

การเตรียมงานธรรมนูญโปรตีนต่ำโดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล



นางสาวพิชญญา ปุรณโชติ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)

are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREPARATION OF LOW PROTEIN NATURAL RUBBER BY HYDROTHERMAL PROCESS

Miss Pitchayada Puranachote



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Petrochemistry and Polymer Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเตรียมยางธรรมชาติโปรตีนต่ำโดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล
โดย	นางสาวพิชญฎา ปุณณโชติ
สาขาวิชา	ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประพันธ์ คูชลธารา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร. นพิตา หิณูชีระนันท์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพรธน์ ประศาสน์สารกิจ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประพันธ์ คูชลธารา)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร. นพิตา หิณูชีระนันท์)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อนวัช อาชวาคม)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วารุณี อริยวิริยะนันท์)

พิชญญา ปุรณโชติ : การเตรียมยางธรรมชาติโปรตีนต่ำโดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล (PREPARATION OF LOW PROTEIN NATURAL RUBBER BY HYDROTHERMAL PROCESS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. ประพันธ์ คูชลธารา, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: รศ. ดร. นพิตา วิทยุธีระนันท์, 81 หน้า.

น้ำยางธรรมชาติที่ได้จากต้นยางพารา (*Hevea brasiliensis*) มีส่วนประกอบที่เป็นโปรตีนอยู่หลากหลายชนิด ซึ่งโปรตีนเหล่านี้เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดอาการแพ้ต่อผู้ใช้งาน กระบวนการไฮโดรเทอร์มัลสามารถช่วยลดปริมาณไนโตรเจนซึ่งบ่งชี้ถึงการลดปริมาณโปรตีนในยางธรรมชาติได้ ปฏิกริยาไฮโดรไลซิสดังกล่าวจะเข้าไปสลายโครงสร้างพอลิเพปไทด์ของโปรตีนให้ไปเป็นกรดอะมิโนและเพปไทด์สายที่สั้นลงซึ่งสามารถละลายในน้ำได้ ประยุกต์ใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มัลร่วมกับการใช้สารลดแรงตึงผิวเพื่อต้องการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการลดปริมาณโปรตีนในยางธรรมชาติ ศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อกระบวนการนี้ คือ อุณหภูมิ (125 150 175 และ 200 องศาเซลเซียส) เวลาในการทำปฏิกริยา (30 45 และ 60 นาที) ปริมาณการใช้สารลดแรงตึงผิว (1 5 และ 10% โดยปริมาตร) และปริมาณเนื้อยางที่ใช้ (10 20 และ 30%) เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมที่สามารถลดปริมาณโปรตีนได้ ซึ่งภาวะที่เหมาะสมที่สุด คือ ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที โดยใช้สารลดแรงตึงผิว 5% โดยปริมาตร สามารถลดปริมาณโปรตีนในยางธรรมชาติได้สูงสุด 82.2% เมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติที่ไม่ผ่านกระบวนการ สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการลดปริมาณโปรตีนแล้วมีค่าความทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น 1.0 เมกะปาสคาล ระยะเวลายืด ณ จุดขาดมีค่าเพิ่มขึ้น 67% มอดูลัสการดึงยืด 300% มีค่าลดลง 0.85% และความแข็งมีค่าลดลง 5.7 เนื่องจากผลของการใช้ความร้อนสูงในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล และสารลดแรงตึงผิวที่ตกค้างอยู่ในผลิตภัณฑ์

สาขาวิชา ปีโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5672206823 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE

KEYWORDS: PREPARATION OF LOW PROTEIN NATURAL RUBBER / LOW PROTEIN NATURAL RUBBER

PITCHAYADA PURANACHOTE: PREPARATION OF LOW PROTEIN NATURAL RUBBER BY HYDROTHERMAL PROCESS. ADVISOR: ASST. PROF. PRAPAN KUCHONTHARA, Ph.D., CO-ADVISOR: ASSOC. PROF. NAPIDA HINCHIRANAN, Ph.D., 81 pp.

Natural rubber latex tapped from *Hevea brasiliensis* is consisted of several proteins that are major causes of allergy to rubber product user. Hydrothermal pretreatment can decrease the nitrogen content, which was claimed as the protein reduction in natural rubber. Hydrolysis reaction breaks polypeptides to form amino acids and short peptide chain which are soluble in water. Processes were applied with a surfactant treatment which is a primitive process to study the possibility of reducing protein in natural rubber. Effects of temperatures (125, 150, 175 and 200°C), reaction time (30, 45, 60 min), the presence of surfactant (1, 5, 10% by volume) and dry rubber content (10, 20, 30%) were investigated to achieve the optimal condition. Hydrothermal pretreated natural rubber via the hydrothermal process at a reaction temperature of 200°C, 60 minutes reaction time with an assist of 5% surfactant provided lower nitrogen content with 82.2% removal than that of the original natural rubber. Mechanical properties of hydrothermal pretreatment natural rubber show an increase in tensile strength (1.0 MPa), elongation at break (67%) and a decrease in 300% modulus (0.85%), hardness (5.7) due to the effect of temperature in hydrothermal process and the amount of surfactant left in product.

Field of Study: Petrochemistry and
Polymer Science

Academic Year: 2015

Student's Signature

Advisor's Signature

Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดีด้วยความช่วยเหลือของอาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประพันธ์ คูชลธारा และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รองศาสตราจารย์ ดร. นพิตา หิณฺฐิระนันท์ ที่ได้กรุณาอบความรู้ ข้อคิดเห็น แนวคิดต่างๆ ที่ใช้ในการทำงานวิจัยฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนวัช อาชวาคม และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วารุณี อริยวิริยะนันท์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณารับเชิญเป็นกรรมการสอบ ตลอดจนให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเงินทุนจากสาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ ทางผู้ทำการวิจัยจึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้

ขอขอบคุณภาควิชาเคมีเทคนิค และคณาจารย์ทุกท่าน ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้อุปกรณ์เครื่องมือวิจัย และความรู้ต่างๆ ในการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณนักวิทยาศาสตร์และเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในการอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ และให้คำแนะนำในการวิเคราะห์ข้อมูลต่างๆ

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และผู้มีพระคุณทุกท่านที่คอยดูแลช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนจนสำเร็จการศึกษา

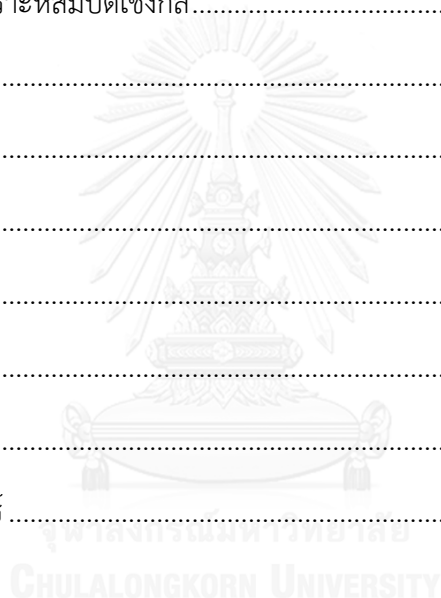
สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ฉ
บทที่ 1	1
บทนำ	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัยนี้.....	2
1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย.....	2
บทที่ 2	4
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 แนวคิดและทฤษฎี	4
2.2 สมบัติของยางธรรมชาติ.....	6
2.2.1 การรักษาสภาพน้ำยาง.....	8
2.2.2 การใช้งานของยางธรรมชาติ.....	10
2.3 โพรตีนในยางธรรมชาติ	10
2.4 กระบวนการลดปริมาณโปรตีนในยางธรรมชาติ	11
2.4.1 การใช้เครื่องหมุนแยกวัตถุ (centrifugation)	12
2.4.2 การใช้เอนไซม์ (enzyme treatment).....	12

2.4.3 การใช้สารลดแรงตึงผิว (surfactant treatment).....	13
2.4.3.1 พอลิเอทิลีนไกลคอล เทิร์ทออกทิลฟีนิลอีเทอร์	13
2.4.3.2 โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต.....	14
2.5 วัลคาไนเซชัน.....	14
2.5.1 กำมะถัน (sulfur).....	16
2.5.2 เปอร์ออกไซด์ (peroxide).....	16
2.5.3 สารเคมีอื่นๆ	16
2.6 สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติ.....	17
2.6.1 สมบัติของยางดิบ.....	17
2.6.2 ความต้านทานต่อแรงดึง (tensile strength)	18
2.6.3 ระยะยืด ณ จุดขาด (elongation at break)	18
2.6.4 ค่ามอดูลัสการดึงยืด 300% (300% modulus).....	18
2.6.5 ความแข็ง (hardness, shore A).....	19
2.7 กระบวนการไฮโดรเทอร์มัล.....	19
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	20
บทที่ 3	27
วิธีดำเนินการวิจัย	27
3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมี	27
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ	27
3.3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	28
3.4 การเตรียมน้ำยาง	30
3.5 การลดปริมาณโปรตีน.....	30
3.6 การเก็บผลิตภัณฑ์.....	31

3.7 การวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจน.....	32
3.8 การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนด้วยวิธีเจลดาล (Kjeldahl method).....	33
3.8.1 การย่อยตัวอย่าง (digestion).....	33
3.8.2 การกลั่นแอมโมเนีย (distillation).....	33
3.8.3 การไทเทรตเพื่อหาปริมาณไนโตรเจน (titration).....	33
3.8.4 การคำนวณ	33
3.9 การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของยาง	34
3.9.1 ความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength)	35
3.9.2 ระยะยืด ณ จุดขาด (Elongation at break)	36
3.9.3 ค่ามอดูลัสการดึงยืด 300% (300% modulus).....	36
3.9.4 ความแข็งกด (Hardness, shore A).....	36
บทที่ 4	37
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	37
4.1 วิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจน.....	37
4.1.1 ความเข้มข้นของน้ำยาง 30%	37
4.1.1.1 ยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล.....	37
4.1.1.2 ยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการลดโปรตีนด้วยสารลดแรงดึงผิว	39
4.1.1.3 ยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลร่วมกับสารลดแรงดึงผิว	40
4.1.2 ความเข้มข้นของน้ำยาง 10 และ 20% โดยความเข้มข้นของเนื้อยาง.....	44
4.2 วิเคราะห์ปริมาณโปรตีน.....	45
4.3 วิเคราะห์สมบัติเชิงกล	46
4.3.1 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยาง	46

4.3.2 สมบัติการรับแรงดึงและความแข็ง	48
บทที่ 5	49
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	51
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	51
5.1.1. การลดปริมาณไนโตรเจน.....	51
5.1.2. อิทธิพลที่ส่งผลต่อการลดปริมาณไนโตรเจน.....	51
5.1.3. วิเคราะห์สมบัติเชิงกล.....	52
5.2. ข้อเสนอแนะ	52
รายการอ้างอิง	53
ภาคผนวก ก.....	58
ภาคผนวก ข.....	60
ภาคผนวก ค.....	62
ภาคผนวก ง	76
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	81



สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบของน้ำยางพารา [7]	7
ตารางที่ 2.2 สารที่ทำให้เกิดการแพ้ในน้ำยาง [28]	22
ตารางที่ 3.1 ตัวแปรที่ใช้ในการเตรียมยางธรรมชาติโปรตีนต่ำด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล	30
ตารางที่ 3.2 สูตรการผสมยาง	34
ตารางที่ 3.3 ภาวะที่ใช้ในการผสม	35
ตารางที่ 4.1 ปริมาณโปรตีนโดยรวมในยาง	46
ตารางที่ 4.2 ลักษณะการวัลคาไนซ์	49
ตารางที่ 4.3 สมบัติการรับแรงดึงและความแข็งของตัวอย่าง	50



สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างยางธรรมชาติ	6
รูปที่ 2.2 อนุภาคของยางธรรมชาติ	7
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของโปรตีน	11
รูปที่ 2.4 ส่วนของน้ำยางที่แยกออกจากกันหลังจากการใช้เครื่องหมุนแยกวัตถุ	12
รูปที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีนไกลคอล เทิร์ตออกทิลฟีนอลอีเทอร์	14
รูปที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของโซเดียมโตนัลคิลซัลเฟต	14
รูปที่ 2.7 การเกิดการเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลของยาง	15
รูปที่ 2.8 แรงดึงในทิศทางเดียว (tension)	18
รูปที่ 2.9 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของโปรตีน	20
รูปที่ 2.10 กระบวนการหมุนเหวี่ยงน้ำยางดิบเพื่อลดปริมาณโปรตีน	23
รูปที่ 2.11 ปริมาณสารที่ทำให้เกิดการแพ้ในเนื้อยาง	24
รูปที่ 2.12 สมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติ	26
รูปที่ 3.1 แผนผังงานวิจัย	29
รูปที่ 3.2 เครื่องปฏิกรณ์ความดันสูง (autoclave reactor)	31
รูปที่ 3.3 เครื่องวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (CHN analyzer รุ่น CHN-2000, LECO Instrument (Thailand) Ltd.).....	32
รูปที่ 3.4 ชิ้นงานที่ใช้ทดสอบแบบดัมเบล	35
รูปที่ 4.1 ผลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการทำกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่ส่งผลต่อการลดปริมาณไนโตรเจน.....	38
รูปที่ 4.2 ผลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาและปริมาณของสารลดแรงดึงผิวที่ส่งผลต่อการลดปริมาณไนโตรเจน.....	39
รูปที่ 4.3 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาร่วมระหว่างกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลและสารลดแรงดึงผิว (ก) ใช้สารลดแรงดึงผิวเข้มข้น 1% (ข) ใช้สารลดแรงดึงผิวเข้มข้น 5% และ (ค) ใช้สาร	

ลดแรงดึงผิวเข้มข้น 10% เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 45 และ 60 นาที ต่อการลดปริมาณไนโตรเจน ในน้ำยาง	41
รูปที่ 4.4 ผลผลิตกัณฑ์ยางธรรมชาติ (ก) ไม่ผ่านกระบวนการ และ (ข) ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์ มัลที่อุณหภูมิ 200 °ซ เป็นเวลา 60 นาที โดยใช้สารลดแรงดึงผิว 5% โดยปริมาตร.....	44
รูปที่ 4.5 ผลของความเข้มข้นของน้ำยางและความเข้มข้นของสารลดแรงดึงผิว ต่อการลดปริมาณ ไนโตรเจนในน้ำยางชั้น.....	45



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ถึงแม้ว่ายางธรรมชาติจะมีสมบัติเชิงกลที่ดีและถูกใช้เป็นตัววัสดุเชิงวิศวกรรมในด้านต่างๆ แต่หนึ่งในข้อด้อยของยางธรรมชาติ คือ ปริมาณโปรตีนที่อยู่ในเนื้อยาง ซึ่งก่อให้เกิดอาการแพ้อย่างรุนแรงกับผู้ที่มีการแพ้ได้ ดังนั้นการลดปริมาณโปรตีนในเนื้อยางก่อนนำไปใช้งานโดยเฉพาะอย่างยิ่งผลิตภัณฑ์ที่ต้องสัมผัสกับผิวหนังของมนุษย์โดยตรงจึงเป็นสิ่งสำคัญ และยังสามารถช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับยางธรรมชาติอีกด้วย โดยทั่วไปแล้วยางพาราเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตวัสดุและอุปกรณ์วิทยาศาสตร์และการแพทย์ เช่น ถุงมือยาง ถุงยางอนามัย สายสวนปัสสาวะ อาการแพ้โปรตีนจากยางธรรมชาติสามารถเกิดขึ้นได้หลายรูปแบบ โดยโปรตีนจากยางจะซึมเข้าสู่ผิวหนังและระบบหายใจ โดยอาการแพ้จะแสดงให้เห็นโดยเริ่มจากผิวหนังอักเสบ เยื่อจมูกและเยื่อตาขาวอักเสบ หากแพ้ขั้นรุนแรงเนื่องจากโปรตีนถูกดูดซึมเข้าสู่กระแสเลือดอาจทำให้เกิดอาการเด่นของหัวใจเต้นถี่ขึ้นและความดันเลือดต่ำลงอย่างรวดเร็ว การลดปริมาณโปรตีนสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้เครื่องหมุนแยกวัตถุ การใช้เอนไซม์ และการใช้สารลดแรงตึงผิว เป็นต้น แต่การใช้วิธีที่กล่าวมาข้างต้นมีต้นทุนสูง และอาจต้องใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจการนำกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลมาใช้ในการลดปริมาณโปรตีนในยางพารา โดยกระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่ทำให้โปรตีนแตกตัวออกเป็นกรดอะมิโนด้วยการใช้น้ำและความร้อน ซึ่งกระบวนการนี้มีข้อดีหลายประการ เช่น สารที่ใช้เป็นน้ำจึงไม่เป็นพิษหรือตกค้างในผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ยังศึกษาการนำกระบวนการนี้มาใช้ร่วมกับการใช้สารลดแรงตึงผิว เนื่องจากสารลดแรงตึงผิวสามารถลดปริมาณโปรตีนได้ และยังสามารถช่วยรักษาสภาพให้อนุภาคยางกระจายตัวในน้ำได้ดีขณะทำไฮโดรเทอร์มัลอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาวิธีการเตรียมยางธรรมชาติโปรตีนต่ำโดยใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มัล
2. ศึกษาสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของยางธรรมชาติโปรตีนต่ำหลังผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

ลดปริมาณไนโตรเจนซึ่งเป็นตัวชี้วัดถึงปริมาณโปรตีนในน้ำอย่างธรรมชาติด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล และวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเชิงกลของยางธรรมชาติที่ผ่านการลดโปรตีนด้วยกระบวนการดังกล่าว

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัยนี้

ได้ภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลในการลดปริมาณโปรตีนในน้ำอย่างธรรมชาติ

1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย

1. ค้นคว้าเอกสารและข้อมูลทางวิชาการที่เกี่ยวข้อง
2. จัดเตรียมวัสดุดิบ สารเคมี และอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย
3. ลดปริมาณไนโตรเจนด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลในเครื่อง โดยศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ได้แก่
 - 3.1 ความดันเริ่มต้นของไนโตรเจน (10 บาร์)
 - 3.2 อุณหภูมิ (125 150 175 และ 200 องศาเซลเซียส)
 - 3.3 เวลาในการทำปฏิกิริยา (30 45 และ 60 นาที)
 - 3.4 ปริมาณของเนือยในสารละลาย (ความเข้มข้น 10 20 และ 30%)
 - 3.5 ปริมาณสารลดแรงตึงผิว พอลิเอทิลีนไกลคอล เทิร์ตออกทิลฟีนอลอีเทอร์ (Polyethylene glycol *tert*-octylphenyl ether) (1 5 และ 10% โดยปริมาตรของสารละลายทั้งหมด)
4. วิเคราะห์หาปริมาณของแข็งโดยรวมในยางธรรมชาติก่อนและหลังผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล
5. ตกตะกอนยางที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลในเอซิโตนและแยกน้ำออก แล้วนำยางที่ได้ไปอบแห้ง

6. นำยางที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณธาตุไนโตรเจน ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน (CHN analyzer)
7. วิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลของยางโดยใช้เทคนิคเจลเพอร์มีเอชันโครมาโตกราฟี (Gas permeation chromatography, GPC)
8. ขึ้นรูปยางที่ได้ และวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ เช่น การทดสอบสมบัติแรงดึง (tensile properties) และค่าความแข็ง (hardness)
9. วิเคราะห์ และสรุปผลการทดลอง
10. เขียนและนำเสนอวิทยานิพนธ์



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดและทฤษฎี

ผลผลิตยางธรรมชาติประมาณ 70% มาจากแหล่งผลิตที่สำคัญ คือ ไทย อินโดนีเซีย และมาเลเซีย โดยไทยเป็นประเทศที่ผลิตยางธรรมชาติรายใหญ่ที่สุดในโลก ซึ่งเน้นที่การผลิตยางแผ่นรมควันและน้ำยางข้น ระดับราคายางที่สูงในอดีตทำให้หลายประเทศทั่วโลกมีการขยายพื้นที่ปลูกยางเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามในปี 2557 ผลผลิตยางโลกลดลงเนื่องจากราคายางตกต่ำ ผลผลิตยางโลกในปี 2558 [1, 2] อยู่ที่ระดับ 12.0 ล้านตัน ซึ่งลดลงจากปีก่อน 0.4% ตามการลดลงของผลผลิตยางของไทยและอินโดนีเซีย เนื่องจากสภาพอากาศที่แห้งแล้งทำให้ผลผลิตน้ำยางน้อย ขณะเดียวกันผลผลิตยางของประเทศอื่นเริ่มทรุดตัวจากระดับราคายางโลกที่ตกต่ำและนโยบายภาครัฐในหลายประเทศเริ่มตระหนักถึงปัญหาผลผลิตยางล้นตลาด จากการทำไทยสามารถผลิตน้ำยางดิบได้เป็นจำนวนมากนี้เองจึงทำให้ไทยมีอุตสาหกรรมต่อเนื่องเกี่ยวกับยางพาราเกิดขึ้นมากมาย เช่น โรงงานผลิตยางแท่ง ยางแผ่น ลูกมียางและยางรถยนต์ เป็นต้น ปัจจุบันไทยจึงสามารถส่งออกยางพาราได้เป็นอันดับหนึ่งของโลก

ความต้องการใช้ยางโลกอยู่ที่ระดับ 12.4 ล้านตัน เพิ่มขึ้นจากปีก่อน 2.2% ซึ่งเป็นการเติบโตในระดับต่ำสุดนับตั้งแต่ปี 2556 [1, 3] เนื่องจากการใช้ยางในจีนชะลอตัวลงจากการลดลงของอุตสาหกรรมรถยนต์ เนื่องจากยังมีสินค้าคงคลังยังเพียงพอต่อความต้องการใช้งาน โดยการใช้ยางธรรมชาติเพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ยางทั้งหมดของจีนแบ่งได้เป็น 2 ตลาดหลัก คือ ตลาดเพื่อใช้ในการทำท่อยาง และตลาดเพื่อใช้ในการทำยางล้อ โดยสามารถแบ่งได้เป็นยางล้อจำนวน 40% ส่วนอีก 60% ที่เหลือเป็นยางอื่นๆ เช่น ท่อยาง เทปยาง สายยางปะเก็นน้ำมัน และยางแท่งกันสะเทือน เป็นต้น โดยในยางรถยนต์แต่ละชนิดจะมีปริมาณยางธรรมชาติในสัดส่วนที่แตกต่างกันระหว่าง 6 – 36% ของน้ำหนักผลิตภัณฑ์ ตลาดการใช้ยางเพื่อผลิตยางรถยนต์จึงมีอิทธิพลในการกำหนดราคายางของตลาดโลก

น้ำยางชั้นส่วนใหญ่ใช้ในการทำผลิตภัณฑ์ที่ใช้กระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีแบบจุ่ม (dipping process) ได้แก่ ถุงมือยาง และถุงยางอนามัย ซึ่งในระยะหลังตลาดมีการเติบโตค่อนข้างสูงมาก เนื่องจากมีการแพร่ระบาดของโรคเอดส์ เจ้าหน้าที่ทางการแพทย์และผู้บริโภคจึงนิยมใช้ผลิตภัณฑ์ถุงมือยางและถุงยางอนามัยกันมากขึ้น การส่งออกสินค้ายางแปรรูปเบื้องต้นมีการส่งออกยางแปรรูปของไทยในปี 2558 [2] มีปริมาณ 4.1 ล้านตัน ลดลงจากปีก่อน 3.1% ซึ่งเป็นการลดลงของการส่งออกยางแท่งและยางคอมพาวด์ไปประเทศจีน เนื่องจากอุตสาหกรรมยานยนต์กำลังประสบปัญหาและมีการใช้ยางสังเคราะห์ทดแทน ขณะเดียวกันมูลค่าการส่งออกยางยังคงลดลงต่อเนื่องถึง 21.4% จากปีก่อนจากสถานการณ์ราคายางขบเซา

