่าง ๆ ส่งผลให้โมเลกุลของ NR-g-NaAA มีหมู่คาร์บอกซิล (-COO⁻) ซึ่งเป็นหมู่ที่ชอบน้ำในปริมาณที่มาก NR-g-NaAA ที่สังเคราะห์ จึงสามารถดูดซึมน้ำเข้าสู่โครงสร้างของพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำจาก NR-g-NaAA และ WSR ที่เตรียมจาก NR-g-NaAA มีอัตราการขยายตัวและมีสมบัติเชิงกลดีที่สุดเมื่อเทียบกับ WSR จาก ENR และ NR-g-NaAA-N ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้างทางโยธาวิศวกรรมการก่อสร้างได้

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ในโครงการวิจัยเรื่อง

ไฮโดรเจลจากยางธรรมชาติกราฟต์ด้วยโซเดียมอะคริเลตและการประยุกต์ใช้สำหรับเตรียมยางบวมน้ำ (RDG5750106) ขอขอบคุณ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี สำหรับการอำนวยความสะดวกในการทำวิจัย และขอขอบคุณ ดร.ศิริวัฒน์ ระดาบุตร ที่ช่วยตรวจสอบความถูกต้องทางวิชาการ

6. รายการอ้างอิง

- [1] Khongtong, S. and Fungchonlajit, N., 2008, Water swollen natural rubber, Walailak J. Sci. Technol. 5: 57-75.
- [2] 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-swellaible composites, Carbohydr. Polym. 86: 581-586.
- [3] Zohuriaan-Mehr, M.J., Omidian, H., Doroudiani, S. and Kabiri, K., 2010, Advances in non-hygienic applications of

- super-absorbent hydrogel materials, *J. Mater. Sci.* 45: 5711-5735.
- [4] Yong, W., Kojima, T., Ming, L. and Jie, L., 2006, A new CMC-AA resin/inorganic-gel super absorbent material, *J. Wuhan Univer. Technol. Mater. Sci. Edu.* 21: 95-98.
- [5] Okay, O. and Sariisik, S.B., 2000, Swelling behavior of poly(acrylamide-co-sodium acrylate) hydrogels in aqueous salt solutions: Theory versus experiments, *Eur. Polym. J.* 36: 393-399.
- [6] Karadag, E. and Saraydin, D., 2002, Swelling of superabsorbent acrylamide/sodium acrylate hydrogels prepared using multifunctional crosslinkers, *Turk J. Chem.* 26: 863-875.
- [7] ชัยวุฒิ วัดจิ่ง, ศศิวงศ์ บุญสิงห์, ธนากร คำสอน และสรารุช ประเสริฐศรี, 2559, ยางบวมน้ำจากยางธรรมชาติอีพอกไซด์และพอลิเมอร์ดูดซึมน้ำได้มาก, *ว.วิทยาศาสตร์ มศว.* 32(2): 77-95.
- [8] Gan, S.N. and Hamid, Z.A., 1997, Partial conversion of epoxide groups to diols in epoxidized natural rubber, *Polymer* 38: 1953-1956.
- [9] Wongsu, C. and Riyajan, S., 2010, Swelling behavior and biodegradation of novel polymer hydrogel based on polyacrylamide starch and NR by microwave method, *The 7th IMT-GT UNINET and The 3rd Joint International PSU-UNS Conferences Proceeding, Prince of Songkha University, Songkhla.*
- [10] Mohammad, S., Fatemeh, S. and Mojgan, Y., 2011, Chemical modification of carboxy methyl cellulose via graft copolymerization and determination of the grafting parameters, *Orient. J. Chem.* 27: 967-972.
- [11] Routray, C.R., Tosh, B. and Nayax, N., 2013, Grafting of polymethyl methacrylate on to cellulose acetate in homogeneous medium using ceric (IV) ion as initiator, *Ind. J. Chem. Technol.* 20: 202-209.
- [12] อุมพร ไชยสุวรรณ และอุไรวรรณ พันธุ์แก่น, 2555, ไฮโดรเจลเชื่อมโยงบแบบโครงสร้างตาข่ายของยางธรรมชาติและแป้งมันสำปะหลัง, *สารนิพนธ์ปริญญาตรี, ภาควิชาเคมี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, อุบลราชธานี.*
- [13] Alla, A., Nada, M.A., Alkady, M.Y. and Fekry, H.M., 2008, Synthesis and characterization of grafted cellulose for use in water and metal ions sorption, *BioResources* 3: 46-59
- [14] Nor, H.M. and Ebdon, J.R., 2000, Ozonolysis of natural rubber in chloroform solution, Part 1: A study by GPC and FTIR spectroscopy, *Polymer* 41: 2359-2365.
- [15] Chen, P., Du, X., Zhang, Z., Xue, Z., Chen, S. and Yang, B., 2014, Effect of amylose content on property and microstructure of starch-graft-sodium acrylate copolymer, *Carbohydr. Polym.* 102: 453-459.
- [16] Wongthong, P., Nakason, C., Pan, Q., Rempel, G.L. and Kiatkamjornwong, S., 2014, Styrene-assisted grafting of maleic

- anhydride onto deproteinized natural rubber, Eur. Polym. J. 59: 144-155.
- [17] Vudjung, C., Chaisuwan, U., Pangan, U., Chaipugdee, N., Boonyod, S., Santawitee, O. and Saengsuwan, S., 2014, Effect of natural rubber contents on biodegradation and water absorption of interpenetrating polymer network (IPN) hydrogel from natural rubber and cassava starch, Energy Procdia 56: 255-263.
- [18] Saramolee, P., Lopattananon, N. and Sahakaro, K., 2014, Preparation and some properties of modified natural rubber bearing grafted poly(methyl methacrylate) and epoxide groups, Eur. Polym. 56: 1-10.