



การศึกษาศักยภาพของเอนไซม์ในเชิงเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ในการเพิ่ม
ความเสถียรเชิงกลและลดการใช้แอมโมเนียในน้ำอย่างชัน

โดย

นางสาวจิราภรณ์ วงศ์ชัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

การศึกษาศักยภาพของเอนไซม์ในเชิงเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ในการเพิ่ม
ความเสถียรเชิงกลและลดการใช้แอมโมเนียในน้ำยางข้น

โดย

นางสาวจิราภรณ์ วงศ์ชัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

THE TECHNICAL AND ECONOMIC POTENTIAL OF ENZYME IN
ACCELERATING MECHANICAL STABILITY AND REDUCING
THE USE OF AMMONIA IN CONCENTRATED
NATURAL RUBBER LATEX

BY

MISS JIRAPORN WONGKHAT

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF MASTER DEGREE OF ENGINEERING
(CHEMICAL ENGINEERING)
DEPARTMENT OF CHEMICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING
THAMMASAT UNIVERSITY
ACADEMIC YEAR 2019
COPYRIGHT OF THAMMASAT UNIVERSITY

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

วิทยานิพนธ์

ของ

นางสาวจิราภรณ์ วงศ์ขัตติย์

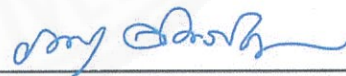
เรื่อง

การศึกษาศักยภาพของเอนไซม์ในเชิงเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ในการเพิ่ม
ความเสถียรเชิงกลและลดการใช้แอมโมเนียในน้ำยางข้น

ได้รับการตรวจสอบและอนุมัติ ให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

เมื่อ วันที่ 15 พฤษภาคม พ.ศ. 2563

ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รองศาสตราจารย์ ดร.ภาณุ ด่านวานิชกุล)

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์



(รองศาสตราจารย์ ดร.แคทลียา ปัทมพรหม)

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์



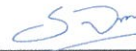
(รองศาสตราจารย์ ดร.จิตดา สิงขรัตน์)

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ดร.ลัทธิพร วายจตุ)

คณบดี



(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีร เจียศิริพงษ์กุล)

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาศักยภาพของเอนไซม์ในเชิงเทคนิคและ เศรษฐศาสตร์ในการเพิ่มความเสถียรเชิงกล และลดการใช้แอมโมเนียในน้ำยางข้น
ชื่อผู้เขียน	นางสาวจิราภรณ์ วงศ์ขัติย์
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา/คณะ/มหาวิทยาลัย	วิศวกรรมเคมี วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รองศาสตราจารย์ ดร.แคทลียา ปัทมพรหม
ปีการศึกษา	2562

บทคัดย่อ

ความเสถียรเชิงกล (Mechanical stability time; MST) เป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญที่แสดงถึงเสถียรภาพทางคอลลอยด์ของน้ำยางข้น โดยน้ำยางข้นที่ได้จากการปั่นเหวี่ยงใหม่ๆ จะมีค่า MST ที่ต่ำ และจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ตามระยะเวลาการบ่ม เนื่องจากฟอสโฟลิปิดที่อยู่บนผิวอนุภาคยางเกิดการไฮโดรไลซิสเกิดเป็นสบู่กรดไขมันเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาการใช้เอนไซม์ไลเปสในการเร่งการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของฟอสโฟลิปิดในน้ำยางข้น โดยในงานวิจัยนี้ได้ศึกษากิจกรรมของเอนไซม์ไลเปส (Lipase activity) แต่ละเกรด และเลือกเอนไซม์ไลเปสเกรดที่มี activity สูงที่สุด มาศึกษาการเร่งความเสถียรเชิงกลของน้ำยางข้น โดยศึกษาค่า MST และสมบัติพื้นฐานอื่น ๆ ของน้ำยางข้นที่มีปริมาณแอมโมเนียต่างกัน 2 ชนิด ได้แก่ น้ำยางข้นชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA latex) และชนิดแอมโมเนียสูง (HA latex) จำนวน 3 ชุดตัวอย่าง ที่บ่มเร่งความเสถียรด้วยเอนไซม์ไลเปส ปริมาณ 0.004% และ 0.04% โดยปริมาตรของน้ำยางข้น เปรียบเทียบกับน้ำยางข้นเกรดการค้า (commercial LATZ latex และ commercial HA latex) จากการศึกษาพบว่า การเติมเอนไซม์ไลเปสลงในน้ำยางข้นทั้งชนิด LA latex และ HA latex สามารถเร่งความเสถียรเชิงกลของน้ำยางข้นได้ โดยไม่ส่งผลต่อสมบัติอื่น ๆ ของน้ำยางข้น โดยการเติมเอนไซม์ไลเปสปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้ค่า MST เพิ่มขึ้น โดยการเติมเอนไซม์ไลเปสในปริมาณ 0.04% โดยปริมาตรของน้ำยางข้น ลงในน้ำยางข้นชนิด LA latex และ HA latex ทำให้ค่า MST ของน้ำยางข้นเพิ่มขึ้นถึงค่ามาตรฐานที่กำหนด (650 วินาที) เร็วกว่าน้ำยางข้นเกรดการค้าประมาณ 4-8 เท่า และ 2-9 เท่า ตามลำดับ โดย

น้ำยางชั้นชนิด HA latex จะมีค่า MST เพิ่มขึ้นเร็วกว่าน้ำยางชั้นชนิด LA latex ประมาณ 1-2 เท่า นอกจากนี้ยังพบว่า ค่า MST ไม่มีความสัมพันธ์กับผลการทดสอบค่า zeta potential ที่ได้จากเทคนิค light scattering และเมื่อศึกษาผลของการบ่มเร่งความเร็วด้วยเอนไซม์ไลเปสต่อการขึ้นรูปเป็นลูกโป่งและยางฟองน้ำ พบว่า สมบัติเบื้องต้นของฟิล์มยางลูกโป่งและความหนาแน่นของยางฟองน้ำที่ได้จากน้ำยางชั้นที่บ่มเร่งความเร็วด้วยเอนไซม์ไลเปสมีค่าใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ยางที่ได้จากน้ำยางชั้นเกรดการค้า แต่ยางฟองน้ำที่ได้มีความยืดหยุ่นที่ดีกว่า โดยมี %การยุบตัวเนื่องจากแรงกดน้อยกว่ายางฟองน้ำที่ขึ้นรูปจากน้ำยางชั้นเกรดการค้า โดย %การยุบตัวมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณเอนไซม์ไลเปสในน้ำยางที่เพิ่มมากขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ระหว่างน้ำยางชั้นที่บ่มเร่งความเร็วด้วยเอนไซม์ไลเปสกับน้ำยางชั้นเกรดการค้าพบว่า การบ่มเร่งความเร็วของน้ำยางชั้นด้วยเอนไซม์ไลเปสจะมีต้นทุนการผลิตที่เพิ่มขึ้นประมาณ 3.8% แต่อย่างไรก็ตามการบ่มเร่งความเร็วด้วยเอนไซม์ไลเปสจะช่วยลดระยะเวลาการบ่มน้ำยาง ทำให้สามารถเพิ่มกำลังการผลิตได้ถึง 8 เท่า ดังนั้น เอนไซม์ไลเปสจึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในกรณีที่ต้องการเพิ่มกำลังการผลิตโดยไม่ต้องขยายขนาดโรงงาน โดยจะสามารถเพิ่มกำไรสุทธิในช่วงเวลาเท่ากันได้มากกว่าน้ำยางชั้นเกรดการค้าประมาณ 7.5 เท่า

คำสำคัญ : น้ำยางชั้น, ไลเปส, เอนไซม์, ความเสถียรเชิงกล, ผลิตภัณฑ์ยาง

Thesis Title	THE TECHNICAL AND ECONOMIC POTENTIAL OF ENZYME IN ACCELERATING MECHANICAL STABILITY AND REDUCING THE USE OF AMMONIA IN CONCENTRATED NATURAL RUBBER LATEX
Author	Miss Jiraporn Wongkhat
Degree	Master of Engineering
Major Field/Faculty/University	Chemical Engineering Faculty of Engineering Thammasat University
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Cattaleeya Pattamaprom, Ph.D.
Academic Years	2019

ABSTRACT

Mechanical stability time (MST) is an important parameter that indicates the colloidal stability of concentrated natural rubber latex (CNRL). The MST of fresh CNRL after centrifugation is always low and slowly increases with maturation time due to the increasing hydrolysis of phospholipid on the surface of rubber particles into fatty acids. So, the use of lipase to accelerate the hydrolysis of phospholipid in CNRL is therefore of interest. In this study, the activity of each grade of lipase was studied and lipase with the highest enzymatic activity was selected to accelerate the MST of CNRL. The MST and other properties of 3 lots of 2 grades of CNRL including low-ammonia latex (LA latex) and high-ammonia latex (HA latex) were investigated by using lipase at 0.004 and 0.04% v/v compare with those of the commercial LATZ latex and commercial HA latex. It was found that lipase treatment was an effective method in accelerating the MST of both LA latex and HA latex without affecting other properties of CNRL. The

results showed that, the MST of LA latex and HA latex treated with 0.04% lipase were higher than those of commercial latexes by 4-8 and 2-9 times, respectively, when the increase in the MST of HA latex were always higher than those of LA latex by about 1-2 times. Nevertheless, it was found that MSTs of CNRL could not be related to the zeta potential tested by light scattering technique. For the effect of CNRL treated with lipase on dip-coated and latex foam products, it was observed that the properties of dip-coated films and the density of latex foam obtained from CNRL treated with lipase were comparable to those produced from commercial latex. Better yet, the indentation strength of latex foam obtained from CNRL treated with lipase were higher than those obtained from commercial latex and tended to increases with increasing amount of lipase in CNRL. For economic assessment of lipase-treated CNRL compared with commercial latex, it was found that the unit cost of lipase-treated CNRL was higher than commercial latex by about 3.8%. However, the use of lipase in latex production could reduce the maturation time leading to increasing production capacity by up to 8 times. Therefore, the use of lipase should be considered in latex production when the production capacity needs to be increased without expanding the factory size. In which case, the use of lipase could increase the net profit in the same production time by about 7.5 times.

Keywords: concentrated natural rubber latex, lipase, enzyme, mechanical stability, latex products

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลงไปด้วยดี โดยได้รับความช่วยเหลือจากรองศาสตราจารย์ ดร.แคลิยา ปัทมพรหม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้อบรมให้ความรู้ คอยดูแลให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางที่เป็นประโยชน์ในการทำงานวิจัยเป็นอย่างดีตลอดมา ขอขอบพระคุณอาจารย์ มา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ภาณุ ด่านวานิชกุล รองศาสตราจารย์ ดร.จิรดา สิงขรัตน์ และดร.ลัทธิพร วายจตุ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้ช่วยตรวจสอบและให้คำชี้แนะต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์จนวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณบริษัท โนวโซม จำกัด ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์เอนไซม์ไลเปสเพื่อใช้ในการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ (NANOTEC) ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่อง Zetasizer เพื่อใช้ในการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณคุณไกรสิงห์ วุ่นคง กรรมการผู้จัดการบริษัท จีเอส พี โปรดักส์ จำกัด ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์แม่พิมพ์จุ่มลูกโป่งเพื่อใช้ในการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่การยางแห่งประเทศไทย ที่ได้ให้ความรู้และให้คำปรึกษาต่าง ๆ ในการทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัว ที่คอยให้คำปรึกษา สนับสนุนสิ่งต่าง ๆ ทางด้านการเรียนและให้กำลังใจในการเรียน การทำงานวิจัยตลอดมาจนกระทั่งประสบความสำเร็จ

ขอขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ทุกคนในห้องปฏิบัติการ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือให้คำปรึกษา และให้คำแนะนำต่าง ๆ ตลอดจนเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมาจนงานวิจัยสำเร็จลงไปด้วยดี

และขอขอบคุณกองทุนวิจัยมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่ได้สนับสนุนทุนวิจัย (ประเภททุนวิจัยทั่วไปสำหรับผู้ปฏิบัติงานในมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ตามสัญญาเลขที่ TUGR 2/28/2562) เพื่อใช้ในการทำงานวิจัยนี้

นางสาวจิราภรณ์ วงศ์ขัติย์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	(1)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	(3)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญตาราง	(11)
สารบัญภาพประกอบ	(13)
รายการสัญลักษณ์และคำย่อ	(16)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber Latex, NR)	5
2.1.1 โครงสร้างของยางธรรมชาติ	5
2.1.2 องค์ประกอบของน้ำยางธรรมชาติ	6
2.1.2.1 ส่วนที่เป็นเนื้อยาง (Rubber components)	7
2.1.2.2 ส่วนที่ไม่ใช่เนื้อยาง (Non-rubber components)	8

2.2 น้ำยางข้น (Concentrated Natural Rubber Latex, CNRL)	11
2.2.1 การผลิตน้ำยางข้น	11
2.2.2 คุณสมบัติของน้ำยางข้น	14
2.2.3 ความเสถียรของน้ำยางข้น	16
2.3 การรักษาสภาพน้ำยาง (Preservation of NR latex)	18
2.3.1 การรักษาสภาพน้ำยางสด	19
2.3.1.1 การใช้แอมโมเนียในการรักษาสภาพน้ำยางสด	19
2.3.1.2 การใช้แอมโมเนียร่วมกับสารเคมีชนิดอื่นในการรักษาสภาพน้ำยางสด	20
2.3.2 การรักษาสภาพน้ำยางข้น	20
2.4 เอนไซม์	23
2.4.1 การทำงานของเอนไซม์	24
2.4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของเอนไซม์	24
2.4.3 เอนไซม์ไลเปส	25
2.5 กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์จากน้ำยางข้น	26
2.5.1 กระบวนการจุ่มขึ้นรูป (Dipping Process)	26
2.5.1.1 วิธีการจุ่มขึ้นรูป	27
2.5.1.2 ขั้นตอนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์โดยการจุ่มน้ำยาง	28
2.5.2 กระบวนการผลิตยางฟองน้ำ (Foaming Process)	30
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	33
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	37
3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำงานวิจัย	37
3.1.1 สารเคมี	37
3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์	39
3.2 แผนการทดลอง (Experimental scheme)	43
3.3 วิธีการทดลอง	44
3.3.1 การวัดกิจกรรมของเอนไซม์ไลเปส (Lipase activity)	44
3.3.2 การเร่งความเสถียรเชิงกลของน้ำยางข้นด้วยเอนไซม์ไลเปส	44
3.3.3 การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์จากยางโดยวิธีการจุ่มขึ้นรูป	45
3.3.4 การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์จากยางโดยวิธีการตีฟอม	47

3.4 การวิเคราะห์สมบัติของน้ำยางชั้น	49
3.4.1 การทดสอบปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total solid content: TSC)	49
3.4.2 การทดสอบปริมาณเนื้อยางแห้ง (Dry rubber content: DRC)	50
3.4.3 การทดสอบปริมาณความเป็นด่างในรูปของแอมโมเนีย (Alkalinity as ammonia; %NH ₃)	51
3.4.4 การทดสอบค่าความเสถียรเชิงกล (Mechanical stability time: MST)	52
3.4.5 การทดสอบปริมาณกรดไขมันที่ระเหยได้ (Volatile fatty acid number: VFA number)	53
3.4.6 การทดสอบค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	54
3.4.7 การวัดค่าศักย์ซีต้า (Zeta potential)	54
3.4.8 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared (FTIR)	54
3.4.9 การวิเคราะห์ปริมาณลิปิดในน้ำยาง	55
3.5 การวิเคราะห์สมบัติของผลิตภัณฑ์ยาง	56
3.5.1 การวัดความทนต่อแรงดึง (Tensile Strength) ของฟิล์มยาง	56
3.5.2 การวัดความหนาแน่นของยางฟองน้ำ (Density)	56
3.5.3 การวัดการยุบตัวเนื่องจากแรงกดของยางฟองน้ำ (Compression set)	56
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	58
4.1 การคัดเลือกเกรดเอนไซม์ไลเปสเพื่อใช้บ่มเร่งความเสถียรของน้ำยางชั้น	58
4.1.1 ผลของ pH ต่อกิจกรรมของเอนไซม์ (Enzyme activity)	58
4.1.2 ผลของเกรดเอนไซม์ไลเปสต่อค่าความเสถียรเชิงกล (Mechanical Stability Time; MST) และสมบัติพื้นฐานอื่นๆ ของน้ำยางชั้น	60
4.2 ผลของปริมาณแอมโมเนียในน้ำยางชั้นต่อค่า MST และสมบัติพื้นฐานอื่นๆ ของน้ำยางชั้น	62
4.2.1 ผลการวัดค่า MST ของน้ำยางชั้นชุดที่ 1	63
4.2.2 ผลการวัดค่า MST ของน้ำยางชั้นชุดที่ 2	65
4.2.3 ผลการวัดค่า MST ของน้ำยางชั้นชุดที่ 3	67
4.2.4 ผลการวัดสมบัติพื้นฐานอื่น ๆ ของน้ำยางชั้น	70

4.3 ผลของการใช้เอนไซม์ไลเปสต่อการบ่มเร่งความเสถียรในน้ำอย่างชันขูดต่าง ๆ	74
4.3.1 ผลการบ่มเร่งความเสถียรเชิงกลในน้ำอย่างชันชนิด LA latex	74
4.3.2 ผลการบ่มเร่งความเสถียรเชิงกลในน้ำอย่างชันชนิด HA latex	76
4.4 ความสัมพันธ์ของผลการทดสอบความเสถียรด้วยเทคนิคการกระเจิงแสง (light scattering technique) กับค่า MST ของน้ำยางชัน	80
4.4.1 ผลการทดสอบความเสถียรของน้ำยางชันชนิด LA latex	80
4.4.2 ผลการทดสอบความเสถียรของน้ำยางชันชนิด HA latex	83
4.5 ผลของการบ่มเร่งความเสถียรด้วยเอนไซม์ไลเปสต่อการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ	86
4.5.1 ผลของการบ่มเร่งความเสถียรด้วยเอนไซม์ไลเปสต่อการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ยางแบบจุ่ม	86
4.5.2 ผลของการบ่มเร่งความเสถียรด้วยเอนไซม์ไลเปสต่อการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ยางฟองน้ำ	90
4.5.2.1 ลักษณะรูพรุนและขนาดรูพรุนของยางฟองน้ำ	90
4.5.2.2 ความหนาแน่นของยางฟองน้ำ	94
4.5.2.3 การยุบตัวเนื่องจากแรงกด	96
4.6 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ระหว่างน้ำยางชันเกรดการค้าและน้ำยางชันที่บ่มเร่งความเสถียรด้วยเอนไซม์ไลเปส	98
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	99
5.1 สรุปผลการวิจัย	99
5.2 ข้อเสนอแนะ	101
รายการอ้างอิง	102

	(10)
ภาคผนวก	106
ภาคผนวก ก การคำนวณกิจกรรมของเอนไซม์ไลเปส (Lipase activity)	107
ภาคผนวก ข การคำนวณในขั้นตอนวิเคราะห์	108
ภาคผนวก ค ผลการทดสอบหมู่ฟังก์ชันของยางธรรมชาติชุดตัวอย่างที่ 2 และชุดตัวอย่างที่ 3	111
ภาคผนวก ง ค่า MST ของน้ำยางชั้นที่นำมาใช้ในการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ยาง	114
ภาคผนวก จ ผลการวัดขนาดรูพรุนและการคำนวณขนาดรูพรุนของยางฟองน้ำ	116
ประวัติผู้เขียน	148



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบของน้ำยางสด	6
2.2 ส่วนประกอบของส่วนที่เป็นเนื้อยาง	8
2.3 มาตรฐานของน้ำยางข้น	15
2.4 ชนิดของน้ำยางข้นและสารเคมีรักษาสภาพ	22
2.5 ตัวอย่างสูตรเคมี สำหรับอุตสาหกรรมจุ่ม	28
2.6 ข้อดีและข้อเสียของเทคโนโลยีการผลิตยางพองน้ำแบบดันลอป	31
2.7 ข้อดีและข้อเสียของเทคโนโลยีการผลิตยางพองน้ำแบบทาลาเลย์	32
3.1 สูตรการเตรียมน้ำยาง Prevulcanized สำหรับการผลิตลูกโป่งแบบจุ่มขึ้นรูป	46
3.2 สูตรสารเคมีในการเตรียมสารช่วยให้ยางจับแม่พิมพ์	46
3.3 สูตรการผสมสารเคมียางในการผลิตยางพองน้ำ	48
4.1 คุณลักษณะเฉพาะของเอนไซม์ไลเปสแต่ละเกรด	59
4.2 สมบัติพื้นฐานของน้ำยางข้น Blank และน้ำยางข้นที่เติมเอนไซม์ไลเปสแต่ละเกรด ที่ระยะเวลาบ่ม 0 และ 40 วัน	62
4.3 สมบัติพื้นฐานต่าง ๆ ของตัวอย่างน้ำยางข้นชุดที่ 1	70
4.4 สมบัติพื้นฐานต่าง ๆ ของตัวอย่างน้ำยางข้นชุดที่ 2	71
4.5 สมบัติพื้นฐานต่าง ๆ ของตัวอย่างน้ำยางข้นชุดที่ 3	71
4.6 ปริมาณลิปิดในน้ำยางข้น อัตราส่วนการดูดกลืน (Absorbance ratio: AR) และค่า Zeta potential เริ่มต้นของน้ำยางชุดที่ 2 และชุดที่ 3	79
4.7 เปรียบเทียบความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ระหว่างน้ำยางข้นเกรดการค้าและน้ำยางข้นที่บ่มเร่งความเสถียรด้วยเอนไซม์ไลเปส	98
ค.1 แถบดูดกลืนของหมู่ฟังก์ชันของยางธรรมชาติที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ	111
ค.2 อัตราส่วนการดูดกลืน (Absorbance ratio: AR) ของน้ำยางข้นชุดที่ 2 และชุดที่ 3	113
ง.1 ค่า MST ของน้ำยางข้นที่ใช้ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางแบบจุ่มที่ระยะเวลาบ่ม 60 วัน	114
ง.2 ค่า MST ของน้ำยางข้นชนิด LA latex 2 ชุดตัวอย่าง ที่ใช้ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางพองน้ำ	114

ง.3	ค่า MST ของน้ำยางชั้นชนิด HA latex 2 ชุดตัวอย่าง ที่ใช้ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางพองน้ำ	115
จ.1	ขนาดรูพรุนของยางพองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางชั้น Blank LA ชุดที่ 2	116
จ.2	ขนาดรูพรุนของยางพองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางชั้น Commercial LATZ latex ชุดที่ 2	118
จ.3	ขนาดรูพรุนของยางพองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางชั้น LA latex ชุดที่ 2 ที่เติมเอนไซม์ไลเปส 0.004%v/v	120
จ.4	ขนาดรูพรุนของยางพองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางชั้น LA latex ชุดที่ 2 ที่เติมเอนไซม์ไลเปส 0.04%v/v	121
จ.5	ขนาดรูพรุนของยางพองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางชั้น Blank HA ชุดที่ 2	123
จ.6	ขนาดรูพรุนของยางพองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางชั้น Commercial HA latex ชุดที่ 2	125
จ.7	ขนาดรูพรุนของยางพองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางชั้น HA latex ชุดที่ 2 ที่เติมเอนไซม์ไลเปส 0.004%v/v	127
จ.8	ขนาดรูพรุนของยางพองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางชั้น HA latex ชุดที่ 2 ที่เติมเอนไซม์ไลเปส 0.04%v/v	129
จ.9	ขนาดรูพรุนของยางพองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางชั้น Blank LA ชุดที่ 3	131
จ.10	ขนาดรูพรุนของยางพองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางชั้น Commercial LATZ latex ชุดที่ 3	133
จ.11	ขนาดรูพรุนของยางพองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางชั้น LA latex ชุดที่ 3 ที่เติมเอนไซม์ไลเปส 0.004%v/v	135
จ.12	ขนาดรูพรุนของยางพองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางชั้น LA latex ชุดที่ 3 ที่เติมเอนไซม์ไลเปส 0.04%v/v	137
จ.13	ขนาดรูพรุนของยางพองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางชั้น Blank HA ชุดที่ 3	139
จ.14	ขนาดรูพรุนของยางพองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางชั้น Commercial HA latex ชุดที่ 3	141
จ.15	ขนาดรูพรุนของยางพองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางชั้น HA latex ชุดที่ 3 ที่เติมเอนไซม์ไลเปส 0.004%v/v	143
จ.16	ขนาดรูพรุนของยางพองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางชั้น HA latex ชุดที่ 3 ที่เติมเอนไซม์ไลเปส 0.04%v/v	145

สารบัญภาพประกอบ

ภาพที่	หน้า
2.1	น้ำยางพารา (Natural rubber latex) 5
2.2	โครงสร้างเคมีซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน 5
2.3	แบบจำลองภาพตัดขวางอนุภาคยางธรรมชาติ 7
2.4	โครงสร้างของเลซิติน (ฟอสฟาติดีลโคลีน) 9
2.5	คิวบราซิทอล (Quebrachitol) หรือ 2-อโทเมทิลแอลอีโนซิทอล (2-o-mrthyl-L-inositol) 10
2.6	เครื่องปั่นเหวี่ยง 12
2.7	หน้าตัดตามยาวของถังปั่นน้ำยางข้น 13
2.8	ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของฟอสโฟลิปิดในสภาวะที่เป็นเบส 16
2.9	ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของฟอสโฟลิปิด 17
2.10	ตัวอย่างทฤษฎีแม่กุญแจและลูกกุญแจ 23
2.11	กระบวนการไฮโดรไลซิสและสังเคราะห์ของไลเปส 25
2.12	ขั้นตอนการผลิตยางฟองน้ำแบบดันลอย 31
2.13	ขั้นตอนการผลิตยางฟองน้ำแบบทาลาเลย์ 32
3.1	แม่พิมพ์จุ่มลูกโป่ง 40
3.2	แม่พิมพ์ยางฟองน้ำ 40
3.3	เครื่องตีโฟมยาง 40
3.4	เครื่องวัดความเสถียรเชิงกลของน้ำยางข้น 40
3.5	ชุดกลั่น Markham still 41
3.6	เครื่องทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง 41
3.7	เครื่องทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงกด 42
3.8	เครื่อง Zetasizer 42
3.9	แผนผังการทดลองและวิเคราะห์ 43
4.1	กิจกรรมของเอนไซม์ไลเปส (Lipase activity) ที่ (ก) pH 7 และ (ข) pH 10 59
4.2	ค่า MST ของน้ำยางข้นชนิด LA latex ที่บ่มเร่งความเสถียรด้วยเอนไซม์ไลเปสเกรดต่าง ๆ 60