ยางธรรมชาติที่ได้จากต้นยางพารา (*Hevea brasiliensis*) ถูกนำไปใช้เป็นวัสดุเชิงวิศวกรรมต่างๆ มากมายเนื่องจากมีสมบัติเชิงกลที่ดี แต่ปัญหาการใช้งานยางธรรมชาติส่วนมากมีสาเหตุเนื่องมาจากการแพ้โปรตีนที่ตกค้างอยู่บนพื้นผิวของผลิตภัณฑ์ซึ่งเป็นหนึ่งในข้อด้อยของยางธรรมชาติ [4] อุตสาหกรรมยางพาราเป็นอุตสาหกรรมการแปรรูปนำน้ำยางสดที่ได้จากต้นยางพารามาแปรรูปให้สะดวกในการนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ยาง ยางพาราที่ได้แบ่งออกได้เป็น 5 ชนิด ได้แก่

- (1) ยางแผ่นรมควัน
- (2) ยางแท่ง
- (3) ยางเครป
- (4) ยางผึ่งแห้ง
- (5) น้ำยางข้น

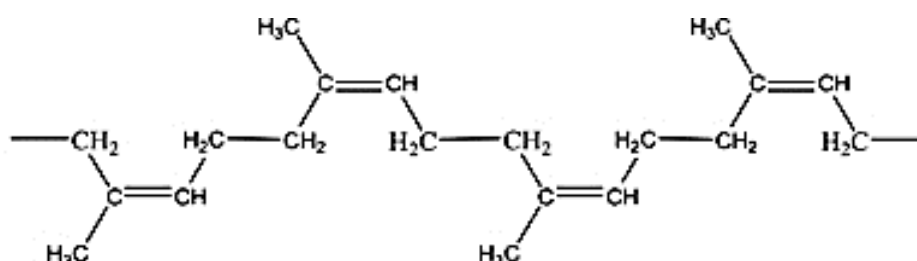
ยางพาราเหล่านี้จะนำไปใช้ในการทำผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปอื่นๆ เช่น ถุงมือยาง ถุงยางอนามัย จุกนมยาง และท่อยางที่ใช้ทางการแพทย์ต่างๆ เป็นต้น ผลิตภัณฑ์ดังกล่าวเมื่อถูกใช้งานจะสัมผัสกับผู้ใช้โดยตรงจึงทำให้เกิดการแพ้มากถึง 17% ของผู้ใช้งานทั้งหมด องค์การอาหารและยาของประเทศสหรัฐอเมริกาและสหภาพยุโรประบุว่า ผู้ที่มีอาการแพ้ต่อโปรตีนสามารถใช้งานผลิตภัณฑ์จากยางพาราได้ เมื่อปริมาณโปรตีนในผลิตภัณฑ์จะต้องมีไม่เกิน 50 ไมโครกรัมต่อกรัม [5] ซึ่งมีอาการรุนแรงจากน้อยไปมาก [4, 6] ดังนี้

- (1) เกิดอาการอักเสบ ระบายเคืองผิวหนัง เป็นผื่นแดงบริเวณที่สัมผัส
- (2) เกิดการระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ เนื่องจากผงแป้งที่ดูดซับโปรตีนไว้ ฟูงกระจายในอากาศ
- (3) ทำให้หัวใจเต้นถี่และความดันเลือดลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากซึมเข้ากระแสเลือด
- (4) หากแพ้รุนแรงอาจมีไข้ และติดเชื้อได้

2.2 สมบัติของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมีคือ ซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน ดังแสดงในรูปที่ 2.1 มีลักษณะคล้ายน้ำมัน น้ำยางที่ได้จากต้นยางมีลักษณะเป็นเม็ดยางเล็กๆ กระจายอยู่ในน้ำ (emulsion) มีความหนืดประมาณ 12-15 เซนติพอยซ์ ลักษณะเป็นของเหลวสีขาวคล้ายน้ำมัน มีสภาพเป็นคอลลอยด์หรือสารแขวนลอย (colloid) [4] เนื่องจากส่วนประกอบของยางธรรมชาติเป็นไฮโดรคาร์บอนไม่มีขั้ว ดังนั้นจึงไม่สามารถละลายในสารละลายที่มีขั้วเช่น น้ำ เป็นต้น โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน (amorphous) เมื่ออุณหภูมิต่ำลงจะเกิดผลึกทำให้มีความแข็งเปราะ และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นยางก็จะอ่อนตัวลงและกลับสู่สภาพเดิม

ส่วนประกอบของน้ำยางพารา [7] มีน้ำเป็นองค์ประกอบหลักที่ 64% เนื้อยาง 33% และยังมีคาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมันปะปนอยู่ 3% นอกจากนี้ยังมีสารอนินทรีย์ ได้แก่ โพแทสเซียม แมกนีเซียม ทองแดง สังกะสี และเหล็กปะปนอยู่ด้วยในปริมาณเล็กน้อย ดังแสดงในตารางที่ 2.1

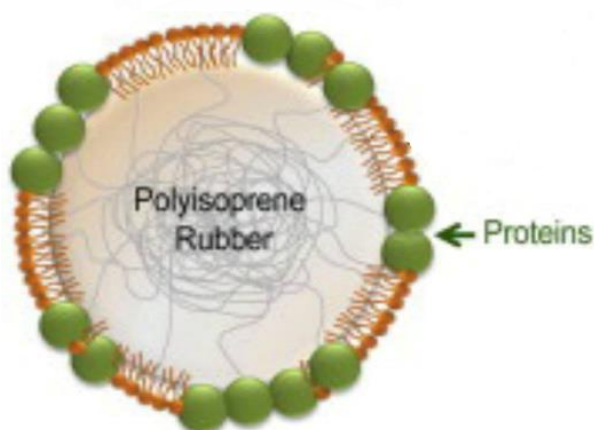


รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างยางธรรมชาติ [8]

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบของน้ำยางพารา [7]

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (% โดยน้ำหนัก)
เนื้อยาง	33
น้ำ	64
สารพวกโปรตีน	1
สารพวกเรซิน	1
ซีลีล่า	1

ในส่วนของเนื้อยาง [4] จะมีส่วนของไฮโดรคาร์บอน 86% น้ำที่กระจายอยู่ในเนื้อยาง 10% สารพวกไขมัน 3% โปรตีน 1.0 – 1.8% ขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของน้ำยาง โปรตีนในน้ำยางบางส่วนจะถูกห่อหุ้มด้วยที่ผิวอนุภาคยางรวมตัวเป็นชั้นหรือเปลือกห่อหุ้ม (hydrate protein envelope) อนุภาคยางไวทำให้อนุภาคยางไม่รวมตัวกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ส่วนประจุลบจะก่อให้เกิดการผลักกันระหว่างอนุภาคยางทำให้น้ำยางคงสภาพเป็นของเหลวอยู่ได้ ดังนั้นเมื่อมีการทำลายชั้นโปรตีนที่ห่อหุ้มอนุภาคยาง จะทำให้น้ำยางเกิดการเสียสภาพ [9] โดยโปรตีนในยางมีทั้งหมด 250 ชนิด แต่มีโปรตีนที่ทำให้เกิดอาการแพ้อยู่ประมาณ 30 - 60 ชนิด เช่น Hevein; Hev 1-13, Class I chitinases, TLPs เป็นต้น



รูปที่ 2.2 อนุภาคของยางธรรมชาติ [10]

2.2.1 การรักษาสภาพน้ำยาง

น้ำยางสดที่กรีตได้จากต้นยางพาราจะคงสภาพความเป็นน้ำยางอยู่ได้ประมาณ 4 - 6 ชั่วโมง เนื่องจากแบคทีเรียในอากาศ อุปกรณ์ที่ใช้กรีตน้ำยาง และจากเปลือกของต้นยางขณะกรีตยางจะลงไปในน้ำยาง แบคทีเรียจะกินสารอาหารที่อยู่ในน้ำยาง เช่น โพรตีน น้ำตาล และฟอสโฟไลปิด โดยแบคทีเรียจะเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นหลังจากแบคทีเรียกินสารอาหาร คือ จะเกิดการย่อยสลายได้เป็นก๊าซชนิดต่าง ๆ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทน จะเริ่มเกิดการบูดเน่าและส่งกลิ่นเหม็น จึงต้องใส่สารเพื่อรักษาสภาพของน้ำยาง ความเสถียรของน้ำยาง คือ การที่น้ำยางสามารถรักษาสภาพการเป็นคอลลอยด์ไว้ได้ [9] การที่น้ำยางสดสามารถคงสภาพเป็นคอลลอยด์ได้ เนื่องจากปัจจัย 2 ประการ คือ [11]

- (1) ส่วนประกอบของโพรตีนที่ดูดซับอยู่รอบๆ ผิวของอนุภาคยาง หรือโพรตีนเป็นชั้นห่อหุ้มอนุภาคยางไว้ จึงมีความสำคัญต่อสถานะความคงตัวของน้ำยาง เพราะโพรตีนจะป้องกันการรวมตัวกันของอนุภาคยาง ถ้ามีการสูญเสีย น้ำในชั้นของโพรตีนที่ห่อหุ้มอนุภาคยาง จะทำให้อนุภาคยางมารวมตัวกันเป็นก้อนยาง น้ำยางก็จะสูญเสียความคงตัวและไม่เป็นของเหลว
- (2) ประจุลบที่อยู่รอบๆ อนุภาคยางซึ่งก่อให้เกิดการผลักกันระหว่างอนุภาคยางก็ช่วยรักษา สถานะการกระจายตัวของอนุภาคยางด้วย ทำให้น้ำยางยังเป็นของเหลวอยู่ได้ ถ้าเกิดผลกระทบบกระเทือนที่ทำให้ประจุลบลดลง อนุภาคยางก็จะรวมตัวกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ น้ำยางก็จะเสียสภาพการเป็นของเหลว และเกิดเป็นก้อนยาง

จากสมบัติดังกล่าวของน้ำยางธรรมชาติ จึงต้องเติมสารเคมีเพื่อรักษาสภาพของน้ำยางก่อนที่จะผ่านกระบวนการขนส่งเพื่อนำไปแปรรูปต่อ สารเคมีที่ใช้รักษาสภาพน้ำยางสดควรมีสมบัติดังนี้ [11]

- (1) มีประสิทธิภาพในการทำลายจุลินทรีย์

- (2) ควรมีประสิทธิภาพпенดางเพื่อส่งเสริมสถานะคอลลอยด์หรือแขวนลอยให้น้ำยาง
- (3) ทำให้อนุมูลโลหะหนักไมวองไวตอการเกิดปฏิกิริยา เพราะอนุมูลเหล่านี้ อาจจะส่งเสริมการเจริญของจุลินทรีย์
- (4) สามารถระงับการทำงานของเอนไซม์ที่ช่วยการเจริญของจุลินทรีย์ ที่ทำให้ง่ายเกิดการเน่าเสีย
- (5) ไม่เป็นพิษต่อคนและต่อคุณภาพของยาง และสามารถกำจัดออกจากยางได้ง่าย

ในปัจจุบันนิยมใช้สารเคมี 4 แบบด้วยกัน [9, 11] คือ

- (1) การเก็บรักษาน้ำยางด้วยด่าง หรือโซเดียมคาร์บอเนต (sodium carbonate, Na_2CO_3) ช่วยลดกรดที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาของแบคทีเรีย และน้ำตาล สารนี้เหมาะสำหรับการรักษาสภาพน้ำยางสดที่นำไปทำยางแผ่น และยางเครพ
- (2) การเก็บรักษาน้ำยางด้วยแอมโมเนีย (ammonia, NH_3) ทำหน้าที่ขัดขวางการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย และด้วยความпенดางของแอมโมเนียจึงช่วยเพิ่มประจุลบรอบอนุภาคยางมากขึ้น
- (3) การเก็บรักษาน้ำยางด้วยฟอร์มาลดีไฮด์ (formaldehyde) สามารถทำลายแบคทีเรีย และอาจช่วยขัดขวางการทำงานของเอนไซม์ในน้ำยางที่ทำให้เกิดการเสียสภาพ
- (4) การเก็บรักษาน้ำยางด้วยโซเดียมซัลไฟต์ (sodium sulfite, Na_2SO_3) ยางที่ได้จะมีสีที่จางกว่ายางที่รักษาสภาพด้วยแอมโมเนีย และฟอร์มาลดีไฮด์ ดังนั้นจึงมีการใช้โซเดียมซัลไฟต์ในการทำยางที่ต้องการสีจาง

2.2.2 การใช้งานของยางธรรมชาติ

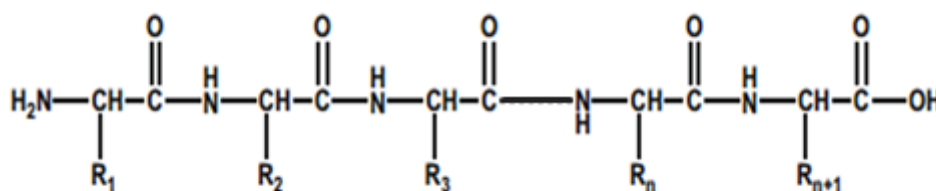
- (1) ผลิตภัณฑ์แบบจุ่ม เช่น ถุงมือผ่าตัด ถุงมือตรวจโรค ถุงมือแม่บ้าน ถุงมืออุตสาหกรรม ถุงยางอนามัย ลูกโป่ง จุกนมยาง ทอสวนปัสสาวะ และอุปกรณ์ทางการแพทย์ต่างๆ เป็นต้น
- (2) ผลิตภัณฑ์น้ำยางในอุตสาหกรรมพรม มีการใช้น้ำยางอาบหลังพรมเพื่อยืดพรมไว้
- (3) ผลิตภัณฑ์ยางฟองน้ำ (latex foam) ใช้ทำที่นอน หมอน เบาะรองนั่ง เป็นต้น
- (4) สายยางยืด เช่น ยางยืดขอบกางเกง ถุงเท้า เสื้อชั้นใน และยางรัดป้ายติดกระเปาะ เปนตน
- (5) ใช้น้ำยางเป็นตัวยึดฟูกโยขนสัตว์ และกาบมะพร้าว
- (6) ยางล้อรถยนต์ ยางล้อเครื่องบิน ยางรองคอสพาน ยางรองรับแรงสะเทือนพื้นรองเทา กาวยาง ยางรัดของ รองเทายาง และยางปูพื้น

2.3 โพรตีนในยางธรรมชาติ

โพรตีนในน้ำยางธรรมชาติเป็นสารอินทรีย์ที่ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ออกซิเจน และซัลเฟอร์ มารวมตัวกันเป็นพอลิเมอร์ที่มีหมู่หมู่อะมิโน (amino groups) หลายร้อยหมู่ เชื่อมต่อกันด้วยพันธะเอไมด์ (amide bond) หรือ $\text{CO} - \text{NH}$ ซึ่งมีชื่อเรียกว่าพันธะเพปไทด์ (peptide bonds) แสดงดังรูปที่ 2.3 เกิดขึ้นจากการรวมตัวของหมู่คาร์บอกซิลของกรดอะมิโน โดยเสียน้ำไปหนึ่งโมเลกุล เรียกสายยาวที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมต่อกันของกรดอะมิโนว่าพอลิเพปไทด์ โดยจะมีกรดอะมิโนตั้งแต่ 100 - 800 ตัว หากมีกรดอะมิโนน้อยกว่า 50 ตัวจะเรียกว่า โอลิโกเพปไทด์ [12] โพรตีนจะตกตะกอนได้เมื่อพันธะที่ยึดเหนี่ยวในโมเลกุลถูกทำลาย ได้แก่ ความร้อน และสารเคมีต่างๆ เช่น กรดและด่างเข้มข้น สารละลายยูเรีย ตัวทำละลายอินทรีย์บางชนิด เนื่องจากสารเหล่านี้จะไปทำลายโครงสร้างหรือแรงยึดเหนี่ยวของโครงสร้าง จากสมบัติดังกล่าวของโพรตีนทำให้สามารถ

แยกโปรตีนได้ด้วยวิธีการต่างๆ เช่น ตกตะกอนมาจากเนื้อเยื่อ หรืออาจทำปฏิกิริยาแล้วแยกโปรตีนออกมา [4]

โปรตีนที่อยู่ในน้ำยางธรรมชาติจะห่อหุ้มอยู่บริเวณผิวรอบนอกของอนุภาคยางประมาณ 25% อยู่ในชั้นน้ำ 50% และอีก 25% จะปะปนอยู่ในส่วนของลูทอยด์ (lutoid) สำหรับโปรตีนที่ห่อหุ้มอยู่บนอนุภาคยางเป็นโปรตีนที่สามารถละลายน้ำได้ จะมีหน้าที่ป้องกันการรวมตัวกันของอนุภาคยาง เมื่อมีการสูญเสียหรือกำจัดโปรตีนตัวนี้ออกไปจะทำให้ยางรวมตัวกันเป็นก้อน (coagulum) แยกออกจากส่วนของเซรัม (serum) โปรตีนบนผิวของอนุภาคยางนี้มีส่วนประกอบของกำมะถันประมาณ 5% ดังนั้นเมื่อเกิดการเสียสภาพจากการบูดหรือเน่าจากแบคทีเรีย โปรตีนส่วนนี้จะเกิดการสลายตัวทำให้ได้สารไฮโดรเจนซัลไฟด์ และสารเมอร์แคปแทน (mercaptan) จึงทำให้ยางมีกลิ่นเหม็น



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของโปรตีน [13]

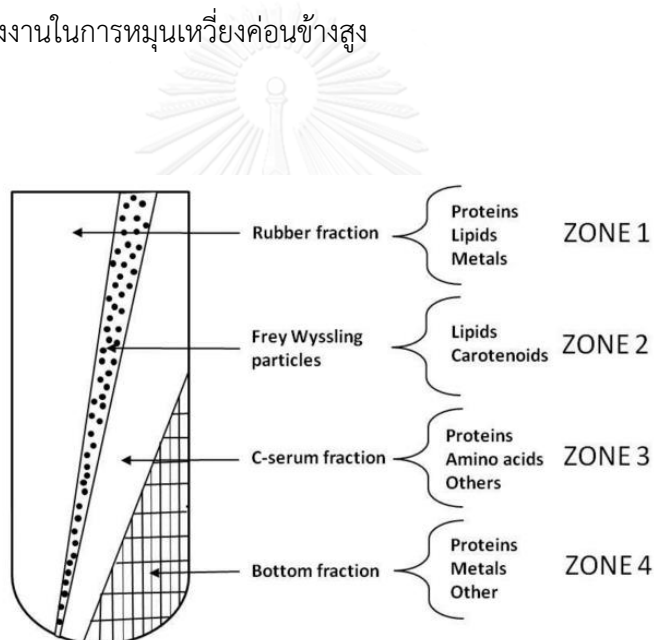
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.4 กระบวนการลดปริมาณโปรตีนในยางธรรมชาติ

ปริมาณของโปรตีนในน้ำยางมีประมาณ 1.0 - 1.8% แตกต่างกันไปตามแหล่งที่มา [4] 75% ของโปรตีนดังกล่าวอยู่ในส่วนของน้ำ และอีก 25% อยู่บนผิวของอนุภาคยาง การที่จะทำให้ผู้บริโภคไม่เกิดอาการแพ้ที่นั่นผลิตภัณฑ์จะต้องมีปริมาณโปรตีนน้อยกว่า 50 ไมโครกรัมต่ออย่าง 1 กรัม [14] ดังนั้นการกำจัดหรือลดปริมาณโปรตีนให้อยู่ในระดับที่ไม่ทำให้เกิดอาการแพ้จึงเป็นวิธีที่ช่วยปรับปรุงคุณภาพของยางพาราเพื่อนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ กระบวนการที่นิยมถูกนำมาใช้เพื่อลดปริมาณโปรตีนได้แก่ การใช้เครื่องหมุนแยกวัตถุ (centrifugation) การใช้สารลดแรงตึงผิว (surfactant treatment) และการใช้เอนไซม์ (enzyme treatment) เป็นต้น

2.4.1 การใช้เครื่องหมุนแยกวัตถุ (centrifugation)

การสกัดหรือกำจัดโปรตีนออกด้วยวิธีการหมุนแยกวัตถุนี้จะใช้การหมุนเหวี่ยงด้วยความเร็วสูงถึง 20,000 รอบต่อนาที (rpm) ซึ่งเป็นการแยกน้ำยางออกเป็น 2 ส่วน โปรตีนประมาณ 75% ในน้ำยางธรรมชาติจะละลายอยู่ในรูปของเซรุ่ม ขณะที่อีก 25% จะรวมตัวกันอยู่ที่บริเวณผิวหน้าของอนุภาคน้ำยาง [4] ดังแสดงในรูปที่ 2.4 จึงทำให้สามารถลดปริมาณโปรตีนลงได้ โดยสามารถแยกโปรตีนออกได้ประมาณ 50% ต่อครั้ง และเมื่อทำการเหวี่ยงหมุน 2 ครั้ง [15] จะมีผลทำให้ปริมาณโปรตีนจะถูกกำจัดออกไปได้มากถึง 63% [16] ข้อเสียของกระบวนการนี้ คือใช้พลังงานในการหมุนเหวี่ยงค่อนข้างสูง



รูปที่ 2.4 ส่วนของน้ำยางที่แยกออกจากกันหลังจากการใช้เครื่องหมุนแยกวัตถุ [17]

2.4.2 การใช้เอนไซม์ (enzyme treatment)

การใช้เอนไซม์ช่วยย่อยสลายพันธะเพปไทด์ของโปรตีนในน้ำยางธรรมชาติ เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพมาก เนื่องจากจะช่วยรักษาสมบัติทางกายภาพเดิมและประสิทธิภาพของยางธรรมชาติไว้ กระบวนการนี้ใช้เอนไซม์ย่อยโปรตีน (proteolytic enzyme) แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงเพื่อกำจัดโปรตีนออก โดยโปรติเอส (protease) ที่ใช้จะ

ได้จากผลมะเดื่อ น้ำสับประรด ยางมะละกอ แบคทีเรีย *Bacillus subtilis* เชื้อรา *Rhizopus oligosporus*, *Aspergillus oryzae* [4] จากการศึกษาพบว่า โปรตีนจากเชื้อ *Bacillus subtilis* สามารถกำจัดโปรตีนในน้ำยางพาราสดได้ดีที่สุด ซึ่งโปรตีนที่ได้จะทำมาจากการหมักแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* โดยใช้ปริมาณ 0.025% ควบคุมอุณหภูมิที่ 13 - 32 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 - 72 ชั่วโมง โดยเอนไซม์ที่ได้จะทำปฏิกิริยากับโปรตีนโดยเข้าไปตัดพันธะเพปไทด์ วิธีนี้สามารถช่วยให้ผลิตภัณฑ์มีโปรตีนตกค้างลดลงถึง 95% [16] แต่ข้อเสียหลักของวิธีการนี้คือใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานาน

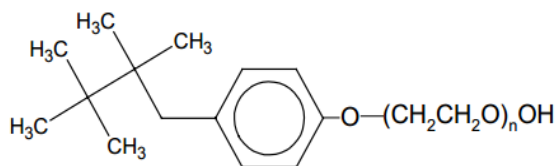
2.4.3 การใช้สารลดแรงตึงผิว (surfactant treatment)

กระบวนการนี้เป็นการใช้สารลดแรงตึงผิวเข้าไปช่วยทำลายสภาพแวดล้อมของโปรตีน (protein denaturation) [18] เนื่องจากโครงสร้างโปรตีนถูกยึดเหนี่ยวด้วยแรงดึงดูดอย่างอ่อนจึงทำให้โครงสร้างสามารถเสียสภาพได้ง่าย การเสียสภาพของโปรตีนสามารถเกิดขึ้นได้โดยใส่สารเคมีเพื่อทำลายพันธะไฮโดรเจน โปรตีนส่วนมากจะเสียสภาพการขดตัว หรือการจับตัวของหน่วยย่อยไป ซึ่งการเสียสภาพทางธรรมชาติไปนี้ บางครั้งจะเป็นการเสียสภาพอย่างถาวร โปรตีนที่เสื่อมสภาพจะไม่สามารถทำหน้าที่ได้อย่างปกติ และสมบัติอื่นๆ ก็เสียไปด้วย เช่น การละลายในน้ำ โปรตีนที่เสียสภาพจะไม่ละลายในน้ำและตกตะกอน โดยส่วนใหญ่จะนิยมใช้สารลดแรงตึงผิว 2 ชนิด คือ พอลิเอทิลีนไกลคอล เทิร์ตออกทิลฟีนิลอีเทอร์ (Polyethylene glycol *tert*-octylphenyl ether) หรือมีชื่อทางการค้า คือ Triton™ X-100 และโซเดียมโดเดคิลซัลเฟต (sodium dodecyl sulfate, SDS) แต่ข้อเสียของกระบวนการนี้ คือ สารลดแรงตึงผิวดังกล่าวมีราคาค่อนข้างสูง และส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการวัลคาไนเซชันลดลง โดยดูจากค่าการเชื่อมขวาง (crosslink density) ที่ลดลง [4] สารลดแรงตึงผิวที่นิยมใช้นั้นมีประสิทธิภาพการลดปริมาณโปรตีนดังนี้

2.4.3.1 พอลิเอทิลีนไกลคอล เทิร์ตออกทิลฟีนิลอีเทอร์

เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุ แต่มีส่วนที่ชอบน้ำ คือ พอลิเอทิลีนออกไซด์ (polyethylene oxide) [19] โครงสร้างแสดงดังรูปที่ 2.5 เมื่อปฏิกิริยาเสร็จสิ้นแล้วสารนี้จะละลายอยู่ในชั้นน้ำ ทำให้สามารถแยกออกจาก

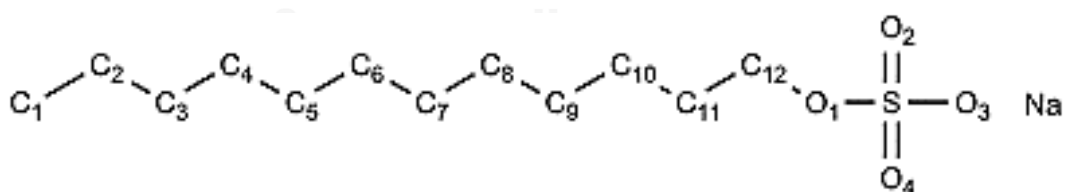
ผลิตภัณฑ์ได้ง่าย ข้อดีของสารนี้ คือ สามารถทนความร้อนและความเป็นกรด-ด่างได้ดี และสามารถถูกย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ



รูปที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีนไกลคอล เดิร์ทออกทิลฟีนิลอีเทอร์ [19]

2.4.3.2 โซเดียมโดเดคิลซัลเฟต

เป็นสารตั้งผิวที่มีประจุลบ (anionic reactant) [20] โครงสร้างแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งเป็นส่วนประกอบในสารที่ใช้ทำความสะอาดต่างๆ เช่น ผงซักฟอก สบู่ แชมพู เป็นต้น ด้านที่มีโครงสร้างเป็นไฮโดรคาร์บอนและด้านที่มีขั้วมีคุณสมบัติเป็นทั้งชอบน้ำและชอบไขมัน (amphiphilic) ทำให้เหมาะสมกับการเป็นสารที่ใช้ชำระล้างสิ่งสกปรกต่างๆ แต่ข้อเสียของสารนี้คือทำให้เกิดอาการระคายเคืองต่อผิวหนังสำหรับผู้ที่มีอาการแพ้หากแยกออกจากผลิตภัณฑ์ไม่หมด [21]

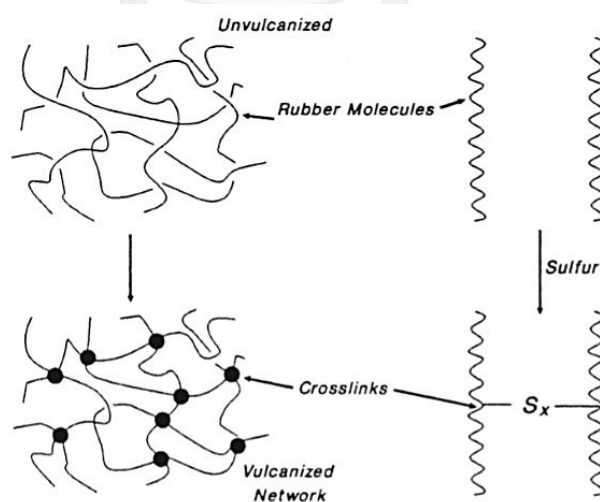


รูปที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของโซเดียมโดเดคิลซัลเฟต [20]

2.5 วัลคาไนเซชัน

เป็นที่ทราบกันดีว่ายางดิบเป็นยางที่ยังไม่อยู่ในสภาพที่พร้อมจะถูกนำไปใช้งานในเชิงวิศวกรรม เพราะยางดิบมีรูปร่างที่ไม่เสถียร มีความยืดหยุ่นต่ำ และมีสมบัติเชิงกลที่ไม่ดีด้วยเหตุนี้ จึง

จำเป็นต้องเปลี่ยนยางดิบให้กลายเป็นยางสุกหรือยางคงรูปก่อนที่จะนำไปใช้งาน เนื่องจากการเปลี่ยนสภาพจากยางดิบให้เป็นอย่างสุกนั้นเกิดขึ้นโดยอาศัยปฏิกิริยาเคมีที่เรียกว่า ปฏิกิริยวัลคาไนเซชัน (vulcanization) ซึ่งเพิ่มความเป็นอีลาสติกและลดความเป็นพลาสติกของยาง คือ ปฏิกิริยวัลคาไนเซชันที่ยางทำปฏิกิริยากับกำมะถันในปริมาณที่พอเหมาะที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวของกำมะถัน โดยกำมะถันที่นำมาทำปฏิกิริยานี้จะสร้างพันธะโคเวเลนต์ (covalent bond) เชื่อมระหว่างโซ่พอลิเมอร์ให้เป็นโมเลกุลเดียวกัน การเพิ่มจำนวนการเชื่อมขวางจะเพิ่มส่วนที่ช่วยในการรับแรงของยาง ทำให้ยางมีสภาพคงตัวในอุณหภูมิต่างๆ มีความยืดหยุ่นได้ดีมากขึ้น ทนความร้อนและแสงแดด และละลายในตัวทำละลายได้ยากขึ้น จึงเรียกกึ่งสุกหรือยางคงรูปในเชิงเทคนิคว่ายางวัลคาไนซ์ [22] โดยจะเกิดเป็นโครงสร้างแบบร่างแห ดังแสดงในรูปที่ 2.7 [23] เมื่อให้แรงดึงยางจะสามารถยืดตัวได้หลายเท่าของความยาวเดิม และเมื่อปล่อยแรงออกยางก็จะกลับคืนสู่รูปร่างและความยาวเดิมหรือใกล้เคียงเดิม ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญในการทำผลิตภัณฑ์ เช่น ยางรถยนต์ เป็นต้น ให้สมบัติเชิงกลดี แข็งแรง มีความเหนียว (toughness) ทนทานต่อการขัดสี (abrasion resistance) สูง [6] และยังสามารถป้องกันการซึมผ่านของน้ำและอากาศได้ จึงเป็นที่นิยมในการนำมาใช้ทำเป็นผลิตภัณฑ์ยางต่างๆ ในทางตรงกันข้ามยางดิบมีข้อจำกัดในการใช้งานเนื่องจากมีลักษณะทางกายภาพไม่เสถียร การเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ คือ ยางอ่อนตัวและเหนียวเมื่ออุณหภูมิสูง และแข็งเปราะเมื่ออุณหภูมิต่ำ



รูปที่ 2.7 การเกิดการเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลของยาง [23]

การวัลคาไนเซชันยางที่ใช้กันมากในโรงงานอุตสาหกรรมสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ระบบ ได้แก่ ระบบกำมะถัน ระบบเปอร์ออกไซด์ และระบบที่ใช้สารเคมีอื่นๆ

2.5.1 กำมะถัน (sulfur)

กำมะถันเป็นสารวัลคาไนซ์ที่ใช้กันมากที่สุดในอุตสาหกรรมยางเพราะเป็นระบบที่มีต้นทุนต่ำ ปฏิกิริยาวัลคาไนซ์สามารถเกิดขึ้นได้เร็ว และยางวัลคาไนซ์ที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ดี ระบบนี้นิยมใช้กับยางทุกชนิดที่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุล โดยเฉพาะยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่ อย่างไรก็ตามระบบนี้ก็ยังมีข้อจำกัดหลัก คือ ไม่สามารถใช้วัลคาไนซ์ยางที่ไม่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุลได้ เช่น ยางซิลิโคน

2.5.2 เปอร์ออกไซด์ (peroxide)

การวัลคาไนเซชันด้วยเปอร์ออกไซด์จะสามารถใช้ได้กับยางส่วนใหญ่ ทั้งที่มีพันธะคู่และไม่มีพันธะคู่ ในโมเลกุล แต่เนื่องจากระบบนี้มีต้นทุนสูงกว่าระบบการวัลคาไนเซชันด้วยกำมะถัน และยางวัลคาไนซ์ที่ได้มีสมบัติทั้งเชิงกลและเชิงพลวัตต่ำกว่ายางที่ได้จากการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน ประกอบกับเปอร์ออกไซด์จัดเป็นสารเคมี ที่ค่อนข้างอันตราย การขนย้ายและการเก็บรักษาต้องทำด้วยความระมัดระวัง ดังนั้นการวัลคาไนซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์นั้นจึงนิยมใช้กับยางที่ไม่มีพันธะคู่ในโมเลกุล หรือยางที่มีปริมาณพันธะคู่ในโมเลกุลต่ำมากเท่านั้น ยกเว้นกรณีที่ต้องการทำผลิตภัณฑ์ที่ทนต่อความร้อนได้ดี หรือมีค่าการเสีयरูปลาวรรหลังกด (compression set) ต่ำเท่านั้น

2.5.3 สารเคมีอื่นๆ

นอกจากระบบหลัก 2 ระบบดังกล่าวมาแล้ว ยังมีการนำสารวัลคาไนซ์ชนิดอื่นๆ มาใช้ในการคงรูปด้วยเช่นกัน แต่มีการใช้น้อยหรือใช้ในกรณีที่เป็น เช่น การใช้โลหะออกไซด์ (แมกนีเซียมออกไซด์ร่วมกับซิงก์ออกไซด์) ในการคงรูปของยางคลอโรพรีน (chloroprene) เป็นต้น

เมื่อยางได้รับการคงรูปหรือวัลคาไนซ์แล้วจะมีสมบัติดังนี้

- (1) มีความยืดหยุ่นสูง
- (2) มีความทนต่อแรงดึงสูง สามารถทนแรงดึงได้มากกว่า 20 เมกะปาสคาล
- (3) มีการยืดตัวก่อนขาดได้มาก สามารถยืดได้ 500 – 1,000%
- (4) มีความทนทานต่อการฉีกขาด (tear) และการสึกหรอ (abrasion) ได้ดี
- (5) มีการคืนตัว (compression set resistance) และการกระดอน (resilience) ดี
- (6) ใช้งานที่อุณหภูมิต่ำได้ดี
- (7) มีแรงยึดหรือติดกันระหว่างยางกับเส้นใย และโลหะได้ดี
- (8) มีอุณหภูมิการใช้งานอยู่ระหว่าง – 40 ถึง 70 องศาเซลเซียส

2.6 สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติ

2.6.1 สมบัติของยางดิบ

ยางมีสมบัติเป็นทั้งพลาสติกและอีลาสติก คือ ยางสามารถแบนและไหลได้เมื่อได้รับแรงกดซึ่งเป้นสมบัติของพลาสติก เมื่อเอาแรงออกยางสามารถกลับคืนสู่รูปเดิมได้ซึ่งเป็นสมบัติของอีลาสติก และยางยังเป็นเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic) เมื่ออยู่ในสภาวะที่อุณหภูมิต่ำยางจะแข็งกระด้าง ถ้ายางอยู่ในสภาวะที่อุณหภูมิสูงยางจะนิ่มลักษณะเช่นนี้ทำให้ยางมีช่วงอุณหภูมิที่จำกัดในการใช้งาน นอกจากนี้ยังมีความแข็งแรงต่ำ ความต้านทานต่อแรงดึงต่ำ (Tensile strength) และความต้านทานต่อการสึกหรอต่ำ และยังสามารถละลายได้ภายในตัวทำละลาย [11]

2.6.2 ความต้านทานต่อแรงดึง (tensile strength)

เป็นการทดสอบขั้นพื้นฐานเพื่อศึกษาความแข็งแรงของวัสดุเมื่อได้รับแรงดึงในทิศทางเดียว (แสดงในภาพที่ 2.9) ใช้เพื่อวัดคุณสมบัติความต้านทานของวัสดุต่อที่มีต่อแรงภายนอกที่มากระทำ ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของวัสดุต่างๆ จะแสดงจากค่าความดึงเครียดที่มากที่สุดที่วัสดุดังกล่าวมาสามารถรับแรงได้ก่อนที่จะขาดออกจากกัน



รูปที่ 2.8 แรงดึงในทิศทางเดียว (tension) [24]

2.6.3 ระยะเวลายืด ณ จุดขาด (elongation at break)

ระยะเวลายืด ณ จุดขาด คือ ความสามารถที่ยืดออกได้ของวัสดุโดยไม่เกิดการแตกหักหรือเสียหาย ซึ่งจะแสดงผลเป็นร้อยละการยืดของชิ้นทดสอบที่จุดขาด คำนวณได้จากสมการด้านล่าง

$$\text{ร้อยละการยืด} = (\text{ความยาวสุดท้าย} - \text{ความยาวเริ่มต้น}) / \text{ความยาวเริ่มต้น} \times 100$$

2.6.4 ค่ามอดูลัสการดึงยืด 300% (300% modulus)

ค่าความต้านทานของยางต่อการเปลี่ยนรูป ซึ่งหมายถึงแรงที่ดึงต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ หรือพูดอีกอย่างว่าเป็นปริมาณของแรงดันที่ต้องการยืดตัวอย่างให้ได้ขนาดตามกระบวนการทดสอบ การดึงยืดชิ้นงานตัวอย่างออก 300% นั้น คือ การดึงยืดออก 3 เท่าของความยาวเดิมนั้นเอง โดยหน่วยการวัดนี้มีหน่วยเป็นเมกะปาสคาล (MPa)

2.6.5 ความแข็ง (hardness, shore A)

การต้านทานต่อแรงกระทำที่กดลงบนผิวหน้าของชิ้นงาน โดยที่แรงกระทำนั้นไม่ทำลายชิ้นงานตัวอย่าง ความแข็ง Shore A และ Shore D เป็นวิธีที่นิยมใช้สำหรับยาง โดยที่ Shore A ใช้สำหรับยางอ่อน ในขณะที่ Shore D ใช้สำหรับยางที่แข็งกว่า ความแข็ง Shore A คือค่าความแข็งสัมพัทธ์ของวัสดุที่มีความยืดหยุ่น เช่น ยาง หรือพลาสติกอ่อน สามารถที่จะหาได้ด้วยเครื่องมือที่เรียกว่า Shore A Durometer เนื่องจากความยืดหยุ่นของยางและพลาสติก การอ่านค่าจะเปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังนั้นการกดบางครั้งจะถูกรายงานร่วมกับค่าความแข็ง

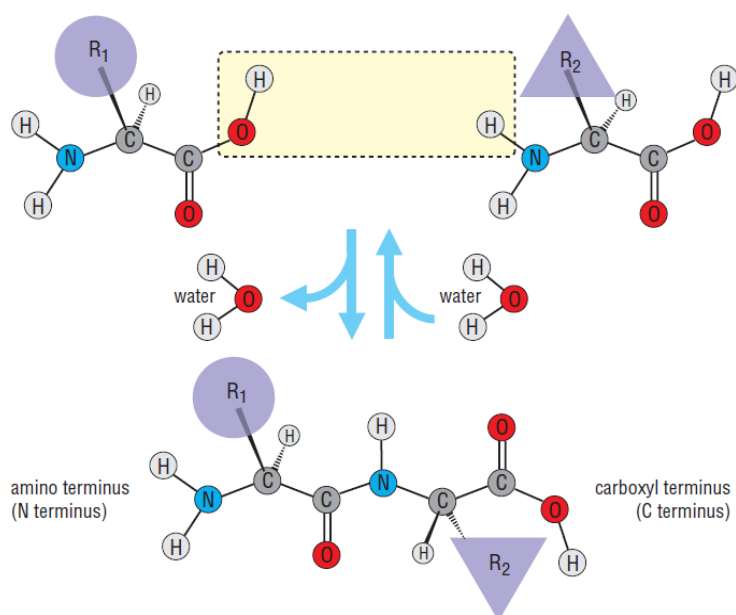
2.7 กระบวนการไฮโดรเทอร์มัล

กระบวนการไฮโดรเทอร์มัลเป็นการทำปฏิกิริยาของสารตั้งต้นกับน้ำที่อุณหภูมิปานกลางและความดันสูงกว่าความดันไอของน้ำ กระบวนการนี้สามารถสลายโครงสร้างส่วนใหญ่ที่เป็นพอลิเมอร์ทางชีวภาพ (biopolymer) ที่สามารถละลายในน้ำได้ เช่น เซลลูโลส และโปรตีน [25] โดยเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) [12] ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส คือ ปฏิกิริยาการสลายพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) ด้วยการใช้น้ำ น้ำและความร้อนจะเข้าไปเหนี่ยวนำทำให้พอลิเมอร์แตกตัวออกเป็นมอนอเมอร์ตัวแปรที่ส่งผลต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส คือ อุณหภูมิ เวลา และตัวกลางที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา [26] ข้อดีของการใช้น้ำเป็นสารละลาย คือ

- 1) ไม่เป็นพิษหรือตกค้างในสิ่งแวดล้อมและสิ่งมีชีวิต
- 2) มีราคาถูกกว่าการใช้สารละลายชนิดอื่น
- 3) สามารถแยกออกจากผลิตภัณฑ์ได้ง่าย
- 4) สามารถประยุกต์ใช้ร่วมกับวิธีอื่นได้

ปฏิกิริยาการสลายพันธะเพปไทด์ของโปรตีนด้วยน้ำ แสดงในรูปที่ 2.10 เป็นกระบวนการการเกิดปฏิกิริยาแบบดูดความร้อน (endothermic reaction) [27] ซึ่งหมายถึงกระบวนการหรือปฏิกิริยาที่ดูดซับพลังงานในรูปของความร้อน เมื่อมีพลังงานหรือความร้อนในระบบมากขึ้นจึงเป็นการเร่ง

ปฏิกิริยานี้ทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดีขึ้น โดยเมื่อโปรตีนแตกตัวออกแล้วจะได้เป็นพันธะเพปไทด์ที่สั้นลงและกรดอะมิโน ซึ่งกรดอะมิโนเป็นสารที่มีขั้วจึงสามารถละลายในน้ำที่ใช้เป็นสารละลายได้ (hydrophilic) ทำให้เมื่อกรดอะมิโนหลุดออกจากพันธะเพปไทด์จะไปละลายอยู่ในชั้นน้ำและถูกแยกออกจากเนื้อเยื่อด้วยกระบวนการเก็บผลิตภัณฑ์ต่อไป ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสนั้นเป็นปฏิกิริยาที่สามารถย้อนกลับได้ด้วยการตั้งโมเลกุลของน้ำออก แต่ในกรณีนี้โปรตีนเมื่อสลายตัวเป็นกรดอะมิโนแล้วจะเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนจึงไม่สามารถรีพอลิเมอร์ไรซ์ (repolymerized) กลับไปเป็นโปรตีนได้อีก



รูปที่ 2.9 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของโปรตีน [12]

(กระบวนการเกิดโปรตีนจากบนลงล่าง และกระบวนการไฮโดรไลซิสจากล่างขึ้นบน)

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยของ Yeang และคณะ [28] ได้ศึกษาโปรตีนที่ทำให้เกิดการแพ้ในน้ำอย่างธรรมชาติ โดยนำน้ำยางไปหมუნเหวี่ยงด้วยความเร็วสูง ได้เป็นน้ำยางที่แยกออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นเนื้อเยื่อ ส่วนของเหลวใส (C-serum) และส่วนล่างสุด (B-serum) ซึ่งโปรตีนส่วนใหญ่จากของเหลวใสและส่วนล่างสุดของน้ำยางเป็นโปรตีนที่สามารถละลายน้ำได้ ส่วนของเหลวใสมีโปรตีนประมาณ 100 ชนิด มีอัตราส่วนของโปรตีน 12 มิลลิกรัมต่อของเหลว 1 มิลลิลิตร ส่วนประกอบหลักของส่วนล่างสุด คือ ลู

ทอยด์ ซึ่งมีโปรตีน 24 มิลลิกรัมต่อ 1 มิลลิลิตร ในส่วนล่างสุดของน้ำยางนี้เองมีโปรตีนประมาณ 20 ชนิด ซึ่งเป็นโปรตีนที่สามารถละลายน้ำได้ 50 – 70% International Union of Immunological Societies หรือ IUIS ระบุว่าโปรตีนในน้ำยางพาราที่ทำให้เกิดอาการแพ้มี 10 ชนิด ดังแสดงในตารางที่ 2.2 และยังพบว่าโปรตีนชนิด Hev b 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 และ 10 ในน้ำยางเกิดจากอาการเครียดของต้นยางพารา

1. ส่วนของเนื้อยางจะพบโปรตีนชนิด Hev b 1 และ Hev b 3 เป็นส่วนใหญ่ โปรตีนชนิด Hev b 1 มีขนาด 58 กิโลดาลตัน ซึ่งมีผู้ใช้งานประมาณ 50% มีอาการแพ้โปรตีนนี้ ส่วนโปรตีนชนิด Hev b 3 มีขนาด 27 กิโลดาลตัน โปรตีนทั้ง 2 ชนิดนี้จะพบอยู่บนพื้นผิวของอนุภาคยาง ซึ่งไม่สามารถละลายน้ำได้
2. ส่วนของเหลวใส หรือ C-serum ประกอบด้วยโปรตีนชนิด Hev b 5, 7, 8 และ 9
 - 2.1 โปรตีนชนิด Hev b 5 เป็นโปรตีนที่มีสภาพเป็นกรด และทนต่อความร้อนสูงได้ดี โปรตีนชนิดนี้จะแยกออกจากน้ำยางได้ยาก
 - 2.2 โปรตีนชนิด Hev b 7 มีขนาดระหว่าง 42 – 46 กิโลดาลตัน ซึ่งเป็นขนาดของโปรตีนที่ทำให้เกิดการแพ้ที่พบได้มากที่สุดใต้น้ำยางธรรมชาติ
 - 2.3 โปรตีนชนิด Hev b 8 มีขนาด 10.2 14.2 และ 15.7 กิโลดาลตัน ซึ่งเป็นโปรตีนที่ทำให้เกิดอาการแพ้เพียงเล็กน้อย โดยพบว่าผู้ใช้ยางเพียง 3% ที่มีอาการแพ้ต่อโปรตีนชนิดนี้
 - 2.4 โปรตีนชนิด Hev b 9 พบได้ไม่มากในน้ำยางพารา โดยมีขนาดประมาณ 47.6 กิโลดาลตัน
3. ส่วนล่างสุดของน้ำยาง หรือ B-fraction ส่วนใหญ่ประกอบด้วยลูทอยด์ มีโปรตีนทั้งหมด 4 ชนิด คือ Hev b 2 4 6 และ 10
 - 3.1 โปรตีนชนิด Hev b 2 หรือ เบต้า-1,3-กลูคาเนส (β -1,3-glucanase) มีขนาด 36 กิโลดาลตัน โปรตีนชนิดนี้ส่งผลต่อการแพ้ทางผิวหนังมากที่สุด และสามารถละลายได้ในสารละลายที่มีสภาวะไอออนิกสูง

3.2 โปรตีนชนิด Hev b 4 มีขนาดประมาณ 50 – 57 กิโลดาลตัน สามารถละลายได้ในสารละลายที่มีสภาวะไอออนิกสูง เช่น 2M NaCl โปรตีนชนิดนี้เป็นชนิดเดียวกันกับที่พบได้ในมันสำปะหลัง

3.3 โปรตีนชนิด Hev b 6 มีขนาดแตกต่างกันออกไป คือ Hev b 6.01 มีขนาด 18.3 กิโลดาลตัน Hev b 6.02 มีขนาด 4.7 กิโลดาลตัน และ Hev b 6.03 มีขนาด 13.3 กิโลดาลตัน โปรตีนชนิดนี้ทนต่อความร้อนได้ดี และสามารถละลายได้ในกรดไตรคลอโรอะซิติก (TCA)

3.4 โปรตีนชนิด Hev b 10 มีขนาด 45 กิโลดาลตัน ซึ่งโปรตีนชนิดนี้ส่งผลต่ออาการแพ้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ตารางที่ 2.2 สารที่ทำให้เกิดการแพ้ในน้ำยาง [28]

IUIS code	Identity	pI ^a	Molecular mass (kDa) ^a	Location in latex
Hev b 1	Rubber elongation factor (REF)	4.9–5.3 ³⁶ , (5.0) ²⁵ , 8.5 ^b	{14.6} ²⁸ , 58 ^b	Rubber particles
Hev b 2	β-1,3-Glucanase	9.5 ⁷⁵ (9.8) ⁸⁰	[36] ^d , 36 ⁷⁶ , 34–36 ^{75,79} , (35) ⁴⁴	B-serum
Hev b 3	Small rubber particle protein (SRPP)	4.3–5.7 ^{27,38} , 4.8 ³⁹ , (4.6 ⁴³ –4.8 ²⁵)	[22–23] ²⁷ , (22) ^{25,43}	Rubber particles
Hev b 4	Microhelix, cyanogenic glucosidase	4.5 ⁷⁵	50–57 ^e	B-serum
Hev b 5	Acidic protein	3.5 ⁴⁷ , (3.9) ⁴⁷	[16] ⁴⁷ (16.0) ⁴⁷	C-serum
Hev b 6.01	Prohevein	(5.3) ²⁴	20 ⁹⁰ (19) ²⁴	B-serum
Hev b 6.02	Hevein	4.7 ² (4.7) ²⁴	{4.7} ⁸⁴ (4.7) ²⁴	B-serum
Hev b 6.03	Prohevein C terminus	(6.0) ²⁴	14 ⁹⁰ (13.3) ²⁴	B-serum
Hev b 7.01	Patatin homolog, rubber biosynthesis inhibitor	4.4 ^d (5.0) ⁵⁸ (4.8) ⁵⁷	[44] ⁵⁶ (43) ^{57,58}	C-serum
Hev b 8	Profilin	(4.9) ⁶⁶	10.2, 14.2, 15.7 ⁶⁴ (14.0) ⁶⁶	C-serum
Hev b 9	Enolase	5.9, 6.0 ³⁶ (5.6) ⁷¹	51 ³⁶ , 48 ⁷¹ (48) ⁷¹	C-serum
Hev b 10	Mn-superoxide dismutase	4.3 ^d , 6.1 ³⁶ (5.7) ¹⁰² (6.3) ¹⁰³	45 ¹⁰¹ , 25 ³⁶ (23) ^{102,103}	B-serum

^a Values corresponding to the protein as predicted from the cDNA sequence are shown in parentheses. Molecular masses determined by mass spectrometry are shown in square brackets, and those determined by amino acid sequencing of the complete native protein are shown in curly brackets. Other values are estimates by SDS-PAGE for molecular mass and isoelectric focusing for pI.