4.3	ค่า MST ของน้ำยางชั้นชนิด HA latex ที่บ่มเร่งความเสถียรด้วยเอนไซม์ ไลเปสเกรดต่าง ๆ	61
4.4	ค่า MST ของตัวอย่างน้ำยางชั้นชนิด LA latex ชุดตัวอย่างที่ 1 ตามระยะเวลาบ่ม 1 เดือน	63
4.5	ค่า MST ของตัวอย่างน้ำยางชั้นชนิด HA latex ชุดตัวอย่างที่ 1 ตามระยะเวลาบ่ม 1 เดือน	64
4.6	ค่า MST ของน้ำยางชั้นชนิด LA latex และ HA latex ชุดที่ 1 ที่ระยะเวลาบ่ม 31 วัน	65
4.7	ค่า MST ของตัวอย่างน้ำยางชั้นชนิดแอมโมเนียต่ำชุดตัวอย่างที่ 2 ตามระยะเวลาบ่ม 1 เดือน	66
4.8	ค่า MST ของตัวอย่างน้ำยางชั้นชนิดแอมโมเนียสูงชุดตัวอย่างที่ 2 ตามระยะเวลาบ่ม 1 เดือน	66
4.9	ค่า MST ของน้ำยางชั้นชนิด LA latex และ HA latex ชุดที่ 2 ที่ระยะเวลาบ่ม 31 วัน	67
4.10	ค่า MST ของตัวอย่างน้ำยางชั้นชนิดแอมโมเนียต่ำชุดตัวอย่างที่ 3 ตามระยะเวลาบ่ม 1 เดือน	68
4.11	ค่า MST ของตัวอย่างน้ำยางชั้นชนิดแอมโมเนียสูงชุดตัวอย่างที่ 3 ตามระยะเวลาบ่ม 1 เดือน	68
4.12	ค่า MST ของน้ำยางชั้นชนิด LA latex และ HA latex ชุดที่ 3 ที่ระยะเวลาบ่ม 31 วัน	69
4.13	ค่า VFA number ของน้ำยางชั้นชุดที่ 1 (ก) LA latex และ (ข) HA latex	72
4.14	ค่า VFA number ของน้ำยางชั้นชุดที่ 2 (ก) LA latex และ (ข) HA latex	73
4.15	ค่า VFA number ของน้ำยางชั้นชุดที่ 3 (ก) LA latex และ (ข) HA latex	74
4.16	เปรียบเทียบค่า MST น้ำยางชั้นชนิด LA latex ของน้ำยางชั้น 3 ชุดตัวอย่าง	75
4.17	เปรียบเทียบค่า MST น้ำยางชั้นชนิด HA latex ของน้ำยางชั้น 3 ชุดตัวอย่าง	76
4.17	(ต่อ) เปรียบเทียบค่า MST น้ำยางชั้นชนิด HA latex ของน้ำยางชั้น 3 ชุดตัวอย่าง	77
4.18	FTIR spectrum ของน้ำยางชั้นชนิด LA latex ชุดตัวอย่างที่ 2 และ 3	78
4.19	FTIR spectrum ของน้ำยางชั้นชนิด HA latex ชุดตัวอย่างที่ 2 และ 3	79

4.20	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาค ค่า zeta potential และค่า conductivity กับค่า MST ของน้ำยางข้นชนิด LA latex ชุดที่ 2	81
4.21	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาค ค่า zeta potential และค่า conductivity กับค่า MST ของน้ำยางข้นชนิด LA latex ชุดที่ 3	82
4.22	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาค ค่า zeta potential และค่า conductivity กับค่า MST ของน้ำยางข้นชนิด HA latex ชุดที่ 2	84
4.23	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาค ค่า zeta potential และค่า conductivity กับค่า MST ของน้ำยางข้นชนิด HA latex ชุดที่ 3	85
4.24	สมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มยางที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางข้นชนิด LA latex	87
4.25	อัตราการบวมตัว (Swelling ratio) ของฟิล์มยางที่จุ่มขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางข้นชนิด LA latex	88
4.26	สมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มยางที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางข้นชนิด HA latex	89
4.27	อัตราการบวมตัว (Swelling ratio) ของฟิล์มยางที่จุ่มขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางข้นชนิด HA latex	90
4.28	ลักษณะรูพรุนของยางพองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางข้น LA latex	91
4.29	ขนาดรูพรุนของยางพองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางข้น LA latex	92
4.30	ลักษณะรูพรุนของยางพองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางข้น HA latex	93
4.31	ขนาดรูพรุนของยางพองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางข้น HA latex	94
4.32	ความหนาแน่นของยางพองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางข้นชนิด LA latex	95
4.33	ความหนาแน่นของยางพองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางข้นชนิด HA latex	96
4.34	%การยุบตัวเนื่องจากแรงกดของยางพองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางข้นชนิด LA latex	97
4.35	%การยุบตัวเนื่องจากแรงกดของยางพองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางข้นชนิด HA latex	97
ค.1	ผลการทดสอบ FTIR ของน้ำยางข้นชนิด LA latex ชุดตัวอย่างที่ 2	111
ค.2	ผลการทดสอบ FTIR ของน้ำยางข้นชนิด LA latex ชุดตัวอย่างที่ 3	112
ค.3	ผลการทดสอบ FTIR ของน้ำยางข้นชนิด HA latex ชุดตัวอย่างที่ 2	112
ค.4	ผลการทดสอบ FTIR ของน้ำยางข้นชนิด HA latex ชุดตัวอย่างที่ 3	113

รายการสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์/คำย่อ	คำเต็ม/คำจำกัดความ
CNRL	Concentrated natural rubber latex / น้ำยางข้น
LA latex	Low-ammonia latex / น้ำยางข้นชนิด แอมโมเนียต่ำ
HA latex	High-ammonia latex / น้ำยางข้นชนิด แอมโมเนียสูง
TSC	Total solid content / ปริมาณของแข็ง ทั้งหมด
DRC	Dry rubber content / ปริมาณเนื้อยางแห้ง
%NH ₃	Alkalinity as ammonia / ปริมาณความเป็น ด่างในรูปของแอมโมเนีย
MST	Mechanical stability time / ความเสถียร เชิงกล
VFA number	Volatile fatty acid number / ปริมาณกรด ไขมันระเหยได้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

น้ำยางธรรมชาติหรือน้ำยางสดที่กรีดได้จากต้นยางพารา มีลักษณะเป็นของเหลวสีขาว และมีสมบัติเป็นคอลลอยด์ (Colloid) ที่มีอนุภาคยางแขวนลอยอยู่ในเซรัม น้ำยางสดที่ได้จากต้นยางพารามีปริมาณเนื้อยางน้อยและมีความเสถียรต่ำ จึงจำเป็นต้องเติมสารเคมีลงไปเพื่อรักษาความเสถียรก่อนนำไปผ่านกระบวนการปั่นเหวี่ยงเพื่อให้ได้น้ำยางที่มีปริมาณเนื้อยางเพิ่มมากขึ้นหรือที่เรียกว่า “น้ำยางข้น” ซึ่งมีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ อย่างไรก็ตาม น้ำยางข้นที่ได้จากการปั่นเหวี่ยงมีความเข้มข้นของอนุภาคยางที่แขวนลอยในน้ำเซรัมสูงขึ้น ทำให้อนุภาคยางมีโอกาสชนกันและจับตัวเป็นก้อนได้ง่าย ส่งผลให้น้ำยางข้นมีค่าความเสถียรเชิงกล (Mechanical Stability Time, MST) ต่ำกว่าค่ามาตรฐานในการใช้งาน ดังนั้นก่อนนำน้ำยางข้นออกจำหน่าย ผู้ประกอบการจำเป็นต้องบ่มน้ำยางเพื่อให้มีค่า MST ตามค่ามาตรฐานที่กำหนด โดยการบ่มน้ำยางข้นจะทำให้ค่า MST เพิ่มขึ้น เนื่องจากฟอสโฟลิปิดและไขมันที่ห่อหุ้มล้อมอนุภาคยางเกิดการแตกตัวเป็นกรดไขมัน ซึ่งกรดไขมันนี้จะรวมตัวกับแอมโมเนียที่เติมลงในน้ำยางเกิดเป็นสบู่กรดไขมันและถูกดูดซับอยู่บริเวณผิวของอนุภาคยางจึงทำให้น้ำยางมีความเสถียรเพิ่มมากขึ้น (Blackley, D. C., 1997) แต่เนื่องจากการบ่มน้ำยางในสภาวะปกติจะใช้เวลานานมาก ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงนิยมเติมสารลดแรงตึงผิว (surfactant) เพื่อเร่งความเสถียรเชิงกลของน้ำยางข้น ซึ่งสาร surfactant ที่นิยมใช้ในปัจจุบัน คือ กรดลอริก (Lauric acid) โดยกรดลอริกจะทำปฏิกิริยากับแอมโมเนียในน้ำยางเกิดเป็นสบู่แอมโมเนียมลอเรต ซึ่งจะสามารถเร่งความเสถียรเชิงกลของน้ำยางข้นได้ โดยปริมาณสูงสุดในการเติมกรดลอริกที่จะไม่ทำให้เกิดปัญหาในการนำน้ำยางข้นไปใช้งานในภายหลัง จะอยู่ในช่วง 0.03 - 0.04% โดยน้ำหนัก ซึ่งจะใช้เวลาในการบ่มน้ำยางประมาณ 28-45 วัน อย่างไรก็ตาม แม้ว่าวิธีการเติมกรดลอริกจะเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการเร่งค่า MST ของน้ำยางข้น แต่การเติมกรดลอริกเพื่อเร่งค่า MST เป็นการเติมประจุลงไปในน้ำยางโดยตรง ซึ่งหากเติมกรดลอริกในปริมาณที่สูงจะส่งผลให้น้ำยางข้นมีความเสถียรเชิงกลที่มากเกินไปเมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้น เนื่องจากอนุภาคยางเองจะมีความเสถียรเชิงกลเพิ่มขึ้นโดยธรรมชาติตามระยะเวลาที่จัดเก็บน้ำยาง ซึ่งจะก่อให้เกิดปัญหาในการจับตัวยากและเกิดฟองอากาศได้ง่ายเมื่อนำน้ำยางไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ยางโดยเฉพาะการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางโดยวิธีจุ่มพิมพ์ และทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพต่ำลง

จากปัญหาในการใช้กรดลอริกดังกล่าว จึงได้มีการศึกษาเพื่อหาแนวทางต่าง ๆ ในการเพิ่มค่า MST ของน้ำยางชั้นอย่างยั่งยืน ซึ่งจากงานวิจัยของเดชณรงค์ พิมาลัย และยศธร วงศ์งาม (เดชณรงค์ พิมาลัย และยศธร วงศ์งาม, 2014) พบว่าการใช้เอนไซม์ไลเปสสามารถเร่งความเสถียรเชิงกลของน้ำยางชั้นชนิดแอมโมเนียสูง (High ammonia latex; HA Latex) ได้รวดเร็วที่สุด เนื่องจากเอนไซม์ไลเปสจะช่วยเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของพอสโพลิปิดที่อยู่ระหว่างชั้นโปรตีนและชั้นของอนุภาคยางได้ประจุลบของคาร์บอกซีเลตสายโซ่ยาว ซึ่งจะถูกดูดซับที่บริเวณผิวของอนุภาคยาง ทำให้น้ำยางมีความเสถียรเพิ่มมากขึ้น โดยการเติมเอนไซม์ไลเปสปริมาณ 0.004% สามารถเพิ่มค่า MST ของน้ำยางชั้นจนถึง 650 วินาที ซึ่งเป็นค่าที่สูงพอที่จะนำน้ำยางชั้นออกไปจำหน่ายได้ภายในระยะเวลาเพียงแค่ 2 วัน ในขณะที่การเติมกรด ลอริกที่ความเข้มข้น 0.04% ต้องใช้เวลาถึง 24 วัน นอกจากนี้เมื่อเก็บน้ำยางชั้นไว้เป็นระยะเวลานาน ค่า MST ของน้ำยางชั้นที่เติมเอนไซม์ไลเปสจะมีค่าคงที่ที่ 1,100 วินาที จึงช่วยลดปัญหาค่า MST ที่สูงเกินไปของน้ำยางชั้นที่ถูกเก็บไว้เป็นเวลานาน และยังช่วยลดปัญหาในการจับตัวของน้ำยางในช่วงการนำไปขึ้นรูปได้อีกด้วย ซึ่งจากผลการวิจัยดังกล่าว จึงทำให้มีความน่าสนใจในการใช้เอนไซม์ไลเปสในการเพิ่มค่า MST ของน้ำยางชั้น เพื่อช่วยลดระยะเวลาและลดการใช้พลังงานในการผลิตน้ำยางชั้น โดยศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการใช้เอนไซม์ไลเปสเพื่อลดการใช้แอมโมเนียอย่างน้อยบางส่วนในการรักษาความเสถียรของน้ำยางชั้น เนื่องจากเอนไซม์ไลเปสสามารถช่วยเร่งค่า MST ของน้ำยางชั้นชนิดแอมโมเนียสูงได้ ดังนั้นหากเติมเอนไซม์ไลเปสลงในน้ำยางชั้นที่มีปริมาณแอมโมเนียต่ำ อาจจะสามารถเร่งความเสถียรเชิงกลของน้ำยางชั้นได้เช่นกัน ซึ่งการใช้เอนไซม์ไลเปสในการเร่งความเสถียรเชิงกลของน้ำยางชั้นในสถานะที่มีแอมโมเนียต่ำนี้ จะสามารถนำมาใช้พิจารณาเพื่อลดปริมาณแอมโมเนียที่ต้องเติมลงในน้ำยางชั้นได้ ซึ่งหากสามารถลดปริมาณการใช้แอมโมเนียได้ จะสามารถลดปัญหาผลกระทบด้านกลิ่นและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและชุมชนและยังลดค่าใช้จ่ายในส่วน of ค่าสารเคมีได้อีกด้วย

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงได้ทำการศึกษาการใช้เอนไซม์ไลเปสในการเพิ่มความเสถียรเชิงกลของน้ำยางชั้นทั้งในสถานะที่มีแอมโมเนียสูงและต่ำ โดยคำนึงถึงความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เป็นสำคัญ นอกจากนี้จะศึกษาผลของการนำน้ำยางชั้นไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของน้ำยางชั้นที่บ่มเร่งความเสถียรด้วยเอนไซม์ไลเปสต่อการนำไปใช้ขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของเอนไซม์ไลเปสเกรดต่าง ๆ และ pH ต่อกิจกรรมของเอนไซม์ (enzyme activity)

1.2.2 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เอนไซม์ไลเปสเพื่อทดแทนหรือช่วยลดปริมาณการใช้แอมโมเนียหรือสาร secondary preservatives ในกระบวนการผลิตน้ำยางข้น

1.2.3 เพื่อศึกษาผลของน้ำยางข้นที่เร่งความเสถียรเชิงกลด้วยเอนไซม์ไลเปสต่อการนำไปใช้ในกระบวนการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดจุ่มขึ้นรูปและผลิตภัณฑ์โฟมยาง

1.2.4 เพื่อศึกษาความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ในการลดต้นทุนการผลิตในด้านต่าง ๆ เมื่อทำการเพิ่มความเสถียรเชิงกลของน้ำยางข้นโดยวิธีการใช้เอนไซม์ไลเปสเปรียบเทียบกับวิธีการเพิ่มความเสถียรเชิงกลของน้ำยางข้นด้วยวิธีปัจจุบัน (การใช้แอมโมเนียมลอสเลต)

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ศึกษากิจกรรมของเอนไซม์ (enzymatic activity) และสมบัติที่เกี่ยวข้องของเอนไซม์ไลเปสเกรดต่าง ๆ ที่ pH จริงในน้ำยางข้นชนิดแอมโมเนียต่ำ (Low ammonia latex; LA Latex) และแอมโมเนียสูง (High ammonia latex; HA Latex)

1.3.2 ศึกษาผลของปริมาณแอมโมเนียในน้ำยางข้นต่อค่าความเสถียรเชิงกลของน้ำยางข้นที่ทำการเพิ่มความเสถียรเชิงกลโดยวิธีการใช้เอนไซม์ไลเปส โดยทำการศึกษาในส่วนของน้ำยางข้นที่มีปริมาณแอมโมเนียประมาณ 0.3% และ 0.7% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

1.3.3 ศึกษาผลการนำน้ำยางข้นที่ได้จากการเร่งความเสถียรเชิงกลด้วยเอนไซม์ไลเปสมาใช้ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์แบบจุ่มและศึกษาสมบัติเชิงกลเบื้องต้นของผลิตภัณฑ์ที่ได้

1.3.4 วิเคราะห์ผลโดยการทดสอบสมบัติของน้ำยางข้นตามมาตรฐานและทดสอบสมบัติของผลิตภัณฑ์จากน้ำยางข้นตามมาตรฐานของผลิตภัณฑ์นั้น ๆ

1.3.5 ศึกษาความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ในการลดต้นทุนการผลิตในด้านต่าง ๆ ของวิธีการใช้ไลเปสเปรียบเทียบกับวิธีการใช้แอมโมเนียมลอสเลตในการเพิ่มความเสถียรเชิงกลของน้ำยางข้น

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถเข้าใจกลไกและได้เทคนิคใหม่ในการเพิ่มความเสถียรเชิงกลของน้ำยางชั้นที่สภาวะการเก็บรักษาต่าง ๆ โดยสามารถลดระยะเวลาในการบ่มน้ำยางชั้นให้น้อยลงได้และยังสามารถลดการใช้สารเคมีได้อีกด้วย

1.4.2 สามารถใช้เอนไซม์ไลเปสในการเพิ่มความเสถียรเชิงกลของน้ำยางชั้น เพื่อลดระยะเวลาในการบ่มน้ำยางชั้นให้น้อยลงได้ และไม่ทำให้เกิดปัญหาการจับตัวยากของน้ำยางเนื่องจากความเสถียรเชิงกลที่สูงเกินไปในกระบวนการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ

1.4.3 สามารถใช้เอนไซม์ไลเปสเพื่อทดแทนหรือช่วยลดปริมาณการใช้แอมโมเนียในกระบวนการผลิตน้ำยางชั้น เพื่อช่วยลดปัญหาผลกระทบจากการใช้แอมโมเนียต่อสุขภาพผู้ใช้งาน สิ่งแวดล้อมและช่วยลดต้นทุนสารเคมีในกระบวนการผลิตน้ำยางชั้นได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

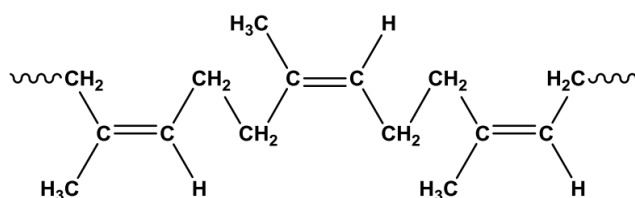
2.1 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber Latex, NR)

2.1.1 โครงสร้างของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติหรือยางพาราที่ใช้ในปัจจุบันเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพชนิดหนึ่งที่ได้จากต้นพืชในสกุล *Hevea brasiliensis* ซึ่งเป็นไม้ป่าที่มีต้นกำเนิดมาจากกลุ่มแม่น้ำอเมซอนในทวีปอเมริกาใต้ ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมีคือ ซิส-1,4 พอลิไอโซพรีน (cis-1,4 polyisoprene) มีโครงสร้างทางเคมีดังภาพที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของโมเลกุลยาง 1 โมเลกุลจะประกอบด้วยหน่วยของไอโซพรีน (C_5H_8) มาต่อกันเป็นสายยาวแบบเส้นตรง และที่ปลายของโมเลกุลอาจมีการสร้างพันธะกับส่วนที่ไม่ใช่ยาง ซึ่งส่วนใหญ่เป็นสารประเภทโปรตีน กรดอะมิโนและฟอสโฟลิปิด และในสายโซ่หลักอาจมีหมู่ อีพอกไซด์ อีเทอร์ อัลดีไฮด์ หรือแลคโตนก็ได้ โดยส่วนที่ไม่ใช่ยางนี้มีสัดส่วนอยู่ที่ประมาณ 5-10 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้ยางธรรมชาติมีสมบัติแตกต่างกัน



ภาพที่ 2.1 น้ำยางพารา (Natural rubber latex). (ภาพจาก <https://www.naewna.com/sport/426291> สืบค้นเมื่อ 18 พฤศจิกายน 2562)



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างเคมีซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน. จาก เทคโนโลยีการดัดแปลงยางธรรมชาติและ การประยุกต์ใช้ (Natural Rubber Modification Technology and Its Applications), โดย สุวดี ก้องพารากุล, 2556.

โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยอยู่ในช่วง 200,000 ถึง 400,000 และมีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลที่กว้างมาก มีอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g) ประมาณ -72 องศาเซลเซียส เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติเป็นแบบ ซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีความไม่อิมิตวสูง โดยประกอบด้วยพันธะคู่ของคาร์บอน ($C=C$) เป็นจำนวนมาก จึงทำให้ยางธรรมชาติสามารถเชื่อมสภาพได้ง่ายเมื่อถูกแสงแดดหรือความร้อน โดยสังเกตได้จากยางจะแปรสภาพจากเดิมที่สามารถยืดหยุ่น กลายสภาพเป็นยางที่แข็งเปราะและไม่สามารถใช้งานต่อไป

2.1.2 องค์ประกอบของน้ำยางธรรมชาติ

น้ำยางสดที่ได้จากการกรีดต้นยางพารามีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวขุ่นคล้าย นํ้านม จัดเป็นสารคอลลอยด์ (colloid) ที่ประกอบด้วยอนุภาคยางแขวนลอยกระจายตัวอยู่ในซีรัม โดยอนุภาคยางธรรมชาติมีลักษณะรูปทรงค่อนข้างกลม มีขนาดอนุภาค 0.05-0.5 ไมครอน ความหนาแน่นประมาณ 0.975-0.980 กรัม/มิลลิลิตร และมีค่าความเป็นกรด-ด่าง ประมาณ 6.5-7.0 โดยทั่วไปในน้ำยางสดมีปริมาณเนื้อยางแห้ง (dry rubber) ประมาณร้อยละ 30-36 และส่วนที่ไม่ใช่เนื้อยางประมาณร้อยละ 5-6 ดังแสดงในตารางที่ 2.1 โดยองค์ประกอบต่าง ๆ ในน้ำยางนั้น จะขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ อายุ ฤดูกาล และกรรมวิธีการกรีดยาง

ตารางที่ 2.1

องค์ประกอบของน้ำยางสด

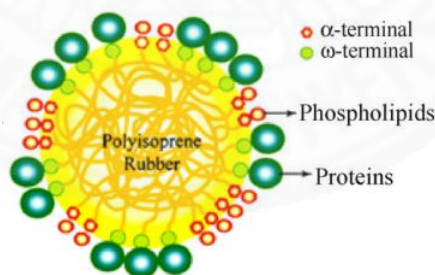
ส่วนประกอบ	ร้อยละ (โดยน้ำหนัก)
เนื้อยางแห้ง	36.0
โปรตีน	1.7
ไขมัน	1.6
คาร์โบไฮเดรต	1.6
เถ้า	0.5
น้ำ	58.6

หมายเหตุ. จาก Non-Rubbers and Abnormal Groups in Natural Rubber In *Natural Rubber Materials* by E. A. Hwee, 2013, p. 53-72, The Royal Society of Chemistry United Kingdom.

จากตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่า ในน้ำยางสดประกอบด้วย 2 องค์ประกอบใหญ่ คือ ส่วนที่เป็นเนื้อยาง (Rubber components) และส่วนที่ไม่ใช่เนื้อยาง (Non-rubber components) ซึ่งละลายหรือแขวนลอยในซีรัมหรือถูกดูดซับอยู่รอบ ๆ อนุภาคของยาง ส่วนใหญ่เป็นสารพวกไขมัน โปรตีน แร่ธาตุ และคาร์โบไฮเดรตประกอบต่าง ๆ โดยรายละเอียดขององค์ประกอบของส่วนที่เป็นเนื้อยางและส่วนที่ไม่ใช่เนื้อยางในน้ำยางธรรมชาติ เป็นดังนี้

2.1.2.1 ส่วนที่เป็นเนื้อยาง (Rubber components)

อนุภาคยางธรรมชาติประกอบด้วยสารจำพวกไฮโดรคาร์บอน มีชื่อโครงสร้างทางเคมีคือ ซิส-1,4 พอลิไอโซพรีน (cis-1,4 polyisoprene) มีความหนาแน่นประมาณ 0.92 กรัมต่อมิลลิลิตร อนุภาคยางเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ ไม่ละลายน้ำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.05 – 3.0 ไมครอน รูปร่างของอนุภาคยางมีทั้งรูปกลมหรือรูปลูกแพร์ และที่ผิวของอนุภาคยางจะถูกห่อหุ้มด้วยชั้นของสารพวกไขมันและโปรตีน โดยสารพวกไขมันส่วนใหญ่เป็นพวก ฟอสโฟไลปิดชนิดแอลฟาเลซิธิน (α -Lecithin) ซึ่งจะถูกดูดซับอยู่บนผิวของอนุภาคยาง ทำหน้าที่ยึดโปรตีนให้เกาะอยู่บนผิวอนุภาคยาง ดังแสดงในภาพที่ 2.3 โดยส่วนชั้นของไขมันและโปรตีนที่ล้อมรอบอนุภาคยางนี้เอง ที่ทำให้อนุภาคยางสามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำได้อย่างเสถียร โดยน้ำยางสดหลังกรีดจากต้นยางจะคงสภาพเป็นน้ำยางอยู่ได้ในช่วงเวลาหนึ่ง ซึ่งถ้าไม่มีการเติมสารเคมีเพื่อช่วยรักษาสภาพน้ำยาง จะทำให้แบคทีเรียและเอนไซม์ไปทำปฏิกิริยากับชั้นของไขมันและโปรตีนที่อยู่บนผิวของอนุภาคยาง ทำให้อนุภาคยางเสียความเสถียรและเกิดการบูดเน่าได้



ภาพที่ 2.3 แบบจำลองภาพตัดขวางอนุภาคยางธรรมชาติ. จาก “Surface nanostructure of *Hevea brasiliensis* natural rubber latex particles,” by K. Nawamawat, J. T. Sakdapipanich, C. C. Ho, Y. Ma, J. Song, and J. G. Vancso, 2011, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 390 (1-3), p. 157-166.

ตารางที่ 2.2

ส่วนประกอบของส่วนที่เป็นเนื้อยาง

ส่วนประกอบ	ร้อยละ (โดยน้ำหนัก)
ยาง (Hydrocarbon)	86
น้ำ (กระจายอยู่ใน Hydrocarbon)	10
ไขมัน	3
โปรตีน	1

หมายเหตุ. จาก *Polymer Latexes*, โดย D. C. Blackley, 1997, London: Chapman & Hall.