^b Putative tetrameric form reported by Czuppon et al. [29].

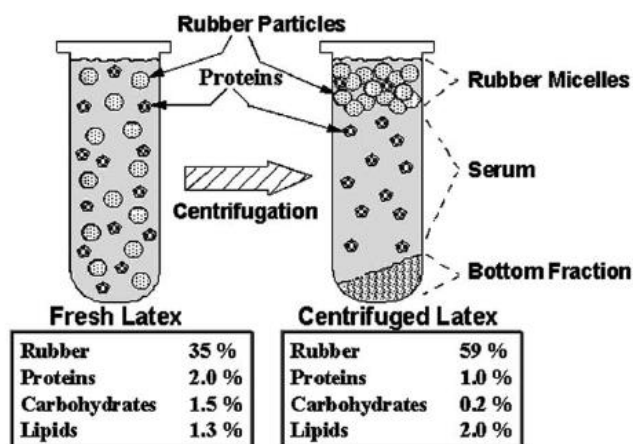
^c Predicted mature protein processed from its translated precursor as described by Chye and Cheung [74] for Hev b 2 and by Soedjanaatmadja et al. [89] for Hev b 6.

^d Unpublished results of H.Y. Yeang, (for Hev b 2), F. Yusof, (for Hev b 7), and F. Yusof, and E. Sunderasan, (for Hev b 10).

^e Reduced form of Hev b 4. Unreduced form has a mass of about 100 kDa [75].

Perrella และ Gaspari [16] ศึกษาเกี่ยวกับการสกัดหรือกำจัดโปรตีนออกจากน้ำยางธรรมชาติด้วยการใช้เครื่องหมุนแยกวัตถุ (centrifugation) แสดงในรูปที่ 2.11 โดยใช้แรงในการหมุนเหวี่ยง 20,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 40 นาที หลังจากกระบวนการดังกล่าวสามารถแยกโปรตีนออกได้ประมาณ 50% และหากทำซ้ำก็สามารถลดปริมาณโปรตีนลงได้อีก ถึงแม้ว่าวิธีนี้จะเป็นวิธีที่ง่ายแต่ไม่เหมาะสมกับการทำเป็นอุตสาหกรรมเนื่องจากในการทำกระบวนการนี้ใช้พลังงานในการหมุนเหวี่ยงสูง นอกจากนี้ยังได้ศึกษาเกี่ยวกับการลดปริมาณโปรตีนโดยใช้เอนไซม์ย่อยโปรตีน (proteolytic enzyme) เอนไซม์ที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นเอนไซม์ที่ได้จากการหมักแบคทีเรีย *Bacillus subtilisin* ที่ความเข้มข้น

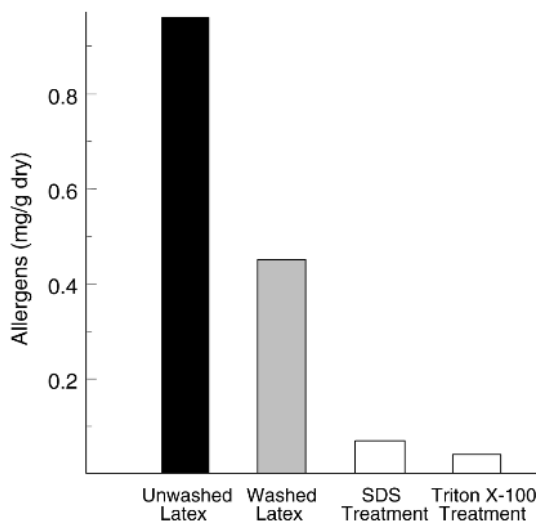
0.025% เป็นเวลา 1-2 วัน ที่อุณหภูมิ 13-32 องศาเซลเซียส เอนไซม์นี้จะเข้าไปตัดพันธะเพปไทด์ของโปรตีน แล้วนำไปปั่นแยกเอาส่วนที่เป็นเซรุ่มออกจากเนื้อยาง ทำให้โปรตีนในยางลดลงถึง 99% ถึงแม้ว่าวิธีนี้เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงแต่มีข้อเสีย คือ ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานาน



รูปที่ 2.10 กระบวนการหมุนเหวี่ยงน้ำยางดิบเพื่อลดปริมาณโปรตีน [16]

Schloman [29] ศึกษาการใช้สารลดแรงตึงผิวในการลดปริมาณโปรตีน (surfactant treatment) โดยสามารถลดปริมาณของโปรตีนได้ถึง 93% ตามที่แสดงในรูปที่ 2.12 โดยทั่วไปนิยมใช้พอลิเอทิลีนไกลคอล เดิร์ทออกทิลฟีนอลีเทอร์ หรือมีชื่อทางการค้าว่า Triton™ X-100 และโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต สารลดแรงตึงผิวจะเข้าไปเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีของโปรตีน (โครงสร้างเกิดการคลายตัว) แต่ไม่ได้ไปทำลายพันธะเพปไทด์ของโปรตีน (protein denaturation) ในงานวิจัยนี้ใช้พอลิเอทิลีนไกลคอล เดิร์ทออกทิลฟีนอลีเทอร์เข้มข้น 10% มาลดโปรตีนในน้ำยาง โดยนำน้ำยางจำนวน 29.3 กรัม ผสมกับสารละลายพอลิเอทิลีนไกลคอล เดิร์ทออกทิลฟีนอลีเทอร์เข้มข้น 10% จำนวน 40.0 กรัม และแอมโมเนียเข้มข้น 0.33% จำนวน 400 กรัม กวนให้เข้ากันเป็นเวลา 60 นาที หลังจากนั้นนำไปใส่กรวยแยกและทิ้งไว้ข้ามคืน จากนั้นแยกส่วนล่างออก แล้วตามด้วยการล้าง 3-4 ขั้นตอน (Alginate creaming – phase separation – dilution) นอกจากนี้ยังได้ศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการนำสารลดแรงตึงผิว คือ โซเดียมโดเดซิลซัลเฟตมาใช้เพื่อเปรียบเทียบถึงผลที่ได้เมื่อใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดที่แตกต่างออกไป พบว่าการใช้พอลิเอทิลีนไกลคอล เดิร์ทออกทิลฟีนอลีเทอร์มีประสิทธิภาพดีกว่า ดังแสดงในรูปที่ 2.12 แต่ข้อเสียของการใช้สารลดแรงตึงผิว คือ ทำให้ค่าความหนาแน่นการเชื่อมขวางลดลงส่งผลทำให้

ประสิทธิภาพในการวัลคาไนเซชันด้อยลง และการใช้สารลดแรงตึงผิวในปริมาณมากทำให้มีค่าใช้จ่ายการผลิตสูง



รูปที่ 2.11 ปริมาณสารที่ทำให้เกิดการแพ้ในเนื้อยาง [29]

งานวิจัยของ Doylea และคณะ [17] ศึกษาการลดปริมาณโปรตีนในยางธรรมชาติด้วยการใช้อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ โดยกระบวนการนี้สามารถกำจัดโปรตีนและส่วนที่ไม่ใช่เนื้อยางออกได้ด้วย โดยใช้น้ำยางผสมกับสารอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ แล้วนำไปปั่นแยก ซึ่งอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์จะเข้าไปยึดเหนี่ยว (binds) กับโปรตีนและสารอื่นที่ไม่ใช่ยาง แล้วสารดังกล่าวจะถูกแยกออกจากเนื้อยางไปพร้อมๆ กันกับสารอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ในขั้นตอนการปั่นแยก จากนั้นนำยางที่ได้ไปขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มเพื่อทดสอบสมบัติต่างๆ ของยางผลิตภัณฑ์ตามมาตรฐาน ISO 4074 โดยได้ตั้งชื่อทางการค้าว่า Vytex พบว่าแผ่นฟิล์มที่ได้ไม่มีรูรั่ว (pin hole) สามารถรับความดันระเบิด (burst pressure) ได้มากถึง 2.19 ± 0.28 กิโลปาสคาล (kPa) และสามารถรับปริมาตรระเบิด (burst volume) ได้ 35.4 ± 4.7 ลิตร แสดงในรูปที่ 2.13 นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์ยางที่ได้ยังมีสีที่จางลงเหมาะแก่การนำไปทำผลิตภัณฑ์ที่ต้องการสีขาวหรือต้องการเติมสี จากสมบัติดังกล่าว Vytex จึงเหมาะสมกับการนำไปผลิตเป็นถุงยางอนามัย และถุงมือยาง

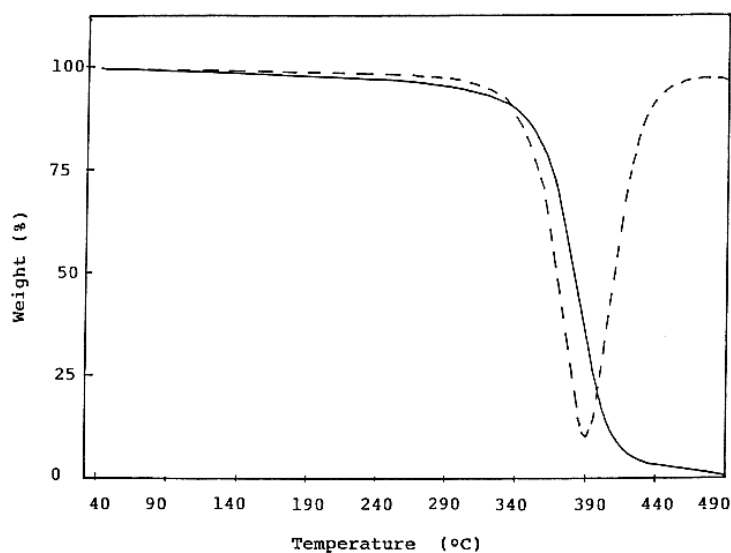
ชยากริต [30] ศึกษาการเตรียมน้ำยางข้นโปรตีนต่ำด้วยการเติมอนุพันธ์เซลลูโลสที่ลดขนาดให้เล็กลงด้วยรังสีแกมมา ใช้สารละลายอนุพันธ์ของเซลลูโลส 4 ชนิด คือ บอนิลเมทิลเซลลูโลส (carboxy methyl cellulose, CMC) ไฮดรอกซิลเอทิลเซลลูโลส (hydroxyl ethyl cellulose, HEC) ไฮดรอกซิลโพรพิลเซลลูโลส (hydroxyl propyl cellulose ,HPC) และ เมทิลเซลลูโลส (Methyl Cellulose, MC) ซึ่งมีขนาดโมเลกุลแตกต่างกันมาดีโพลิเมอไรซ์ (depolymerize) ด้วยรังสีแกมมาให้มีขนาดของโมเลกุลเล็กพอเหมาะที่จะจับโมเลกุลของโปรตีนที่ก่อให้เกิดภูมิแพ้ คือ ประมาณ 14-43 กิโลดาลตัน เติมน้ำยางข้น ที่มีเนื้อเยื่อ 60% และเจือจางด้วยสารละลายแอมโมเนีย ใหม่เนื้อเยื่อลดลงเป็น 30% ตั้งทิ้งไว้ข้ามคืนที่อุณหภูมิห้อง แลวนำมาปั่นด้วยเครื่องเหวี่ยง 18,000 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อแยกเอาส่วนของน้ำยางข้นที่แยกตัวอยู่ด้านบนของหลอดปั่นออก การแยกวิธีนี้จะแยกเฉพาะโปรตีนที่ละลายในน้ำได้ออกเท่านั้น ทำให้โปรตีนโมเลกุลใหญ่ที่ไม่ก่อให้เกิดภูมิแพ้อยู่ที่อนุภาคยาง ทำให้น้ำยางข้นคงสภาพอยู่ได้โดยไม่ต้องเติมสารรักษาสภาพแต่อย่างใด

Raver และคณะ [25] ศึกษาการสลายตัวด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล (hydrothermal degradation) ของไขมัน คาร์โบไฮเดรต และโปรตีนในเมล็ดทานตะวัน ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ความดันสูง ใช้เมล็ดทานตะวัน 1 กรัมต่อน้ำ 20 มิลลิลิตร ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 130 160 190 220 และ 240 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการทดลอง 5 10 30 60 และ 120 นาที เมื่อเสร็จสิ้นปฏิกิริยาตามเวลาที่กำหนด ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องจนเย็นแล้วนำไปกรอง และสกัดด้วยสารละลายเฮกเซนโดยใช้กรวยแยก หลังจากนั้นนำไประเหยสารละลายออกด้วยเครื่องระเหยแบบสุญญากาศ (vacuum evaporator) พบการเปลี่ยนแปลงของโปรตีนดังนี้ ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส ปริมาณโปรตีนลดลงเมื่อเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ในขณะที่ใช้อุณหภูมิในการทดลองตั้งแต่ 190 องศาเซลเซียสขึ้นไปปริมาณโปรตีนลดลงเป็นอย่างมาก เนื่องจากโปรตีนได้ถูกสลายไปเป็นกรดอะมิโนและเพปไทด์สายสั้นซึ่งสามารถละลายน้ำได้ ในกรณีของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา โปรตีนจะสลายตัวเพิ่มมากขึ้นเมื่อใช้เวลาในการทดลองนานขึ้น ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการสลายตัวของโปรตีนสามารถเกิดได้ดีเมื่อสารตั้งต้นมีเวลาในการสัมผัสกับตัวทำละลายอย่างเพียงพอ

จากงานวิจัยของ Du และคณะ [27] ศึกษากระบวนการไฮโดรเทอร์มัลในการลดปริมาณไนโตรเจนในจุลสาหร่าย (microalgae) ก่อนนำไปผลิตเป็นน้ำมันชีวภาพที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส

(pyrolytic bio-oil) เพื่อลดการปนเปื้อนจากไนโตรเจนเมื่อนำน้ำมันดังกล่าวไปใช้งาน โดยใช้สำหรับจ่าย 10 กรัมบรรจุลงในเครื่องปฏิกรณ์ความดันสูงที่อยู่ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนแล้วปิดให้สนิท โดยใช้ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 150 175 200 และ 225 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 10 20 30 40 50 และ 60 นาที ภายในเครื่องปฏิกรณ์ความดันสูงจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ของ ฟันระเพปไทด์ได้เป็นกรดอะมิโนและเพปไทด์สายสั้น ภาวะในการทำปฏิกิริยาที่สามารถลดปริมาณ โปรตีนได้มากที่สุด คือ ใช้อุณหภูมิ 225 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 60 นาที ซึ่งสามารถลดปริมาณโปรตีน ได้มากถึง 42% จึงเป็นแนวทางในการนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้ต่อไป

จากงานวิจัยของ Verkey และคณะ [31] ได้ศึกษาการสลายตัวของยางธรรมชาติ และยางสไตรีนบิวตะไดอีน (styrene butadiene rubber, SBR) เพื่อพัฒนาความเสถียร ทางความร้อนของยางผสมของยางดังกล่าว ตรวจสอบการสลายตัวของยางธรรมชาติโดยใช้เทคนิค วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของวัสดุ (thermogravimetric analysis, TGA) พบว่าอุณหภูมิในการ สลายตัวของยางธรรมชาติ คือ 310 - 456 องศาเซลเซียส แต่ที่อุณหภูมิต่ำกว่านั้นอาจมี การสลายตัวของยางโมเลกุลเล็กและโมเลกุลที่ไม่อิมมัตวเนื่องจากความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.12 สมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติ [31]

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการลดปริมาณโปรตีนในน้ำยางธรรมชาติด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล และศึกษาสมบัติทางกายภาพของยางที่ได้ผ่านกระบวนการดังกล่าวแล้ว รวมไปถึงตัวแปรต่างๆ ต่อประสิทธิภาพในการลดปริมาณโปรตีน

3.1 วัสดุุดิบและสารเคมี

- | | | |
|--------|--|---|
| 3.1.1. | น้ำยางชั้น | : สถาบันวิจัยยาง
การยางแห่งประเทศไทย |
| 3.1.2. | พอลิเอทิลีนไกลคอล เทิร์ตออกทิลฟีนิลอีเทอร์
(Polyethylene glycol <i>tert</i> -octylphenyl ether) | : Loba-Chemie |
| 3.1.3. | แอสซีโตน (commercial grade) | : Zen Point |
| 3.1.4. | แก๊สไนโตรเจน ความบริสุทธิ์ 99.99% | : Praxair Inc |

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

- | | | |
|-------|--|--|
| 3.2.1 | บีกเกอร์ขนาด 50 100 และ 500 มิลลิลิตร | |
| 3.2.2 | กระบอกตวงขนาด 100 มิลลิลิตร | |
| 3.2.3 | แท่งแก้วคนสารและชั้นตักสาร | |
| 3.2.4 | เครื่องปฏิกรณ์ความดันสูง
(Parr reactor) (200 มิลลิลิตร) | : Parr รุ่น 4848 |
| 3.2.5 | ตู้อบความร้อน | : Wtb Binder รุ่น ED-115i |
| 3.2.6 | เครื่องกวนสารละลาย (magnetic stirrer) | : IKA รุ่น C-MAG HS 7 |
| 3.2.7 | เครื่องวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (CHN analyzer) | : รุ่น CHN 2000 (LECO
Instrument Thailand Ltd.) |

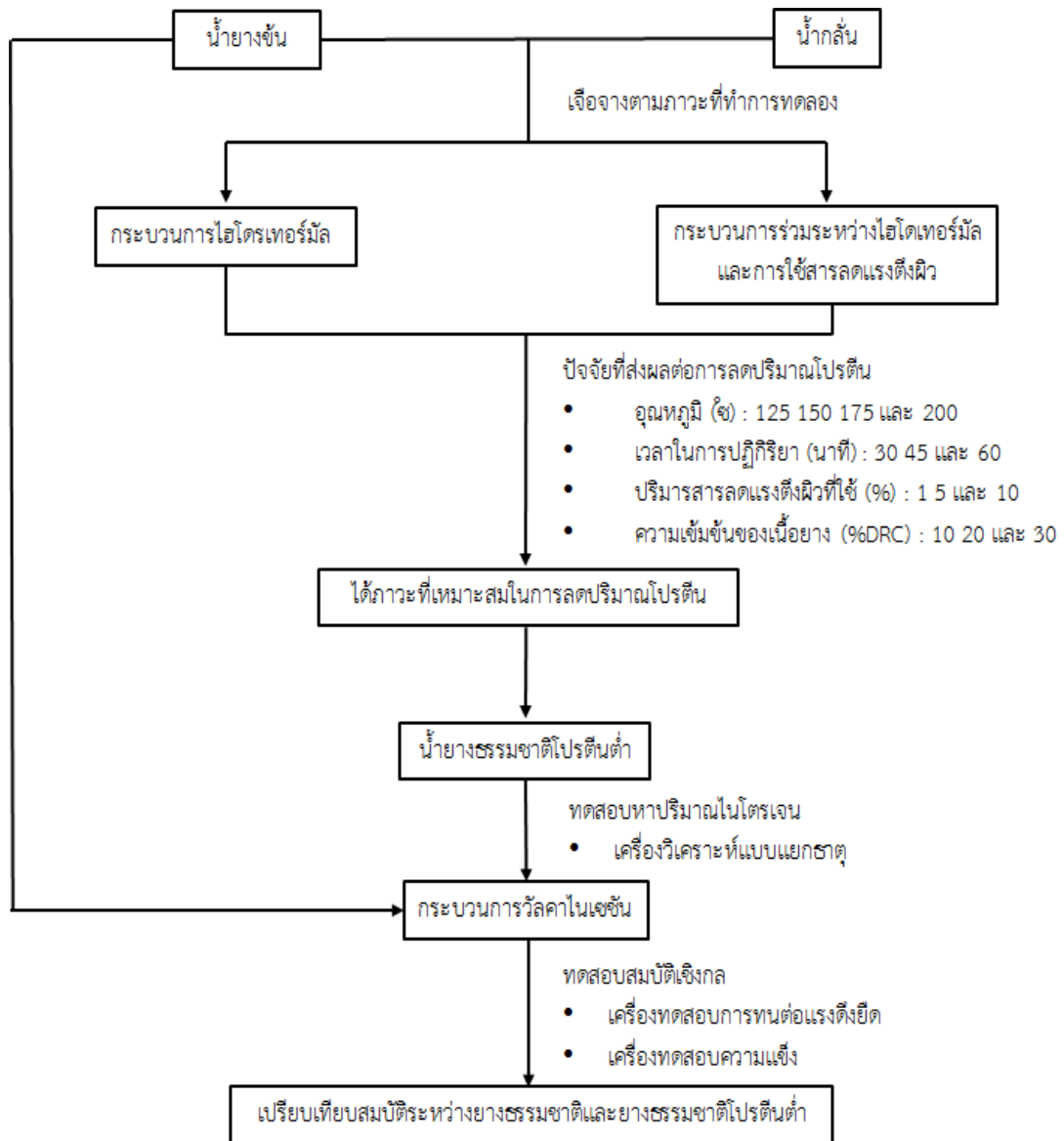
3.2.8	เครื่องผสมระบบเปิด	: COLLIN (Two roll-mill)
3.2.9	เครื่องวัดลักษณะการคงรูป (Moving die rheometer)	: TECHPRO rheo MD+, Thailand
3.2.10	เครื่องทดสอบสมบัติด้านการดึง (Universal testing machine)	: INSTRON 3366
3.2.11	เครื่องทดสอบสมบัติความแข็ง (Hardness testing machine)	: Shore A hardness tester (WALLACE)

3.3 วิธีดำเนินงานวิจัย

การทดลองแบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ

1. การเตรียมน้ำยาง ที่ระดับความเข้มข้นที่ 10 20 และ 30%
2. การลดปริมาณโปรตีน
3. การเก็บผลิตภัณฑ์ยาก้อน
4. การวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจน
5. การทดสอบสมบัติเชิงกลของยางผลิตภัณฑ์

โดยแผนผังแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังงานวิจัย

3.4 การเตรียมน้ำยาง

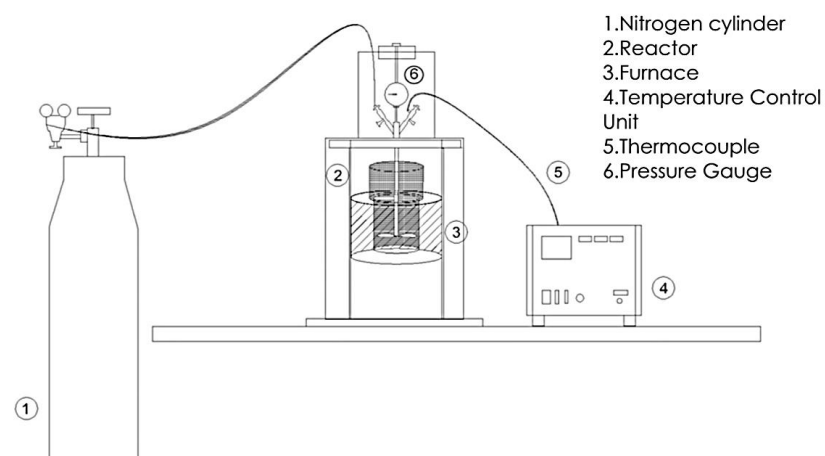
น้ำยางชั้นที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้มาจากสถาบันวิจัยยาง การยางแห่งประเทศไทย ซึ่งเป็นน้ำยางชั้นที่มีเนื้อยางอยู่ 60% และผสมสารละลายแอมโมเนียเพื่อช่วยรักษาเสถียรภาพของน้ำยาง เริ่มจากนำน้ำยางดังกล่าวมาเจือจางด้วยน้ำกลั่นให้ได้ตามสภาวะที่ใช้ในงานวิจัย ดังแสดงในตารางที่ 3.1 แล้วนำไปทำการทดลอง

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรที่ใช้ในการเตรียมยางธรรมชาติโปรตีนต่ำด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล

ตัวแปร	ช่วงที่ใช้ในการศึกษา
ความดันเริ่มต้น (บาร์)	10
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	125 150 175 200
เวลาที่ใช้ในการทดลอง (นาที)	30 45 60
ความเข้มข้นของน้ำยาง (% dry rubber content)	10 20 30
ปริมาณสารลดแรงตึงผิว (% โดยปริมาตรของสารละลายทั้งหมด)	1 5 10

3.5 การลดปริมาณโปรตีน

นำน้ำยางตามภาวะที่ใช้ในตารางที่ 3.1 ปริมาตรรวม 100 มิลลิลิตรบรรจุลงในเครื่องปฏิกรณ์ความดันสูงแล้วปิดฝาให้แน่นสนิทดังแสดงในรูปที่ 3.2 จากนั้นไล่อากาศภายในเครื่องปฏิกรณ์ออกด้วยแก๊สไนโตรเจนเป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้ภายในเครื่องปฏิกรณ์มีภาวะแบบเฉื่อย หลังจากนั้นเปิดเตาเพื่อให้ความร้อนตามอุณหภูมิที่กำหนด ใช้รอบในการปั่นกวน 200 รอบต่อนาที (rpm) เมื่อถึงอุณหภูมิดังกล่าวแล้วให้เริ่มจับเวลาการทำปฏิกิริยา หลังจากเสร็จสิ้นปฏิกิริยาแล้วจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำยางที่มีปริมาณโปรตีนต่ำ



รูปที่ 3.2 เครื่องปฏิกรณ์ความดันสูง (autoclave reactor) [32]

เพื่อศึกษาถึงผลของสารลดแรงตึงผิวต่อการลดปริมาณโปรตีน จึงได้มีการเติมสารลดแรงตึงผิวลงในน้ำอย่างตามอัตราส่วนที่กำหนดดังแสดงในตารางที่ 3.1 ก่อนที่จะบรรจุในเครื่องปฏิกรณ์ และทำปฏิกิริยาตามที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ในกระบวนการนี้เลือกใช้สารลดแรงตึงผิว คือ พอลิเอทิลีนไกลคอล เดิร์ทออกทิลฟีนิลอีเทอร์ หรือ Triton™ x-100 เนื่องจากสามารถทนความร้อนและความเป็นกรด-ด่างได้ดี สามารถถูกย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ และสามารถลดโปรตีนได้มากกว่าการใช้โซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต 1% ของโปรตีนทั้งหมด [29]

3.6 การเก็บผลิตภัณฑ์

เมื่อเสร็จสิ้นปฏิกิริยาตามหัวข้อ 3.5 แล้ว นำน้ำยาที่ได้มาตกตะกอนด้วยสารละลายแอสिटอนปริมาตร 200 มิลลิลิตร จะได้เนื้อเยื่อที่ชุ่มด้วยสารละลายแอสिटอน และชั้นน้ำที่มีกรดอะมิโนรวมอยู่กับพอลิเอทิลีนไกลคอล เดิร์ทออกทิลฟีนิลอีเทอร์ ซึ่งโปรตีนและเนื้อเยื่อจะถูกแยกออกจากกันในช่วงตอนนี้ หลังจากนั้นน้ำเนื้อเยื่อที่ได้ไปอบในตู้อบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง เพื่อระเหยแอสिटอนที่ตกค้างอยู่ในเนื้อเยื่อออก แล้วนำไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งแบบละเอียดเพื่อวัดปริมาณเนื้อเยื่อผลิตภัณฑ์ที่ได้

3.7 การวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจน

หลังจากได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นเนื้อเยื่อที่มีปริมาณโปรตีนต่ำแล้ว นำไปวิเคราะห์ปริมาณธาตุไนโตรเจนด้วยเครื่องวิเคราะห์แบบแยกธาตุ แสดงในรูปที่ 3.3 โดยใช้มาตรฐาน ASTM D5291 – D5296 เพื่อตรวจหาปริมาณไนโตรเจนซึ่งบ่งชี้ถึงปริมาณโปรตีนในเนื้อเยื่อได้ หลังจากนั้นนำค่าไนโตรเจนที่ได้มาคำนวณเป็นร้อยละปริมาณไนโตรเจนที่ถูกกำจัดออกไปดังแสดงในสมการด้านล่าง

$$N^* = \frac{N_0 - N_1}{N_0} \times 100$$

เมื่อ N^* = ร้อยละของไนโตรเจนที่ถูกกำจัดออกไป

N_0 = ไนโตรเจนของยางธรรมชาติ

N_1 = ไนโตรเจนในยางโปรตีนต่ำ



รูปที่ 3.3 เครื่องวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (CHN analyzer รุ่น CHN-2000, LECO Instrument (Thailand) Ltd.)

3.8 การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนด้วยวิธีเจลดาล (Kjeldahl method)

วิธีเจลดาล [33] เป็นการวิเคราะห์โปรตีนโดยรวมด้วยการวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในสารตัวอย่าง โดยการย่อยสลายโปรตีนซึ่งประกอบด้วยกรดอะมิโน การย่อยสลายนี้จะปลดปล่อยไนโตรเจนออกมาและถูกเปลี่ยนเป็นแอมโมเนีย การวิเคราะห์ด้วยวิธีเจลดาลประกอบด้วย 4 ขั้นตอนคือ

3.8.1 การย่อยตัวอย่าง (digestion)

ด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้นร่วมกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น คอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4) เพื่อเปลี่ยนไนโตรเจนในโปรตีนไปเป็นแอมโมเนียมซัลเฟต ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) ภายใต้อุณหภูมิสูง

3.8.2 การกลั่นแอมโมเนีย (distillation)

โดยการทำปฏิกิริยาของเกลือแอมโมเนียมซัลเฟตที่ได้จากการย่อยโปรตีนกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และได้ก๊าซแอมโมเนีย สามารถดักจับสารนี้ได้โดยใช้สารละลายบอริก

3.8.3 การไทเทรตเพื่อหาปริมาณไนโตรเจน (titration)

โดยไทเทรตสารละลายบอริกที่ดักจับก๊าซแอมโมเนียไว้กับสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟูริก

3.8.4 การคำนวณ

นำปริมาณสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟูริกที่ใช้ในการไตเตรตไปคำนวณหาปริมาณไนโตรเจน ดังสมการ

$$\% \text{ไนโตรเจน (total nitrogen)} = \frac{(A - B) \times C \times 0.014 \times 100}{D}$$

$$\% \text{โปรตีน} = \% \text{ไนโตรเจน} \times 6.25$$

เมื่อ A = ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟูริกที่ใช้ในการไทเทรตตัวอย่าง

B = ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟูริกที่ใช้ในการไทเทรตเปล่า (blank)

C = ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟูริก

D = น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)

3.9 การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของยาง

ยางผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการดังกล่าวมาแล้ว นำไปทดสอบสมบัติเชิงกลต่างๆ โดยสูตรการผสมยางเพื่อขึ้นรูปแสดงในตารางที่ 3.3 ใช้เครื่องผสมระบบเปิด (Two roll-mill, COLLIN) และใช้ภาวะการผสมตามตารางที่ 3.4 วัดลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางคอมพาวด์ตามมาตรฐาน ASTM D5289 โดยใช้เครื่องวัดลักษณะการคงรูป (Moving die rheometer, TECHPRO rheoTECH MD+) ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส แล้วเตรียมขึ้นยางที่ใช้ทดสอบด้วยการนำยางคอมพาวด์ดังกล่าวไปขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์แบบอัดที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 3.2 สูตรการผสมยาง

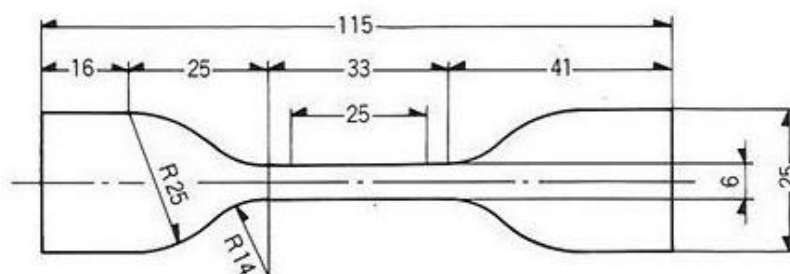
องค์ประกอบ	Parts per hundred rubber (phr)
ยาง	100.0
ซิงค์ออกไซด์	5.0
กรดสเตียริก	2.0
แคลเซียมคาร์บอเนต	20.0
บิวทิลเบนโซโทอะโซลซัลฟิनाไมด์ (TBBS)	0.7
ซัลเฟอร์	2.25

ตารางที่ 3.3 ภาวะที่ใช้ในการผสม

การผสม (เครื่องผสมระบบเปิด; (Two roll-mill, COLLIN)	
อุณหภูมิเริ่มต้น : 60°C	
องค์ประกอบ	ระยะเวลาที่ใช้ในการผสม (นาที)
บดยางจนเป็นเนื้อเดียวกัน	
ซิงค์ออกไซด์ และกรดสเดียร์ริก	3
แคลเซียมคาร์บอเนต	5
บิวทิลเบนโซโซลซัลฟิनाไมด์ (TBBS) และซัลเฟอร์	3

3.9.1 ความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength)

ทำการทดสอบสมบัติการดึงของยางทั้งก่อนทำปฏิกิริยาและหลังทำปฏิกิริยา โดยตัดชิ้นงานที่ต้องการทดสอบขึ้นรูปตัวอย่างเป็นรูปทรงแบบดัมเบล (dumbbell specimen) โดยมีรูปร่างและขนาดดังแสดงในรูปที่ 3.5 ชิ้นตัวอย่างจะถูกทดสอบตามมาตรฐาน ISO 37 (Type 1) โดยใช้เครื่อง Universal testing machine รุ่น INSTRON 3366 เพื่อทดสอบแรงดึงของยางผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการคงรูปแล้ว โดยจะทำการทดสอบ 5 ครั้งและนำมาหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ 3.4 ชิ้นงานที่ใช้ทดสอบแบบดัมเบล

3.9.2 ระยะเวลายืด ณ จุดขาด (Elongation at break)

ค่าระยะเวลายืด ณ จุดขาดนั้นเป็นค่าที่ได้จากการทำการวัดความต้านทานต่อแรงดึง ดังที่กล่าวไปแล้วในข้อที่ 3.8.1 โดยแสดงค่าระยะเวลายืด ณ จุดขาดเป็นร้อยละที่ได้จากการคำนวณตามสมการด้านล่าง

$$\text{ร้อยละการยืด} = (\text{ความยาวสุดท้าย} - \text{ความยาวเริ่มต้น}) / \text{ความยาวเริ่มต้น} \times 100$$

3.9.3 ค่ามอดูลัสการดึงยืด 300% (300% modulus)

ค่ามอดูลัสจะได้จากการคำนวณจากกราฟในช่วง linear หรือช่วงที่มีพฤติกรรมเป็นแบบอีลาสติก หรือช่วงที่การยืดตัวหรือ strain น้อย และบางครั้งจะเรียกค่ามอดูลัสในแบบดังกล่าวว่าค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) หรือค่ามอดูลัสเริ่มต้น (initial modulus)

3.9.4 ความแข็งกด (Hardness, shore A)

การทดสอบสมบัติความแข็งของยางที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปแล้ว วิธีนี้ใช้เพื่อศึกษาความแข็งและความยืดหยุ่นของผลิตภัณฑ์ ความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างบริเวณพื้นผิวสามารถวัดได้โดยใช้หัวกดกดลงบนพื้นผิวภายใต้ภาวะที่กำหนด ตามมาตรฐาน ASTM D2240 โดยใช้เครื่องทดสอบสมบัติความแข็ง (durometer) แบบ Shore A รุ่น WALLACE โดยชิ้นงานที่ใช้ทดสอบต้องมีพื้นผิวเรียบ ความลึกของการทะลุจะสะท้อนถึงค่าความแข็งของวัสดุนั้นๆ การทดสอบจะทำการวัดค่าความแข็งที่ตำแหน่งต่างๆ ตัวอย่างละ 5 จุดแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาภาวะที่เหมาะสมของการลดปริมาณไนโตรเจนซึ่งบ่งชี้ถึงปริมาณโปรตีนในยางธรรมชาติ และสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติโปรตีนต่ำ โดยศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการ ได้แก่ อุณหภูมิ เวลาในการทำปฏิกิริยา และปริมาณสารลดแรงตึงผิว โดยวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้ด้วยเครื่องวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (CHN analyzer) วัดลักษณะการคงรูปของยางด้วยเครื่องวัดลักษณะการคงรูป (Moving die rheometer, TECHPRO rheoTECH MD+) และวัดความทนต่อแรงดึง (Universal testing machine รุ่น INSTRON 3366)

4.1 วิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจน

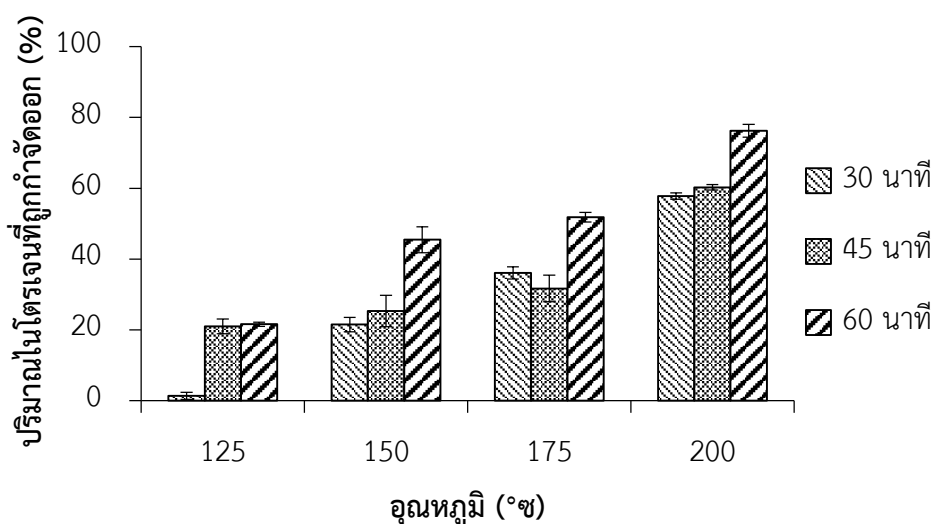
เมื่อได้ผลิตภัณฑ์ยางที่ผ่านกระบวนการต่างๆแล้ว นำผลิตภัณฑ์ดังกล่าวไปวิเคราะห์แบบแยกธาตุเพื่อตรวจหาปริมาณธาตุไนโตรเจนซึ่งสามารถบ่งชี้ถึงปริมาณโปรตีนในยางธรรมชาติได้ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์แบบแยกธาตุวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D5291 – D5296 และนำค่าที่ได้ไปคำนวณ ตามสมการที่แสดงในข้อ 3.7 เพื่อแสดงผลเป็นเปอร์เซ็นต์ปริมาณไนโตรเจนที่ถูกกำจัดออก โดยแบ่งผลการทดลองออกเป็นสองส่วนตามความเข้มข้นของน้ำยางที่แตกต่างกัน โดยมีปริมาณไนโตรเจนในยางธรรมชาติอยู่ในช่วงระหว่าง 0.16 – 0.46%

4.1.1 ความเข้มข้นของน้ำยาง 30%

4.1.1.1 ยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล

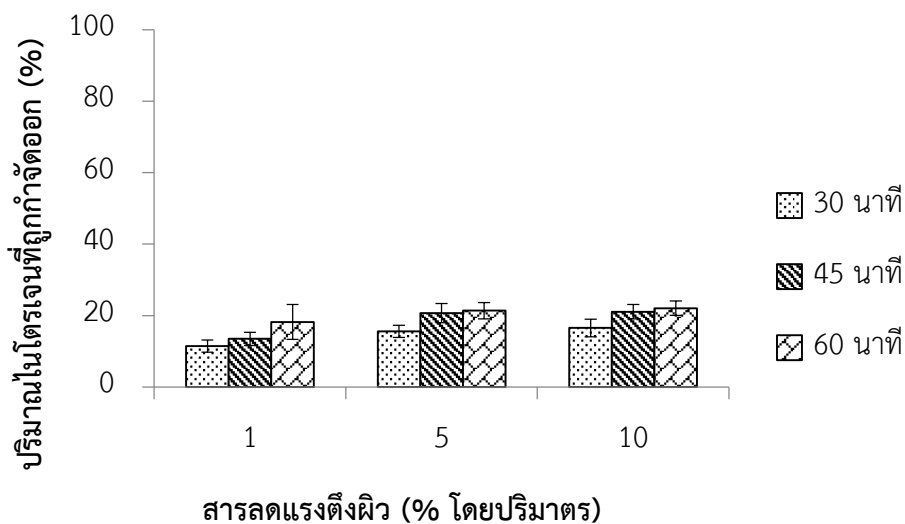
จากรูปที่ 4.1 รายงานผลที่ได้เป็นร้อยละของปริมาณไนโตรเจนที่ถูกกำจัดออกจากผลิตภัณฑ์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 125 150 175 และ 200 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 30

45 และ 60 นาที พบว่าภาวะที่สามารถลดปริมาณไนโตรเจนได้มากที่สุด คือ ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที โดยลดไนโตรเจนได้มากที่สุด 76% กระบวนการไฮโดรเทอร์มัลสามารถลดปริมาณไนโตรเจนได้มากขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเพิ่มสูงขึ้นตามลำดับ ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีการดูดซับพลังงานหรือความร้อน (endothermic reaction) [12] ดังที่กล่าวไปแล้วว่าเมื่อมีความร้อนในระบบสูงขึ้นจะมีส่วนช่วยเร่งปฏิกิริยาการสลายพันธะเพปไทด์ของโปรตีน หรือปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสไปเป็นกรดอะมิโนและเพปไทด์สายสั้นได้ดียิ่งขึ้น และในส่วนของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา เมื่อเวลาที่ใช้เพิ่มขึ้นก็ทำให้การลดปริมาณไนโตรเจนมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งเป็นไปในแนวทางเดียวกันกับงานวิจัยของ Du และคณะ [27] ที่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการลดปริมาณโปรตีนในจุลสาหร่าย (microalgae) ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล โดยสามารถลดปริมาณโปรตีนได้มากที่สุดด้วยการใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาทีเช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.1 ผลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการทำกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่ส่งผลต่อการลดปริมาณไนโตรเจน

4.1.1.2 ยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการลดโปรตีนด้วยสารลดแรงตึงผิว



รูปที่ 4.2 ผลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาและปริมาณของสารลดแรงตึงผิวที่ส่งผลต่อการลดปริมาณไนโตรเจน

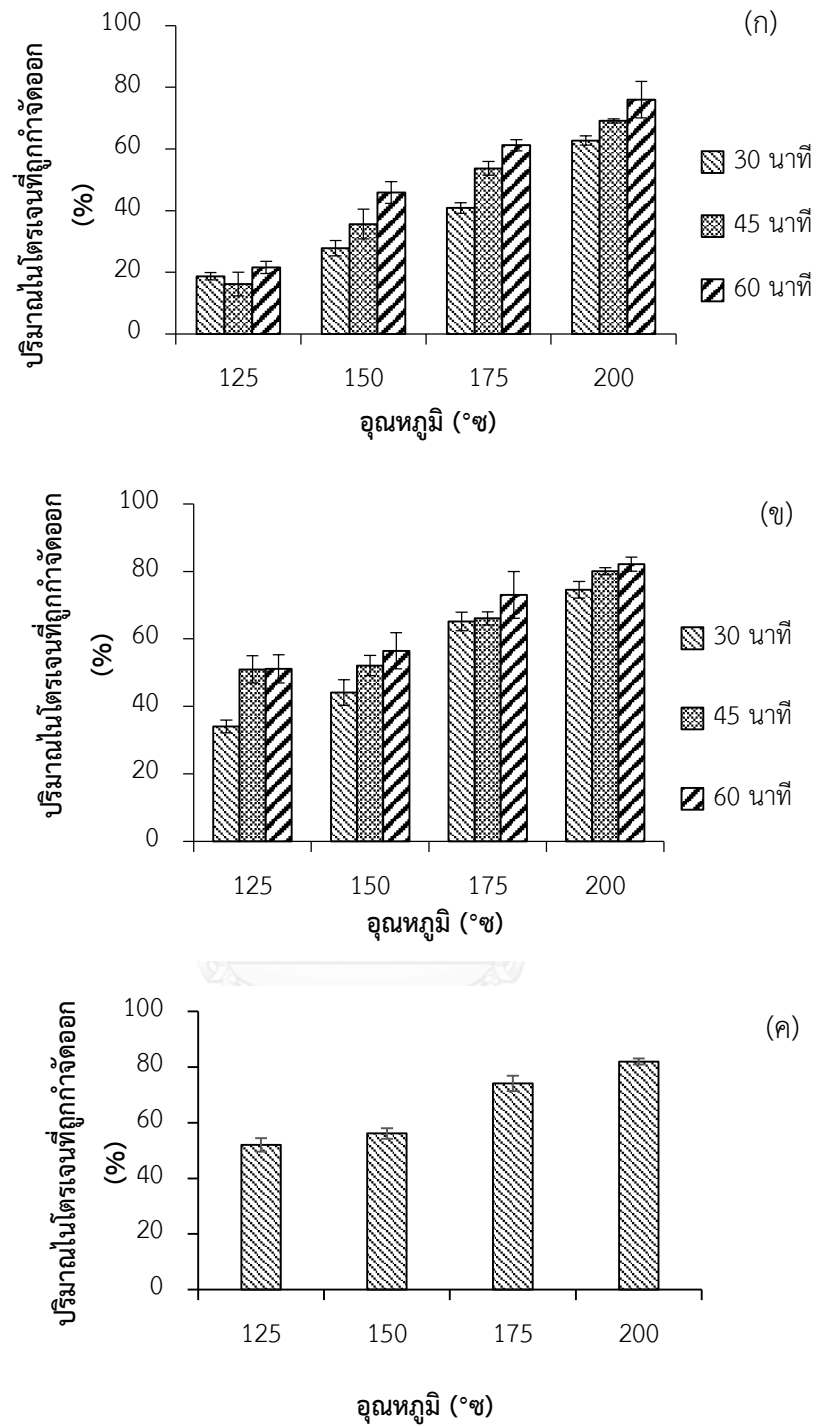
จากรูปที่ 4.2 แสดงปริมาณไนโตรเจนที่ถูกกำจัดออกด้วยสารลดแรงตึงผิวเข้มข้น 1 5 และ 10% โดยปริมาตร และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 45 และ 60 นาที พบว่าปริมาณการใช้สารลดแรงตึงผิวที่มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณไนโตรเจนได้ดีที่สุดที่ 22% ที่ภาวะที่ใช้สารลดแรงตึงผิว 10% โดยปริมาตรของสารละลายทั้งหมด ซึ่งการใช้สารลดแรงตึงผิวเข้มข้น 5% โดยปริมาตรสามารถลดปริมาณไนโตรเจนได้ 21.4% เมื่อพิจารณาจะพบว่าการใช้สารลดแรงตึงผิวร้อยละ 10 สามารถลดได้มากกว่าเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยลดได้มากกว่าเพียง 0.6%