2.1.2.2 ส่วนที่ไม่ใช่เนื้อยาง (Non-rubber components)

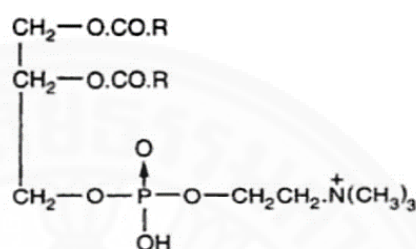
ส่วนที่ไม่ใช่ยางในน้ำยางธรรมชาติ เป็นส่วนที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติของยางธรรมชาติที่แตกต่างกัน โดยสามารถแบ่งเป็นกลุ่มใหญ่ๆ 4 กลุ่ม ได้แก่

(1) ไขมัน (lipids)

ไขมัน เป็นสารที่มีจำนวนมากที่สุดในส่วนประกอบที่ไม่ใช่ยาง ซึ่งมีประมาณร้อยละ 1.3-3.5 โดยน้ำหนัก ประกอบด้วย 2 ประเภท ได้แก่ ไขมันไม่มีขั้วหรือไขมันเป็นกลาง (non-polar lipids or neutral lipids) และไขมันที่มีขั้ว (polar lipids)

- **ไขมันไม่มีขั้วหรือไขมันเป็นกลาง (non-polar lipids or neutral lipids)** ไขมันไม่มีขั้วประกอบไปด้วยสารมากกว่า 14 สาร ซึ่งส่วนมากเป็นไตรกลีเซอไรด์ (triglycerides) สารอื่น ๆ ได้แก่ เอสเทอร์ สารประกอบฟีนอลิก (โทโคไตรอินอล) และสเตียรอล โทโคไตรอินอลรวมถึงสารประกอบฟีนอลิกอื่น ๆ ที่ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาไปเป็นสบู่เป็นแอนติออกซิแดนท์สำคัญที่ช่วยป้องกันน้ำยางไม่ให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ส่วนประกอบรองของไขมันไม่มีขั้ว คือ กรดไขมันอิสระ ไขมันแอลกอฮอล์ มอนอกลิเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์และสารแคโรทีนอยด์ โดยเชื่อว่ากรดไขมันอิสระได้จากการบวนการย่อยสลายของไขมัน กรดไขมันเหล่านี้สามารถกลายเป็นสบู่ที่มีประจุบวกและมีบางส่วนกระจายตัวเพื่อรักษาเสถียรภาพคอลลอยด์ของน้ำยาง

- **ไขมันที่มีขั้ว (polar lipids)** ไขมันที่มีขั้วประกอบไปด้วยไกลโคลิปิด และฟอสโฟลิปิด โดยฟอสโฟลิปิดที่เชื่อมอยู่กับอนุภาคยางธรรมชาติจะเป็นพวกเลซิทีน ซึ่งสารหลักในกลุ่มฟอสโฟลิปิด คือ ฟอสฟาติดีลโคลีน (phosphatidyl choline; PC) และไลโซฟอสฟาติดีลโคลีน (lysophosphatidyl choline; LPC) โครงสร้างทางเคมีของเลซิทีนแสดงดังภาพที่ 2.4 โดยหมู่ R groups เป็นส่วนของสารไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาว (long-chain hydrocarbon) เช่น n-heptadecyl ($n\text{-C}_{17}\text{H}_{35}$) หรือ n-heptadenyl ($n\text{-C}_{17}\text{H}_{33}$)



ภาพที่ 2.4 โครงสร้างของเลซิทีน (ฟอสฟาติดีลโคลีน). จาก *Polymer Latices*, โดย Blackley, D. C., 1997, London: Chapman & Hall.

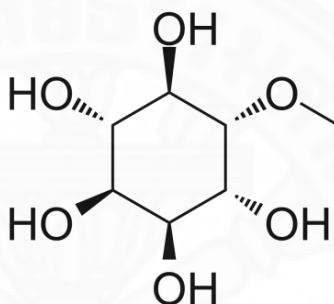
(2) โปรตีน (Proteins)

ในน้ำยางสดประกอบด้วยโปรตีน ประมาณร้อยละ 1-2% โดยโปรตีนที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในยาง คือ แอลฟาไกลบูลิน (α -globuline) มีมวลโมเลกุลประมาณ 200 กิโลดาลตัน (kDa) โปรตีนชนิดนี้ไม่ละลายในน้ำกลั่น แต่ละลายในสารละลายเกลือที่เป็นกลาง สารละลายเบสและและสารละลายกรดที่มี pH น้อยกว่า 3 จะเสื่อมสภาพและตกตะกอนเมื่อโดนความร้อนหรือทำให้แห้ง เป็นโปรตีนที่มีซัลเฟอร์ต่ำประมาณร้อยละ 0.06 มีจุดไอโซอิเล็กทริก (isoelectric) ที่ pH 4.5 ซึ่งใกล้เคียงกับจุดไอโซอิเล็กทริกของอนุภาคยาง (จุดไอโซอิเล็กทริกของอนุภาคยางอยู่ที่ pH 4.1) เนื่องจากความคล้ายกันระหว่างจุดไอโซอิเล็กทริกของโปรตีนชนิดนี้กับอนุภาคยาง และความคล้ายกันระหว่างสภาพคอลลอยด์ของสารทั้งสอง จึงทำให้เชื่อว่าโปรตีนชนิดนี้เป็นโปรตีนสำคัญที่เป็นองค์ประกอบของชั้นโปรตีนบนผิวอนุภาคยาง

โปรตีนในยางมีผลต่อคุณสมบัติทั้งของน้ำยางและยางแห้ง เนื่องจากโปรตีนที่ถูกดูดซับอยู่บริเวณรอบ ๆ อนุภาคยางมีประจุเป็นลบ ซึ่งช่วยรักษาความเสถียรของคอลลอยด์ในน้ำยาง ซึ่งในรายงานระบุว่าโปรตีนมีส่วนช่วยทำให้มีประจุลบถึงร้อยละ 14 บนอนุภาคของยางและเป็นส่วนที่ปกคลุมพื้นที่ผิวของอนุภาคยางถึงร้อยละ 84 ในขณะที่ส่วนที่เหลือเป็นฟอสโฟลิปิดร้อยละ 16

(3) คาร์โบไฮเดรต (Carbohydrates)

คาร์โบไฮเดรตที่มีอยู่ในยางธรรมชาติส่วนใหญ่จะเป็นสารพวกน้ำตาล มีอยู่ในน้ำยางประมาณ 1% โดยน้ำตาลที่มีอยู่ส่วนใหญ่เป็นน้ำตาลชนิดคิวบราซิทอล (Quebrachitol) หรือ 2-อโทเมทิลแอลอีโนซิทอล (2-o-methyl-L-inositol) และมีน้ำตาลชนิดกลูโคส (glucose) ซูโครส (sucrose) ฟรุคโทส (fructose) กาแลคโตส (galactose) แรฟฟิโนส (raffinose) และเพนโตส (pentose) ปริมาณเพียงเล็กน้อย ในน้ำยางที่ใส่สารรักษาสภาพในปริมาณน้อยพบว่า แบคทีเรียจะเข้าไปย่อยน้ำตาลและเปลี่ยนเป็นกรดไขมันที่ระเหยง่าย (volatile fatty acids; VFAs) ซึ่งเป็นกรดที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก ส่งผลให้น้ำยางเกิดการเสียสภาพขึ้น



ภาพที่ 2.5 คิวบราซิทอล (Quebrachitol) หรือ 2-อโทเมทิลแอลอีโนซิทอล (2-o-methyl-L-inositol). (ภาพจาก https://www.chemsrc.com/en/cas/642-38-6_255820.html สืบค้นเมื่อ 22 กุมภาพันธ์ 2561)

(4) เถ้า (Ash)

เถ้าในน้ำยางธรรมชาติ ประกอบด้วยแร่ธาตุต่าง ๆ ซึ่งปริมาณแร่ธาตุเหล่านี้จะส่งผลต่อเสถียรภาพของน้ำยาง (colloidal stability) และการเสื่อมสภาพของยางเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยปริมาณแร่ธาตุขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น สายพันธุ์ของยาง สภาพดิน อากาศ และปุ๋ยที่ใส่ ตัวอย่างเช่น แมกนีเซียมในน้ำยางธรรมชาติจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อเข้าสู่ฤดูหนาว เนื่องจากถูกเคลื่อนย้ายมาจากใบที่แห้ง ซึ่งปริมาณแมกนีเซียมที่สูงขึ้นจะส่งผลให้น้ำยางมีความเสถียรลดลง อีกทั้งยังทำให้จำนวน VFAs เพิ่มขึ้นและเกิดผลึกบนผิวของน้ำยาง ในทางตรงกันข้าม สารประกอบฟอสฟอรัสและอนุภาคฟอสเฟส จะช่วยเพิ่มความเสถียรให้กับน้ำยาง สัดส่วนของฟอสเฟสกับแมกนีเซียมจำเป็นในการหาค่าความเสถียรของน้ำยาง เมื่อน้ำยางอยู่ในต้นยาง แมกนีเซียมส่วนใหญ่จะอยู่ในส่วนของลูทอยด์และจะกลายเป็นแมกนีเซียมไอออนซึ่งอยู่ในส่วนของชีรัม หลังจากการกรีดและรักษาสภาพน้ำยาง การรักษาสภาพน้ำยางด้วยแอมโมเนีย ฟอสโพลิปิดจะ

ถูกไฮโดรไลซ์ได้ฟอสเฟสเพิ่มขึ้นเป็นผลให้ปริมาณแมกนีเซียมลดลง ซึ่งจะช่วยเพิ่มความเสถียรให้กับน้ำยาง

2.2 น้ำยางข้น (Concentrated Natural Rubber Latex, CNRL)

เนื่องจากน้ำยางสดที่กรีตได้จากต้นยางมีปริมาณน้ำที่มากเกินไป ซึ่งไม่เหมาะสำหรับการนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ และยังสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการขนส่ง ดังนั้นน้ำยางที่จะนำมาใช้ในอุตสาหกรรมจึงต้องนำไปผ่านกระบวนการแปรรูปให้อยู่ในรูปของน้ำยางข้น เพื่อลดปริมาณน้ำที่มีอยู่ในน้ำยางสด จนกระทั่งได้น้ำยางที่มีปริมาณเนื้อยางแห้งเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 30 เป็นร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก น้ำยางที่ได้นี้จึงเรียกกันว่า “น้ำยางข้น” (Concentrated Natural Rubber Latex, CNRL) ทำให้สะดวกในการขนย้ายและยังเป็นการทำให้น้ำยางมีคุณภาพที่เหมาะสมสำหรับการนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ อีกทั้งยังเป็นการขจัดสารที่ไม่ใช่ยางซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้น้ำยางเสียสภาพเร็วขึ้นออกจากน้ำยางอีกด้วย

2.2.1 การผลิตน้ำยางข้น

การผลิตน้ำยางข้นสามารถทำได้ 4 วิธี ได้แก่ วิธีระเหยน้ำ (evaporation) วิธีการทำให้เกิดครีม (creaming) วิธีการแยกด้วยไฟฟ้า (electrodecantation) และวิธีปั่นแยก (centrifuging) โดยรายละเอียดการผลิตน้ำยางข้นชนิดต่าง ๆ มีดังนี้

- การผลิตน้ำยางข้นโดยวิธีระเหยน้ำ (Evaporation) การผลิตน้ำยางข้นโดยวิธีระเหยน้ำ จะมีการเติมสารที่ทำให้คงตัว (stabilizer) ลงในน้ำยางสดเพื่อเพิ่มความเสถียรให้กับน้ำยาง จากนั้นน้ำยางสดที่ได้จะถูกนำไประเหยเอาน้ำออกผ่านเครื่องระเหย ซึ่งจะมีการให้ความร้อนรอบ ๆ ถัง โดยความร้อนจะทำให้น้ำค่อยๆ ระเหยไป น้ำยางจึงมีความเข้มข้นมากขึ้น วิธีนี้เหมาะสำหรับการขนย้ายน้ำยางไปในระยะทางไกลและการนำไปทำผลิตภัณฑ์ที่ต้องใส่สารเติม (filler) จำนวนมาก แต่ข้อเสียของน้ำยางข้นที่ได้จากการผลิตด้วยวิธีนี้คือ มีสารที่ไม่ใช่ยางตกค้างมาก จะดูความขุ่นสูงและผิวเหนียวแห้งช้า จึงใช้ทำกาวได้อย่างเดียว

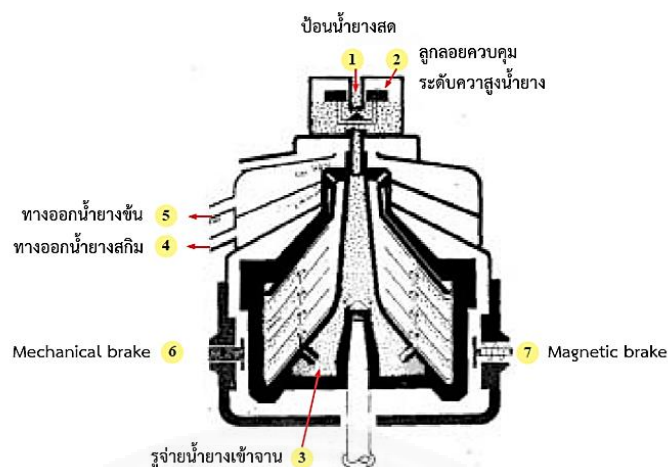
- การผลิตน้ำยางข้นโดยวิธีการทำให้เกิดครีม (Creaming) การทำให้เกิดครีม (creaming) วิธีนี้มีการเติมสารให้เกิดครีม (creaming agent) สารทำให้เกิดครีมจะเคลือบผิวของอนุภาควาง ทำให้อนุภาควางมีขนาดใหญ่ขึ้น และลอยขึ้นสู่บริเวณบนผิวของน้ำยาง น้ำยางข้นจะมีความบริสุทธิ์มากยิ่งขึ้นเมื่อผ่านวิธีการทำให้เกิดครีมหลาย ๆ ครั้ง แต่วิธีนี้มีความยุ่งยากและสิ้นเปลืองระยะเวลา

- การผลิตน้ำยางข้นโดยวิธีการแยกด้วยไฟฟ้า (Electrodecantation) การใช้กระแสไฟฟ้าแยก (electro decantation) วิธีนี้ใช้กระแสไฟฟ้าในการแยกส่วนของเนื้อยางออกจากส่วนซีรัม โดยการจุ่มขั้วไฟฟ้าที่เป็นขั้วบวกลงในน้ำยาง ที่เติมสารช่วยให้เนื้อยางคงตัวไว้แล้ว เนื่องจากบริเวณอนุภาควางมีประจุลบอยู่รอบ ๆ จะค่อย ๆ เคลื่อนที่ไปรวมตัวกันที่ขั้วบวกและลอยตัวขึ้นสู่บริเวณผิวของน้ำยาง จะได้เป็นชั้นน้ำยางเข้มข้นอยู่ด้านบน แต่วิธีนี้ไม่สะดวก และลงทุนสูง

- การผลิตน้ำยางข้นโดยวิธีปั่นเหวี่ยง (Centrifuging) เนื่องจากน้ำยางธรรมชาติเป็นสารละลายที่จัดอยู่ในระบบคอลลอยด์ ที่ประกอบด้วยอนุภาควางกระจายตัวอยู่ในเซรุ่ม อนุภาควางเหล่านี้มีการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน (Brownian movement) และเบากว่าเซรุ่ม จึงมีแนวโน้มที่จะลอยสู่ผิวหน้าของน้ำยาง โดยอัตราการเคลื่อนที่ของอนุภาควางขึ้นอยู่กับแรงดึงดูดของโลก หากสามารถเพิ่มแรงดึงดูดได้ก็จะช่วยเพิ่มความเร็วในการเคลื่อนที่ของอนุภาควางได้ด้วย ดังนั้นการปั่นจึงสามารถเร่งการเคลื่อนที่ของอนุภาควางได้ ซึ่งจากหลักการนี้จึงได้ถูกนำมาพิจารณาสร้างเครื่องปั่นน้ำยางเพื่อการผลิตน้ำยางข้น หรือเพื่อคัดแยกส่วนที่เป็นเนื้อยางออกจากส่วนที่เป็นเซรุ่ม โดยในการปั่นแยกน้ำยางสดจะได้ น้ำยางข้นและหางน้ำยาง (skim latex)



ภาพที่ 2.6 เครื่องปั่นเหวี่ยง. (ภาพจาก <https://www.nstda.or.th> สืบค้นเมื่อ 18 มีนาคม 2561)



ภาพที่ 2.7 หน้าตัดตามยาวของถังปั่นน้ำยางชั้น (ดัดแปลงภาพจาก http://php.diw.go.th/ctu/files/pdf/codeofpractice_rubber_th.pdf สืบค้นเมื่อ 18 มีนาคม 2561)

การผลิตน้ำยางชั้นโดยวิธีปั่นเหวี่ยง เป็นวิธีหลักและเป็นกระบวนการที่สำคัญในอุตสาหกรรมการผลิตน้ำยางชั้น เนื่องจากสามารถผลิตน้ำยางชั้นได้เร็วและน้ำยางชั้นที่ได้มีความบริสุทธิ์สูง โดยขั้นตอนในการผลิตน้ำยางชั้น มีดังนี้

1. การรับน้ำยางสด น้ำยางสดจะถูกรักษาสภาพไม่ให้จับตัวด้วยแอมโมเนียและสารเคมีอื่น และถูกถ่ายผ่านตะแกรงกรองลงสู่รางรับน้ำยางสด และน้ำยางสดจะไหลจากรางรับน้ำยางสดลงสู่บ่อรับน้ำยางสด

2. การเตรียมน้ำยางสด มีการปรับสภาพน้ำยางสดให้เหมาะสมต่อกระบวนการปั่นแยกด้วยการเติมแอมโมเนีย เพื่อให้มีปริมาณแอมโมเนียเกินกว่าร้อยละ 0.4 โดยน้ำหนัก และเติม Diammonium Hydrogen Phosphate (DAP) เพื่อให้แมกนีเซียมตกตะกอนเป็นขี้แป้งและทิ้งไว้ 1 คืน ก่อนจะนำน้ำยางเข้าเครื่องปั่น

3. การปั่นแยก การปั่นแยกน้ำยางสดจะได้น้ำยาง 2 ส่วน คือ ทางน้ำยางและน้ำยางชั้น โดยน้ำยางชั้นจะมีเนื้อยางแห้งประมาณ 60% ในการปั่นแยกยางจะมีการล้างเครื่องปั่นยางทุก ๆ 2 หรือ 3 ชั่วโมง เนื่องจากการอุดตันของยางและกากขี้แป้ง บริเวณหัวโบริลของเครื่องปั่นยาง โดยในการล้างแต่ละครั้งจะใช้เวลาในการล้างนานประมาณ 10 -15 นาที

4. การรักษาสภาพน้ำยางชั้น น้ำยางชั้นที่ได้จากกระบวนการปั่นเหวี่ยงจะต้องมีการเติมแอมโมเนียลงไปหรืออาจใช้แอมโมเนียร่วมกับสารเคมีอื่นเพื่อช่วยรักษาสภาพของน้ำยางชั้นให้เก็บไว้ได้นาน น้ำยางที่ใช้แอมโมเนียอย่างเดียวต้องใช้แอมโมเนียที่มีความเข้มข้นสูงถึง 0.7% น้ำยางชนิดนี้จึงมีชื่อเรียกว่า High Ammonia Latex หรือ HA Latex ส่วนน้ำยางที่มีการใช้แอมโมเนียที่มีความเข้มข้นต่ำเพียง 0.2% เรียกว่า Low Ammonia Latex หรือ LA Latex ซึ่งจะมีการเติมแอมโมเนีย

ร่วมกับสารชนิดอื่นได้แก่ เตตระเมทิลไทูรัมไดซัลไฟด์หรือทีเอ็มทีดี (tetramethylthiuram disulphide; TMTD) กับซิงค์ออกไซด์ (zinc oxide) เพื่อรักษาสภาพน้ำยางก่อนนำออกจำหน่ายต่อไป

5. การไล่แอมโมเนียในทางน้ำยาง ทางน้ำยางที่ได้จากกระบวนการปั่นยางจะถูกนำไปไล่แอมโมเนียออกเพื่อลดปริมาณการใช้กรดซัลฟูริกในการตกตะกอนสำหรับผลิตยางสกิม เนื่องจากถ้าทางน้ำยางมีปริมาณแอมโมเนียสูงจะต้องใช้กรดในการตกตะกอนเป็นปริมาณมาก ดังนั้นจึงมีการไล่แอมโมเนียในทางน้ำยาง ด้วยการใช้กรดไล่แอมโมเนียหรือเครื่องกว

2.2.2 คุณสมบัติของน้ำยางชั้น

คุณสมบัติที่ใช้ในการระบุคุณภาพของน้ำยางชั้นที่สำคัญ ได้แก่ ปริมาณของแข็งทั้งหมด ปริมาณเนื้อยางแห้ง ความเป็นต่างของน้ำยาง ปริมาณกรดระเหยได้ในน้ำยาง และค่าความเสถียรเชิงกลของน้ำยาง เป็นต้น ซึ่งน้ำยางชั้นมีสมบัติบางประการที่เปลี่ยนแปลงได้ หากมีการเก็บรักษาน้ำยางไว้ไม่ดี ดังนั้นจึงมีการกำหนดมาตรฐานสมบัติของน้ำยางชั้นเพื่อเป็นมาตรฐานในการซื้อขาย ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3

มาตรฐานของน้ำยางชั้น

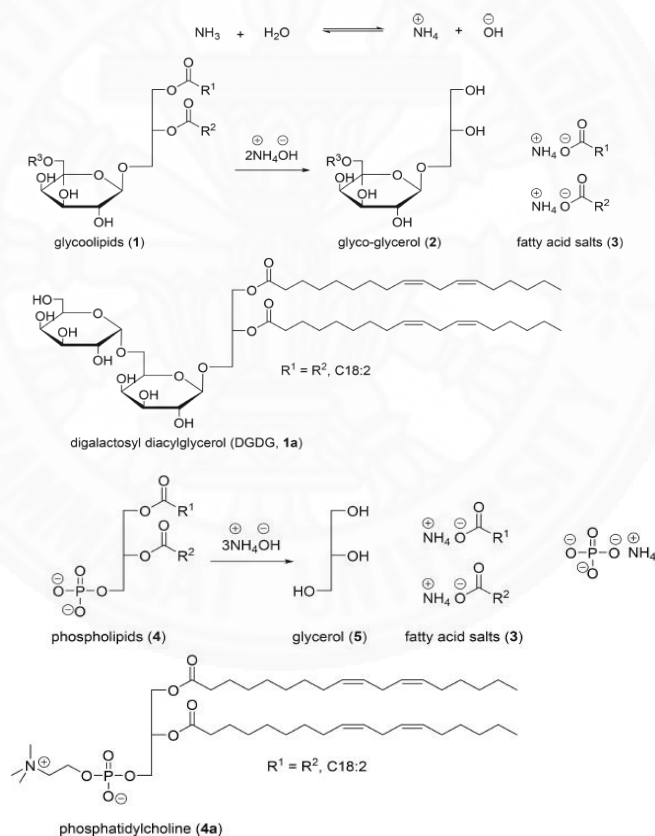
รายการที่	คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด					วิธีทดสอบตาม
		ชนิด HA	ชนิด LA	ชนิด MA ³⁾	ชนิด HA ครีม	ชนิด LA ครีม	
1	ของแข็งทั้งหมด ร้อยละโดยน้ำหนัก ไม่น้อยกว่า	61.0 หรือให้เป็นไปตามข้อตกลงระหว่างผู้ซื้อและผู้ขาย			65.0	65.0	ISO 124
2	เนื้อยางแห้ง ร้อยละโดยน้ำหนัก ไม่น้อยกว่า	60.0	60.0	60.0	64.0	64.0	ISO 126
3	ของแข็งที่ไม่ใช่ยาง ¹⁾ ร้อยละโดยน้ำหนัก ไม่เกิน	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	-
4	ความเป็นด่าง (คำนวณเป็น NH ₃) ร้อยละโดยน้ำหนักน้ำยางชั้น	ไม่น้อยกว่า 0.60	ไม่เกิน 0.29	0.30 – 0.59	ไม่น้อยกว่า 0.55	ไม่เกิน 0.35	ISO 125
5	เสถียรภาพต่อการปั่น ²⁾ (mechanical stability) วินาที ไม่น้อยกว่า	650	650	650	650	650	ISO 35
6	ยางจับก้อน (coagulum) ร้อยละโดยน้ำหนัก ไม่เกิน	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	ISO 706
7	ทองแดง มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมของของแข็งทั้งหมด ไม่เกิน	8	8	8	8	8	ISO 8053
8	แมงกานีส มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมของของแข็งทั้งหมด ไม่เกิน	8	8	8	8	8	ISO 7780
9	แมกนีเซียม มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมของของแข็งทั้งหมด ไม่เกิน	40 หรือให้เป็นไปตามข้อตกลงระหว่างผู้ซื้อและผู้ขาย					ข้อ 8.3
10	ตะกอน (sludge) ร้อยละโดยน้ำหนัก ไม่เกิน	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	ISO 2005
11	ค่ากรดไขมันที่ระเหยได้ (VFA number) ไม่เกิน	0.06 หรือให้เป็นไปตามข้อตกลงระหว่างผู้ซื้อและผู้ขาย					ISO 506
12	ค่าโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH number) ไม่เกิน	0.7 หรือให้เป็นไปตามข้อตกลงระหว่างผู้ซื้อและผู้ขาย					ISO 127

หมายเหตุ. จาก มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม น้ำยางชั้นธรรมชาติ มอก. 980-2552, โดย
สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2552.

- 1) คำนวณจากผลต่างระหว่างปริมาณของแข็งทั้งหมดกับปริมาณเนื้อยางแห้ง
- 2) เสถียรภาพต่อการปั่น เป็นค่าที่วัดภายหลัง 21 วันนับจากวันที่ทำ
- 3) “MA” หรือ “XA” หมายถึง Medium Ammonium Latex

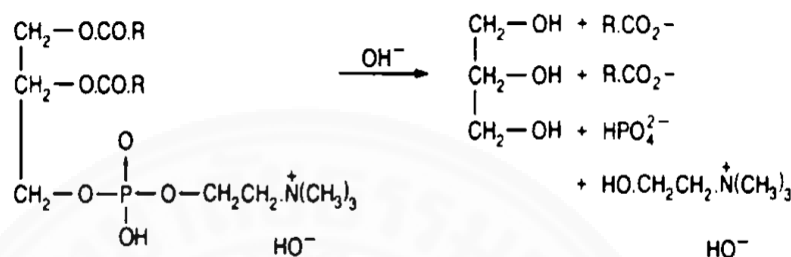
2.2.3 ความเสถียรของน้ำยางชั้น

ความเสถียรของน้ำยางเป็นความสามารถของน้ำยางในการรักษาสภาพความเป็นของเหลวไว้ได้โดยไม่จับตัวเป็นก้อน โดยปกติในน้ำยางธรรมชาติจะมีโปรตีนดูดซับอยู่บริเวณผิวของอนุภาคยาง ซึ่งชั้นโปรตีนเหล่านี้มีประจุลบ ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้อนุภาคของยางมารวมกันและจับตัวเป็นก้อน นอกจากนี้ ประจุลบที่อยู่รอบ ๆ อนุภาคยางซึ่งก่อให้เกิดการผลักกันระหว่างอนุภาคยาง ยังช่วยรักษาการกระจายตัวของอนุภาคยางได้อีกด้วย โดยการเก็บน้ำยางไว้ที่สถานะที่เป็นเบส เช่น การเติมแอมโมเนีย สารฟอสโฟลิปิด (phospholipids) ซึ่งอยู่ระหว่างชั้นโปรตีนและอนุภาคยางจะถูกไฮโดรไลซ์เป็นกลีเซอรอล (glycerol) ประจุลบของคาร์บอกซีเลตสายโซ่ยาว (long-chain carboxylate anions) ประจุลบของฟอสเฟต (phosphate anions) และเบสอินทรีย์ (organic bases) ดังแสดงในภาพที่ 2.8 ซึ่งส่งผลให้น้ำยางมีความเสถียรเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 2.8 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของฟอสโฟลิปิดในสถานะที่เป็นเบส. จาก “Investigating the Mechanistic and Structural Role of Lipid Hydrolysis in the Stabilization of Ammonia-Preserved Hevea Rubber Latex”, by S. Kumarn, N. Churinthorn, A. Nimpai boon, M. Sriring, C. C. Ho, A. Takahara, and J. Sakdapipanich, 2018. *Langmuir*, 34(43), p. 12730-12738.

โดยตัวอย่างปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสในสภาวะเบสของ α -lecithin (phosphatidyl choline) แสดงไว้ดังภาพที่ 2.9 ซึ่งประจุลบของคาร์บอกซีเลตสายโซ่ยาวที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสของฟอสโฟลิปิดนี้จะอยู่บริเวณรอบ ๆ อนุภาคของยาง ทำให้น้ำยางมีความเสถียรเพิ่มมากขึ้น (Blackley, 1997) ดังนั้นเมื่อมีการทำลายโปรตีนหรือทำให้ประจุลบที่อยู่บริเวณผิวของอนุภาคยางสูญเสียไปจะส่งผลให้น้ำยางเกิดการเสถียรภาพขึ้น



ภาพที่ 2.9 ปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสของฟอสโฟลิปิด. จาก Polymer Latices, โดย Blackley, D. C., 1997, London: Chapman & Hall.

ในการทดสอบสมบัติของน้ำยางข้น โดยทั่วไปจะอิงตามมาตรฐานการทดสอบขององค์การมาตรฐานระหว่างประเทศ (International Organization for Standardization, ISO) ซึ่งมีสมบัติที่เกี่ยวข้องกับความเสถียรของน้ำยาง ดังนี้

1. ค่าความเสถียรเชิงกล (mechanical stability time; MST) หมายถึง ระยะเวลาการปั่นกวนน้ำยางภายใต้สภาวะที่ควบคุม จนทำให้น้ำยางสูญเสียความคงตัว อนุภาคยางจะเริ่มเกาะหรือจับตัวเป็นเม็ด ค่า MST สูงจะบ่งบอกว่าน้ำยางมีความเสถียรต่ออิทธิพลทางกลสูง ในทางตรงกันข้าม ถ้าค่า MST ต่ำ แสดงว่าน้ำยางนั้นสูญเสียความเสถียรและสามารถจับตัวเป็นเม็ดได้ง่าย เมื่อถูกกระแทกหรือปั่นกวน

2. จำนวนโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (potassium hydroxide number; KOH number) หมายถึง จำนวนกรัมของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่สมมูลย์พอดีกับอนุมูลของกรดทั้งหมดที่รวมกับแอมโมเนียในน้ำยางที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมด 100 กรัม โดยจำนวนโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะเป็นตัวระบุปริมาณสบู่อะมิเนียที่เกิดขึ้นในน้ำยาง ซึ่งเกิดจากการกรดไขมัน 2 ชนิด คือ กรดไขมันระเหยได้ที่เกิดจากการกระทำของแบคทีเรียต่อสารที่ไม่ใช่เนื้อมะพร้าวและกรดไขมันที่มีสายโซ่ยาวที่เกิดขึ้นจากการไฮโดรไลซิสของโปรตีนในระหว่างการเก็บน้ำยาง โดยน้ำยางที่เก็บรักษาด้วยแอมโมเนีย กรดจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับแอมโมเนีย เกิดเป็นสบู่อะมิเนียขึ้น ค่า KOH ที่สูงแสดงถึง ความเปลี่ยนแปลงมากและอาจบ่งชี้ว่าน้ำยางข้นมีอายุหลังการผลิตนานอีกด้วย

3. จำนวนกรดไขมันระเหย (Volatile fatty acid number, VFA number)

หมายถึง ปริมาณของกรดไขมันระเหยที่เกิดขึ้นจากการไฮโดรไลซิสของคาร์โบไฮเดรตในเซรุ่มของน้ำยาง กรดเหล่านี้ประกอบด้วยกรดอะซิติก กรดฟอร์มิก และกรดพรอปิโอนิก เป็นส่วนใหญ่ หรือหมายถึง จำนวนกรัมของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ทำให้กรดไขมันระเหยทั้งหมดในน้ำยางที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมด 100 กรัม เป็นกลาง ค่า VFA number เป็นค่าที่บ่งชี้ถึงสถานะการเสื่อมสภาพของน้ำยาง ถ้าค่า VFA number สูง แสดงว่าน้ำยางถูกเชื้อจุลินทรีย์เข้าทำลายมาก เกิดกรดไขมันระเหยมาก ทำให้สูญเสียสภาพการเป็นคอลลอยด์ เกิดการบูดเน่าและจับเป็นก้อนได้

นอกจากนี้ การวัดเสถียรภาพในการกระจายตัวของคอลลอยด์ยังนิยมวัดค่าซีต้าโพเทนเชียล (zeta potential) ซึ่งสามารถทำนายค่าความคงตัวของการกระจายตัวของอนุภาคในของเหลวจากจำนวนและชนิดของประจุไฟฟ้าที่ผิวของอนุภาคยางได้โดยตรง โดยค่าซีต้าโพเทนเชียลนี้เป็นค่าความต่างศักย์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าบริเวณพื้นผิวอนุภาคกับศักย์ไฟฟ้าในชั้นสารละลาย โดยอนุภาคที่มีค่าซีต้าโพเทนเชียลเป็นบวกหรือลบมาก จะเกิดแรงผลักระหว่างอนุภาคที่อยู่ใกล้กันทำให้เกิดเสถียรภาพในการกระจายตัว แต่ถ้าอนุภาคมีค่าซีต้าโพเทนเชียลเป็นบวกหรือลบน้อย ทำให้ไม่มีแรงผลักระหว่างอนุภาครอบ ๆ ที่เข้ามาใกล้ ดังนั้นจึงไม่เกิดเสถียรภาพในการกระจายตัวและเกิดการรวมกันของอนุภาคขึ้น ซึ่งอนุภาคแขวนลอยจะเสถียรเมื่อซีต้าโพเทนเชียลมีค่ามากกว่า +30 มิลลิโวลต์ หรือน้อยกว่า -30 มิลลิโวลต์ ถ้าซีต้าโพเทนเชียลมีค่าอยู่ในช่วง -30 ถึง 30 มิลลิโวลต์ หรือใกล้เคียงศูนย์ สารแขวนลอยจะไม่เสถียร จะมีการเกาะตัวกันเป็นก้อนและตกตะกอน เรียกจุดที่ค่าซีต้าโพเทนเชียลเท่ากับศูนย์ว่า จุดไอโซอิเล็กทริก (isoelectric point)

2.3 การรักษาสภาพน้ำยาง (Preservation of NR latex)

น้ำยางสดที่กรีตจากต้นยาง จะสามารถคงอยู่ในรูปของเหลวได้ในระยะเวลาไม่กี่ชั่วโมง หลังจากถูกกรีตออกจากต้น ทั้งนี้เนื่องจากแบคทีเรียในอากาศและแบคทีเรียจากเปลือกของต้นยาง จะเข้าไปปนเปื้อนในน้ำยางและเข้าไปย่อยสารจำพวกน้ำตาลและโปรตีนในน้ำยาง ทำให้เกิดกรดที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก มีความยาวโซ่สั้น (Short chain fatty acid) ซึ่งเป็นกรดที่ระเหยง่าย (Volatile fatty acid, VFA) โดยกรดดังกล่าวนี้จะส่งผลทำให้ค่า pH ของน้ำยางเปลี่ยนแปลง ทำให้อนุภาคยางเริ่มจับตัวกันเป็นเม็ดเล็ก ๆ แล้วค่อย ๆ จับตัวกันเป็นอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นและเกิดการเสื่อมสภาพในเวลาต่อมา ดังนั้นน้ำยางพาราที่ได้จึงต้องมีการเติมสารรักษาสภาพในปริมาณที่เหมาะสม เพื่อรักษาสภาพน้ำยางให้มีคุณภาพที่ดีก่อนการนำไปเข้าสู่กระบวนการแปรรูปต่อไป ซึ่งสารเคมีที่ใช้ในการรักษาสภาพน้ำยางควรมีคุณสมบัติ คือ

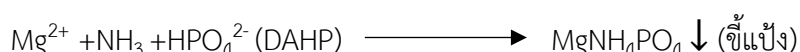
1. ช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่มีอยู่ในน้ำยาง
2. เนื่องจากบริเวณผิวของอนุภาคมีสภาพเป็นประจุลบและมีความเป็นด่าง ดังนั้นสารเคมีที่ใช้ในการรักษาสภาพน้ำยางจึงควรมีฤทธิ์เป็นด่าง เพื่อช่วยให้อนุภาคยางมีความเสถียรแบบคอลลอยด์ได้
3. สามารถทำให้อนุผลโลหะหนักในน้ำยาง ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้น้ำยางเสียสภาพไม่พร้อมต่อการเกิดปฏิกิริยาโดยการทำให้ตกตะกอนเป็นเกลือที่ไม่ละลายน้ำ
4. สามารถทำปฏิกิริยากับสารที่เป็นอาหารของแบคทีเรียที่มีอยู่ในน้ำยาง เช่น สารจำพวกคาร์โบไฮเดรต ทำให้แบคทีเรียไม่มีอาหารที่จะใช้ในการเจริญเติบโตได้
5. สารเคมีที่ใช้ต้องไม่เป็นพิษกับทั้งคนและคุณภาพของเนื้อมะพร้าว
6. ไม่ทำให้สีของน้ำยางและเนื้อมะพร้าวเปลี่ยนไป
7. ควรมีราคาถูก สามารถบรรจุในภาชนะที่ให้ความปลอดภัย สะดวกต่อการเก็บรักษาและขนส่ง

2.3.1 การรักษาสภาพน้ำยางสด

ในกระบวนการผลิตน้ำยางข้น ต้องใช้เวลารวบรวมน้ำยางสด ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการเติมสารเคมีลงในน้ำยางสด เพื่อรักษาสภาพน้ำยางให้มีคุณภาพที่ดีก่อนนำเข้าสู่กระบวนการผลิต ซึ่งสารเคมีที่นิยมใช้โดยทั่วไป ได้แก่ แอมโมเนีย หรือแอมโมเนียร่วมกับสารรักษาสภาพน้ำยางชนิดอื่น

2.3.1.1 การใช้แอมโมเนียในการรักษาสภาพน้ำยางสด

แอมโมเนีย เป็นสารเคมีที่นิยมใช้ในการรักษาสภาพน้ำยางสดเพื่อทำเป็นน้ำยางข้น เนื่องจากแอมโมเนียสามารถช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ทำให้ค่าปริมาณกรดไขมันระเหยง่าย (Volatile fatty acid number, VFA No.) ในน้ำยางมีค่าต่ำ และช่วยทำให้ประจุบนอนุภาคยางเป็นลบมากยิ่งขึ้น ทำให้น้ำยางมีความเสถียรเพิ่มขึ้น นอกจากนี้แอมโมเนียยังสามารถทำปฏิกิริยากับไอออนของโลหะหนักพวกแมกนีเซียมในน้ำยาง ซึ่งโดยปกติจะมีการเติมสารเคมีอีกชนิดหนึ่งคือ ไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Diammonium hydrogen phosphate, DAHP) ลงในน้ำยางสด และตั้งทิ้งไว้ 1 คืนเพื่อให้แมกนีเซียมเกิดการตกตะกอนเป็นแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟตหรือที่เรียกขี้แป้ง ซึ่งจะส่งผลให้น้ำยางมีความเสถียรเพิ่มขึ้น ดังสมการ



การใช้แอมโมเนียในการรักษาสภาพน้ำยางสดเพื่อทำเป็นน้ำยางชั้น จำเป็นต้องใส่ในปริมาณที่สูงพอที่จะไปยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียได้ โดยต้องใส่ในปริมาณมากกว่า 0.1% ขึ้นไป หากใส่ต่ำกว่า 0.5% จะมีผลทำให้อัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณแอมโมเนียเพียงเล็กน้อย ทำให้น้ำยางมีค่า pH เพิ่มขึ้นจาก 6.5 เป็นประมาณ 8 ซึ่งเป็นช่วง pH ที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย โดยในทางปฏิบัติจะใส่แอมโมเนียในน้ำยางสดปริมาณ 0.3-0.5% ซึ่งการเพิ่มปริมาณของแอมโมเนียในน้ำยาง จะมีผลทำให้การเจริญเติบโตของแบคทีเรียในน้ำยางลดลง จึงทำให้กรดที่ระเหยง่าย (VFA) ซึ่งเกิดจากแบคทีเรียย่อยสลายสารอาหารในน้ำยางมีค่าที่ต่ำด้วยเช่นกัน

2.3.1.2 การใช้แอมโมเนียร่วมกับสารเคมีชนิดอื่นในการรักษาสภาพน้ำยางสด

ถึงแม้ว่าการใช้แอมโมเนียในการรักษาสภาพน้ำยางสดจะเป็นที่นิยม เนื่องจากมีข้อดีหลายประการ แต่การใช้แอมโมเนียในการรักษาสภาพน้ำยางยังมีข้อจำกัด เนื่องจากแอมโมเนียเป็นสารที่มีฤทธิ์ยับยั้งแบคทีเรียไม่สูงนัก จึงต้องใช้เป็นปริมาณมาก เพื่อให้สามารถยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียได้สมบูรณ์และข้อจำกัดอีกประการหนึ่งของแอมโมเนีย คือ เป็นสารที่ระเหยง่าย และมีกลิ่นฉุนรุนแรง ทำให้เกิดมลภาวะทางกลิ่นในสิ่งแวดล้อม โดยแอมโมเนียจะมีการระเหยอยู่ตลอด ทำให้ปริมาณแอมโมเนียในน้ำยางไม่คงที่ ซึ่งจะส่งผลให้น้ำยางมีสมบัติไม่คงที่ด้วยเช่นกัน ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีการพัฒนาสารเคมีชนิดต่าง ๆ ขึ้นมาเพื่อใช้ทดแทนหรือใช้ร่วมกับแอมโมเนีย หรือที่เรียกว่า Secondary preservative โดยสาร Secondary preservative ที่นิยมใช้ในการรักษาสภาพน้ำยางสดร่วมกับแอมโมเนีย คือ เตตระเมทิลไทอูรัมไดซัลไฟด์หรือทีเอ็มทีดี (tetramethylthiuram disulphide, TMTD) กับซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) โดยใช้ TMTD และ ZnO ในปริมาณ 0.01% และ 0.013% ตามลำดับ ต่อน้ำหนักน้ำยางสด ร่วมกับแอมโมเนีย 0.25% อย่างไรก็ตาม เนื่องจาก TMTD ถูกระบุในภายหลังว่าเป็นสารที่อาจก่อมะเร็ง จึงอาจต้องพิจารณาสารอื่นมาทดแทนในเร็ววัน

2.3.2 การรักษาสภาพน้ำยางชั้น

แอมโมเนียเป็นสารเคมีที่สำคัญที่ใช้ในการรักษาสภาพน้ำยางชั้น การใช้แอมโมเนียเพียงอย่างเดียวในการรักษาสภาพน้ำยางชั้นจะใช้แอมโมเนียในปริมาณ 0.7% ต่อน้ำหนักน้ำยาง เรียกน้ำยางชั้นชนิดนี้ว่า High ammonia (HA) หรือใช้แอมโมเนียในปริมาณ 0.2% ต่อน้ำหนักน้ำยาง ร่วมกับสารรักษาสภาพน้ำยางชนิดอื่น ๆ ซึ่งจะเรียกน้ำยางชั้นชนิดนี้ว่า Low ammonia (LA) ดังแสดงในตารางที่ 2.4

โดยส่วนใหญ่ น้ำยางชั้นจะผลิตโดยวิธีการใช้เครื่องปั่นเหวี่ยง ซึ่งน้ำยางสดก่อนการนำไปปั่นจะมีการเติมแอมโมเนียเพื่อรักษาสภาพน้ำยางประมาณ 0.4% ต่อน้ำหนักน้ำยาง หลังจากการปั่นเหวี่ยงปริมาณแอมโมเนียจะลดลงเหลือ 0.2% ต่อน้ำหนักน้ำยาง ในกรณีที่将会ทำเป็นน้ำยางชั้นชนิด HA จะต้องเติมแอมโมเนียและปรับเป็น 0.7% ต่อน้ำหนักน้ำยาง ส่วนในกรณีที่将会ทำเป็นน้ำยางชั้นชนิด LA จะใช้ปริมาณแอมโมเนียเดิมคือ 0.2% ต่อน้ำหนักน้ำยาง และเติมสารสารรักษาสภาพน้ำยางชนิดอื่น ๆ เช่น TMTD ร่วมกับ ZnO โดยใช้ TMTD และ ZnO ในปริมาณ 0.13% และ 0.13% ตามลำดับ ต่อน้ำหนักน้ำยางชั้น จะช่วยเก็บรักษาน้ำยางชั้นไว้ได้นานขึ้น

นอกจากแอมโมเนียจะสามารถทำลายแบคทีเรีย และสามารถทำปฏิกิริยากับแมกนีเซียมไอออนแล้ว แอมโมเนียยังสามารถไฮโดรไลซิสลิปิดในน้ำยาง เกิดเป็นกรดไขมันซึ่งจะเปลี่ยนเป็นสารประกอบ Ammonium soap ที่มีสมบัติช่วยส่งเสริมสถานะของเหลวให้น้ำยาง นอกจากนี้แอมโมเนียยังเป็นสารที่ระเหยได้ง่าย และจะไม่มีสารตกค้างอยู่ในเนื้อยาง เมื่อนำยางนั้นแห้งแล้ว

อย่างไรก็ตาม แอมโมเนียก็มีข้อเสียบางประการ เช่น มีกลิ่นที่รุนแรง มีผลต่อกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์บางชนิด เช่น กระบวนการ gelation ในการทำยางฟองน้ำ จำเป็นต้องให้มีแอมโมเนียประมาณ 0.2% ต่อน้ำหนักยาง ดังนั้นในการผลิตผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดจึงต้องเลือกชนิดของน้ำยางให้มีความเหมาะสมด้วยเช่นกัน

ตารางที่ 2.4

ชนิดของน้ำยางชั้นและสารเคมีรักษาสภาพ

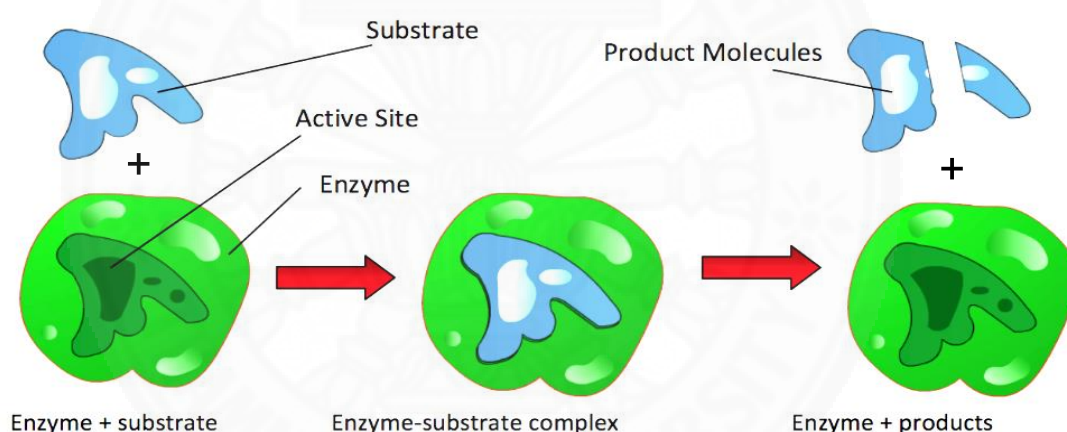
ชนิดของน้ำยาง	สารเคมีรักษาสภาพ
1) น้ำยางชั้นจากการปั่นแยก (DRC ต่ำสุด 60%)	
a) High ammonia (HA)	0.7% ammonia
b) Low ammonia-santobrite (LA-SPP)	0.2% ammonia + 0.2% sodium penta chlorophenate
c) Low ammonia-boric acid (LA-BA)	0.2% ammonia + 0.24% boric acid + 0.5% lauric acid
d) Low ammonia-zinc diethyl dithiocarbamate (LA-ZDC)	0.2% ammonia + 0.10% ZDC + 0.05% lauric acid
e) Low ammonia-tetramethyl thiuram disulphide/ zinc oxide (LA-TZ)	0.2% ammonia + 0.013% TMTD + 0.013% ZnO + 0.05% lauric acid
2) น้ำยางชั้นจากการทำครีม (DRC ต่ำสุด 60%)	
a) High ammonia (HA)	0.7% ammonia
b) Low ammonia (LA)	เช่นเดียวกับน้ำยางชั้นจากการปั่นแยก (b)-(e)
3) น้ำยางชั้นจากการระเหยน้ำ	
a) High solid (min 72% TSC)	250 milliequivalent KOH+soap
b) Low solid (about 63% TSC)	250 milliequivalent KOH+soap
c) High ammonia (about 62% TSC)	0.7% ammonia
หมายเหตุ สารเคมีที่เติม คัดสรรส่วน น้ำหนัก/น้ำหนักน้ำยางทั้งหมด	

หมายเหตุ. จาก <http://dc.oas.psu.ac.th/dcms/files/01854/Chapter2.pdf>

2.4 เอนไซม์

เอนไซม์ คือ กลุ่มของโปรตีนที่มีคุณสมบัติในการเร่งปฏิกิริยาทางชีวเคมีที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ของสิ่งมีชีวิตได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง เพื่อใช้ในการสังเคราะห์องค์ประกอบภายในเซลล์ ระบบการย่อยอาหาร ฯลฯ โดยเอนไซม์มีความจำเพาะต่อสารที่ทำปฏิกิริยาที่เรียกว่า “**ซับสเตรท**” (Substrate) และสามารถเร่งปฏิกิริยาโดยไม่ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์อื่น ตลอดทั้งเอนไซม์จะเพิ่มอัตราเร็วของปฏิกิริยาโดยลดพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาได้

การทำงานของเอนไซม์คล้ายกันกับการทำงานของกุญแจ โดยเรียกว่าทฤษฎีแม่กุญแจ และลูกกุญแจ (lock and key) นำเสนอครั้งแรกในปี 1984 โดย Emil Fischer โดยเอนไซม์จะมีบริเวณเร่งที่มีโครงสร้างเหมาะสมกับโครงสร้างโมเลกุลของซับสเตรท เหมือนกับลูกกุญแจที่มีโครงสร้างเหมาะสมกับแม่กุญแจ จึงจะไขแม่กุญแจได้พอดี ดังภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 ตัวอย่างทฤษฎีแม่กุญแจและลูกกุญแจ. ดัดแปลงจาก *Advanced Biology for You*, โดย G. Williams, N. Thornes, 2000, United kingdom: Stanley Thornes (Publishers) Ltd.

ซึ่งต่อมาได้มีการศึกษาแสดงให้เห็นว่า เอนไซม์อาจยึดกับซับสเตรทที่มีรูปร่างใกล้เคียงกันได้ เนื่องจากเอนไซม์เป็นโปรตีนซึ่งมีความยืดหยุ่น จึงสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างเพียงเล็กน้อยเพื่อให้พอดีกับรูปร่างของซับสเตรต โดยสายโซ่ด้านกรดอะมิโนของเอนไซม์สามารถเข้าไปในตำแหน่งของซับสเตรตอย่างความแม่นยำ การที่เอนไซม์เปลี่ยนรูปร่าง เอนไซม์จะส่งความเครียด (strain) ไปบนโมเลกุลของซับสเตรต และช่วยลดพลังงานกระตุ้น (activation energy)

โดยทั่วไปเอนไซม์สกัดได้จากแหล่งธรรมชาติ 3 แหล่ง คือ เนื้อเยื่อสัตว์ พืช และจุลินทรีย์ แต่เนื่องจากเอนไซม์ที่เกิดจากธรรมชาติเหล่านี้มีปริมาณไม่เพียงพอสำหรับการใช้งานในอุตสาหกรรม ในปัจจุบันจึงมีการผลิตเอนไซม์ด้วยเทคนิคการหมักในภาชนะปิด โดยการแยกจุลินทรีย์

ที่ผลิตเอนไซม์ที่ต้องการมาเลี้ยงในสภาวะที่มีการเจริญเติบโตที่ดีที่สุด ซึ่งทำให้ได้เอนไซม์ตามปริมาณที่ต้องการ โดยการหมักที่สมบูรณ์หนึ่งครั้งสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กจำนวนมากจะถูกทำลาย ส่วนเอนไซม์จะถูกแยกออกและนำไปใช้ในกระบวนการต่อไป

2.4.1 การทำงานของเอนไซม์

กลไกพื้นฐานในการเร่งปฏิกิริยาชีวเคมีของเอนไซม์ เริ่มจากเอนไซม์จะเข้าทำปฏิกิริยากับซับสเตรตในตำแหน่งที่เฉพาะเจาะจง ซึ่งเรียกว่า บริเวณเร่ง (active site) ทำให้ซับสเตรตแปรสภาพไป โดยมีการสลายหรือสร้างพันธะของซับสเตรตขึ้นใหม่เกิดผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาเคมี จนกลายเป็นเอนไซม์-ซับสเตรตคอมเพล็กซ์ (Enzyme-substrate complex) ซึ่งการรวมตัวของเอนไซม์และซับสเตรตจะไม่เกิดหากรูปร่างหรือตำแหน่งของเอนไซม์หรือซับสเตรตที่บริเวณเร่งเปลี่ยนไป เปรียบได้กับแม่กุญแจกับลูกกุญแจ (lock and key model) โดยหลังจากการทำปฏิกิริยาระหว่างเอนไซม์และซับสเตรต ผลิตภัณฑ์จะถูกปล่อยออกมาจากผิวของเอนไซม์ เพื่อให้เอนไซม์กลับไปอยู่ในรูปเดิมที่สามารถรวมตัวกับสารโมเลกุลอื่นได้อีก

2.4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของเอนไซม์

1. อุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น การเร่งของเอนไซม์จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงจุดสูงสุดหนึ่ง (temperature optimum) แล้วจะลดลง ซึ่งจำเพาะตามชนิดของเอนไซม์ ส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 25-40 องศาเซลเซียส แต่ที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดนี้มาก ๆ เอนไซม์จะเกิดการเสียสภาพโครงสร้าง ทำให้เข้าร่วมกับซับสเตรตไม่ได้

2. ค่า pH จุดที่ทำให้เอนไซม์มีการเร่งสูงสุด เรียกว่า pH optimum ซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในช่วง pH 6-7.5 แต่เอนไซม์หลายชนิดจะทำงานได้ดีในสภาพความเป็นกรดเบสแตกต่างกันออกไป เช่น ไลเปสทำงานได้ดีที่สุดที่ค่า pH 7, เพปซินที่ pH 1.5-2.5, ทริปซินที่ pH 8-11 เป็นต้น

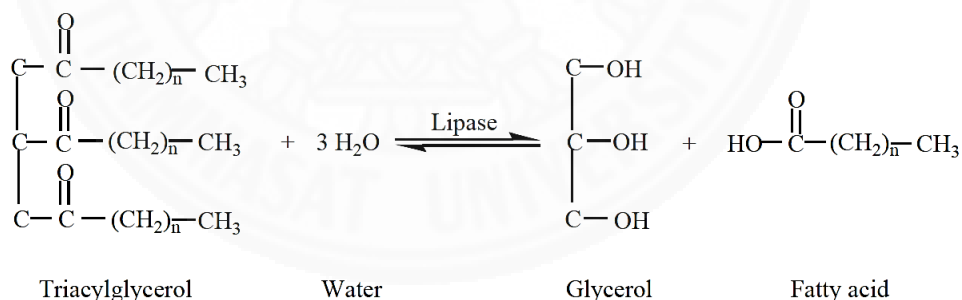
3. ความเข้มข้นของเอนไซม์ ที่ความเข้มข้นของซับสเตรตมากเกินไป (excess) อัตราเร็วของปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของเอนไซม์เพิ่มขึ้น

4. ความเข้มข้นของซับสเตรต เมื่อความเข้มข้นของเอนไซม์คงที่ ที่ความเข้มข้นของซับสเตรตน้อย ๆ ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นด้วยอัตราเร็วมากจนกระทั่งถึงความเข้มข้นของซับสเตรตจุดหนึ่งที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาจะคงที่ ความเร็วของปฏิกิริยาที่สูงสุด เรียกว่า ความเร็วสูงสุด (V_{max})

2.4.3 เอนไซม์ไลเปส

เอนไซม์ไลเปส (lipases) หรือ triacylglycerol acylhydrolases (E.C. 3.1.1.3) จัดอยู่ในกลุ่มเอนไซม์ไฮโดรเลส (hydrolase) ซึ่งเป็นเอนไซม์ชนิดหนึ่งช่วยในการไฮโดรไลซิส (hydrolysis) หรือก่อตัว (formation) ของไขมัน ในกลุ่มของเอนไซม์ไลเปสสามารถจำแนกย่อยได้ตามการทำงาน เช่น ฟอสโฟไลเปส ไลโซฟอสโฟไลเปส โคเลสเตอรอลเอสเทอเรส คิวทีเนส อะมิเดส และเอสเทอเรสอื่นๆ โดยทั่วไปไลเปสมีการเลือกความชอบในซับสเตรต ไม่ว่าจะเป็นไตรกลีเซอไรด์ และไดกลีเซอไรด์ ดังนั้นจึงได้ผลิตภัณฑ์เป็นไดกลีเซอไรด์และมอนอกลิเซอไรด์ด้วย

ไลเปสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของสารจำพวก long chain triacylglyceride ที่ผิวระหว่างเฟสน้ำและสารอินทรีย์ ปฏิกิริยาสามารถผันกลับได้ นอกจากนี้ยังเป็นตัวเร่งของปฏิกิริยา ester synthesis และ transesterification ในกรณีที่มีความเข้มข้นของน้ำต่ำ ไลเปสสามารถเป็นตัวเร่งในสารที่คล้าย ๆ กันได้ เช่น ไตรกลีเซอไรด์ ฟอสโฟไลปิด กาแลคโทไลปิด คิวทิน แวกซ์ เอสเทอร์สายสั้นและสเตียรอยด์ ซึ่งใช้หลากหลายในอุตสาหกรรม เช่น เอสเทอร์สายสั้นและปานกลางของกรดคาร์บอกซิลิกและส่วนหนึ่งของแอลกอฮอล์ (alcohol moieties) มีความสำคัญในอุตสาหกรรมอาหาร ด้านส่วนผสมของกลิ่นต่าง ๆ ในทางตรงกันข้าม เมทิลและเอทิลเอสเทอร์ของกรดคาร์บอกซิลิกสายยาวใช้ในอุตสาหกรรมน้ำมันดีเซลและเอสเทอร์สายยาวของกรดคาร์บอกซิลิกและบางส่วนของแอลกอฮอล์ (รวมถึงแวกซ์) ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมน้ำมันหล่อลื่น และสารเติมแต่งในเครื่องสำอางค์ และยา เป็นต้น กระบวนการไฮโดรไลซิสและสังเคราะห์ของไลเปสแสดงดังภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.11 กระบวนการไฮโดรไลซิสและสังเคราะห์ของไลเปส จาก *New Lipases and Proteases* โดย A. B. Salleh, N. Z. Rahman, M. Basri, 2006, New York: Nova Science Publishers Inc.