เมื่อนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลจากรูปที่ 4.1 พบว่าการลดปริมาณไนโตรเจนจากกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลมีประสิทธิภาพมากกว่าการใช้สารลดแรงตึงผิวเพียงอย่างเดียวอย่างเห็นได้ชัดเจน โดยเมื่อนำผลที่ภาวะที่เหมาะสมที่สามารถลดปริมาณไนโตรเจนได้มากที่สุดของทั้งสองกระบวนการมาเปรียบเทียบกัน พบว่าการลดปริมาณไนโตรเจนจากกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลสามารถลดได้มากกว่าถึง 54.6% เนื่องจากกระบวนการไฮโดรเทอร์

มัลลันจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสซึ่งเข้าไปตัดพันธะเพปไทด์ของโปรตีน [27] จึงมีประสิทธิภาพกว่าการใช้สารลดแรงตึงผิวซึ่งเข้าไปเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง (denaturation) ของโปรตีนเท่านั้น [29]

4.1.1.3 ยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลร่วมกับสารลดแรงตึงผิว

จากรูปที่ 4.3(ก) แสดงปริมาณไนโตรเจนที่ถูกกำจัดออกด้วยปฏิกิริยาร่วมระหว่างกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 125 150 175 และ 200 องศาเซลเซียส และการใช้สารลดแรงตึงผิวเข้มข้น 1% โดยปริมาตร เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 30 45 และ 60 นาที พบว่าภาวะที่สามารถลดปริมาณไนโตรเจนได้มากที่สุด คือ ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที โดยสามารถลดปริมาณไนโตรเจนได้ 76.25% เมื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลจากรูปที่ 4.1 จะเห็นว่าที่อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส และเวลา 60 นาทีของทั้งสองรูปนั้น กระบวนการไฮโดรเทอร์มัลร่วมกับการใช้สารลดแรงตึงผิวเข้มข้น 1% สามารถลดปริมาณไนโตรเจนได้มากกว่าอย่างชัดเจนถึง 9.36% แสดงให้เห็นว่าการใช้สารลดแรงตึงผิวร่วมกับไฮโดรเทอร์มัลให้ประสิทธิภาพในการลดปริมาณไนโตรเจนได้ดีกว่าการใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มัลเพียงอย่างเดียว เนื่องมาจากผลของการทำปฏิกิริยาร่วมกันของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและสารลดแรงตึงผิวที่ช่วยส่งเสริมกันทั้งการตัดพันธะเพปไทด์ของโปรตีนด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส [12] และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโปรตีนที่หลงเหลืออยู่บนเนื้อเยื่อด้วยการใช้สารลดแรงตึงผิว [29]



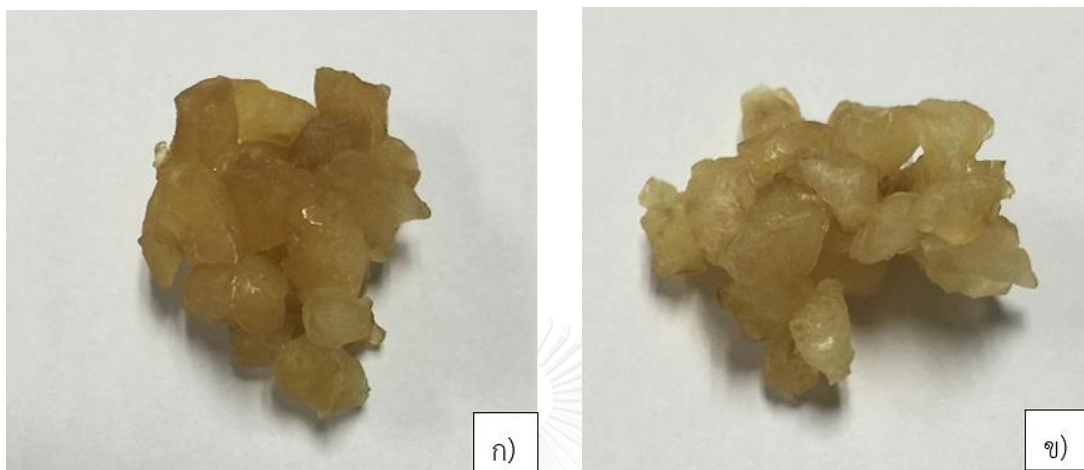
รูปที่ 4.3 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาร่วมระหว่างกระบวนไฮโดรเทอร์มัลและสารลดแรงตึงผิว (ก) ใช้สารลดแรงตึงผิวเข้มข้น 1% (ข) ใช้สารลดแรงตึงผิวเข้มข้น 5% และ (ค) ใช้สารลดแรงตึงผิวเข้มข้น 10% เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 45 และ 60 นาที ต่อการลดปริมาณไนโตรเจนในน้ำยาง

จากรูปที่ 4.3(ข) แสดงร้อยละของปริมาณไนโตรเจนที่ถูกกำจัดออกด้วยปฏิกิริยาร่วมระหว่างกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 125 150 175 และ 200 องศาเซลเซียส และการใช้สารลดแรงตึงผิว 5% โดยปริมาตร เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 45 และ 60 นาที เห็นได้ว่าภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาที่สามารถลดปริมาณไนโตรเจนได้มากที่สุด คือ ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ซึ่งสามารถลดปริมาณไนโตรเจนได้มากถึง 82.2% เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากรูปที่ 4.3(ก) จะเห็นว่าการลดลงของไนโตรเจนมีแนวโน้มที่ไปในโน้มนเดียวกัน ซึ่งการเพิ่มปริมาณสารลดแรงตึงผิวในการร่วมทำปฏิกิริยาส่งผลทำให้มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณไนโตรเจนได้ดีขึ้น โดยสามารถลดได้มากกว่า 6.18% เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้สารลดแรงตึงผิวเข้มข้น 1% ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มปริมาณสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ในระบบจึงสามารถลดปริมาณไนโตรเจนได้มากขึ้น ผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Suksaeree และคณะ [34] ที่ได้ศึกษาถึงการผลิตยางธรรมชาติโปรตีนต่ำด้วยกระบวนการร่วมระหว่างการใช้สารลดแรงตึงผิวและการชะล้าง โดยใช้สารลดแรงตึงผิวเข้มข้น 0.5 – 3.0% และใช้สารละลายอินทรีย์ (organic solvent) เช่น สารละลายเอทานอลในการชะล้าง สามารถลดปริมาณโปรตีนที่ตกค้างบนยางผลิตภัณฑ์ได้ 74 – 100% แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณสารลดแรงตึงผิวในระบบสามารถลดปริมาณโปรตีนได้มากขึ้นเช่นเดียวกัน เมื่อได้ภาวะที่เหมาะสมต่อการทำปฏิกิริยาจากการทดลองข้างต้นแล้ว จึงทดลองเพิ่มสารลดแรงตึงผิวเป็น 10% โดยปริมาตรที่ภาวะที่เหมาะสม คือ เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 60 นาทีอ้างอิงจากผลของการทำปฏิกิริยาข้างต้น ทั้งนี้เพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้และตัวแปรที่ส่งผลในการเพิ่มประสิทธิภาพการลดปริมาณไนโตรเจน สืบเนื่องมาจากงานวิจัยของ Schloman [29] ที่ได้ศึกษาการลดปริมาณโปรตีนในยางธรรมชาติด้วยการใช้สารลดแรงตึงผิวแล้วตามด้วยการปั่นกวนและตั้งแยกไว้ข้ามคืน โดยใช้สารลดแรงตึงผิวปริมาณ 10% โดยปริมาตร ตามด้วยกระบวนการล้าง 3 – 4 ขั้นตอน ซึ่งสามารถลดปริมาณไนโตรเจนได้ 93% ของโปรตีนทั้งหมดในน้ำยาง

จากการวิเคราะห์ตามรูปที่ 4.3(ค) แสดงผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาร่วมระหว่างกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลและสารลดแรงตึงผิว 10% โดยปริมาตร ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที พบว่าอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 200 องศาเซลเซียสยังคงเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดในการทำปฏิกิริยา ซึ่งสามารถลดปริมาณลดปริมาณไนโตรเจนได้ 81.97% เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากรูปที่ 4.3(ข) จะเห็นได้ว่าที่ภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการใช้สารลดแรงตึงผิวความเข้มข้น 5 และ 10% โดยปริมาตร มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณไนโตรเจนได้ต่างกันเพียงเล็กน้อยอย่างไม่น่าสำคัญ คือ ที่อุณหภูมิ 125 และ 175 องศาเซลเซียส การใช้สารลดแรงตึงผิวเข้มข้น 10% โดยปริมาตรสามารถลดปริมาณไนโตรเจนได้มากกว่า 0.91% และ 1.03% ตามลำดับ แต่ที่อุณหภูมิ 150 และ 200 องศาเซลเซียส การใช้สารลดแรงตึงผิว 5% โดยปริมาตรสามารถลดปริมาณไนโตรเจนได้มากกว่า 0.35% และ 0.18% ตามลำดับ ดังนั้นภาวะที่เหมาะสมที่จะใช้ในการศึกษานี้คือ ใช้สารลดแรงตึงผิวเข้มข้น 5% โดยปริมาตร เนื่องจากสารลดแรงตึงผิวที่ใช้มีราคาค่อนข้างสูงจึงทำให้การใช้สารลดแรงตึงผิวเข้มข้น 10% โดยปริมาตรไม่คุ้มค่าต่อการผลิตเนื่องจากสามารถลดปริมาณไนโตรเจนได้มากกว่าในบางภาวะเท่านั้น และอีกสาเหตุหนึ่งคือการใช้สารลดแรงตึงผิวที่มากเกินไปทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้อาจมีค่าสมบัติเชิงกลต่างๆ ต่ำลงได้ อ้างอิงจากงานวิจัยของ Scholman [29] การลดปริมาณโปรตีนด้วยสารลดแรงตึงผิวเข้มข้น 10% โดยปริมาตรทำให้มีการเชื่อมขวางของยางน้อยลงอย่างมากเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติที่ไม่สารลดแรงตึงผิว

จากรูปที่ 4.4 เมื่อสังเกตสีของผลิตภัณฑ์จะพบว่า ยางในรูปที่ 4.4(ก) มีสีเหลืองเข้มกว่ายางในรูปที่ 4.4(ข) เนื่องจากสีเหลืองที่ปรากฏขึ้นในเนื้อยางนั้นส่วนใหญ่มาจากโปรตีน ยางที่ผ่านกระบวนการร่วมในการลดปริมาณโปรตีนแล้วจะมีสีเหลืองที่อ่อนลง ซึ่งเป็นไปในแนวทางเดียวกันกับงานวิจัยของ Doylea และคณะ [17] ที่ทำการทดลองลดปริมาณโปรตีนในยางธรรมชาติด้วยการใช้อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($Al(OH)_3$) แล้วตามด้วยการปั่นแยก เมื่อปริมาณโปรตีนในยางลดลงก็จะมีสีที่อ่อนลงเช่นกัน ดังนั้นจึงสามารถ

สรุปได้ว่าสียางที่มีสีอ่อนลงแสดงว่ามีปริมาณโปรตีนที่ต่ำลง จึงเป็นข้อดีในการนำยางนี้ไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการสีขาวหรือต้องการเติมสี



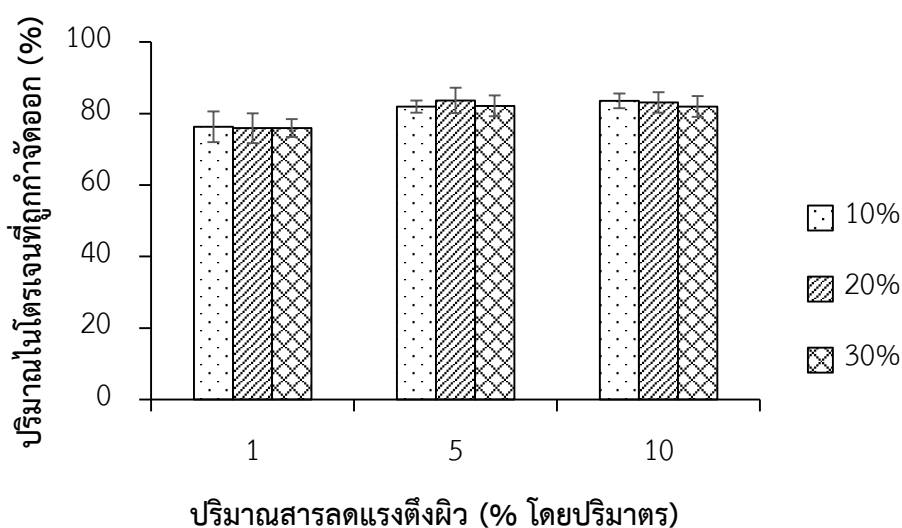
รูปที่ 4.4 ผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติ (ก) ไม่ผ่านกระบวนการ และ (ข) ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 200 °ซ เป็นเวลา 60 นาที โดยใช้สารลดแรงตึงผิว 5% โดยปริมาตร

4.1.2 ความเข้มข้นของน้ำยาง 10 และ 20% โดยความเข้มข้นของเนื้อยาง

จากผลการทดลองข้างต้นพบว่าภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาเพื่อลดปริมาณไนโตรเจน คือ ใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 200 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที โดยใช้สารลดแรงตึงผิว 5% โดยปริมาตร สามารถลดปริมาณไนโตรเจนได้ 82% หลังจากนั้นจึงทดลองลดความเข้มข้นของน้ำยางลงเหลือ 10 และ 20% เพื่อศึกษาเพิ่มเติมถึงตัวแปรที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการลดปริมาณไนโตรเจน

จากการวิเคราะห์ตามรูปที่ 4.5 แสดงผลของความเข้มข้นของน้ำยาง 10 20 และ 30% และความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว 1 5 และ 10% โดยปริมาตร พบว่าการใช้ความเข้มข้นของน้ำยาง 10 และ 20% มีการลดปริมาณไนโตรเจนใกล้เคียงกับการใช้น้ำยางที่มีความเข้มข้น 30% โดยจะเห็นได้ว่าที่ภาวะที่สามารถลดปริมาณ

ไนโตรเจนได้มากที่สุด คือ ใช้สารลดแรงตึงผิว 10% โดยปริมาตร และใช้น้ำยางที่มีความเข้มข้น 10% เนื่องจากปริมาณเนื้อเยื่อต่อปริมาณสารลดแรงตึงผิวที่ใช้มีค่าน้อยลงจึงสามารถทำปฏิกิริยากันได้ดีขึ้น ซึ่งภาวะดังกล่าวแตกต่างจากการใช้สารลดแรงตึงผิว 5% โดยปริมาตร และความเข้มข้นของน้ำยาง 30% เพียง 1.38% เท่านั้น แต่ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ต่อครั้งมีปริมาณน้อยกว่ามากถึง 3 เท่า ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าความเข้มข้นของเนื้อเยื่อไม่ส่งผลต่อการลดปริมาณโปรตีน



รูปที่ 4.5 ผลของความเข้มข้นของน้ำยางและความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว ต่อการลดปริมาณไนโตรเจนในน้ำยางข้น

4.2 วิเคราะห์ปริมาณโปรตีน

เมื่อได้ภาวะที่สามารถลดปริมาณไนโตรเจนจากผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุข้างต้นแล้ว จึงนำยางผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณโปรตีนโดยรวมด้วยวิธีเจลดาล (Kjeldahl method) ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าปริมาณโปรตีนในยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการมีปริมาณโปรตีนลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน โดยลดลงจาก 2.13% เหลือเพียง 0.63% ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 200 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที เมื่อเปรียบเทียบกับโปรตีนกับ

ผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติโปรตีนต่ำที่ผ่านกระบวนการที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส พบว่าสามารถลดปริมาณโปรตีนได้ 0.82% เนื่องจากการใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาลดต่ำกว่าจึงมีประสิทธิภาพในการสลายพันธะเพปไทด์ของโปรตีนได้น้อยกว่าการใช้อุณหภูมิสูง จึงสามารถสรุปได้ว่าปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการลดปริมาณโปรตีนด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

ตารางที่ 4.1 ปริมาณโปรตีนโดยรวมในยาง

ตัวอย่าง	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)	ความเข้มข้นสารลดแรงตึงผิว (%)	ปริมาณโปรตีน (%)
NR	-	-	-	2.13
HPTNR 1	150	60	5	0.82
HPTNR 2	200	60	1	0.63
HPTNR 3	200	60	5	0.63

4.3 วิเคราะห์สมบัติเชิงกล

เมื่อได้ผลิตภัณฑ์เป็นยางธรรมชาติโปรตีนต่ำจากกระบวนการข้างต้นแล้ว นำมาผสมกับสารเคมีต่างๆเพื่อขึ้นรูปและใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของยาง เพื่อตรวจสอบว่าผลิตภัณฑ์ยางที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่เปลี่ยนแปลงหรือไม่เปรียบเทียบกับยางธรรมชาติที่ไม่ผ่านกระบวนการ

4.3.1 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยาง

นำยางผลิตภัณฑ์ไปทดสอบสมบัติเชิงกล โดยทำการผสมยางและขึ้นรูปตามสถานะที่แสดงในหัวข้อ 3.10 วัดลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางคอมพาวด์ตามมาตรฐาน ASTM D5289 ใช้เครื่องวัดลักษณะการคงรูปที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส

ลักษณะการคงรูปของยาง NR และยาง HPTNR ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิและปริมาณการใช้สารลดแรงตึงผิวต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.2 ประกอบด้วย ค่าแรงบิดต่ำสุด (minimum torque, M_L) แรงบิดสูงสุด (maximum torque, M_H) เวลาเริ่มเกิดการคงรูป (scorch time, t_{s2}) และเวลาที่ยางเกิดการคงรูป (optimum cure time, t_{c90}) พบว่าค่าแรงบิดต่ำสุดและสูงสุดของยาง NR (0.47 และ 5.75 เดซินิวตันเมตร) มีค่าสูงกว่ายาง HPTNR ในทุกภาวะที่ใช้ในการทดลอง เนื่องจากการลดลงของปริมาณโปรตีนทำให้เกิดการเชื่อมขวางน้อยลง [29] ยางจึงมีความหนืดน้อยลงเช่นกัน และเนื่องจากสารลดแรงตึงผิวที่ตกค้างอยู่ในยางจึงทำให้ยางนิ่มลง

เมื่อพิจารณาเวลาเริ่มเกิดการคงรูป และเวลาที่ยางเกิดการคงรูปของยาง HPTNR พบว่าในกรณีที่มีค่าน้อยลงที่การใช้สารลดแรงตึงผิวเข้มข้น 1% เนื่องจากโครงสร้างของโปรตีนมีส่วนในการสร้างการเชื่อมขวางกับซัลเฟอร์ ดังนั้นเมื่อปริมาณโปรตีนลดน้อยลงจึงทำให้ระยะเวลาที่ใช้ในการเชื่อมขวางมีน้อยลง ในกรณีที่มีเวลาที่เกิดการคงรูปของยาง HPTNR เร็วขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับที่ใช้สารลดแรงตึงผิวความเข้มข้นเดียวกันที่ 5% โดยปริมาตร เวลาที่ใช้ในการคงรูปมีค่ามากขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่ใช้เพิ่มขึ้น เนื่องจากผลิตภัณฑ์ยาง HPTNR อาจมีสารลดแรงตึงผิวหลงเหลืออยู่ในปริมาณที่แตกต่างกัน เพราะหลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลแล้วไม่ได้ทำการล้างเพื่อกำจัดสารลดแรงตึงผิวออก สารลดแรงตึงผิวดังกล่าวจึงทำหน้าที่เป็นตัวหน่วง (retard) ปฏิกิริยาการเชื่อมขวางของยาง ซึ่งเป็นผลดีต่อการขึ้นรูปยาง เนื่องจากยางสามารถไหลได้เต็มแม่พิมพ์และไม่เกิดยางตายระหว่างการขึ้นรูป สอดคล้องกับงานวิจัยของ George [35] ที่ได้ทำการศึกษาการลดปริมาณโปรตีนในยางน้ำยาง (skim rubber) ด้วยเอนไซม์ที่ได้จากยางมะละกอ (*Carica papaya*) โดยลดปริมาณโปรตีนจาก 2.30% โดยน้ำหนัก เป็น 0.62% โดยน้ำหนัก แล้วนำยางที่ได้ไปขึ้นรูปเพื่อทดสอบสมบัติของยาง พบว่าการลดปริมาณโปรตีนส่งผลให้ใช้เวลาในการเชื่อมขวางมากขึ้น

4.3.2 สมบัติการรับแรงดึงและความแข็ง

เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 4.3 ในกรณีที่ค่าความทนต่อแรงดึง ระยะยืด ณ จุดขาด และค่ามอดูลัสการดึงยืด 300% ของยาง HPTNR มีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับยาง NR เนื่องจากกระบวนการลดปริมาณโปรตีนมีการใช้ความร้อนที่ค่อนข้างสูงจึงอาจทำให้เกิดการสลายตัวเนื่องจากความร้อน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Verkey และคณะ [31] ได้ศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของยางธรรมชาติ พบว่าอุณหภูมิในการสลายตัวอย่างสมบูรณ์ของยางธรรมชาติ คือ 310 – 456 องศาเซลเซียส แต่ที่อุณหภูมิต่ำกว่านั้นอาจเกิดการสลายตัวของยางโมเลกุลเล็กและโมเลกุลที่ไม่อิ่มตัวเนื่องจากความร้อน จึงทำให้คุณภาพของยางลดลงได้

ในกรณีที่ยาง HPTNR มีค่าความทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับผลจากการใช้อุณหภูมิเดียวกันในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่ 125 175 และ 200 องศาเซลเซียส พบว่าการใช้สารลดแรงดึงผิว 5% โดยปริมาตร มีค่าสูงกว่าการใช้สารลดแรงดึงผิว 1% โดยปริมาตร เป็นเหตุมาจากปริมาณสารลดแรงดึงผิวที่หลงเหลือจากกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล

ในส่วนของค่าความแข็ง ยาง HPTNR มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับยาง NR เนื่องจากยางมีพันธะเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลน้อยจึงทำให้ยางนิ่มลง ซึ่งมีผลคล้ายงานวิจัยของ Schloman [29] ที่ได้กล่าวไว้ว่า “โปรตีนมีส่วนสำคัญต่อการเชื่อมโยงของโมเลกุล” หลังจากที่เขาได้ทำการลดปริมาณโปรตีนด้วยสารลดแรงดึงผิวแล้วแล้วได้นำยางดังกล่าวไปขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มและทดสอบการเชื่อมขวางของยาง พบว่ายางที่ได้จากการลดปริมาณโปรตีนด้วยสารลดแรงดึงผิวนั้นมีการเชื่อมขวางลดลงจากยางธรรมชาติเป็นอย่างมาก เมื่อพิจารณาที่ใช้สารลดแรงดึงผิวความเข้มข้นเดียวกันจะเห็นได้ว่าการใช้สารลดแรงดึงผิวเข้มข้น 5% ค่าความแข็งมีน้อยกว่าการใช้สารลดแรงดึงผิวความเข้มข้น 1% เนื่องจากสารลดแรงดึงผิวดกต่างในทางผลิตภัณฑ์ทำให้ยางดังกล่าวนิ่มลง