ไลเปสเป็นเอนไซม์ที่จำเป็นต่อสิ่งมีชีวิต ดังนั้นจึงพบได้ทั้งในสัตว์ พืช และจุลินทรีย์ ในสัตว์จะพบไลเปสได้ในตับอ่อนและน้ำนม ส่วนในพืชจะพบไลเปสได้ในเนื้อเยื่อที่มีการสะสมพลังงาน เช่น ในเมล็ดพืชที่กำลังงอก แหล่งของเอนไซม์ไลเปสส่วนใหญ่มาจากจุลินทรีย์ เนื่องจากไลเปสจากภายนอกเซลล์จุลินทรีย์ (Microbial extracellular) มีความเสถียรทางความร้อน (thermostable) มากกว่าไลเปสจากสัตว์และพืช ไลเปสจากแบคทีเรียที่ชอบอุณหภูมิสูง

(thermophiles) เป็นไลเปสที่มีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมเนื่องจากมีความเสถียรทางความร้อน และทนต่อการเสียสภาพทางเคมี อย่างไรก็ตาม ไลเปสที่ใช้หลักๆ คือ ไลเปสที่ได้จากแบคทีเรียพวก ชอบความร้อนปานกลาง (mesophilic) มีอุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 35-40 องศาเซลเซียส ตัวอย่างของ จุลินทรีย์ที่ผลิตไลเปส เช่น *Geobacillus* sp. T1, *Bacillus* sp. RSJ-1, *Bacillus thermocatenulatus*, *Pseudomonas cepacia* เป็นต้น (Salleh, Rahman, & Basri, 2006) โดยสภาวะความเป็นกรด-เบสที่เหมาะสม สำหรับไลเปสส่วนใหญ่อยู่ระหว่าง 7-9 อย่างไรก็ตาม เอนไซม์ ไลเปสยังทำงานได้แม้จะอยู่ในสภาวะ กรดหรือเบสมากกว่านี้ โดยอยู่ในช่วง 4-10 เช่น ไลเปสจากสปีชีส์ *Pseudomonas* มีค่าความเป็น กรด-เบสที่เหมาะสมคือ 8.5 ส่วนไลเปสเชื้อรา *Aspergillus niger* และ *Rhizopus delemar* เหมาะสมในช่วงที่เป็นกรด เป็นต้น

2.5 กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์จากน้ำยางชั้น

น้ำยางชั้นเป็นวัตถุดิบหลักที่สำคัญในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางหลายประเภท โดย กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์จากน้ำยางชั้นนั้นมีหลายแบบ ขึ้นอยู่กับประเภทของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ ผลิต เช่น กระบวนการจุ่มขึ้นรูป (Dipping Process) กระบวนการผลิตยางยืด (Threading Process) กระบวนการหล่อเข้าพิมพ์ (Casting Process) และกระบวนการผลิตยางฟองน้ำ (Foaming Process) เป็นต้น โดยในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะกระบวนการจุ่มขึ้นรูปและกระบวนการผลิตยางฟองน้ำ

2.5.1 กระบวนการจุ่มขึ้นรูป (Dipping Process)

กระบวนการจุ่มขึ้นรูปมีหลักการสำคัญ คือ การจุ่มแบบพิมพ์ (Former) ลงใน น้ำยางคอมพาวด์ (compound latex) ที่ประกอบด้วย น้ำยางชั้นและสารเคมีต่าง ๆ จนเกิดการ พอร์ม เจลบาง ๆ บนผิวแบบพิมพ์ แล้วจึงยกแบบพิมพ์ออกโดยพยายามให้น้ำยางเคลือบแบบพิมพ์ อย่างสม่ำเสมอ และนำไปอบให้ยางคงรูป จากนั้นนำไปล้างสารเคมีที่อาจตกค้างในน้ำยางและถอด ออกจากแบบพิมพ์ ผลิตภัณฑ์ยางที่ผลิตโดยกระบวนการจุ่มขึ้นรูปมีหลายชนิด เช่น ถังมือยาง ลูกโป่ง และถ่วงยางอนามัย เป็นต้น

2.5.1.1 วิธีการจุ่มขึ้นรูป

วิธีการจุ่มขึ้นรูปสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 วิธีใหญ่ๆ คือ

(1) **วิธีการจุ่มโดยตรง (Straight dipping)** วิธีการจุ่มโดยตรงทำโดยจุ่มแบบพิมพ์ที่แห้งและสะอาดลงในน้ำยางผสมสารเคมี แล้วค่อยๆนำแบบพิมพ์ขึ้นมาช้า ๆ การเคลื่อนแบบพิมพ์ต้องทำให้นิ่งเพื่อให้ได้แผ่นฟิล์มยางที่เรียบ นำไปทำให้แห้งและทำให้ยางสุกต่อไป ถ้าต้องการทำให้ฟิล์มหนาขึ้น จะต้องทำให้ยางชั้นแรกแห้งเพียงบางส่วน แล้วจุ่มแบบพิมพ์ลงในน้ำยางผสมสารเคมีอีกครั้งหนึ่ง โดยฟิล์มยางที่ได้จากการจุ่มแต่ละครั้งจะมีความหนาประมาณ 0.01-0.07 มิลลิเมตร โดยความหนาของฟิล์มยางจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ ความเข้มข้นของน้ำยาง ความเร็วในการดึงแบบพิมพ์ขึ้นจากน้ำยาง ความหนืดของน้ำยาง อุณหภูมิของน้ำยางและแบบพิมพ์ ความสามารถเกาะแบบพิมพ์ของน้ำยาง และจำนวนครั้งในการจุ่มแบบพิมพ์

(2) **วิธีการจุ่มโดยใช้สารจับตัว (Coagulant dipping)** วิธีการจุ่มโดยใช้สารจับตัวทำโดยจุ่มแบบพิมพ์ที่สะอาดลงในสารละลายของสารช่วยให้ยางจับแบบพิมพ์ ทำให้แห้งหมาดๆ แล้วจึงจุ่มลงในน้ำยางผสมสารเคมี ทิ้งไว้ตามเวลาที่กำหนดแล้วค่อยๆ นำแบบพิมพ์ขึ้นทำให้ฟิล์มยางแห้งและทำให้ยางสุกต่อไป สารช่วยให้ยางจับแบบพิมพ์ที่นิยมใช้คือ สารละลายของเกลือแคลเซียม เช่น แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) แคลเซียมไนเตรต ($\text{Ca(NO}_3)_2$) เป็นต้น โดยความหนาของฟิล์มยางขึ้นอยู่กับจำนวนครั้งในการจุ่ม ชนิด และความเข้มข้นของสารช่วยให้ยางจับแม่แบบ เวลาในการจุ่มและปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำยางผสมสารเคมี

(3) **วิธีการจุ่มโดยใช้ความร้อน (Heat sensitive dipping)** การจุ่มวิธีนี้ต้องทำให้แบบพิมพ์ร้อนประมาณ 50 – 80 °C แล้วจึงจุ่มแบบพิมพ์ลงในน้ำยางผสมสารเคมีที่เติมสารช่วยให้ยางไวต่อความร้อนแล้ว ทิ้งไว้ช่วงเวลาหนึ่งจึงนำแบบพิมพ์ขึ้น แล้วทำให้ฟิล์มยางแห้งและทำให้ยางสุกต่อไป สารช่วยให้ยางไวต่อความร้อนที่นิยมใช้ได้แก่ Polyvinyl methyl ether เป็นต้น โดยความหนาของฟิล์มยางขึ้นกับคุณสมบัติของน้ำยางผสม อุณหภูมิ ความจุความร้อนของแม่แบบ และเวลาในการจุ่ม วิธีนี้เหมาะกับผลิตภัณฑ์ที่มีความหนามาก

2.5.1.2 ขั้นตอนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์โดยการจุ่มน้ำยาง

1. การเตรียมน้ำยางคอมปาวด์ น้ำยางคอมปาวด์เตรียมได้โดยการผสมน้ำยางข้น (Concentrated natural rubber latex) กับสารเคมีในรูปของเหลวตามสูตรที่ต้องการ โดยสารเคมีที่ใช้ผสมกับน้ำยาง ได้แก่ สารเพิ่มความเสถียรให้กับน้ำยาง (Stabilizer) สารทำให้ยางเกิดปฏิกิริยาคงรูป (Vulcanizing agent) สารกระตุ้นปฏิกิริยา (Accelerator agent) และสารตัวเติม (Filler) ซึ่งสูตรเคมีจะมีความแตกต่างไปตามแต่ละผลิตภัณฑ์ เช่น ตัวอย่างสูตรเคมีสำหรับถุงมือยางจะประกอบด้วยสารเคมีต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.5 เป็นต้น จากนั้นน้ำยางข้นที่ผสมกับสารเคมีต่าง ๆ ได้ดีแล้วจะถูกบ่มไว้อย่างน้อย 24 ชั่วโมง และตรวจสอบคุณภาพของน้ำยางโดยการวัดระดับการคงรูปของน้ำยางก่อนนำไปขึ้นรูปต่อไป

ตารางที่ 2.5

ตัวอย่างสูตรเคมี สำหรับอุตสาหกรรมจุ่ม (ถุงมือยางธรรมชาติ ถุงมือแพทย์)

ชื่อสารเคมี	น้ำหนักแห้ง (phr : ส่วนในร้อยของน้ำหนักยางแห้ง)
60% น้ำยางข้น	100
10% สารละลายโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์	0.3
20% สารละลายโปแตสเซียมลอลเลต	0.2
50% ดิสเพสชั่นซิลเฟอร์	0.5
50% ดิสเพสชั่น ZDC	0.75
40% ดิสเพสชั่น SDBE	0.5
50% ดิสเพสชั่น Wingstay L	0.75
50% ดิสเพสชั่นซิงค์ออกไซด์	0.4

หมายเหตุ. จาก รายงานการศึกษาเชิงลึก เรื่อง อนาคตถุงมือยางไทยในตลาดโลก (น.11), โดยสถาบันพลาสติก.

2. การเตรียมแบบ การเตรียมแบบพิมพ์สำหรับจุ่มขึ้นรูปน้ำยางทำได้โดยล้างแบบพิมพ์ให้สะอาด ไม่มีฝุ่นเกาะ จากนั้นนำแบบพิมพ์มาอบให้แห้ง ก่อนนำไปจุ่มสารช่วยจับตัวน้ำยางเพื่อขึ้นรูปต่อไป

3. การจุ่มแบบพิมพ์ในน้ำยาง การจุ่มแบบพิมพ์ในน้ำยางจะทำการจุ่มแบบพิมพ์ลงในน้ำยางและยกแบบพิมพ์ขึ้นจากน้ำยางด้วยอัตราเร็วที่สม่ำเสมอเพื่อลดการเกิดฟองในน้ำยาง ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดรูร้าวกับผลิตภัณฑ์ โดยอัตราเร็วของการจุ่มแบบพิมพ์และการเคลื่อนของแบบพิมพ์ในน้ำยางนอกจากจะมีผลต่อการเกิดฟองอากาศในน้ำยางแล้ว ยังมีผลต่อความหนาของฟิล์มยางที่เกาะบนแบบพิมพ์อีกด้วย

4. การม้วนขอบ การชะล้างและการอบแห้ง ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางแบบจุ่ม เช่น ถุงมือและลูกโป่ง จะมีการม้วนขอบของฟิล์มยางภายหลังจากการยกแบบพิมพ์ออกจากน้ำยางเพื่อเพิ่มความแข็งแรงของขอบขณะใช้งาน โดยการม้วนขอบฟิล์มยางที่ขึ้นรูปแล้วทำโดยใช้ลูกกลิ้งที่เป็นแปรงหรือยางที่ไม่แข็งมากนัก หมุนม้วนด้านเปิดของฟิล์มยางขณะที่ยังอยู่บนพิมพ์ การม้วนขอบจะทำให้ยางเพ่งจับเป็นเจลบนพิมพ์แห้งพอควรและยังไม่คงรูปจะทำให้ได้ขอบที่ม้วนติดกันดีเพราะยางมีความเหนียว จากนั้นผลิตภัณฑ์ยางที่ได้จะถูกนำไปชะล้างด้วยน้ำอุ่นอุณหภูมิ 60-80 °C เพื่อกำจัดสารเคมีต่าง ๆ ได้แก่ สารที่ละลายน้ำได้ที่มีอยู่ในน้ำยาง สารช่วยน้ำยางจับตัวที่ตกค้างและสารที่ละลายน้ำได้ที่มีอยู่ในสูตรน้ำยางคอมปาวด์ สำหรับผลิตภัณฑ์ยางที่ขึ้นรูปโดยใช้วิธีจุ่มโดยตรงจะทำการชะล้างหลังจากการอบแห้ง ส่วนผลิตภัณฑ์ยางที่ขึ้นรูปโดยใช้สารช่วยจับตัวน้ำยางสามารถทำการชะล้างในช่วงที่ยางเกาะแบบยังอยู่ในสถานะเจลเปียก (wet gel) หรือเจลแห้งบางส่วน (partially-dried gel) หรือเจลแห้งอย่างสมบูรณ์ (completely-dried gel) (วรารณ ขจรไชยกุล, 2559) ฟิล์มยางที่ถูกชะล้างแล้วจะถูกทำให้แห้งและสุกในตู้อบลมร้อน โดยฟิล์มยางจะถูกทำให้แห้งบางส่วนบนแม่แบบที่อุณหภูมิค่อนข้างต่ำ ประมาณ 80 – 90 °C แล้วจึงนำไปอบให้ยางสุกที่อุณหภูมิสูงกว่า 100 °C เพื่อป้องกันปัญหาการพองหรือเกิดฟองอากาศที่ยางได้

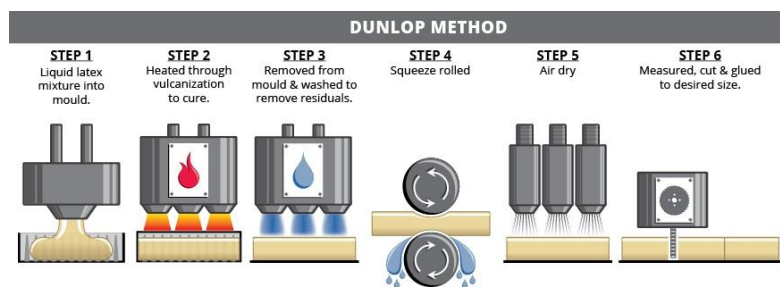
2.5.2 กระบวนการผลิตยางฟองน้ำ (Foaming Process)

ยางฟองน้ำเป็นผลิตภัณฑ์ที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติ มีลักษณะเป็นรูพรุน ผิวหน้าระบายอากาศออกได้และสามารถกดหรือบิดได้โดยไม่เสียรูปร่าง จึงนิยมใช้ผลิตเป็นสิ่งของเพื่อรองรับน้ำหนัก เช่น หมอนหรือที่นอน เป็นต้น โดยหลักการสำคัญของการผลิตยางฟองน้ำ คือ การทำให้น้ำยางเกิดฟองเป็นฟองอากาศหรือฟองของก๊าซต่าง ๆ แล้วคงรูปหรือวัลคาไนซ์ฟองยางด้วยสารเคมีและความร้อน จากนั้นจึงนำไปล้าง อบแห้ง และตกแต่งในขั้นสุดท้ายต่อไป

เทคโนโลยีการผลิตยางฟองน้ำจากยางธรรมชาติมีหลายวิธี แต่วิธีที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมมี 2 วิธีหลักๆ ได้แก่ เทคโนโลยีการผลิตแบบดันลอป (Dunlop process) และเทคโนโลยีการผลิตแบบทาลาเลย์ (Talalay process)

1. เทคโนโลยีการผลิตแบบดันลอป (Dunlop process) เทคโนโลยีการผลิตยางฟองน้ำแบบดันลอป เป็นกระบวนการผลิตยางฟองน้ำจากน้ำยางธรรมชาติโดยอาศัยหลักการที่ให้น้ำยางให้เกิดฟองอากาศ และใช้สารก่อเจลอย่างช้า (delayed-action gelling agent) ที่มีชื่อว่า sodium silicofluoride ในการทำให้ฟองเซตตัว ก่อนนำไปอบวัลคาไนซ์ โดยขั้นตอนของเทคโนโลยีการผลิตแบบดันลอป ดังแสดงในภาพ 2.12 ประกอบด้วย

- (1) เติมสารช่วยการเกิดฟอง (foaming agent) ลงในน้ำยางคอมพาวด์เพื่อให้เกิดฟอง
- (2) จากนั้นเติมสารก่อเจลลงไปอย่างช้า ๆ
- (3) เทโฟมยางขณะที่ยังเหลวลงในแม่พิมพ์ที่ต้องการและปล่อยให้โฟมยางจับตัวที่อุณหภูมิห้อง (STEP 1)
- (4) วัลคาไนซ์เจลโฟมยางที่ได้เพื่อให้โฟมเกิดการคงรูป (STEP 2)
- (5) จากนั้นดึงโฟมยางออกจากแม่พิมพ์ ล้าง บิดให้หมาดและนำไปอบให้แห้ง (STEP 3-5)
- (6) นำโฟมยางที่แห้งไปตัดตามขนาดที่ต้องการ (STEP 6)



ภาพที่ 2.12 ขั้นตอนการผลิตยางฟองน้ำแบบดันลอป. (ภาพจาก <https://sleepacademy.org> สืบค้นเมื่อ 25 สิงหาคม 2562)

ตารางที่ 2.6

ข้อดีและข้อเสียของเทคโนโลยีการผลิตยางฟองน้ำแบบดันลอป

ข้อดี	ข้อเสีย
1. โฟมยางมีความหนาแน่นต่ำไปถึงสูง 2. สามารถควบคุมความนุ่ม-แข็งของโฟมยางได้ด้วยการควบคุมระดับการตีฟอง 3. ต้นทุนต่ำกว่าแบบทาลาเลย์ 4. รอบของการผลิตผลิตภัณฑ์สั้นกว่า จึงผลิตได้เร็วกว่าแบบทาลาเลย์	1. ขนาดของรูพรุนที่แตกต่างกัน ทำให้ความนุ่มของโฟมยางไม่สม่ำเสมอตลอดความหนาของโฟมยาง 2. โฟมยางมีความหนาแน่นสูงทำให้แข็งและน้ำหนักของผลิตภัณฑ์เพิ่มมากขึ้น

หมายเหตุ. จาก เทคโนโลยีการผลิตและทดสอบโฟมยางจากน้ำยางธรรมชาติ, โดย ชินรัตน์ ลาภพลธนอนันต์, 2558.

2. เทคโนโลยีการผลิตแบบทาลาเลย์ (Talalay process) เทคโนโลยีการผลิตยางฟองน้ำแบบทาลาเลย์ พัฒนามาจากกระบวนการดันลอป โดยอาศัยหลักการดูดสุญญากาศให้เต็มแม่พิมพ์ ทำให้ฟองยางเซ็ดตัวที่อุณหภูมิต่ำและเติมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปในฟองน้ำยางก่อนนำไปอบวัลคาไนซ์ โดยขั้นตอนของเทคโนโลยีการผลิตแบบทาลาเลย์ ดังแสดงในภาพ 2.13 ประกอบด้วย

- (1) ทำให้น้ำยางคอมพาวด์เกิดฟองแล้วเทใส่เบ้า (STEP 1)
- (2) ปิดเบ้าด้วยระบบสุญญากาศเพื่อให้ฟองเกิดขยายตัวหรือไหลได้เต็มเบ้า

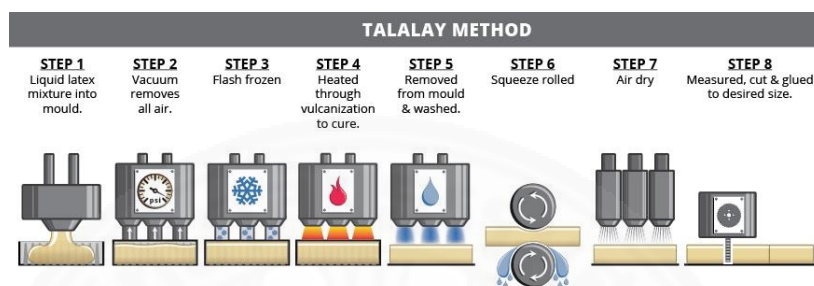
(STEP 2)

(3) นำไปแช่แข็งที่อุณหภูมิประมาณ -30°C ก่อนที่จะใส่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปเพื่อให้โฟมยางเกิดเจลและคงรูป (STEP 3)

(4) นำไปอบที่อุณหภูมิ $100-120^{\circ}\text{C}$ (STEP 4)

(5) จากนั้นจึงนำมาล้างและอบให้แห้ง (STEP 5-7)

(6) นำโฟมยางที่แห้งไปตัดตามขนาดที่ต้องการ (STEP 8)



ภาพที่ 2.13 ขั้นตอนการผลิตยางพองน้ำแบบทาลาเลย์. (ภาพจาก <https://sleepacademy.org> สืบค้นเมื่อ 25 สิงหาคม 2562)

ตารางที่ 2.7

ข้อดีและข้อเสียของเทคโนโลยีการผลิตยางพองน้ำแบบทาลาเลย์

ข้อดี	ข้อเสีย
1. โฟมยางมีความหนาแน่นต่ำ 2. ขนาดของรูพรุนมีความสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นโฟมยาง ทำให้มีความนุ่มสม่ำเสมอตลอดชิ้นและนุ่มกว่าโฟมยางที่ได้จากกระบวนการดันลอป	1. ไม่สามารถทำให้โฟมยางมีความหนาแน่นสูงได้แบบดันลอป 2. ต้นทุนสูงกว่าแบบดันลอป 3. สิ้นเปลืองพลังงานมากกว่าแบบดันลอปประมาณ 5 เท่า (ทำให้เป็นสัญญาณการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์สูง) 4. การใช้คาร์บอนไดออกไซด์ในการทำให้พองยางแข็งตัวมีผลกระทบต่อสภาวะโลกร้อน 5. รอบของการผลิตผลิตภัณฑ์นานกว่าแบบดันลอปประมาณ 4 เท่า

หมายเหตุ. จาก เทคโนโลยีการผลิตและทดสอบโฟมยางจากน้ำยางธรรมชาติ, โดย ชินรัตน์ ลาภพูลธนอนันต์, 2558.

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษางานวิจัยต่าง ๆ พบว่ามีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อความเสถียรเชิงกลของน้ำยาง โดยจากงานวิจัยของ Pendle และคณะ (1978) ที่ได้ทำการศึกษาความเสถียรเชิงกลของน้ำยาง พบว่าปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความเสถียรเชิงกลของน้ำยางคือความแข็งแรงของพันธะไอออนิกในเฟสน้ำของน้ำยาง ซึ่งเมื่อความแข็งแรงของพันธะไอออนิกเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้ความเสถียรเชิงกลของน้ำยางลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าประจุลบที่ถูกดูดซับบนผิวอนุภาคยางส่งผลต่อความเสถียรเชิงกลของน้ำยางด้วยเช่นกัน ต่อมา Chen และ Ng (1984) ได้ศึกษาผลของสบูกรดไขมันโซยาวในน้ำยางชั้นที่รักษาสภาพด้วยแอมโมเนียต่อความเสถียรเชิงกลของน้ำยางชั้น ซึ่งจากการศึกษาพบว่า สบูกรดไขมันโซยาวในน้ำยางชั้นเกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของลิปิดที่อยู่ผิวอนุภาคยาง โดยปริมาณสบูกรดไขมันโซยาวในน้ำยางชั้นจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วใน 1 ถึง 2 สัปดาห์แรก และจะมีค่าคงที่ใน 3 ถึง 6 สัปดาห์ ซึ่งสบูกรดไขมันโซยาวในน้ำยางชั้นมากกว่า 92% จะถูกดูดซับบนผิวอนุภาคยางทำให้เกิดประจุลบบนผิวอนุภาคยางเพิ่มมากขึ้นและส่งผลทำให้ความเสถียรเชิงกลของน้ำยางชั้นมีค่าเพิ่มขึ้น

ต่อมา Karunanayake และ Perera (2006) ได้ทำการศึกษาผลของแมกนีเซียมไอออนและฟอสเฟตไอออนต่อความเสถียรของน้ำยางชั้นและผลิตภัณฑ์ยางที่ได้จากการจุ่ม โดยศึกษาผลของปริมาณแมกนีเซียมไอออนและฟอสเฟตไอออน ต่อคุณสมบัติของน้ำยางชั้น ได้แก่ ความเสถียรเชิงกล, ปริมาณกรดไขมันระเหยได้, ความเสถียรทางเคมี และคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ยางที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการจุ่ม ซึ่งจากการศึกษาพบว่าปริมาณแมกนีเซียมไอออนและฟอสเฟตไอออน ที่มากเกินไปส่งผลต่อความเสถียรของน้ำยางในระหว่างการจัดเก็บและกระบวนการผลิต โดยการเติมฟอสเฟตไอออนปริมาณ 30 ppm ทำให้น้ำยางชั้นมีคุณสมบัติที่ดีที่สุด และผลิตภัณฑ์ยางที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการจุ่มยังมีคุณสมบัติที่ดีด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ได้มีงานวิจัยของ Sansatsadeekul และคณะ (2011) ซึ่งได้ทำการศึกษาลักษณะองค์ประกอบต่าง ๆ ที่อยู่บริเวณผิวอนุภาคยางและบทบาทในการช่วยให้อนุภาคยางแขวนลอยอยู่ในน้ำได้แบบคอลลอยด์ โดยเมื่อแยกส่วนที่เป็นครีมและซีรัมโดยใช้ SDS–polyacrylamide gel electrophoresis แล้วนำมาเปรียบเทียบปริมาณโปรตีนในส่วนที่เป็นครีมและซีรัมพบว่า ปริมาณโปรตีนที่กระจายตัวอยู่ในซีรัมมีปริมาณใกล้เคียงกับที่อยู่บนผิวอนุภาคยาง และเมื่อทำการแยกฟอสโฟลิปิดออกจากน้ำยางโดยการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ แล้วนำมาวิเคราะห์โดยใช้ $^1\text{H-NMR}$ spectroscopy พบว่ามีหมู่ฟังก์ชันที่แสดงให้เห็นว่าฟอสโฟลิปิดอยู่ในสายโซ่ของยาง นอกจากนี้เมื่อนำน้ำยางก่อนและหลังการกำจัดโปรตีนและฟอสโฟลิปิดมาวิเคราะห์ด้วยค่าศักย์ซีต้า เพื่อศึกษาพฤติกรรมความเป็นคอลลอยด์พบว่า ค่าศักย์ซีต้าของอนุภาคยางมีค่าต่ำสุดที่ pH เท่ากับ 10 แสดงให้เห็นว่าอนุภาคยางมีค่าความเสถียรมากที่สุด

จากงานวิจัยในข้างต้นพบว่า ความเสถียรของน้ำยางจะขึ้นอยู่กับประจุที่อยู่ในอนุภาคยาง โดยประจุบนอนุภาคนั้นมาจากโปรตีนและกรดไขมันโซยาวที่มีอยู่ในน้ำยาง โดยโปรตีนที่ถูกดูดซับอยู่บริเวณรอบ ๆ อนุภาคนั้นจะมีประจุลบ ซึ่งช่วยรักษาความเสถียรของคอลลอยด์ในน้ำยาง ส่วนกรดไขมันโซยาวในน้ำยางชั้น เกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของลิพิดที่อยู่ในผิวอนุภาคนั้นและจะถูกดูดซับบนผิวอนุภาคนั้น ทำให้ประจุลบบนผิวอนุภาคนั้นเพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลทำให้ความเสถียรเชิงกลของน้ำยางชั้นมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าแร่ธาตุต่าง ๆ ที่มีอยู่ในน้ำยาง เช่น แมกนีเซียม และฟอสฟอรัส มีผลต่อความเสถียรของน้ำยางด้วยเช่นกัน

นอกจากงานวิจัยต่าง ๆ ที่ได้ศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อความเสถียรของน้ำยาง ยังได้มีงานวิจัยอื่น ๆ ซึ่งได้ศึกษาการเพิ่มความเสถียรของน้ำยางโดยใช้วิธีการต่าง ๆ โดยงานวิจัยของ Davies และ Pendle (1992) ที่ได้ทำการศึกษาการเร่งความเสถียรของน้ำยางชั้นโดยใช้ความร้อนพบว่าเมื่อให้ความร้อนแก่น้ำยางชั้นที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 30 นาที ทำให้ความเสถียรเชิงกลมีค่าเพิ่มขึ้นมากที่สุด เมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิอื่น ๆ โดยการเพิ่มขึ้นของค่าความเสถียรเชิงกลไม่ได้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงประจุที่ดูดซับบนผิวอนุภาคและประจุที่อยู่ในซีรัม แต่คาดว่าเกิดจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของชั้นผิวดูดซับของอนุภาคนั้น และจากงานวิจัยของ บุญธรรม นิธิอุทัย และคณะ (1995) ได้ทำการศึกษาการเพิ่มความเสถียรเชิงกลของน้ำยางชั้นชนิดเก็บรักษาด้วยแอมโมเนียต่ำ (LA-TZ) และน้ำยางชั้นชนิดเก็บรักษาด้วยแอมโมเนียสูง (HA) และศึกษาการเติมสบู่คาร์บอกซิเลตชนิดต่าง ๆ และสบู่จากน้ำมันพืช 4 ชนิด ได้แก่ น้ำมันละหุ่ง น้ำมันมะพร้าว น้ำมันปาล์ม และน้ำมันมะกอก ลงในน้ำยางชั้นชนิด LA-TZ ซึ่งจากการทดลองพบว่า ค่า MST ของน้ำยางชั้นชนิด HA เพิ่มขึ้นเร็วกว่าน้ำยางชั้นชนิด LA-TZ โดยค่า MST ของน้ำยางชั้นชนิด HA จะมีค่าเกิน 650 วินาที เมื่อบ่มเป็นระยะเวลา 60 วัน ในขณะที่น้ำยางชั้นชนิด LA-TZ ยังมีค่า MST ที่ต่ำกว่าค่ามาตรฐานมากที่ระยะเวลาบ่มเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องจากฟอสโฟลิพิดสามารถสลายตัวได้ดีกว่าในสภาวะที่เป็นด่างมากขึ้น โดยจากการเติมสบู่คาร์บอกซิเลตชนิดต่าง ๆ ลงในน้ำยางชั้น พบว่า สบู่ลดช่วยเพิ่มความเสถียรเชิงกลให้กับน้ำยางชั้นได้ดีที่สุดในกลุ่มสบู่คาร์บอกซิเลตที่อิมัลชัน โดยทำให้ค่า MST ของน้ำยางชั้นเพิ่มจาก 87 วินาที เป็น 834 วินาที ภายใน 70 วัน เนื่องจากสบู่ลดมีขนาดโมเลกุลพอดีที่จะเกาะผิวอนุภาคนั้นได้ง่าย และเป็นตัวแทรกให้สารที่ห่อหุ้มอนุภาคนั้นกระจายตัว ทำให้ความเสถียรเชิงกลของน้ำยางชั้นเพิ่มขึ้น และจากการเติมสบู่จากน้ำมันพืช 4 ชนิด พบว่า น้ำมันละหุ่งช่วยเพิ่มความเสถียรเชิงกลให้กับน้ำยางชั้นได้ดีที่สุด โดยทำให้ค่า MST ของน้ำยางชั้นเพิ่มจาก 87 วินาที เป็น 1,193 วินาที ภายใน 70 วัน ซึ่งจากการวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลของน้ำมันละหุ่ง พบว่ามีอนุกรม -OH อยู่ในโมเลกุล ซึ่งอาจเป็นตัวเสริมที่ช่วยดูดโมเลกุลน้ำ ทำให้ค่า MST ของน้ำยางเพิ่มมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับสบู่จากน้ำมันพืชชนิดอื่น

ต่อมา Tanaka และคณะ (1997) ได้ศึกษาการเพิ่มความเสถียรให้กับน้ำยางธรรมชาติที่มีการกำจัดโปรตีนออก โดยการเติมสารเพิ่มความเสถียรในกลุ่มสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ สารลดแรงตึงผิวชนิดที่มีประจุบวกและประจุลบ สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ โอลิโกเมอร์หรือพอลิเมอร์ชนิดไม่มีประจุหรือมีทั้งประจุบวกและประจุลบ และโอลิโกเมอร์หรือพอลิเมอร์ชนิดที่มีประจุลบ ซึ่งผลการทดลองพบว่า การเติมสารเพิ่มความเสถียรสามารถช่วยปรับปรุงค่าความเสถียรเชิงกลให้กับน้ำยางธรรมชาติที่มีการกำจัดโปรตีนออกได้

ส่วนการเติมสารลดแรงตึงผิวอื่น ๆ เพื่อช่วยเพิ่มความเสถียรของน้ำยางชั้นนั้น ได้มีงานวิจัยของ Manroshan และคณะ (2007) ซึ่งได้ทำการศึกษาผลการเติม hydrophobically modified polyfructose ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวลงในน้ำยางชั้นที่อัตราส่วนต่าง ๆ ต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติที่สำคัญต่อน้ำยางชั้น โดยพบว่าค่าความเสถียรเชิงกลของน้ำยางชั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้น 500 วินาทีเมื่อเติมสารลดแรงตึงผิวทุกๆ 0.25 phr และที่ระยะการจัดเก็บน้ำยางนานสูงสุด 6 สัปดาห์พบว่า ความหนืดและปริมาณกรดไขมันระเหยได้มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก นอกจากนี้ยังพบว่าประสิทธิภาพของสารลดแรงตึงผิวจะลดลงเมื่อน้ำยางชั้นมีค่า pH ต่ำกว่า 10 ซึ่งส่งผลให้ความเสถียรเชิงกลของน้ำยางชั้นลดลง ในขณะที่ความหนืดและปริมาณกรดไขมันระเหยได้มีค่าเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ Silva และคณะ (2009) ได้ทำการศึกษาผลของการเติมสบู่แอมโมเนียมลอเลตต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติต่าง ๆ ของน้ำยางชั้น โดยพบว่า เมื่อเติมสบู่แอมโมเนียมลอเลตในปริมาณที่มากกว่า 0.5×10^{-4} โมล ขึ้นไป ต่อน้ำยางชั้น 100 กรัม จะทำให้ค่าความเสถียรเชิงกล (MST) ของน้ำยางชั้นมีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยค่า MST มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณสบู่แอมโมเนียมลอเลตที่เติมลงในน้ำยาง นอกจากนี้ยังพบว่าการเติมสบู่ลอเลตจะส่งผลต่อค่า KOH number และค่าการนำไฟฟ้า โดยการเติมสบู่ในปริมาณ 4.2×10^{-4} ถึง 5×10^{-4} โมล ต่อน้ำยางชั้น 100 กรัม จะทำให้ค่า KOH number และค่าการนำไฟฟ้าของน้ำยางชั้นมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากอนุโมลกรดเกิดการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเติมสบู่แอมโมเนียมลอเลตลงในน้ำยางชั้น โดยค่า KOH number และค่าการนำไฟฟ้าของน้ำยางชั้นจะมีค่าคงที่เมื่อสบู่แอมโมเนียมลอเลตที่เติมลงในน้ำยางมีปริมาณมากกว่า 5×10^{-4} โมล

นอกจากนี้ ยังมีการศึกษาผลของการเติมแอมโมเนียในน้ำยางสด ต่อความเสถียรของน้ำยาง โดยจากงานวิจัยของ ศิริรักษา สันติภาณุโสภณ และ สอาด ริยะจันทร์ (2012) ได้ศึกษาผลของปริมาณแอมโมเนียในน้ำยางสดและระยะเวลาการเก็บรักษาน้ำยางสดต่อสมบัติของน้ำยางชั้นและการจับตัวของน้ำยางสกิม ซึ่งจากการศึกษาพบว่า เมื่อเติมแอมโมเนียในปริมาณ 0.35-0.8% โดยน้ำหนัก ค่าความเสถียรเชิงกล (MST) ของน้ำยางมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บน้ำยาง แต่เมื่อเก็บน้ำยางไว้นานกว่า 30 วัน ค่า MST มีแนวโน้มลดลงเนื่องจากปริมาณเจลในน้ำยางมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่ปริมาณแอมโมเนียในช่วง 0.35-0.8% โดยน้ำหนัก ไม่ได้ให้ผลการเพิ่ม MST ที่แตกต่างกันมากนัก

จากงานวิจัยที่ผ่านมาในเบื้องต้นพบว่า ในงานวิจัยส่วนใหญ่จะศึกษาการเร่งค่า MST ของน้ำยางโดยวิธีการเติมสารลดแรงตึงผิวลงไป ซึ่งการเติมสารลดแรงตึงผิวนี้นี้เป็นการเติมประจุลงไป ในน้ำยางโดยตรง ทำให้น้ำยางมีความเสถียรที่เพิ่มมากขึ้น แต่การเติมสารลดแรงตึงผิวเพื่อเพิ่มค่า MST ให้กับน้ำยาง อาจส่งผลทำให้น้ำยางที่เก็บไว้เป็นระยะเวลานานมีความเสถียรที่มากเกินไป ซึ่งจะส่งผลทำให้เกิดปัญหาในกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานแบบจุ่มพิมพ์ จึงต้องมีการศึกษาถึงแนวทางอื่นที่สามารถช่วยเพิ่มค่า MST โดยไม่ส่งผลต่อคุณสมบัติของน้ำยาง

จากงานวิจัยของเดชณรงค์ พิมาลัย และยศธร วงศ์งาม (2014) ได้ทำการศึกษา ทางเลือกต่าง ๆ ในการเร่งความเสถียรเชิงกลของน้ำยางข้น โดยได้ศึกษาผลของการใช้ความร้อน รังสี ไมโครเวฟ กระบวนการ อิเล็กโทรลิซิส และเอนไซม์ เพื่อหาแนวทางในการเร่งความเสถียรเชิงกลของ น้ำยางข้นอย่างยั่งยืน โดยไม่ทำให้เกิดปัญหาการจับตัวของน้ำยางข้นเนื่องจากความเสถียรเชิงกล ที่สูงเกินไปในกระบวนการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ซึ่งจากผลการวิจัยพบว่า เอนไซม์สามารถเร่ง ความเสถียรเชิงกลของน้ำยางข้นได้รวดเร็วที่สุด โดยสามารถทำให้ค่า MST ของน้ำยางข้นชนิด แอมโมเนียสูงมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึง 650 วินาที ซึ่งเป็นค่าที่สูงพอที่จะนำน้ำยางข้นออกไปจำหน่ายได้ ภายในระยะเวลา 2 วัน นอกจากนี้เมื่อเก็บไว้เป็นเวลานาน ค่า MST ของน้ำยางข้นที่เติมเอนไซม์จะมี ค่าคงที่ที่ 1,100 วินาที (ไม่เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เหมือนกรณีที่ใช้กรดลอริก) จึงช่วยลดปัญหาค่า MST ที่สูง เกินไปของน้ำยางข้นที่ถูกเก็บไว้เป็นเวลานาน และยังช่วยลดปัญหาในการจับตัวของน้ำยางในช่วงการ นำไปขึ้นรูปได้อีกด้วย ซึ่งจากผลการวิจัยเบื้องต้นนี้ จะเห็นได้ว่าการใช้เอนไซม์ในการเร่งความเสถียร เชิงกลของน้ำยางข้นเป็นสิ่งที่น่าสนใจ แต่เนื่องจากเอนไซม์มีหลายชนิด และแต่ละชนิดจะมี ประสิทธิภาพสูงที่ pH แตกต่างกัน จึงมีความเป็นไปได้ที่ชนิดและปริมาณเอนไซม์ที่เหมาะสมอาจช่วย ร่นระยะเวลาการบ่มได้แตกต่างกัน หรืออาจช่วยลดปริมาณแอมโมเนียที่ต้องใช้ในการรักษาสภาพ น้ำยางลงได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะศึกษาการเพิ่มค่า MST ให้กับน้ำยางข้นอย่างรวดเร็ว โดยไม่ส่งผลเสียต่อกระบวนการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ และศึกษาความเป็นไปได้ในการลด การใช้แอมโมเนียในการรักษาสภาพน้ำยางข้น โดยมุ่งเน้นกระบวนการวิเคราะห์ต่าง ๆ ในการคัดเลือก เกรดของเอนไซม์และปริมาณที่เหมาะสมของเอนไซม์สำหรับใช้ย่นระยะเวลาบ่มน้ำยางข้นในสภาวะที่ มีแอมโมเนียสูงและสภาวะที่มีแอมโมเนียต่ำ โดยคำนึงถึงความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เป็นสำคัญ นอกจากนี้จะได้ทำการศึกษาการนำน้ำยางข้นที่ผ่านการเร่งความเสถียรเชิงกลโดยใช้เอนไซม์ไปขึ้นรูป เป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของน้ำยางข้นต่อการนำไปใช้ขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ต่อไป

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการใช้เอนไซม์ไลเปสในการเร่งความเสถียรเชิงกลของน้ำยางข้น และศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของน้ำยางข้นที่ผ่านการเร่งความเสถียรเชิงกลโดยใช้เอนไซม์ไลเปส เปรียบเทียบกับน้ำยางข้นที่ผ่านการเร่งความเสถียรเชิงกลโดยใช้แอมโมเนียมลอลเลต (น้ำยางข้นเกรดการค้า; Commercial latex) จากนั้นได้ศึกษาการนำน้ำยางข้นที่บ่มเร่งความเสถียรด้วยเอนไซม์ไลเปสมาใช้ในการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ยางโดยวิธีการจุ่มขึ้นรูปและวิธีการตีโฟม และศึกษาสมบัติเบื้องต้นของผลิตภัณฑ์ยางที่ได้ โดยขั้นตอนในการทำงานวิจัยมีดังนี้

3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำงานวิจัย

3.1.1 สารเคมี

1) น้ำยางข้น (Concentrated natural rubber latex; CNRL) ซื้อจากบริษัท ไทยอีสเทิร์น รับเบอร์ จำกัด โดยน้ำยางข้นที่ใช้ในงานวิจัยนี้มี 4 ชนิด ซึ่งทั้ง 4 ชนิดเป็นน้ำยางข้นที่ได้จากกระบวนการปั่นเหวี่ยงใหม่ๆ และยังไม่ผ่านการบ่มเร่งความเสถียร ได้แก่

- น้ำยางข้นสำหรับใช้ในการศึกษาการบ่มเร่งความเสถียรเชิงกลโดยใช้เอนไซม์ไลเปส จะใช้น้ำยางข้น 2 ชนิด คือ น้ำยางข้นที่มีปริมาณแอมโมเนียประมาณ 0.6% โดยน้ำหนัก (High-ammonia latex) โดยใช้ชื่อย่อว่า น้ำยางข้น HA latex และน้ำยางข้นที่มีปริมาณแอมโมเนียประมาณ 0.2% โดยน้ำหนัก (Low-ammonia latex) ใช้ชื่อย่อว่า น้ำยางข้น LA latex โดยน้ำยางข้นที่มีปริมาณแอมโมเนียแตกต่างกันนี้ เป็นน้ำยางข้นที่ไม่ได้เติม TMTD/ZnO และ แอมโมเนียมลอลเลต

- น้ำยางข้นสำหรับใช้เป็นตัวอย่างอ้างอิงในการทดลอง จะใช้น้ำยางข้น 2 ชนิด คือ น้ำยางข้นเกรดการค้าชนิดแอมโมเนียสูง (commercial high ammonia latex) โดยใช้ชื่อย่อว่า น้ำยางข้น commercial HA latex เป็นน้ำยางข้นที่มีปริมาณแอมโมเนียประมาณ 0.6% โดยน้ำหนัก และเติมแอมโมเนียมลอลเลตเพื่อเร่งความเสถียรเชิงกลให้กับน้ำยาง และน้ำยางข้นเกรดการค้าชนิดแอมโมเนียต่ำ (commercial low ammonia latex) ใช้ชื่อย่อว่า น้ำยางข้น commercial LATZ latex เป็นน้ำยางข้นที่มีปริมาณแอมโมเนียประมาณ 0.2% โดยน้ำหนัก ที่เติม TMTD/ZnO เพื่อรักษาสภาพน้ำยางและเติมแอมโมเนียมลอลเลตเพื่อเร่งความเสถียรเชิงกลให้กับน้ำยาง

2) เอนไซม์ไลเปส ซื้อจากบริษัท รีช ไบโอเทคโนโลยี จำกัด, บริษัท CTI & SCIENCE จำกัด และได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท โนวัวโซ จำกัด

- 3) น้ำมันมะกอก (Olive oil) ยี่ห้อ SABROSO
- 4) โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol; PVA) ซื้อจากบริษัท รวมเคมี 1986 จำกัด
- 5) ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4) ซื้อจากบริษัท รวมเคมี 1986 จำกัด
- 6) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide; NaOH) ยี่ห้อ Ajax Finechem
- 7) ฟีนอล์ฟทาลีน (Phenolphthalene) ยี่ห้อ Ajax Finechem
- 8) เอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol) ความเข้มข้น 99.9% ซื้อจากบริษัท เคมีภัณฑ์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด
- 9) อะซิโตน (Acetone) เกรดอุตสาหกรรม ซื้อจากบริษัท เคมีภัณฑ์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด
- 10) กรดอะซิติก (Acetic acid) ความเข้มข้น 99.7% ยี่ห้อ J.T.Baker
- 11) กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid; HCl) ความเข้มข้น 37% ยี่ห้อ Merck
- 12) สารละลายเทอริค 16 เอ 16 (Terric 16A16) ความเข้มข้น 10% ซื้อจากสถาบันวิจัยยาง การยางแห่งประเทศไทย
- 13) เมทิลเรด (Methyl red) ยี่ห้อ Panreac
- 14) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide; KOH) เกรดอุตสาหกรรม ซื้อจากบริษัท ศึกษาภัณฑ์พาณิชย์ จำกัด
- 15) สารละลายโพแทสเซียมลอเลต (Potassium laurate) ความเข้มข้น 20% ซื้อจากสถาบันวิจัยยาง การยางแห่งประเทศไทย
- 16) สารละลายดิสเพอร์ชันกำมะถัน (Sulphur) ความเข้มข้น 50% ซื้อจากสถาบันวิจัยยาง การยางแห่งประเทศไทย
- 17) สารละลายดิสเพอร์ชันซิงค์ ไดเอทิล ไตไทโอคาร์บาเมต (Zinc diethyl dithiocarbamate; ZDEC) ความเข้มข้น 50% ซื้อจากสถาบันวิจัยยาง การยางแห่งประเทศไทย
- 19) สารละลายดิสเพอร์ชันวิงสเตย์ แอล (Wingstay-L) ความเข้มข้น 50% ซื้อจากสถาบันวิจัยยาง การยางแห่งประเทศไทย
- 20) สารละลายดิสเพอร์ชันซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide; ZnO) ความเข้มข้น 50% ซื้อจากสถาบันวิจัยยาง การยางแห่งประเทศไทย
- 21) ซิลิโคน (Silicone)
- 22) สารละลายโพแทสเซียมโอเลอเต (Potassium oleate) ความเข้มข้น 10% ซื้อจากสถาบันวิจัยยาง การยางแห่งประเทศไทย

23) สารละลายดิสเพอร์ชันซิงค์-2-เมอร์แคปโตเบนโซไทอาโซล (Zinc 2-mercaptobenzothiazole, ZMBT) ความเข้มข้น 50% ซื้อมาจากสถาบันวิจัยยาง การยางแห่งประเทศไทย

24) สารละลายดิสเพอร์ชันดีพีจี (DPG) ความเข้มข้น 33% ซื้อมาจากสถาบันวิจัยยาง การยางแห่งประเทศไทย

25) สารละลายดิสเพอร์ชันเอสเอสเอฟ (SSF) ความเข้มข้น 12.5% ซื้อมาจากสถาบันวิจัยยาง การยางแห่งประเทศไทย

26) น้ำกลั่น (Distilled water)

3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

- 1) ปีกเกอร์ (Beaker) ขนาด 100, 250, 500 และ 1000 มิลลิลิตร
- 2) ขวดรูปชมพู่ขนาด 100 และ 250 มิลลิลิตร
- 3) หลอดหยดสาร (Dropper Tube)
- 4) ปิเปต (Pipet)
- 5) บิวเรต (Burette)
- 6) แท่งแก้วคนสาร (Stirring Rod)
- 7) กระจกแก้วนาฬิกา (Watch Glass)
- 8) เครื่องให้ความร้อน (Heater)
- 9) เครื่องกวนแม่เหล็ก (Magnetic Stirrer)
- 10) แท่งแม่เหล็ก (Magnetic Bar)
- 11) เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer)
- 12) เครื่องชั่ง (Balance) ความละเอียดทศนิยม 3 และ 4 ตำแหน่ง
- 13) เครื่องวัดความเป็นกรด-เบส (pH Meter)
- 14) ไมโครปิเปต (Micro Pipet)
- 15) เครื่องปั่นผสมสาร (Homogenizer)

- 16) ตู้อบลมร้อน (Air Oven)
- 17) เครื่องบ่มแบบเขย่า (Shaking Incubator)
- 18) แม่พิมพ์จุ่มลูกโป่ง
- 19) แม่พิมพ์ยางฟองน้ำเพื่อเตรียมตัวอย่างขึ้นทดสอบขนาด 50×50×25

มิลลิเมตร



ภาพที่ 3.1 แม่พิมพ์จุ่มลูกโป่ง



ภาพที่ 3.2 แม่พิมพ์ยางฟองน้ำ

- 20) เครื่องตีโฟมยาง ยี่ห้อ XPS รุ่น JD56

21) เครื่องวัดความเสถียรเชิงกลของน้ำยางข้น (MST Test Apparatus) ยี่ห้อ Klaxon อยู่ภายใต้การดูแลของศูนย์บริการทดสอบรับรองภาคกลาง การยางแห่งประเทศไทย



ภาพที่ 3.3 เครื่องตีโฟมยาง



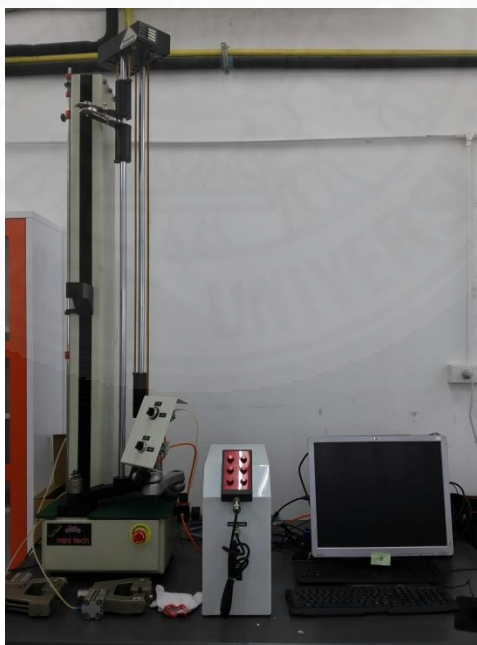
ภาพที่ 3.4 เครื่องวัดความเสถียร
เชิงกลของน้ำยางข้น

22) ชุดกลั่น Markham still อยู่ภายใต้การดูแลของศูนย์บริการทดสอบรับรอง
ภาคกลาง การยางแห่งประเทศไทย



ภาพที่ 3.5 ชุดกลั่น Markham still

23) เครื่องทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile test machine) ยี่ห้อ Dak
System Inc รุ่น UTB9251-ACHiTech โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ผลของบริษัท นรินทร์ อินสทรูเมนต์
จำกัด อยู่ภายใต้การดูแลของภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์