ตารางที่ 4.2 ลักษณะการวัดคาบโนซ์

ชื่อตัวอย่าง	อุณหภูมิ (° ซ)	ปริมาณสารลดแรงตึงผิว (% โดยปริมาตร)	แรงบิดต่ำสุด M_L (dN.m)	แรงบิดสูงสุด M_H (dN.m)	เวลาเริ่มเกิดการ คงรูป t_{s2} (นาที)	เวลาที่ยางเกิด การคงรูป t_{c90} (นาที)
NR	-	-	0.47 ± 0.02	5.75 ± 0.03	3.71 ± 0.04	6.31 ± 0.06
HPTNR 1	125	1	0.32 ± 0.00	5.35 ± 0.02	6.04 ± 0.14	8.37 ± 0.17
HPTNR 3	175	1	0.27 ± 0.01	5.13 ± 0.03	4.87 ± 0.08	7.02 ± 0.05
HPTNR 4	200	1	0.25 ± 0.02	5.31 ± 0.05	4.23 ± 0.16	7.08 ± 0.31
HPTNR 5	125	5	0.27 ± 0.10	4.66 ± 0.26	2.33 ± 0.08	4.80 ± 0.35
HPTNR 7	175	5	0.34 ± 0.02	4.60 ± 0.27	3.09 ± 0.06	5.33 ± 0.21
HPTNR 8	200	5	0.40 ± 0.01	4.97 ± 0.35	3.67 ± 0.14	6.10 ± 0.23

ตารางที่ 4.3 สมบัติการรับแรงดึงและความแข็งของตัวอย่าง

ชื่อตัวอย่าง	อุณหภูมิ (° C)	ปริมาณสารลดแรงดึงผิว (% โดยปริมาตร)	ความทนต่อแรงดึง (เมกะปาสคาล)	ระยะยืด ณ จุดขาด (%)	มอดูลัสการดึงยืด 300% (เมกะปาสคาล)	ความแข็ง (Shore A)
NR	-	-	31.0 ± 2.2	742 ± 19	2.52 ± 0.06	46.4 ± 0.2
HPTNR 1	125	1	29.7 ± 1.1	762 ± 14	2.25 ± 0.05	44.5 ± 0.4
HPTNR 3	175	1	30.8 ± 1.9	808 ± 20	1.72 ± 0.02	41.7 ± 0.3
HPTNR 4	200	1	31.2 ± 0.7	814 ± 6	1.67 ± 0.01	40.8 ± 0.3
HPTNR 5	125	5	32.8 ± 1.2	801 ± 13	2.09 ± 0.03	40.2 ± 0.4
HPTNR 7	175	5	33.4 ± 1.1	817 ± 9	1.74 ± 0.03	40.4 ± 0.4
HPTNR 8	200	5	32.0 ± 0.8	809 ± 7	1.71 ± 0.01	40.7 ± 0.3

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มัลร่วมกับสารลดแรงตึงผิว คือ พอลิเอทิลีนไกลคอล เติร์ทออกทิลฟีนิลอีเทอร์ ในการลดปริมาณโปรตีนในน้ำยางธรรมชาติ และศึกษาสมบัติเชิงกลของยางผลิตภัณฑ์จากกระบวนการดังกล่าว โดยสรุปได้ดังต่อไปนี้

5.1.1. การลดปริมาณไนโตรเจน

ภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในการลดปริมาณไนโตรเจนในยางธรรมชาติ คือ การทำกระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลและการใช้สารลดแรงตึงผิวเข้มข้น 5% โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที และใช้น้ำยางที่มีความเข้มข้น 30% โดยสามารถลดปริมาณโปรตีนได้สูงสุด 82.2%

5.1.2. อิทธิพลที่ส่งผลต่อการลดปริมาณไนโตรเจน

ตัวแปรหลักที่มีอิทธิพลต่อการลดปริมาณไนโตรเจน คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส พบว่าเมื่อมีการใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะมีปริมาณโปรตีนที่ถูกกำจัดจะมีค่ามากขึ้นตามลำดับ แต่หากอุณหภูมิที่ใช้สูงกว่า 200 องศาเซลเซียสจะทำให้ยางเสื่อมสภาพ (ไหม้) เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสส่งผลต่อการลดปริมาณโปรตีน โดยเมื่อเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาให้นานขึ้น ปริมาณโปรตีนในยางผลิตภัณฑ์จะลดลงตามลำดับ ซึ่งเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมที่สามารถลดปริมาณโปรตีนได้มากที่สุด คือ 60 นาที และอีกตัวแปรหนึ่งที่ส่งผลต่อการลดปริมาณโปรตีนเช่นกัน คือ ปริมาณการใช้สารลดแรงตึงผิว พบว่าเมื่อใช้สารลดแรงตึงผิวมากขึ้นจะสามารถลด

ปริมาณโปรตีนได้มากขึ้น ซึ่งปริมาณการใช้สารลดแรงตึงผิวที่เหมาะสม คือ 5% โดย ปริมาตรของสารละลาย

5.1.3. วิเคราะห์สมบัติเชิงกล

อิทธิพลที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของยาง HPTNR คือ อุณหภูมิ และสารลดแรงตึงผิวที่ตกค้างอยู่ในเนื้อยาง อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลส่งผลโดยทำให้โมเลกุลขนาดเล็กของยางและโมเลกุลที่ไม่อิมิตัวเกิดการสลายตัวได้ จึงทำให้คุณภาพของยางบางอย่างลดลง ในส่วนของสารลดแรงตึงผิวที่ตกค้างอยู่ในผลิตภัณฑ์ยาง ส่งผลต่อคุณภาพยางโดยมีส่วนในการหน่วงการวัลคาไนซ์ของยางทำให้ยางใช้เวลาในการคงรูปที่ช้าลง ภาวะที่สามารถลดปริมาณโปรตีนได้มากที่สุดมีค่าความหนืดต่อแรงตึงเพิ่มขึ้น 1.0 เมกะปาสคาล ระยะยืด ณ จุดขาดมีค่าเพิ่มขึ้น 67% มอดูลัสการดึงยืด 300% มีค่าลดลง 0.85% และความแข็งมีค่าลดลง 5.7 เมื่อเปรียบเทียบกับยาง NR

5.2. ข้อเสนอแนะ

ผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติโปรตีนต่ำที่ได้จากภาวะการทดลองที่เหมาะสมที่สุด ยังมีปริมาณโปรตีนที่หลงเหลืออยู่ 0.63% ซึ่งยังไม่อยู่ในเกณฑ์ที่ผู้ใช้ที่มีอาการแพ้ต่อโปรตีนสามารถใช้งานผลิตภัณฑ์ที่มาจากยางนี้ได้ ดังนั้นจึงควรทำการทดลองเพิ่มเติมเพื่อลดปริมาณโปรตีนให้น้อยกว่า 50 ไมโครกรัมต่อยาง 1 กรัม [5] เช่น การเปลี่ยนสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ หรือใช้กระบวนการชะล้างหลังจากผ่านการทำปฏิกิริยาแล้ว เป็นต้น เพื่อให้สามารถนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปใช้งานได้จริง

รายการอ้างอิง

1. กฤษณี พิสิฐศุภกุล, สถานการณ์ยางพาราปี 2557 และแนวโน้มปี 2558. ธนาคารแห่งประเทศไทย, 2015.
2. กฤษณี พิสิฐศุภกุล, สถานการณ์ยางพาราปี 2558 และแนวโน้มราคาปี 2559 ธนาคารแห่งประเทศไทย, 2016.
3. สำนักพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมภาคตะวันออกเฉียงเหนือ, สถานการณ์ยางพาราและการปรับตัวของเกษตรกรในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ. 2015.
4. กรมวิทยาศาสตร์บริการ, โปรตีนในน้ำยางธรรมชาติ (*Protein in natural rubber latex*). 2010.
5. Scientific Committee on Medicinal Products and Medical Devices, *Opinion on natural rubber latex allergy*. European Commission, 2000.
6. ชญาภา นิมสุวรรณ, การแพ้โปรตีนในน้ำยางธรรมชาติ : วิธีตรวจสอบและเทคโนโลยีการแก้ไข. rubbercenter.org, 2007. 1.
7. W. Jankangram, โปรตีนในน้ำยางพารา (*Natural rubber latex protein*). KRU Res. J., 2013. **18(6)**: p. 996-1002.
8. O. Chaikumpollert, K. Suchiva, S. Kawahara, *Mechanical properties and cross-linking structure of cross-linked natural rubber*. Polymer Journal, 2012. **44**: p. 772-777.
9. D.C. Blackley, *Polymer latices*. Science and technology, 1997. **Volume 2: Types of latices**.
10. K. Berthelot, et al., *Rubber particle proteins, HbREF and HbSRPP, show different interactions with model membranes*. Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Biomembranes, 2014. **1838**(1, Part B): p. 287-299.
11. สถาบันวิจัยยาง, ยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์. งานนิทรรศการพืชสวน, 2011.
12. University of Massachusetts Amherst, *The peptide bond*. New Science Press Ltd., 2004.

13. M. Sakakura, M. Takayama, *Sonolytic hydrolysis of peptides in aqueous solution upon addition of catechol*. Ultrasonics Sonochemistry, 2009. **16**(3): p. 367-371.
14. X. Baur, Z. Chen, *Summary of appropriate measures to prevent natural rubber latex allergy*. Allergology International, 1999. **48**: p. 31-36.
15. J.T. Sakdapipanich, *Structural characterization of natural rubber based on recent evidence from selective enzymatic treatments*. J Biosci Bioeng, 2007. **103**(4): p. 287-92.
16. F.W. Perrella, A.A. Gaspari, *Natural rubber latex protein reduction with an emphasis on enzyme treatment*. Methods, 2002. **27**(1): p. 77-86.
17. W. Doylea, G. Narayananb, J. Johnc, R.K. Matthanc, *The non enzymatic deproteinization of natural rubber latex (DPNRL) enabling the greater versatility in end product applications* Vystar® Corporation.
18. กัญจน์ นวมะวัฒน์, ผลขององค์ประกอบที่ไม่ใช่ยางต่อสมบัติพื้นฐานและสมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติ ฮีเวีย บราซิลเลียนซิส (*Effect of non-rubber components on basic characteristics and physical properties of natural rubber from Heavea brasiliensis*) Fac. of Grad. Studies, Mahidol Univ: p. 228.
19. J. Walworth, K.J. Brewer, M.M. Richter, *Enhanced electrochemiluminescence from $Os(phen)_2(dppene)_2^+$ ($phen=1,10$ -phenanthroline and $dppene=bis(diphenylphosphino)ethene$) in the presence of Triton X-100 (polyethylene glycol tert-octylphenyl ether)*. Analytica Chimica Acta, 2004. **503**(2): p. 241-245.
20. B.J. Chun, J.I. Choi, S.S. Jang, *Molecular dynamics simulation study of sodium dodecyl sulfate micelle: water penetration and sodium dodecyl sulfate dissociation*. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2015. **474**: p. 36-43.
21. O. Rattanaphan, P. Danwanichakul, *Reduction of protein content in skim rubber via both extractions in skim latex and from rubber films*. 1st Mae Fah Luang University International Conference, 2012: p. 1-7.
22. พงษ์ธร แซ่ฮ้อย, วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยียาง. วารสารเพื่อการพัฒนาของอุตสาหกรรมยางไทย, 2009. **3**.

23. A.Y. Coran, *Vulcanization. The Science and Technology of Rubber*, 2013: p. 337-381.
24. P. Parker, *The maximum stress a material subjected to a stretching load can withstand without tearing*. McGraw-Hill dictionary of Scientific and Technical Terms. **5**: p. 2001.
25. M. Ravber, M. Škerget, *Hydrothermal degradation of fats, carbohydrates and proteins in sunflower seeds after treatment with subcritical water* Chem. Biochem. Eng. Q., 2015. **29**: p. 351-355.
26. M. Fountoulakis, *Hydrolysis and amino acid composition analysis of proteins* Journal of Chromatography A, 1998. **826**: p. 109–134.
27. Z. Du, et al., *Hydrothermal pretreatment of microalgae for production of pyrolytic bio-oil with a low nitrogen content*. Bioresource Technology, 2012. **120**: p. 13-18.
28. H.Y. Yeang, et al., *Allergenic proteins of natural rubber latex*. Methods, 2002. **27**(1): p. 32-45.
29. W.W. Schloman, *Surfactant treatment reduces both allergen content and cure efficiency of Hevea latex*. Trends in new crops and new uses ASHS Press 2002: p. 245-249.
30. ขยากกริต ศิริอุปลัมภ์, การเตรียมน้ำยางชั้นธรรมชาติที่มีโปรตีนก่อภูมิแพ้ต่ำโดยการเติมอนุพันธ์เซลลูโลสที่ลดขนาดโมเลกุลให้เล็กลงโดยใช้รังสีแกมมา การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนิวเคลียร์ครั้งที่ 10, 2007.
31. J.T. VARKEY, S. THOMAS, *Thermal degradation of natural rubber/ styrene butadiene rubber latex blends by thermogravimetric method*. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 2000. **39**: p. 415-435.
32. M.K. Akalin, K. Tekin, S. Karagöz, *Hydrothermal liquefaction of cornelian cherry stones for bio-oil production*. Bioresource Technology, 2012. **110**: p. 682-687.
33. R.B. Bradstreet, *Kjeldahl method for organic nitrogen*. Analytical chemistry, 1954. **26**: p. 185-187.
34. J. Suksaeree, W. Pichayakorn, *Surfactant treatment and leaching combination process for preparation of deproteinized natural rubber latex*. Key Engineering Materials, 2015. **659**: p. 500-504.

35. K.M. George, S. Joseph, K.T. Thomas, *Characterization of enzyme-deproteinized skim rubber*. Wiley InterScience 2009.





ภาคผนวก ก

การเตรียมน้ำยางธรรมชาติ

ก.1 หลักการ

น้ำยางธรรมชาติชั้นที่ได้จากสถาบันวิจัยยาง การยางแห่งประเทศไทย มีความเข้มข้นร้อยละ 60 ซึ่งน้ำยางดังกล่าวมีสารแอมโมเนียผสมอยู่เพื่อช่วยในการรักษาสภาพน้ำยางให้สามารถเก็บรักษาได้นานขึ้น งานวิจัยนี้ใช้ความเข้มข้นของน้ำยาง คือ 10 20 และ 30% จึงนำน้ำยางที่ได้มาเจือจางก่อนนำไปใช้ในการทดลอง

ก.2 เครื่องมือและสารเคมี

- 2.1 น้ำยางชั้น (60% DRC)
- 2.2 เครื่องกวนสารละลาย (magnetic stirrer)
- 2.3 แท่งแม่เหล็ก (magnetic bar)
- 2.4 ตู้ดูดควัน (fume hood)
- 2.5 กระจกบอทดวง
- 2.6 ปีกเกอร์
- 2.7 น้ำกลั่น

ก.3 วิธีการ

- 3.1 นำน้ำยางชั้นที่ได้มาเจือจางด้วยน้ำกลั่นที่ปริมาตรแตกต่างกันตามภาวะที่ใช้ในการทดลอง
- 3.2 เมื่อเจือจางเรียบร้อยแล้ว นำน้ำยางดังกล่าวบรรจุลงในปีกเกอร์เพื่อทำการปั่นกวนด้วยเครื่องปั่นกวนแบบแม่เหล็กเป็นเวลา 24 ชม.

- 3.3 การปั่นกวนตามข้อ 3.2 นั้น มีจุดประสงค์เพื่อให้น้ำยางข้นและน้ำกลั่นที่ผสมเข้ากันได้
ได้อย่างดีจนเป็นเนื้อเดียวกัน และเพื่อระเหยสารแอมโมเนียในน้ำยางออกอีกด้วย
- 3.4 การปั่นกวนจะต้องทำในตู้ดูดควันเท่านั้น เนื่องจากมีสารระเหยของแอมโมเนีย
ระเหยออกมาตลอดเวลา จึงอาจเกิดอันตรายได้
- 3.5 เมื่อทำการปั่นกวนจนครบ 24 ชม.แล้ว จึงสามารถนำน้ำยางไปทำการทดลองต่อไป



ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ

ข.1 หลักการ

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุเป็นการวิเคราะห์ถึงองค์ประกอบหลักของสารนั้นๆ คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน โดยจะใช้หลักการเผาไหม้สารตัวอย่างเพื่อให้เหลือเป็นธาตุองค์ประกอบ ซึ่งจะถูกวัดปริมาณและแสดงผลเป็นร้อยละ

ข.2 เครื่องมือและสารเคมี

2.1 CHN analyzer รุ่น CHN 2000 (LECO instrument (Thailand) Ltd.)

2.2 เอทิลีนไดเอมีนเตตระอะซิติก เอซิด (EDTA)

2.3 ฟอล์ยดีบุก (tin foil)

ข.3 วิธีการวิเคราะห์

3.1 ตรวจสอบปริมาณแก๊สที่ใช้ คือ ฮีเลียม และออกซิเจน ให้มีอัตราการไหลเข้าเครื่อง 20 มิลลิลิตรต่อนาที

3.2 ตรวจสอบสถานะความพร้อมใช้งานของเครื่อง โดยเข้าโหมด maintenance ให้สถานะทุกฟังก์ชันพร้อมใช้งาน

3.3 กดเลือกโปรแกรม method เพื่อเลือกสถานะของสารตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์

3.4 เมื่อเครื่องมือสถานะพร้อมใช้งานแล้ว ในครั้งแรกจะทำการวิเคราะห์เปล่า (blank) 10 ค่าเพื่อตรวจสอบความแม่นยำของเครื่อง

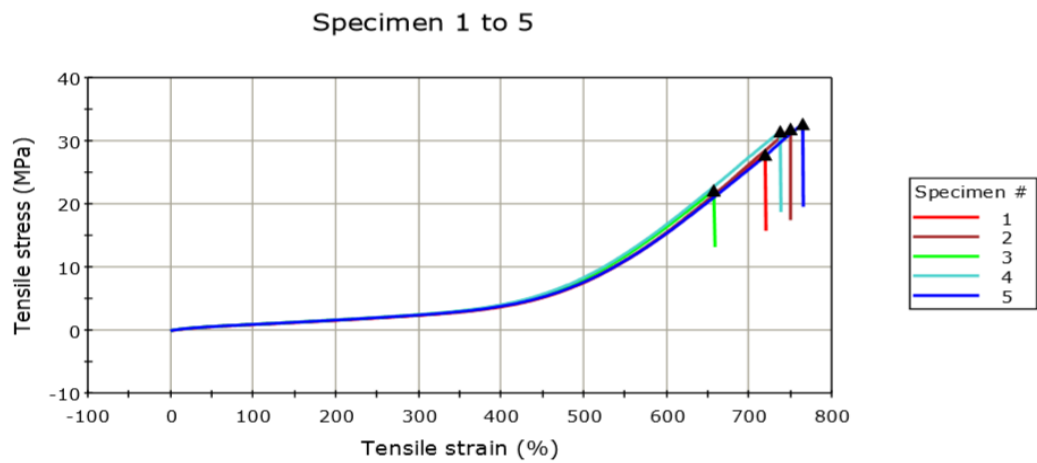
- 3.5 จากนั้นวิเคราะห์สารมาตรฐาน ในกรณีนี้สารตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นของแข็ง ให้ใช้ EDTA เป็นสารมาตรฐาน โดยชั่งน้ำหนักไม่เกิน 0.2 กรัม ใส่ลงในฟอยล์ดีบุก แล้วหย่อนลงในเครื่อง
- 3.6 ทำการวิเคราะห์สารมาตรฐานอย่างน้อย 5 ค่า แล้วนำผลที่ได้เปรียบเทียบกับค่าปริมาณธาตุของ EDTA ที่ระบุไว้ในคู่มือ
- 3.7 จากนั้นวิเคราะห์สารตัวอย่างที่ต้องการ โดยนำไปชั่งน้ำหนัก 0.2 กรัม แล้วใส่ลงในฟอยล์ดีบุก
- 3.8 หลังจากนั้นใส่น้ำหนักที่ชั่งได้จากข้อ 3.7 และหย่อนสารตัวอย่างที่ได้ลงในเครื่องเพื่อเริ่มทำการวิเคราะห์
- 3.9 กด analyze เพื่อวิเคราะห์ปริมาณธาตุ ผลที่ได้จะแสดงผลเป็นปริมาณร้อยละของธาตุนั้นๆ



ภาคผนวก ค

ผลการทดสอบการรับแรงดึง

ค.1 สมบัติการรับแรงดึงของยางธรรมชาติ

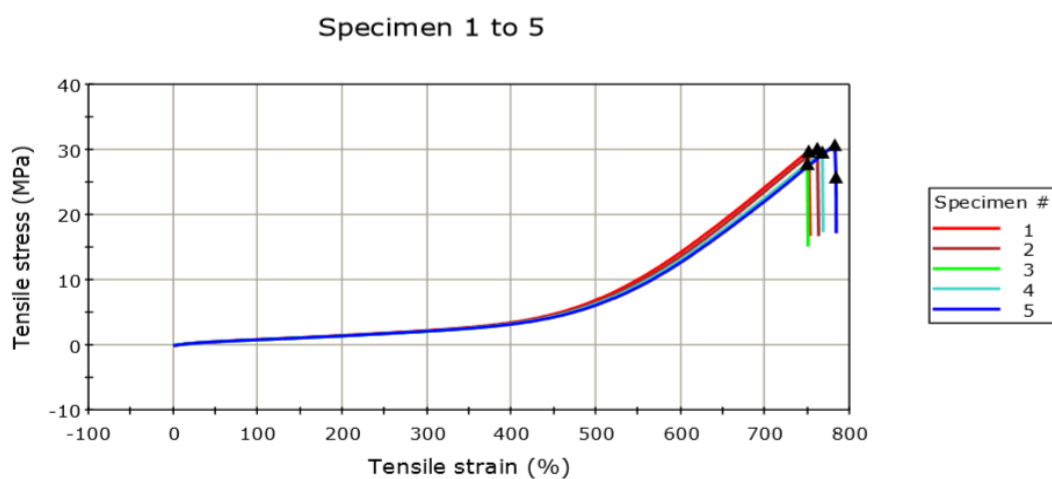


	Load at maximum (N)	Tensile stress at maximum (MPa)	Tensile strain at maximum (%)	Tensile stress at break (MPa)	Tensile strain at break (%)	Extension at maximum (mm)
1	326.40	27.9	718	27.9	718.1	556.7
2	377.85	31.9	749	31.9	748.9	580.0
3	267.07	22.2	656	22.2	655.9	517.5
4	391.04	31.5	736	31.5	736.4	576.7
5	401.53	32.7	764	32.7	763.6	586.7
Mean	347.21	31.0	742	31.0	741.8	575.0
SD	33.31	2.15	19	2.15	19.30	12.91

	Tensile stress at 10% modulus (MPa)	Tensile stress at 20% modulus (MPa)	Tensile stress at 50% modulus (MPa)	Tensile stress at 100% modulus (MPa)	Tensile stress at 200% modulus (MPa)
1	0.23	0.368	0.66	1.00	1.66
2	0.25	0.397	0.70	1.04	1.72
3	0.27	0.411	0.71	1.05	1.74
4	0.28	0.423	0.71	1.06	1.76
5	0.24	0.394	0.69	1.04	1.72
Mean	0.25	0.395	0.69	1.03	1.71
SD	0.02	0.023	0.02	0.03	0.04

	Tensile stress at 300% modulus (MPa)	Tensile stress at 400% modulus (MPa)	Tensile stress at 500% modulus (MPa)
1	2.45	3.80338	7.69
2	2.51	3.89434	7.80
3	2.56	4.05244	8.25
4	2.60	4.144223	8.51
5	2.52	3.90908	7.76
Mean	2.52	3.93726	7.94
SD	0.06	0.14	0.38

ค.2 สมบัติการรับแรงดึงของยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที โดยใช้สารลดแรงดึงผิวเข้มข้น 1%