ภาพที่ 3.6 เครื่องทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง

24) เครื่องทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงกด ยี่ห้อ Yasuda อยู่ภายใต้การดูแล
ของศูนย์บริการทดสอบรับรองภาคกลาง การยางแห่งประเทศไทย



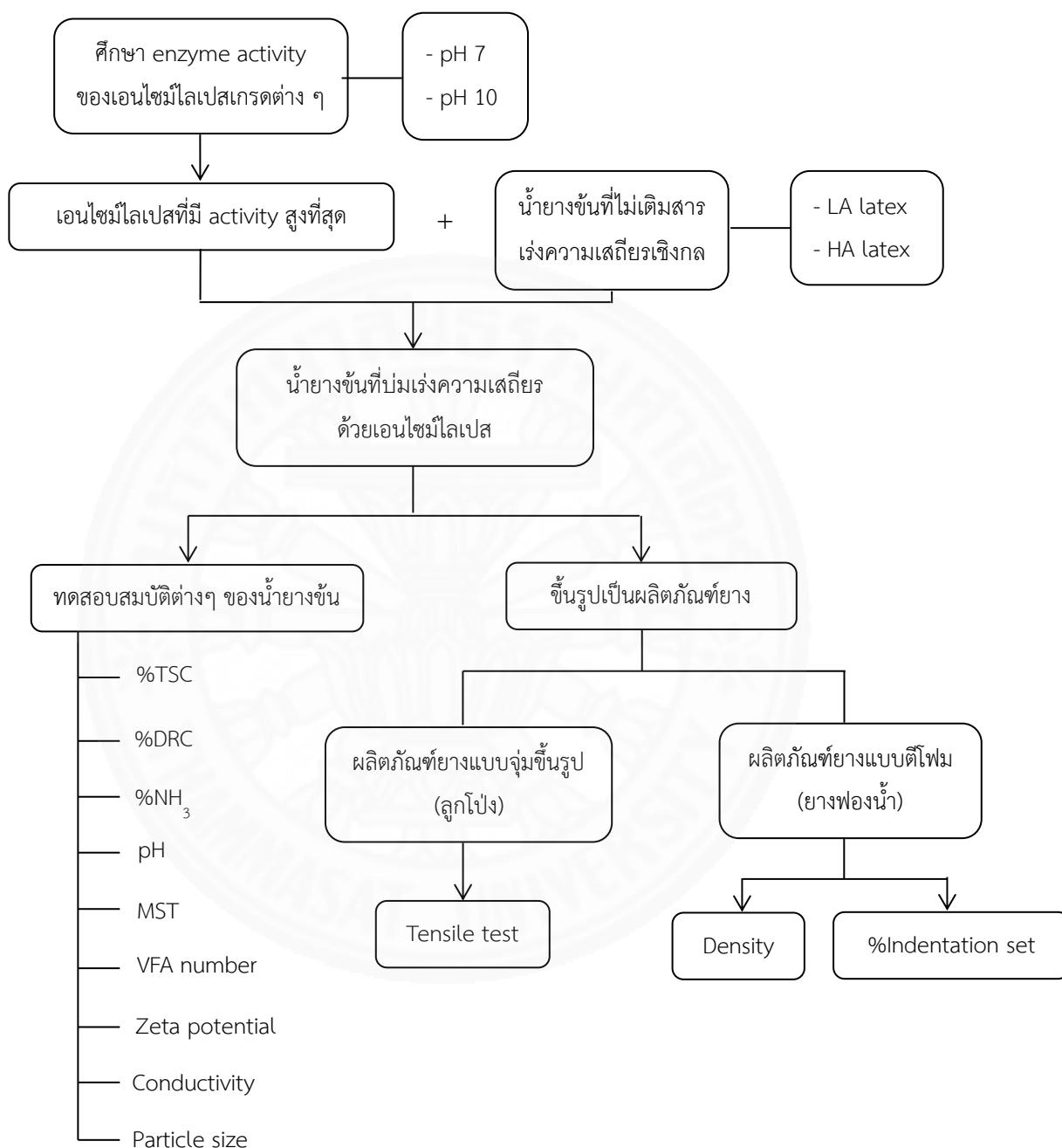
ภาพที่ 3.7 เครื่องทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงกด

25) เครื่อง Zetasizer ยี่ห้อ Malvern Instrument รุ่น Zetasizer Nano Series
อยู่ภายใต้การดูแลของศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ (NANOTEC)



ภาพที่ 3.8 เครื่อง Zetasizer

3.2 แผนการทดลอง (Experimental scheme)



ภาพที่ 3.9 แผนผังการทดลองและวิเคราะห์

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การวัดกิจกรรมของเอนไซม์ไลเปส (Lipase activity)

การวัดกิจกรรมของเอนไซม์ เป็นวัดประสิทธิภาพการทำงานของเอนไซม์ ซึ่งค่าที่วัดได้จะอยู่ในหน่วยของเอนไซม์ (Enzyme unit) โดยกำหนดให้ 1 หน่วยของเอนไซม์ หมายถึง ปริมาณของเอนไซม์ที่สามารถเร่งปฏิกิริยาย่อยสลายน้ำมันมะกอกให้ได้กรดไขมันที่อยู่ในรูป oleic acid 1 μmole ภายใต้สภาวะที่กำหนด สำหรับงานวิจัยนี้ทำการวัดกิจกรรมของเอนไซม์ ตามวิธีการดังนี้

1) ผสมซัสเตรท (10% emulsion olive oil ในสารละลาย polyvinyl alcohol ความเข้มข้น 0.09%) ปริมาตร 2 มิลลิลิตร, สารละลาย buffer (pH 7 หรือ pH 10 ตามที่ต้องการวัด) ปริมาตร 2 มิลลิลิตร และสารละลายเอนไซม์ปริมาตร 4 มิลลิลิตร ในขวดรูปชมพู่

2) นำสารผสมในข้อ 1) ไปบ่มในตู้บ่มแบบเขย่าที่ 35 °C ด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นหยุดปฏิกิริยาโดยเติมสารละลาย acetone: alcohol (1:1 v/v) ปริมาตร 20 ml

3) นำไปไตเตรทกับสารละลายมาตรฐาน 0.05 M NaOH โดยใช้ฟีนอล์ฟทาลีนเป็นอินดิเคเตอร์ จนสารละลายเปลี่ยนเป็นสีชมพู บันทึกปริมาณสารละลาย NaOH ที่ใช้ จากนั้นคำนวณกิจกรรมของเอนไซม์ไลเปสโดยใช้สูตร ดังนี้

$$\text{Lipase unit activity } (\mu\text{mole/min}) = \frac{\left(\frac{C_{\text{NaOH}} (V_{\text{NaOH}} - V_{\text{NaOH-blank}})}{1000} \right) \times 10^6}{20}$$

เมื่อ C_{NaOH} คือ ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่ใช้ในการไตเตรท (M)

V_{NaOH} คือ ปริมาตรสารละลาย NaOH ที่ใช้ในการไตเตรทซัสเตรทผสมเอนไซม์ (ml)

$V_{\text{NaOH-blank}}$ คือ ปริมาตรสารละลาย NaOH ที่ใช้ในการไตเตรทซัสเตรท (ml)

3.3.2 การเร่งความเสถียรเชิงกลของน้ำยางชั้นด้วยเอนไซม์ไลเปส

ในงานวิจัยนี้ น้ำยางที่ใช้เพื่อศึกษาการเร่งความเสถียรเชิงกลด้วยเอนไซม์ไลเปส คือ น้ำยางชั้นชนิดแอมโมเนียต่ำ (Low ammonia latex; LA latex) และน้ำยางชั้นชนิดแอมโมเนียสูง (High ammonia latex; HA latex) ที่ไม่ได้เติมสารรักษาสภาพชนิดอื่น (Secondary preservatives; TMTD/ZnO) และสารเพิ่มความเสถียรให้กับน้ำยางชั้น (Thai Eastern Rubber, Thailand) โดยจะใช้น้ำยางชั้นที่ผลิตได้จากกระบวนการปั่นเหวี่ยงและเก็บไว้เป็นระยะเวลาไม่เกิน 5 วัน ซึ่งน้ำยางชั้นที่ได้

จะถูกนำมาเติมเอนไซม์ไลเปสในปริมาณ 0.004% และ 0.04% โดยปริมาตรของน้ำยางชั้น จากนั้นบ่มน้ำยางชั้นที่อุณหภูมิห้องและวัดคุณสมบัติของน้ำยางชั้นตามระยะเวลาบ่มที่กำหนด

3.3.3 การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางโดยวิธีการจุ่มขึ้นรูป

การเตรียมน้ำยาง Prevulcanized สำหรับการจุ่มขึ้นรูป

- 1) ชั่งน้ำยางและสารเคมีตามปริมาณที่แสดงดังตารางที่ 3.1 ใส่ในภาชนะที่สะอาด
- 2) นำภาชนะเข้าเครื่องกวน เติมสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และสบู่โพแทสเซียมลอลเลต กวนให้เข้ากันประมาณ 5 นาที
- 3) เติม ZDEC, Wingstay-L และ ZnO กวนให้เข้ากันประมาณ 15 นาที
- 4) เติม sulphur, silicone และน้ำกลั่น จากนั้นกวนให้เป็นเนื้อเดียวกันใช้เวลาต่ออีก 10 นาที
- 5) เมื่อครบตามเวลา นำน้ำยางผสมสารเคมีบ่มทิ้งไว้จนเกิดการคงรูปบางส่วนโดยเมื่อทดสอบด้วยคลอโรฟอร์มแล้ว ได้คลอโรฟอร์มอยู่ระหว่างเบอร์ 2-3 และกรองน้ำยางผสมสารเคมีก่อนนำไปใช้งาน

หมายเหตุ. การทดสอบการคงรูปของน้ำยางโดยใช้คลอโรฟอร์ม (Chloroform Test) สามารถทำได้ดังนี้

- 1) ผสมน้ำยางกับคลอโรฟอร์ม ในอัตราส่วน 1:1 กวนให้เข้ากัน
- 2) สังเกตการณ์จับตัวเป็นก้อนของน้ำยาง:

เบอร์ 1 ก้อนเหนียวติดมือ ดึงยืดได้ยาว	→	ใช้ไม่ได้
เบอร์ 2 ก้อน ดึงขาดได้ง่าย	→	ใช้ได้
เบอร์ 3 ก้อนๆ หลากก้อน ดึงขาดง่าย	→	ใช้ได้
เบอร์ 4 เม็ดผงร่วน	→	ใช้ไม่ได้

ตารางที่ 3.1

สูตรการเตรียมน้ำยาง *Prevulcanized* สำหรับการผลิตลูกโป่งแบบจุ่มขึ้นรูป

น้ำยางและสารเคมี	น้ำหนักแห้ง (phr)	น้ำหนักเปียก (กรัม)
60% น้ำยางข้น	100	167
10% โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide)	0.4	4
20% โพแทสเซียมลอเลต (Potassium laurate)	0.4	2
50% กำมะถัน (Sulfur)	0.5	1
50% ซิงค์ ไดเอทิล ไดไทโอคาร์บาเมต (ZDEC)	0.75	1.5
50% วิงสเตย์ แอล (Wingstay-L)	0.5	1
50% ซิงค์ออกไซด์ (ZnO)	0.25	0.5
ซิลิโคน (Silicone)	-	1.5
น้ำกลั่น (Distillated water)	-	50

การเตรียมน้ำช่วยให้อย่างจับแม่พิมพ์ (Coagulant)

- 1) ชั่งสารเคมีตามปริมาณที่แสดงดังตารางที่ 3.2 ใส่ในภาชนะที่สะอาด
- 2) ผสมสารเคมีที่ชั่งไว้ในข้อ 1) กวนให้เป็นเนื้อเดียวกัน เก็บบรรจุในภาชนะที่สะอาด

ตารางที่ 3.2

สูตรสารเคมีในการเตรียมน้ำช่วยให้อย่างจับแม่พิมพ์

สารเคมี	น้ำหนัก (กรัม)
แคลเซียมไนเตรต (Calcium nitrate)	10
สารปรับแรงตึงผิว Terric 16 A16	0.1
น้ำกลั่น (Distillated water)	89.9

การขึ้นรูปลูกโป่งด้วยกระบวนการจุ่ม (Dipping Process)

- 1) ล้างแบบพิมพ์ (former) ให้สะอาดไม่มีฝุ่นผงเกาะ
- 2) อบแม่พิมพ์ในตู้อบให้ร้อนอุณหภูมิประมาณ 45-50 องศาเซลเซียส
- 3) จุ่มแม่พิมพ์ลงในสารช่วยให้ยางจับแม่พิมพ์ (coagulant) ตั้งทิ้งไว้ให้ coagulant แห้งหมาดๆ
- 4) ค่อยๆ จุ่มแม่พิมพ์จากข้อ 3) ลงในน้ำยาง Prevulcanized โดยแช่แม่พิมพ์ในน้ำยางนาน 1 นาที
- 5) ค่อยๆ เอาแม่พิมพ์ขึ้นจากน้ำยาง Prevulcanized ตั้งทิ้งไว้ให้ฟิล์มยางที่จับพิมพ์แล้วเซตตัว
- 6) ล้างแม่พิมพ์ที่มียางเกาะติดอยู่ด้วยน้ำอุ่นอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3-5 นาที เพื่อชะล้างสารเคมีที่ตกค้างและสารที่ไม่ใช่น้ำยางที่มีอยู่ในน้ำยางออก และชะล้างโปรตีนที่ละลายน้ำได้ซึ่งอยู่ในยางธรรมชาติ
- 7) นำแม่พิมพ์เข้าอบให้ยางคงรูปในตู้อบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นานประมาณ 30 นาที
- 8) นำแม่พิมพ์ออกจากตู้อบและถอดลูกโป่งออกจากแม่พิมพ์โดยใช้แปรงช่วย หล่อลื่นในขณะถอด

3.3.4 การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางโดยวิธีการตีโฟม

- 1) ชั่งน้ำยางและสารเคมีตามปริมาณที่แสดงดังตารางที่ 3.3 ใส่ในภาชนะที่สะอาด
- 2) ใส่ น้ำยางและโพแทสเซียมโอเลเอตลงในหม้อปั่น นำหม้อปั่นเข้าเครื่องตีโฟม ยาง ปรับความเร็วการปั่นระดับ 5
- 3) ปั่นฟองประมาณ 2 นาที เพื่อให้ได้ระดับฟองตามต้องการ ลดความเร็วการปั่น เหลือระดับ 3
- 4) เติม sulphur, ZDEC, ZMBT และ Wingstay-L ปั่นสารให้เข้ากันเป็นเวลา 2 นาที
- 5) เติม DPG และ ZnO ปั่นสารให้เข้ากันเป็นเวลา 30 วินาที
- 6) เติม SSF ปั่นจนสารเข้ากันเป็นเวลา 30 วินาที
- 7) เทโฟมยางที่ตีได้ลงในเบ้าพิมพ์ ทิ้งให้น้ำยางเซตตัวในแม่พิมพ์ประมาณ 10 นาที จากนั้นนำเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 2 ชั่วโมง

8) นำยางฟองน้ำออกจากเบ้าพิมพ์และซักล้างด้วยน้ำร้อน 70 องศาเซลเซียส เวลาประมาณ 5-30 นาที เพื่อชะล้างสารเคมีที่ยังตกค้างอยู่แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 70-80 องศาเซลเซียสจนแห้ง

ตารางที่ 3.3

สูตรการผลิตสารเคมียางในการผลิตยางฟองน้ำ

น้ำยางและสารเคมี	น้ำหนักเปียก (กรัม)
60% น้ำยางข้น	167
10% โพแทสเซียมโอเลเอต (Potassium oleate)	15
50% กำมะถัน (Sulfur)	4
50% ซิงค์ ไดเอทิล ไดไทโอคาร์บาเมต (ZDEC)	2
50% ซิงค์-2-เมอร์แคปโตเบนโซไทอาโซล (ZMBT)	2
50% ริงสเตย์ แอล (Wingstay-L)	2
50% ซิงค์ออกไซด์ (ZnO)	10
33% ดีพีจี (DPG)	3
12.5% เอสเอสเอฟ (SSF)	8

3.4 การวิเคราะห์สมบัติของน้ำยางข้น

3.4.1 การทดสอบปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total solid content: TSC)

ปริมาณของแข็งทั้งหมด หมายถึง ปริมาณส่วนที่เป็นเนื้อยางแห้งทั้งหมดในน้ำยาง รวมกับสารอื่น ๆ ที่เป็นของแข็งและไม่ใช่น้ำยาง ซึ่งจะคงเหลือเป็นฟิล์มยางภายหลังจากการทำให้แห้งที่อุณหภูมิทดสอบและบรรยากาศที่กำหนด โดยสามารถวัดได้ตามมาตรฐาน ISO 124 : 2014 ตามวิธีการดังนี้

- ชั่งน้ำหนักงานแก้วด้วยเครื่องชั่งที่มีความละเอียดอย่างน้อย 3 ตำแหน่ง และบันทึกน้ำหนักของงานแก้ว
- เทตัวอย่างทดสอบลงในงานแก้ว ให้ได้น้ำหนักประมาณ 2 ± 0.5 กรัม ชั่งและบันทึกน้ำหนักของตัวอย่างทดสอบ+งานแก้ว แล้วนำมาคำนวณหาน้ำหนักของตัวอย่างที่แน่นอน (m_0)
- เติมน้ำหรือน้ำกลั่นเข้า ๆ เพื่อให้ให้น้ำยางกระจายทั่วงานแก้ว อาจเติมน้ำกลั่นหรือน้ำบริสุทธิ์เทียบเท่า น้ำกลั่นปริมาณ 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร ผสมกับน้ำยางในงานแก้วเพื่อให้น้ำยางกระจายตัวได้ดีขึ้น)
- นำงานแก้วที่มีตัวอย่างทดสอบไปอบที่อุณหภูมิ 70 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง หรือที่อุณหภูมิ 105 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หรือจนกระทั่งแผ่นยางไม่มีจุดขาว
- นำงานแก้วออกจากตู้อบ ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องในโถดูดความชื้น ชั่งและบันทึกน้ำหนักหลังอบ
- ทำการอบซ้ำจนน้ำหนักคงที่ (คำนวณจากน้ำหนักที่บันทึกสองครั้งหลังแตกต่างกันไม่เกิน 0.5 มิลลิกรัม) โดยในกรณีอบที่อุณหภูมิ 70 ± 5 องศาเซลเซียส ให้ทำการอบซ้ำเป็นเวลา 30 นาที หรือ ในกรณีที่ใช้อุณหภูมิ 105 ± 5 องศาเซลเซียส ให้ทำการอบซ้ำเป็นเวลา 15 นาที ชั่งและบันทึกน้ำหนักครั้งสุดท้ายที่คงที่ แล้วนำมาคำนวณหาน้ำหนักของตัวอย่างหลังอบที่แน่นอน (m_1) โดยใช้สูตร

$$\text{ปริมาณของแข็งทั้งหมด, ร้อยละ} = \frac{m_1}{m_0} \times 100$$

เมื่อ m_0 = น้ำหนักตัวอย่างทดสอบก่อนอบ หน่วยเป็นกรัม
 m_1 = น้ำหนักตัวอย่างทดสอบหลังอบ หน่วยเป็นกรัม

หมายเหตุ. การทดสอบสองซ้ำ ต่างจากค่าเฉลี่ยไม่เกิน 0.2% โดยมวล ถ้าเกินที่กำหนดให้ทำการทดสอบใหม่

3.4.2 การทดสอบปริมาณเนื้อยางแห้ง (Dry rubber content: DRC)

ปริมาณเนื้อยางแห้ง หมายถึง ปริมาณของส่วนที่เป็นเนื้อยางทั้งหมดในน้ำยาง โดยสามารถวัดได้ตามมาตรฐาน ISO 126 : 2005 ตามวิธีการดังนี้

- ชั่งน้ำหนักจานแก้วด้วยเครื่องชั่งที่มีความละเอียดอย่างน้อย 3 ตำแหน่ง และบันทึกน้ำหนักของจานแก้ว
- เทตัวอย่างทดสอบลงในจานแก้ว ให้ได้น้ำหนักประมาณ 10 ± 1 กรัม ชั่งและบันทึกน้ำหนักของตัวอย่างทดสอบ+จานแก้ว แล้วนำมาคำนวณหาน้ำหนักของตัวอย่างที่แน่นอน (m_0)
- เติมน้ำกลั่นประมาณ 20 มิลลิลิตร ลงในจานแก้วที่มีตัวอย่างทดสอบเพื่อทำให้ตัวอย่างเจือจาง (ทำให้มีปริมาณของแข็งทั้งหมดประมาณ $20\% \pm 1\%$ โดยมวล) โดยเทน้ำด้านในขอบจาน หมุนจานช้า ๆ เพื่อให้ น้ำกับตัวอย่างทดสอบเป็นเนื้อเดียวกัน
- เทสารละลายกรดอะซิติก จำนวน 35 ± 5 มิลลิลิตร ในเวลา 5 นาที ลงในจานตัวอย่างทดสอบ โดยเทด้านในขอบจาน ในขณะเดียวกันให้หมุนจานตัวอย่างทดสอบช้า ๆ ใช้แท่งแก้วกวดแผ่นยางเบาๆ ให้อยู่ใต้ผิวของสารละลายกรดอะซิติก จากนั้นปิดด้วยกระจกนาฬิกา วางจานบนอ่างไอน้ำนาน 15-30 นาที ถ้าเซรุ่มไม่ใสให้เติมเอทานอล ปริมาตร 5 มิลลิลิตร
- เมื่อเซรุ่มใส ให้รวบรวมยางที่จับตัวทั้งหมดเข้าด้วยกัน ล้างด้วยน้ำจนสารละลายกรดออกหมด
- ริดยางจับตัวด้วยเครื่องริดเพื่อไล่น้ำออก ให้ได้แผ่นยางที่มีความหนาสม่ำเสมอ ≤ 2 มิลลิเมตร
- ล้างแผ่นยางด้วยน้ำไหลผ่านเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 5 นาทีวางแผ่นยางไว้ในจานปล่อยให้แผ่นยางแห้งหมาดๆ ก่อนอบแห้ง
- อบแผ่นยางที่ได้ในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 70 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง หรือจนกระทั่งแผ่นยางไม่มีจุดขาว
- นำแผ่นยางที่อบแล้ว วางในโถดูดความชื้นเป็นเวลา 30 นาที ชั่งและบันทึกน้ำหนักที่แน่นอนของแผ่นยาง
- ทำการอบซ้ำ แต่ใช้เวลาอบ 30 นาที ทำการอบซ้ำจนน้ำหนักคงที่ (คำนวณจากน้ำหนักที่บันทึกสองครั้งหลังแตกต่างกันไม่เกิน 1 มิลลิกรัม) ชั่งและบันทึกน้ำหนักครั้งสุดท้ายที่คงที่ (m_1) และนำมาคำนวณปริมาณเนื้อยางแห้ง โดยใช้สูตร

$$\text{ปริมาณเนื้อเยื่อแห้ง, ร้อยละ} = \frac{m_1}{m_0} \times 100$$

เมื่อ m_0 คือ น้ำหนักตัวอย่างทดสอบก่อนอบ หน่วยเป็นกรัม

m_1 คือ น้ำหนักเนื้อเยื่อแห้ง หน่วยเป็นกรัม

หมายเหตุ การทดสอบสองซ้ำ ต่างจากค่าเฉลี่ยไม่เกิน 0.1% โดยมวล ถ้าเกินที่กำหนดให้ทำการทดสอบใหม่

3.4.3 การทดสอบปริมาณความเป็นต่างในรูปของแอมโมเนีย (Alkalinity as ammonia; %NH₃)

ความเป็นต่างในรูปของแอมโมเนียของน้ำยาง หมายถึง ปริมาณต่างอิสระทั้งหมดในน้ำยางแสดงเป็นปริมาณแอมโมเนีย โดยสามารถวัดได้ตามมาตรฐาน ISO 125 : 2011 ตามวิธีการดังนี้

- ใส่น้ำกลั่นประมาณ 200 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตร
- เติมสารละลายช่วยน้ำยางคงตัว (Terric 16A 16) ปริมาตร 10 มิลลิลิตร กวนให้เข้ากัน
- ชั่งตัวอย่างทดสอบน้ำหนักประมาณ 5-10 กรัม เติมลงในขวดรูปชมพู่ที่มีสารละลายช่วยน้ำยางคงตัว กวนให้เข้ากัน
- หยดสารละลายเมทิลเรด 2-3 หยด ลงในขวดรูปชมพู่ที่มีสารละลายตัวอย่างทดสอบ จากนั้นนำไปไตเตรทด้วยสารละลายมาตรฐานกรดเกลือ 0.1M HCl สังเกตการเปลี่ยนแปลงของสีจากสีชาวน้ำเป็นสีชมพูอ่อน แสดงว่าถึงจุดยุติ (End point) บันทึกปริมาตรของ 0.1M HCl ที่ใช้ไป แล้วนำมาคำนวณโดยใช้สูตร

$$\text{ความเป็นต่าง (ในรูปแอมโมเนีย), ร้อยละ} = \frac{FcV}{m}$$

เมื่อ $F = 1.7$

c = ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานกรดเกลือ หน่วยเป็นโมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร

V = ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานกรดเกลือที่ใช้ หน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตร

m = น้ำหนักตัวอย่างทดสอบ หน่วยเป็นกรัม

3.4.4 การทดสอบค่าความเสถียรเชิงกล (Mechanical stability time: MST)

ความเสถียรเชิงกลของน้ำยาง หมายถึง ความเสถียรของน้ำยางต่ออิทธิพลทางกล เช่น การกวน การบีบ การเคลื่อนย้าย หรือการกระทำทางกลโดยวิธีอื่น ๆ สามารถทำได้โดยวัดระยะเวลาที่เริ่มปั่นกวนน้ำยางจนกระทั่งสังเกตเห็นน้ำยางเริ่มจับตัวเป็นเม็ดเล็ก ๆ ในหน่วยของวินาที โดยน้ำยางที่มีค่า MST สูง แสดงให้เห็นว่าน้ำยางมีความเสถียรต่ออิทธิพลทางกลได้สูง แต่ถ้าน้ำยางมีค่า MST ต่ำแสดงว่าน้ำยางนั้นจะเสียความเสถียรและสามารถจะจับเป็นเม็ดได้ง่ายเมื่อน้ำยางถูกกระทบจากอิทธิพลทางกลโดยค่าความเสถียรเชิงกลของน้ำยางสามารถวัดได้ตามมาตรฐาน ISO 35 ตามวิธีการดังนี้