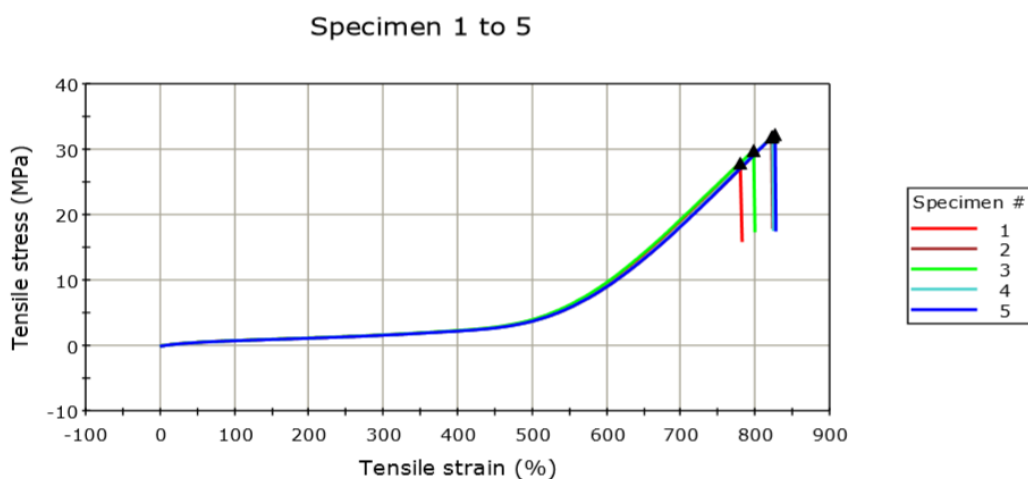


	Load at maximum (N)	Tensile stress at maximum (MPa)	Tensile strain at maximum (%)	Tensile stress at break (MPa)	Tensile strain at break (%)	Extension at maximum (mm)
1	352.98	29.8	751	29.8	750.6	595.5
2	357.58	30.2	761	30.2	760.8	595.0
3	326.61	27.9	749	27.9	748.9	587.5
4	345.45	29.6	767	29.6	766.6	596.7
5	364.49	30.8	781	25.8	782.5	600.0
Mean	349.42	29.7	762	28.7	761.9	595.0
SD	14.51	1.09	13	1.83	13.64	4.60

	Tensile stress at 10% modulus (MPa)	Tensile stress at 20% modulus (MPa)	Tensile stress at 50% modulus (MPa)	Tensile stress at 100% modulus (MPa)	Tensile stress at 200% modulus (MPa)
1	0.23	0.368	0.64	0.96	1.58
2	0.22	0.353	0.63	0.94	1.55
3	0.21	0.345	0.61	0.92	1.50
4	0.22	0.352	0.62	0.93	1.52
5	0.19	0.323	0.60	0.91	1.51
Mean	0.21	0.348	0.62	0.93	.53
SD	0.02	0.017	0.02	0.02	0.03

	Tensile stress at 300% modulus (MPa)	Tensile stress at 400% modulus (MPa)	Tensile stress at 500% modulus (MPa)
1	2.33	3.56070	7.02
2	2.28	3.44685	6.70
3	2.20	3.30563	6.38
4	2.23	3.35959	6.46
5	2.22	3.29846	6.23
Mean	2.25	3.39425	6.56
SD	0.05	0.11	0.31

ค.3 สมบัติการรับแรงดึงของยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที โดยใช้สารลดแรงดึงผิวเข้มข้น 1%

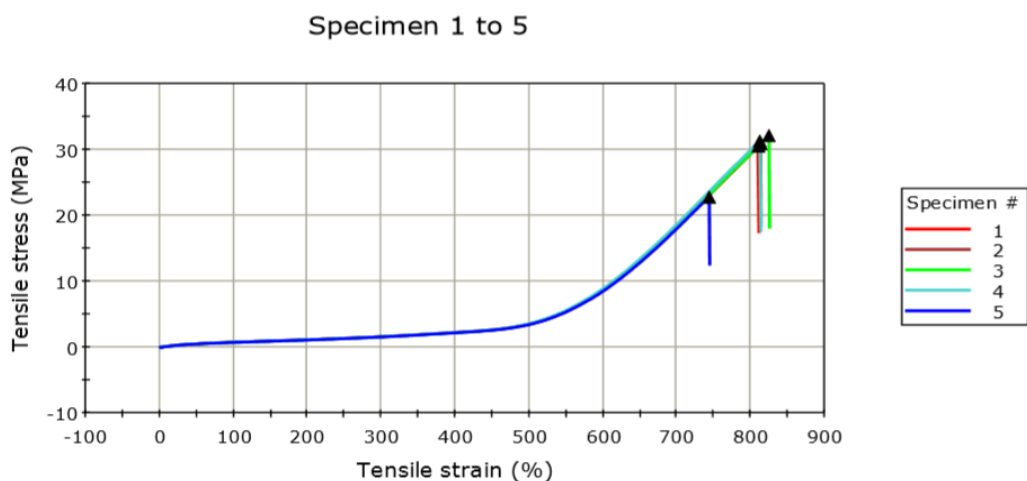


	Load at maximum (N)	Tensile stress at maximum (MPa)	Tensile strain at maximum (%)	Tensile stress at break (MPa)	Tensile strain at break (%)	Extension at maximum (mm)
1	332.47	27.9	778	27.9	778.4	602.5
2	375.36	31.9	820	31.9	820.1	630.0
3	348.16	29.9	769	29.9	796.1	615.0
4	374.92	32.0	822	32.0	821.5	634.2
5	382.52	32.3	825	32.3	825.1	633.3
Mean	362.69	30.8	808	30.8	808.2	623.0
SD	21.38	1.87	20	1.87	20.24	13.83

	Tensile stress at 10% modulus (MPa)	Tensile stress at 20% modulus (MPa)	Tensile stress at 50% modulus (MPa)	Tensile stress at 100% modulus (MPa)	Tensile stress at 200% modulus (MPa)
1	0.23	0.355	0.61	0.88	1.26
2	0.22	0.342	0.61	0.87	1.26
3	0.22	0.349	0.62	0.89	1.29
4	0.21	0.337	0.60	0.86	1.25
5	0.20	0.325	0.59	0.86	1.25
Mean	0.21	0.342	0.60	0.87	1.26
SD	0.01	0.012	0.01	0.01	0.02

	Tensile stress at 300% modulus (MPa)	Tensile stress at 400% modulus (MPa)	Tensile stress at 500% modulus (MPa)
1	1.73	2.38372	4.02
2	1.71	2.35045	3.84
3	1.76	2.43114	4.10
4	1.71	2.34614	3.85
5	1.71	2.34363	3.86
Mean	1.72	2.37102	3.93
SD	0.02	0.04	0.12

ค.4 สมบัติการรับแรงดึงของยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที โดยใช้สารลดแรงดึงผิวเข้มข้น 1%

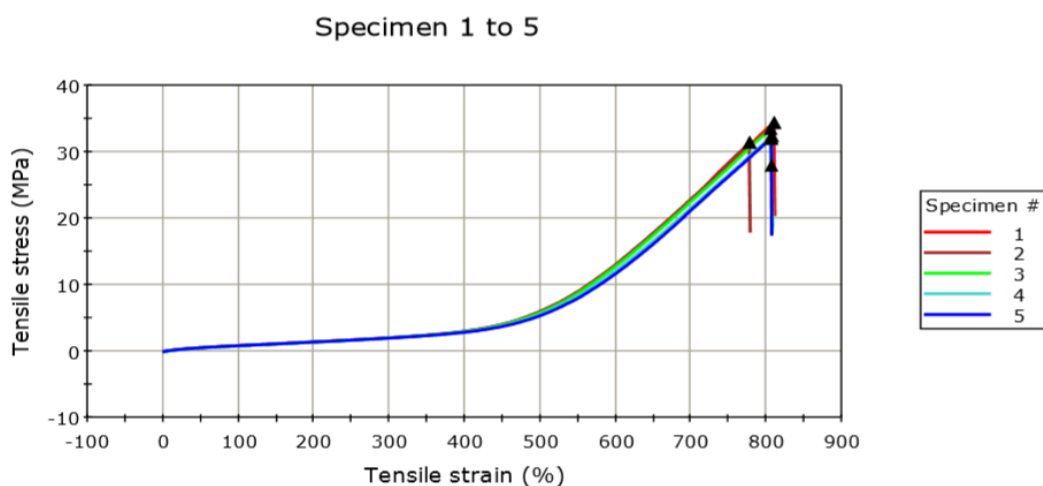


	Load at maximum (N)	Tensile stress at maximum (MPa)	Tensile strain at maximum (%)	Tensile stress at break (MPa)	Tensile strain at break (%)	Extension at maximum (mm)
1	356.16	30.6	809	30.6	809.4	633.3
2	362.58	30.9	812	30.9	812.2	637.5
3	376.75	32.2	823	32.2	823.5	644.2
4	366.88	31.3	811	31.3	811.0	635.8
5	268.97	22.8	743	22.8	742.8	580.8
Mean	365.59	31.2	814	31.2	814.0	637.7
SD	8.64	0.68	6	0.68	6.40	4.63

	Tensile stress at 10% modulus (MPa)	Tensile stress at 20% modulus (MPa)	Tensile stress at 50% modulus (MPa)	Tensile stress at 100% modulus (MPa)	Tensile stress at 200% modulus (MPa)
1	0.22	0.341	0.59	0.84	1.22
2	0.21	0.338	0.59	0.83	1.20
3	0.21	0.335	0.59	0.83	1.20
4	0.22	0.341	0.59	0.84	1.21
5	0.20	0.330	0.58	0.82	1.19
Mean	0.21	0.339	0.59	0.84	1.21
SD	0.00	0.003	0.00	0.00	0.01

	Tensile stress at 300% modulus (MPa)	Tensile stress at 400% modulus (MPa)	Tensile stress at 500% modulus (MPa)
1	1.68	2.31896	3.59
2	1.66	2.29130	3.56
3	1.66	2.29006	3.59
4	1.67	2.31020	3.65
5	1.64	2.27448	3.52
Mean	1.67	2.30263	3.60
SD	0.01	0.01	0.04

ค.5 สมบัติการรับแรงดึงของยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที โดยใช้สารลดแรงดึงผิวเข้มข้น 5%

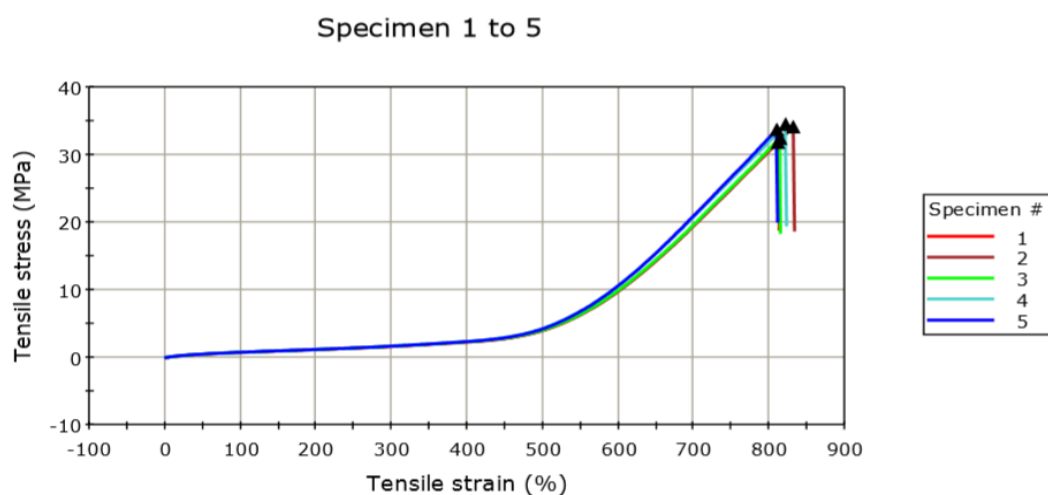


	Load at maximum (N)	Tensile stress at maximum (MPa)	Tensile strain at maximum (%)	Tensile stress at break (MPa)	Tensile strain at break (%)	Extension at maximum (mm)
1	399.05	34.4	809	34.4	809.3	659.2
2	366.69	31.5	777	31.5	776.7	614.2
3	386.37	33.5	805	28.0	805.9	626.7
4	378.18	32.4	806	32.4	805.1	613.3
5	369.30	32.0	805	32.0	805.1	615.8
Mean	379.92	32.8	800	31.7	800.5	625.8
SD	13.21	1.19	13	2.34	13.42	19.39

	Tensile stress at 10% modulus (MPa)	Tensile stress at 20% modulus (MPa)	Tensile stress at 50% modulus (MPa)	Tensile stress at 100% modulus (MPa)	Tensile stress at 200% modulus (MPa)
1	0.22	0.350	0.62	0.93	1.49
2	0.21	0.342	0.62	0.93	1.49
3	0.20	0.328	0.60	0.92	1.48
4	0.18	0.313	0.59	0.90	1.45
5	0.21	0.337	0.62	0.93	1.47
Mean	0.20	0.334	0.61	0.92	1.48
SD	0.01	0.014	0.01	0.01	0.02

	Tensile stress at 300% modulus (MPa)	Tensile stress at 400% modulus (MPa)	Tensile stress at 500% modulus (MPa)
1	2.10	3.07074	5.99
2	2.12	3.10332	6.10
3	2.10	3.05779	5.90
4	2.05	2.96101	5.62
5	2.06	2.94066	5.44
Mean	2.09	3.02670	5.81
SD	0.03	0.07	0.27

ค.6 สมบัติการรับแรงดึงของยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที โดยใช้สารลดแรงดึงผิวเข้มข้น 5%

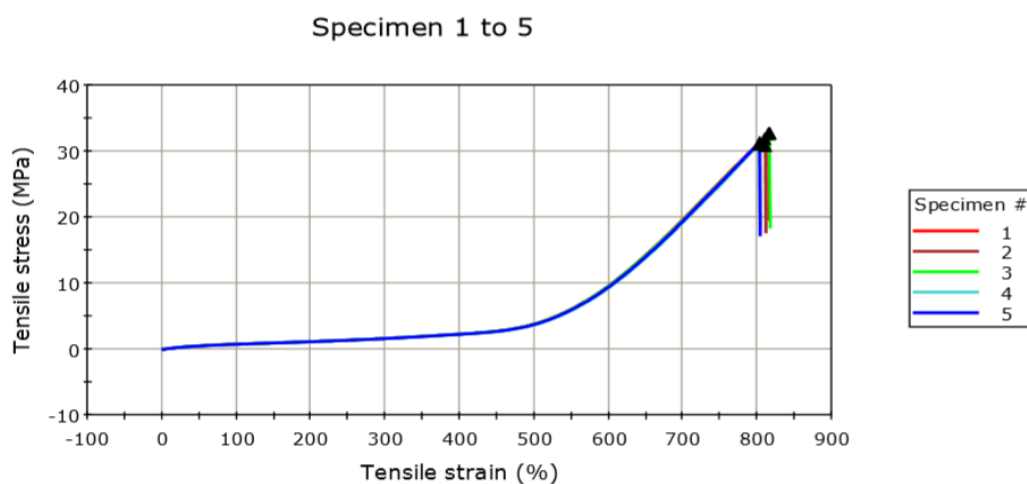


	Load at maximum (N)	Tensile stress at maximum (MPa)	Tensile strain at maximum (%)	Tensile stress at break (MPa)	Tensile strain at break (%)	Extension at maximum (mm)
1	371.02	31.8	810	31.8	810.3	635.0
2	400.34	34.2	831	34.2	830.9	657.5
3	376.81	32.5	813	32.5	813.2	641.7
4	402.50	34.5	821	34.5	820.7	655.8
5	391.14	33.7	809	33.7	809.0	639.2
Mean	388.36	33.4	817	33.4	816.8	645.8
SD	14.01	1.14	9	1.14	9.08	10.19

	Tensile stress at 10% modulus (MPa)	Tensile stress at 20% modulus (MPa)	Tensile stress at 50% modulus (MPa)	Tensile stress at 100% modulus (MPa)	Tensile stress at 200% modulus (MPa)
1	0.20	0.319	0.57	0.83	1.23
2	0.20	0.322	0.57	0.84	1.25
3	0.21	0.329	0.58	0.84	1.26
4	0.23	0.348	0.60	0.86	1.28
5	0.22	0.346	0.59	0.86	1.28
Mean	0.21	0.333	0.58	0.85	1.26
SD	0.01	0.014	0.01	0.01	0.02

	Tensile stress at 300% modulus (MPa)	Tensile stress at 400% modulus (MPa)	Tensile stress at 500% modulus (MPa)
1	1.70	2.34585	4.06
2	1.73	2.38669	4.10
3	1.73	2.39682	4.15
4	1.77	2.45794	4.40
5	1.76	2.43533	4.32
Mean	1.74	2.40453	4.21
SD	0.03	0.04	0.15

ค.7 สมบัติการรับแรงดึงของยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที โดยใช้สารลดแรงดึงผิวเข้มข้น 5%



	Load at maximum (N)	Tensile stress at maximum (MPa)	Tensile strain at maximum (%)	Tensile stress at break (MPa)	Tensile strain at break (%)	Extension at maximum (mm)
1	378.75	32.7	814	32.7	813.7	628.3
2	374.13	31.9	809	30.9	809.6	630.8
3	383.94	32.8	816	32.8	815.6	637.5
4	360.65	31.1	802	31.1	801.5	630.8
5	365.47	31.4	802	31.4	802.0	629.2
Mean	372.59	32.0	808	31.8	808.5	631.3
SD	9.52	0.75	6	0.90	6.51	3.61

	Tensile stress at 10% modulus (MPa)	Tensile stress at 20% modulus (MPa)	Tensile stress at 50% modulus (MPa)	Tensile stress at 100% modulus (MPa)	Tensile stress at 200% modulus (MPa)
1	0.22	0.344	0.60	0.85	1.24
2	0.21	0.331	0.59	0.84	1.23
3	0.22	0.348	0.60	0.86	1.24
4	0.20	0.329	0.59	0.84	1.23
5	0.20	0.328	0.58	0.84	1.23
Mean	0.21	0.336	0.59	0.85	1.24
SD	0.01	0.009	0.01	0.01	0.01

	Tensile stress at 300% modulus (MPa)	Tensile stress at 400% modulus (MPa)	Tensile stress at 500% modulus (MPa)
1	1.72	2.37368	3.89
2	1.71	2.36368	3.88
3	1.72	2.37300	3.89
4	1.70	2.34478	3.77
5	1.70	2.35042	3.83
Mean	1.71	2.36111	3.85
SD	0.01	0.01	0.05

ภาคผนวก ง

ข้อมูลการทดลอง

ตารางที่ ง.1 ข้อมูลผลการทดลอง

ตัวอย่าง	อุณหภูมิ (°ซ)	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น ของน้ำยาง (%)	ความเข้มข้น ของสารลด แรงตึงผิว (%)	ปริมาณไนโตรเจน (%)		
					ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
1	-	-	30	-	0.2907	0.3309	0.3108
2	125	30	30	-	0.3097	0.3037	0.3067
3	150	30	30	-	0.2377	0.2507	0.2441
4	175	30	30	-	0.2040	0.1933	0.1986
5	200	30	30	-	0.1283	0.1340	0.1311
6	125	45	30	-	0.2391	0.2521	0.2456
7	150	45	30	-	0.2195	0.2458	0.2321
8	175	45	30	-	0.2006	0.2241	0.2123
9	200	45	30	-	0.1258	0.1212	0.1873
10	125	60	30	-	0.2455	0.2419	0.2437
11	150	60	30	-	0.1809	0.1582	0.1695
12	175	60	30	-	0.1456	0.1539	0.1497
13	200	60	30	-	0.0794	0.0682	0.0739

ตารางที่ ง.2 ข้อมูลผลการทดลอง

ตัวอย่าง	อุณหภูมิ (°ซ)	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	ความเข้มข้น	ปริมาณไนโตรเจน		
			ของน้ำยาง (%)	ของสารลด แรงตึงผิว (%)	(%)		เฉลี่ย
					ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	
14	-	-	30	-	0.1658	0.1700	0.1679
15	-	30	30	1	0.1459	0.1514	0.1487
16	-	30	30	1	0.1445	0.1389	0.1417
17	-	30	30	1	0.1360	0.1414	0.1401
18	-	45	30	5	0.1421	0.1483	0.1452
19	-	45	30	5	0.1282	0.1373	0.1332
20	-	45	30	5	0.1291	0.1360	0.1325
21	-	60	30	10	0.1455	0.1292	0.1373
22	-	60	30	10	0.1281	0.1359	0.1320
23	-	60	30	10	0.1274	0.1343	0.1308

ตารางที่ ง.3 ข้อมูลผลการทดลอง

ตัวอย่าง	อุณหภูมิ (°ซ)	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	ความเข้มข้น	ปริมาณไนโตรเจน		
			ของน้ำยาง (%)	ของสารลด แรงตึงผิว (%)	(%)		เฉลี่ย
					ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	
24	-	-	30	-	0.3985	0.4671	0.4328
25	125	30	30	1	0.3569	0.3467	0.3519
26	150	30	30	1	0.3014	0.3230	0.3122
27	175	30	30	1	0.2486	0.2634	0.2512
28	200	30	30	1	0.1690	0.1559	0.1625
29	125	45	30	1	0.3794	0.3462	0.3628
30	150	45	30	1	0.2579	0.2296	0.2437
31	175	45	30	1	0.2101	0.1907	0.2004
32	200	45	30	1	0.1310	0.1367	0.1338
33	-	-	30	-	0.4208	0.5042	0.4625
34	125	60	30	1	0.3555	0.3739	0.3647
35	150	60	30	1	0.2683	0.2355	0.2519
36	175	60	30	1	0.1719	0.1892	0.1806
37	200	60	30	1	0.0843	0.1393	0.1118

ตารางที่ ง.4 ข้อมูลผลการทดลอง

ตัวอย่าง	อุณหภูมิ (°ซ)	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น ของน้ำยาง (%)	ความเข้มข้น ของสารลด แรงตึงผิว (%)	ปริมาณไนโตรเจน (%)		
					ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
38	-	-	30	-	0.4308	0.3896	0.4102
39	125	30	30	5	0.2627	0.2782	0.2704
40	150	30	30	5	0.2137	0.2449	0.2293
41	175	30	30	5	0.1542	0.2785	0.2164
42	200	30	30	5	0.0944	0.1147	0.1045
43	-	-	30	-	0.4013	0.4999	0.4506
44	125	45	30	5	0.1986	0.2074	0.2141
45	150	45	30	5	0.2219	0.2025	0.2122
46	175	45	30	5	0.1615	0.1440	0.1527
47	200	45	30	5	0.0851	0.0944	0.0898
48	-	-	30	-	0.4183	0.3619	0.3901
49	125	60	30	5	0.1744	0.2070	0.1907
50	150	60	30	5	0.1488	0.1908	0.1698
51	175	60	30	5	0.1322	0.078	0.1051
52	200	60	30	5	0.0616	0.0777	0.0464

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ง.5 ข้อมูลผลการทดลอง

ตัวอย่าง	อุณหภูมิ (°ซ)	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น ของน้ำยาง (%)	ความเข้มข้น ของสารลด แรงตึงผิว (%)	ปริมาณไนโตรเจน (%)		
					ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
53	-	-	30	-	0.3294	0.3886	0.3590
54	125	60	30	10	0.1636	0.1809	0.1723
55	150	60	30	10	0.1644	0.1506	0.1575
56	175	60	30	10	0.1018	0.1218	0.1118
57	200	60	30	10	0.0686	0.0609	0.0648

ตารางที่ ง.6 ข้อมูลผลการทดลอง

ตัวอย่าง	อุณหภูมิ (°ซ)	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	ความเข้มข้น	ปริมาณไนโตรเจน		
			ของน้ำยาง (%)	ของสารลดแรง ตึงผิว (%)	(%)		
					ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
38	-	-	10	-	0.4037	0.3589	0.3813
39	200	60	10	1	0.0741	0.1067	0.0904
40	200	60	10	5	0.0530	0.0846	0.0688
41	200	60	10	10	0.0742	0.0533	0.0637
43	-	-	20	-	0.4013	0.4999	0.4318
44	200	60	20	1	0.1114	0.0976	0.1045
45	200	60	20	5	0.0554	0.0857	0.0705
46	200	60	20	10	0.0604	0.0857	0.0730
47	-	-	30	-	0.3908	0.4166	0.4037
48	200	60	30	1	0.1055	0.0887	0.0971
49	200	60	30	5	0.0838	0.0604	0.0721
50	200	60	30	10	0.0612	0.0845	0.0728

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวพิชญญา ปุรณโชติ เกิดเมื่อวันที่ 25 สิงหาคม พ.ศ. 2532 สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนนวมินทราชินูทิศ สวนกุหลาบวิทยาลัย สมุทรปราการ ในปีพ.ศ. 2551 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีปิโตรเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2554 และศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2556

การนำเสนอผลงานวิจัย

Puranachote P., Kuchonthara P., Hinchiranan N. Preparation of Low Protein Natural Rubber by Hydrothermal Process. Poster presentation. International Conference on Thai Institute of Chemical Engineering and Applied Chemistry Conference. November 8-10, 2015. Dusit Thani Hotel Pattaya, Chonburi, Thailand