- ทดสอบปริมาณของแข็งทั้งหมด (TSC) และทดสอบปริมาณความเป็นด่าง (Alkalinity as ammonia) ของตัวอย่างทดสอบก่อน
 - ทดสอบความคงตัวเชิงกลภายในเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากเปิดภาชนะตัวอย่างสำหรับห้องปฏิบัติการ ชั่งน้ำหนักทดสอบประมาณ 100 กรัมใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 400 มิลลิลิตร
 - เติมน้ำละลายแอมโมเนียที่มีความเข้มข้น 1.6% (โดยน้ำหนัก) หรือ 0.6% (โดยน้ำหนัก) เพื่อเจือจางให้มีปริมาณของแข็งทั้งหมด $55\% \pm 0.2\%$ (โดยน้ำหนัก)
- หมายเหตุ. 1. สารละลายแอมโมเนียที่มีความเข้มข้น 1.6% (โดยน้ำหนัก) ใช้สำหรับตัวอย่างทดสอบที่มีความเป็นด่าง (Alkalinity) มากกว่า 0.3%
2. สารละลายแอมโมเนียที่มีความเข้มข้น 0.6% (โดยน้ำหนัก) ใช้สำหรับตัวอย่างทดสอบที่มีความเป็นด่าง (Alkalinity) น้อยกว่า 0.3%
- นำตัวอย่างทดสอบไปอุ่นด้วยอ่างไอน้ำ (Water bath) อุณหภูมิ 35-37 องศาเซลเซียส พร้อมกวนช้า ๆ และกรองด้วยแผ่นกรองที่มีขนาด $80 \mu\text{m} \pm 0.76 \mu\text{m}$ ลงในบีกเกอร์ขนาด 400 มิลลิลิตร
 - ชั่งน้ำหนักตัวอย่างที่กรองแล้วใส่ภาชนะทรงกระบอก (Latex container) ประมาณ 80 ± 0.5 กรัม ตรวจสอบอุณหภูมิของตัวอย่างทดสอบให้ได้ 35 ± 1 องศาเซลเซียส ก่อนวางภาชนะที่มีตัวอย่างทดสอบในเครื่องวัดความเสถียรเชิงกล (Mechanical stability measuring apparatus) ตามตำแหน่งที่กำหนด
 - เปิดสวิตช์เครื่องกวน พร้อมเริ่มจับเวลาทำงานให้เครื่องกวนทำงานด้วยความเร็วรอบ 14,000 รอบ/นาที ± 200 รอบ/นาที ตลอดการทดสอบ

- ก่อนถึงจุดยุติ ระดับตัวอย่างทดสอบรอบแกนจะลดลง ให้ตรวจจุดยุติทุก 15 วินาที โดยใช้แท่งแก้วจุ่มตัวอย่างทดสอบ แล้วทำให้กระจายบนผิวน้ำ จุดยุติ (End point) คือ เวลาที่เริ่มเห็นการจับเป็นเม็ดครั้งแรก ยืนยันโดยการจุ่มซ้ำภายใน 15 วินาที ปริมาณการจับตัวเป็นเม็ดเพิ่มมากขึ้น

3.4.5 การทดสอบปริมาณกรดไขมันที่ระเหยได้ (Volatile fatty acid number: VFA number)

ปริมาณกรดไขมันระเหยได้ หมายถึง ปริมาณของกรดไขมันระเหยที่เกิดขึ้นโดยการไฮโดรไลซิสของคาร์โบไฮเดรตในเซรัมของน้ำยาง กรดเหล่านี้ประกอบด้วยกรดแอซิติก กรดฟอร์มิก และกรดพรอพิโอนิก เป็นส่วนใหญ่ หรือหมายถึง จำนวนกรัมของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ทำให้กรดไขมันระเหยทั้งหมดในน้ำยางที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมด 100 กรัม เป็นกลาง ค่า VFA number เป็นค่าที่บ่งชี้ถึงสถานะการเสถียรภาพ ถ้าค่า VFA number สูง แสดงว่าน้ำยางถูกเชื้อจุลินทรีย์เข้าทำลายมาก เกิดกรดไขมันระเหยมาก ทำให้สูญเสียสภาพการเป็นคอลลอยด์ เกิดการบูดเน่าและจับเป็นก้อนได้ โดยค่าปริมาณกรดไขมันระเหยได้ สามารถวัดได้ตามมาตรฐาน ISO 506 ตามวิธีการดังนี้

- ชั่งน้ำยางประมาณ 50 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์
 - กวนน้ำยางขึ้นและเติมสารละลายแอมโมเนียมซิลิเฟต ปริมาณ 50 มิลลิลิตร
- ในขณะกวน
- วางบีกเกอร์ที่มีน้ำยางบนอ่างไอน้ำอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส คนน้ำยางอย่างต่อเนื่องประมาณ 15 นาที จนยางจับตัวเป็นก้อน แล้วจึงแยกส่วนที่เป็นเซรัมใสออกมา
 - แบ่งเซรัมที่ได้มา 25 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 50 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟิวริกปริมาณ 5 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน
 - แบ่งสารละลายจากข้อที่ 4 มา 10 มิลลิลิตร กลั่นด้วยชุดกลั่น Markham still ตามขั้นตอนดังนี้
1. เปิด steam outlet ของชุดกลั่นแล้วผ่านไอน้ำเข้าไปในอุปกรณ์เป็นเวลา 15 นาที
 2. ใส่สารละลายลงในท่อขึ้นในปริมาณ 10 มิลลิลิตร เติม silicone antifoam ลงไป 1 หยด เพื่อป้องกันการเกิดฟอง
 3. วางกระบอกดวงขนาด 100 มิลลิลิตร ที่ปลาย condenser เพื่อรองรับของเหลว
 4. ปิด steam outlet เล็กน้อยเพื่อให้ไอน้ำเข้าไปในท่อขึ้นใน แล้วค่อยๆ ผ่านไอน้ำเข้าไปเบาๆ จากนั้นปิด steam outlet แล้วกลั่นด้วยอัตรา 3-5 cm³/min จนได้ของเหลวปริมาณ 100 มิลลิลิตร

- นำของเหลวที่ได้จากการกลั่นไปผ่านอากาศที่ไม่มี CO₂ ด้วยอัตราเร็ว 200-300 cm³/min นานประมาณ 3 นาที

- หยดฟีนอล์ฟทาลีนลงในของเหลวแล้วนำไปไตเตรทด้วยสารละลายแบบเตรียมไฮดรอกไซด์ สังเกตจุดที่สารละลายเริ่มเปลี่ยนเป็นสีชมพู บันทึกปริมาณสารละลายแบบเตรียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไป

3.4.6 การทดสอบค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

การทดสอบค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำยาง สามารถวัดได้ตามมาตรฐาน 976 : 2013 โดยใช้เครื่องวัดความเป็นกรด-เบส (pH Meter) จุ่มลงไปในน้ำยาง จากนั้นรอนจนกระทั่งค่าที่แสดงบนหน้าจอแสดงผลมีค่าคงที่ แล้วจึงบันทึกค่า pH ที่วัดได้

3.4.7 การวัดค่าศักย์ซีต้า (Zeta potential)

ค่าศักย์ซีต้า เป็นค่าความต่างศักย์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าบริเวณพื้นผิวอนุภาคกับศักย์ไฟฟ้าในชั้นสารละลาย ซึ่งสามารถใช้วัดเสถียรภาพในการกระจายตัวของอนุภาคในของเหลวจากจำนวนและชนิดของประจุไฟฟ้าที่ผิวของอนุภาคยางได้โดยตรง ในงานวิจัยนี้การเตรียมตัวอย่างสำหรับวัดค่าศักย์ซีต้าสามารถเตรียมได้โดยการนำน้ำยางปริมาตร 100 µL ใส่ลงในน้ำกลั่นปริมาตร 20 mL จากนั้นเติมสารละลาย 0.1% w/v KOH ปริมาตร 1.5 mL เพื่อปรับให้ตัวอย่างมีค่า pH เท่ากับ 10 จากนั้นนำตัวอย่างที่เตรียมได้ ไปวัดค่าศักย์ซีต้า ด้วยเครื่องวัดค่าศักย์ซีต้า (Malvern instrument รุ่น zetasizer nano series)

3.4.8 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared (FTIR)

การทดสอบ FTIR ในงานวิจัยนี้จะใช้เพื่อตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของสารที่เป็นองค์ประกอบของน้ำยางชั้นที่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่า MST ของน้ำยางชั้นแต่ละชุด ซึ่งการเตรียมตัวอย่างแผ่นฟิล์มยางสามารถทำได้โดยเทน้ำยางชั้นปริมาตร 15 มิลลิลิตร บนจานเพาะเชื้อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 89 มิลลิเมตร แล้วทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นลอกฟิล์มยางออกแล้วล้างด้วยน้ำร้อนอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งฟิล์มยางให้แห้งอีกครั้งที่อุณหภูมิห้องจนฟิล์มยางใสอีกครั้ง แล้วจึงนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR โดยใช้เครื่อง Fourier Transform Infrared spectrometer (FT-IR) ยี่ห้อ Thermo Scientific รุ่น Nicolet iS50 โหมด Attenuated Total Reflectance (ATR) ความละเอียด 2 cm⁻¹ ช่วงแถบความยาวคลื่น 400 - 4000 cm⁻¹

3.4.9 การวิเคราะห์ปริมาณลิปิดในน้ำยาง

การวิเคราะห์ปริมาณลิปิดในน้ำยางในงานวิจัยนี้ ได้ดัดแปลงวิธีการสกัดลิปิดจากงานวิจัยของคุณ Liengprayoon, S และคณะ (2008) โดยตัดฟิล์มยางที่เตรียมเช่นเดียวกับฟิล์มยางในหัวข้อ 3.4.8 เป็นชิ้นเล็ก ๆ มาแช่ในสารละลายผสม chloroform : methanol (2:1 v/v) ปริมาตร 50 ml เป็นเวลา 18 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำมาปั่นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาอีก 5 ชั่วโมง หลังจากนั้นกรองแผ่นฟิล์มยางออกแล้วนำสารละลายที่ได้ไประเหยจนแห้ง และนำมาเติมสารละลายผสม chloroform : methanol (2:1 v/v) ปริมาตร 4 ml จากนั้นเทสารผสมที่ได้ลงในกรวยแยกและเติมสารละลาย 0.9% NaCl ปริมาตร 1 ml ลงไป เขย่าและรอจนสารเกิดการแยกชั้นแล้วจึงเก็บสารส่วนล่างมาระเหยจนแห้ง ชั่งน้ำหนักสารที่ได้และนำไปคำนวณหาปริมาณลิปิดที่สกัดได้ โดยใช้สูตร

$$\% \text{Lipid in CNRL} = \frac{W_2 \times 100}{W_1}$$

เมื่อ W_1 คือ น้ำหนักฟิล์มยางก่อนแช่สารละลายผสม (กรัม)
 W_2 คือ น้ำหนักสารที่สกัดได้ (กรัม)

3.5 การวิเคราะห์สมบัติของผลิตภัณฑ์ยาง

3.5.1 การวัดความทนต่อแรงดึง (Tensile Strength) ของฟิล์มยาง

การเตรียมชิ้นงานสำหรับวัดความทนต่อแรงดึงยึดในงานวิจัยนี้ สามารถเตรียมได้โดยการตัดชิ้นทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมขนาด 10x70 cm และกำหนดระยะการวัด (gauge length) เป็น 3 cm จากนั้นนำชิ้นงานมาทดสอบความทนต่อแรงดึง (Tensile Strength) และความยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) โดยใช้ load cell ขนาด 30 kN ที่อัตราเร็ว (Crosshead speed) 30 mm/min

3.5.2 การวัดความหนาแน่นของยางฟองน้ำ (Density)

การทดสอบความหนาแน่นของยางฟองน้ำในงานวิจัยนี้ ได้ดัดแปลงการเตรียมตัวอย่างชิ้นทดสอบจาก มอก. 2741-2559 โดยเตรียมชิ้นทดสอบที่มีขนาดความกว้างด้านละ 50 ± 1 mm หนา 2.5 ± 1 mm จำนวน 5 ชิ้น/ตัวอย่าง และคำนวณหาความหนาแน่น จากสูตร

$$\text{ความหนาแน่น (kg/m}^3\text{)} = \frac{m}{V} \times 10^6$$

เมื่อ m คือ น้ำหนักของยางฟองน้ำ เป็นกรัม

V คือ ปริมาตรของยางฟองน้ำ เป็นลูกบาศก์มิลลิเมตร

3.5.3 การวัดการยุบตัวเนื่องจากแรงกดของยางฟองน้ำ (Compression set)

การทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงกดของยางฟองน้ำในงานวิจัยนี้ได้อ้างอิงการวัดจาก มอก. 2741-2559 ทำได้โดยเตรียมชิ้นยางฟองน้ำทดสอบขนาดยาว (50 ± 1) มิลลิเมตร กว้าง (50 ± 1) มิลลิเมตร และหนา (2.5 ± 1) มิลลิเมตร มากด้วยเครื่องกดอัดให้มีความหนาลดลง 50% ของความหนาเดิม แล้วนำไปเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ $(70 \pm 1) ^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 22 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบ แกะชิ้นทดสอบออกจากเครื่องกดอัด วางทิ้งไว้ 30 นาที แล้วจึงวัดความหนาของชิ้นทดสอบ สำหรับการคำนวณให้คำนวณ 2 วิธี ได้แก่

1. คำนวณหาการยุบตัวคิดเป็นร้อยละของความหนาเดิม

$$C_h = \frac{(t_0 - t_1)}{t_0} \times 100$$

โดยที่ C_h คือ ความหนาที่ลดลงจากความหนาเดิมหลังจากผ่านแรงอัดแล้ว (%)

t_0 คือ ความหนาเดิมของชั้นทดสอบ (mm)

t_1 คือ ความหนาของชั้นทดสอบหลังจากผ่านแรงอัดแล้ว (mm)

2. คำนวณหาการยุบตัวคิดเป็นร้อยละของระยะยุบตัวเดิม

$$C_d = \frac{(t_0 - t_1)}{(t_0 - t_s)} \times 100$$

โดยที่ C_d คือ ระยะยุบตัวที่เปลี่ยนไปจากระยะยุบตัวเดิม (ครึ่งหนึ่งของความหนาเดิม) หลังจากผ่านแรงอัดแล้ว (%)

t_0 คือ ความหนาเดิมของชั้นทดสอบ (mm)

t_1 คือ ความหนาของชั้นทดสอบหลังจากผ่านแรงอัดแล้ว (mm)

t_s คือ ความสูงของแท่งเหล็กกล้า (mm)

หมายเหตุ. ในงานวิจัยนี้จะใช้การคำนวณแบบที่ 1 ในการคำนวณหา %การยุบตัวของยางพองน้ำ

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการใช้เอนไซม์ไลเปสในการเร่งความเสถียรเชิงกลของน้ำยางชั้น โดยได้ศึกษากิจกรรมของเอนไซม์ไลเปส (Enzyme activity) เพื่อคัดเลือกเอนไซม์ไลเปสเกรดที่เหมาะสมสำหรับการบ่มเร่งความเสถียรเชิงกลของน้ำยางชั้น และศึกษาผลของการบ่มเร่งความเสถียรเชิงกลของน้ำยางชั้นด้วยเอนไซม์ไลเปสเทียบกับการบ่มเร่งความเสถียรเชิงกลของน้ำยางชั้นด้วยสบู่แอมโมเนียมลอเลต (น้ำยางชั้นเกรดการค้า; Commercial latex) ที่ระยะเวลาบ่มต่าง ๆ นอกจากนี้ยังได้ศึกษาการนำน้ำยางชั้นที่ผ่านการบ่มเร่งความเสถียรเชิงกลด้วยเอนไซม์ไลเปสมาขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ยาง ได้แก่ ลูกโป่งและยางพองน้ำ และศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของผลิตภัณฑ์ที่ได้เทียบกับผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางชั้นเกรดการค้า

4.1 การคัดเลือกเกรดเอนไซม์ไลเปสเพื่อใช้บ่มเร่งความเสถียรของน้ำยางชั้น

4.1.1 ผลของ pH ต่อกิจกรรมของเอนไซม์ (Enzyme activity)

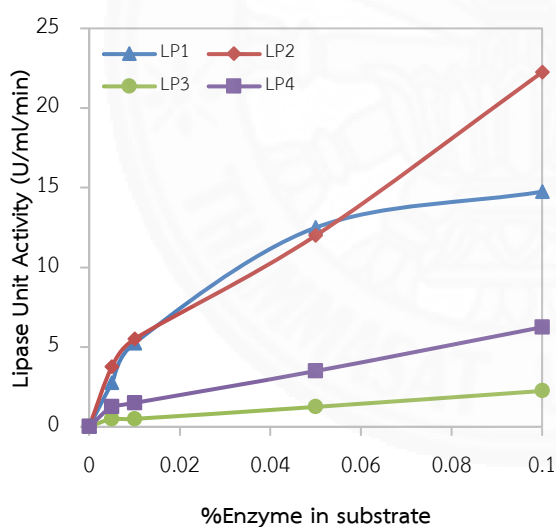
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษา activity ของเอนไซม์ไลเปสที่ pH 7 และ pH 10 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของเอนไซม์ไลเปส ในสภาวะที่เป็นกลาง (pH 7) ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการทำงานของเอนไซม์ และในสภาวะที่เป็นเบส (pH 10) ซึ่งเป็นสภาวะที่ใกล้เคียงกับค่า pH จริงของน้ำยางชั้น โดยศึกษา activity ของเอนไซม์ไลเปส 4 เกรด ซึ่งใช้ชื่อย่อเป็น LP1, LP2, LP3 และ LP4 ที่มีคุณลักษณะเฉพาะที่ต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.1 จากการศึกษาพบว่า ค่า activity ที่ pH 7 ของเอนไซม์ไลเปสเกรด LP1 และ LP2 มีค่าสูงกว่าเอนไซม์ไลเปสเกรด LP3 และ LP4 โดยค่า activity ของเอนไซม์ไลเปสเกรด LP1 และ LP2 มีค่าที่ใกล้เคียงกันเมื่อเติมเอนไซม์ลงในขั้วสเตรทในปริมาณ 0-0.05% โดยปริมาตรของขั้วสเตรท แต่เมื่อเติมเอนไซม์ไลเปสในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นจะพบว่าค่า activity ของเอนไซม์ไลเปสเกรด LP2 มีค่าสูงกว่าเอนไซม์ไลเปสเกรด LP1 ดังแสดงในภาพที่ 4.1(ก) เมื่อทำการศึกษากิจกรรมของเอนไซม์ไลเปสที่ pH 10 พบว่าเอนไซม์ไลเปสเกรด LP2 มีค่า activity สูงที่สุด ในขณะที่เอนไซม์ไลเปสเกรดอื่น ๆ มีค่า activity ที่ไม่แตกต่างกันมากนัก ดังแสดงในภาพที่ 4.1(ข) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเอนไซม์ไลเปสเกรด LP2 สามารถทำงานได้ดีในช่วง pH 10 ซึ่งจากผลการทดลองที่ pH 7 และ pH 10 แสดงให้เห็นว่าเอนไซม์ไลเปสเกรด LP1 และ LP2 สามารถทำงานได้ดีใกล้เคียงกันที่ pH 7 ในขณะที่เอนไซม์ไลเปสเกรด LP2 สามารถทำงานได้ดีทั้งใน pH 7 และ pH 10 ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้เอนไซม์ไลเปสเกรด LP1 และ LP2 ในการ

เปรียบเทียบประสิทธิภาพการเร่งความเสถียรเชิงกลในน้ำยางข้น เพื่อคัดเลือกเอนไซม์ไลเปสเกรดที่เหมาะสมในการศึกษาการบ่มเร่งความเสถียรเชิงกลของน้ำยางข้นต่อไป

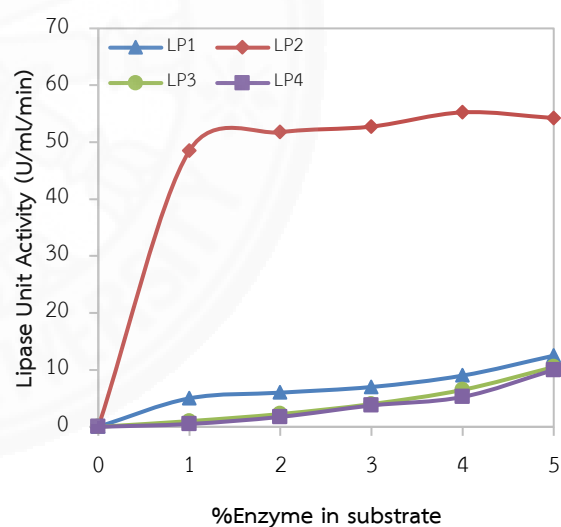
ตารางที่ 4.1

คุณลักษณะเฉพาะของเอนไซม์ไลเปสแต่ละเกรด

Sample	Origin	Appearance	Color	Adjusting pH
LP1	camlicla lipolytica	liquid	Brown	6.5-10.5
LP2	Thermomyces lanuginosa	liquid	Brown	7-10
LP3	camlicla lipolytica	powder	Amber	6.5-10.5
LP4	-	powder	Amber	-



(ก) Lipase activity at pH 7

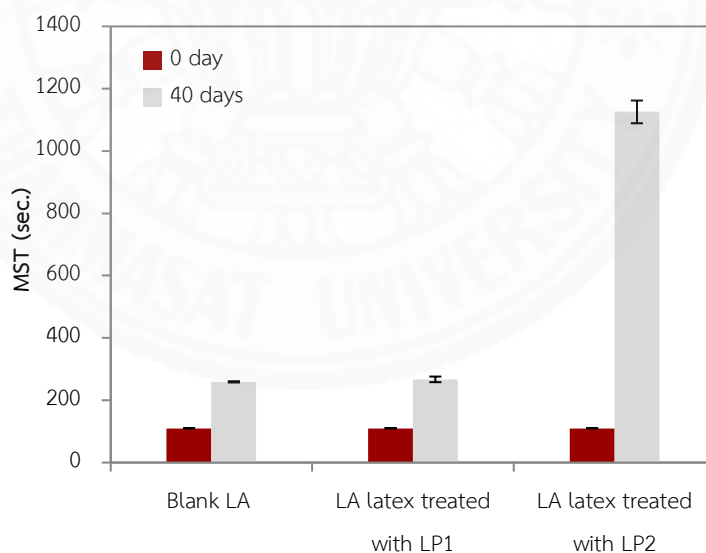


(ข) Lipase activity at pH 10

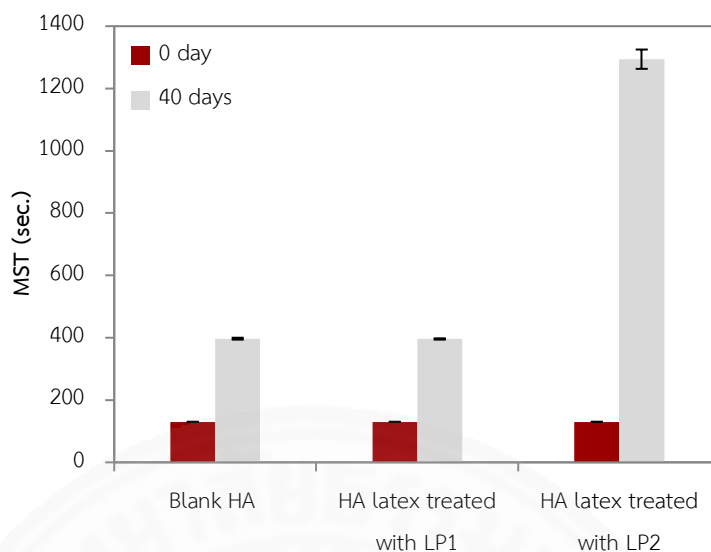
ภาพที่ 4.1 กิจกรรมของเอนไซม์ไลเปส (Lipase activity) ที่ (ก) pH 7 และ (ข) pH 10

4.1.2 ผลของเอนไซม์ไลเปสต่อค่าความเสถียรเชิงกล (Mechanical Stability Time; MST) และสมบัติพื้นฐานอื่นๆ ของน้ำยางข้น

การศึกษาผลของเอนไซม์ไลเปสต่อค่า MST และสมบัติพื้นฐานอื่น ๆ ของน้ำยางข้น จะใช้เอนไซม์ไลเปส 2 เกรด ได้แก่ เอนไซม์ไลเปสเกรด LP1 และ LP2 ปริมาณ 0.004% v/v ในการบ่มเร่งความเสถียรเชิงกลของน้ำยางข้นทั้งชนิด LA latex และ HA latex ที่มีค่า MST เริ่มต้น (ที่ระยะเวลาบ่ม 0 วัน) คือ 110 และ 130 วินาที ตามลำดับ โดยเมื่อเปรียบเทียบกับค่า MST ที่ระยะเวลาบ่ม 40 วัน ระหว่างน้ำยางข้น Blank กับน้ำยางข้นที่บ่มเร่งความเสถียรด้วยเอนไซม์ไลเปสทั้งสองเกรด พบว่าค่า MST ของน้ำยางข้นทั้งชนิด LA latex และ HA latex ที่บ่มเร่งความเสถียรด้วยเอนไซม์ไลเปสเกรด LP2 มีค่าสูงกว่าน้ำยางข้นที่บ่มเร่งความเสถียรด้วยเอนไซม์ไลเปสเกรด LP1 อย่างเห็นได้ชัด ดังแสดงในภาพที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ ซึ่งความแตกต่างของค่า MST ของน้ำยางข้นที่บ่มเร่งความเสถียรเชิงกลด้วยเอนไซม์ไลเปสทั้ง 2 เกรดที่แตกต่างกันนี้ อาจเนื่องมาจากเอนไซม์แต่ละเกรดมีประสิทธิภาพการทำงานในน้ำยางข้นแตกต่างกัน โดยเอนไซม์ไลเปสเกรด LP2 ที่มีค่า enzyme activity สูงกว่าเอนไซม์ไลเปส LP1 ที่ pH 10 จะมีประสิทธิภาพในการเร่งความเสถียรเชิงกลของน้ำยางข้นได้ดีกว่า ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้เอนไซม์ไลเปสเกรด LP2 ในการศึกษาการบ่มเร่งความเสถียรเชิงกลของน้ำยางข้นต่อไป



ภาพที่ 4.2 ค่า MST ของน้ำยางข้นชนิด LA latex ที่บ่มเร่งความเสถียรด้วยเอนไซม์ไลเปสเกรดต่าง ๆ



ภาพที่ 4.3 ค่า MST ของน้ำยางชั้นชนิด HA latex ที่บ่มเร่งความเสถียรด้วยเอนไซม์ไลเปสเกรดต่าง ๆ

โดยจากการศึกษาสมบัติพื้นฐานอื่น ๆ ของน้ำยางชั้น ได้แก่ ค่า %TSC, %DRC, % NH_3 และ pH ของน้ำยางชั้นที่เติมเอนไซม์ไลเปสแต่ละเกรด เทียบกับน้ำยางชั้น Blank ที่ระยะเวลาบ่ม 40 วัน ดังแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่า ค่า %TSC ของน้ำยางชั้นที่เติมเอนไซม์ไลเปสแต่ละเกรดมีค่าสูงกว่าน้ำยางชั้น Blank เล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากน้ำยางชั้นที่เติมเอนไซม์ไลเปสจะมีปริมาณของแข็งทั้งหมดซึ่งรวมของแข็งในน้ำยางชั้นและเอนไซม์ จึงทำให้น้ำยางชั้นที่เติมเอนไซม์ไลเปสมีค่า %TSC ที่มากกว่าน้ำยางชั้น Blank นั้นเอง แต่อย่างไรก็ตามจากการศึกษาจะพบว่า สมบัติพื้นฐานอื่น ๆ ของน้ำยางชั้นที่เติมเอนไซม์ไลเปส มีค่าที่แตกต่างจากน้ำยางชั้น Blank เพียงเล็กน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเติมเอนไซม์ไลเปสแต่ละเกรดไม่ส่งผลต่อสมบัติพื้นฐานของน้ำยางชั้นเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำยางชั้น Blank

ตารางที่ 4.2

สมบัติพื้นฐานของน้ำยางชั้น Blank และน้ำยางชั้นที่เติมเอนไซม์ไลเปสแต่ละเกรด ที่ระยะเวลาบ่ม 0 และ 40 วัน

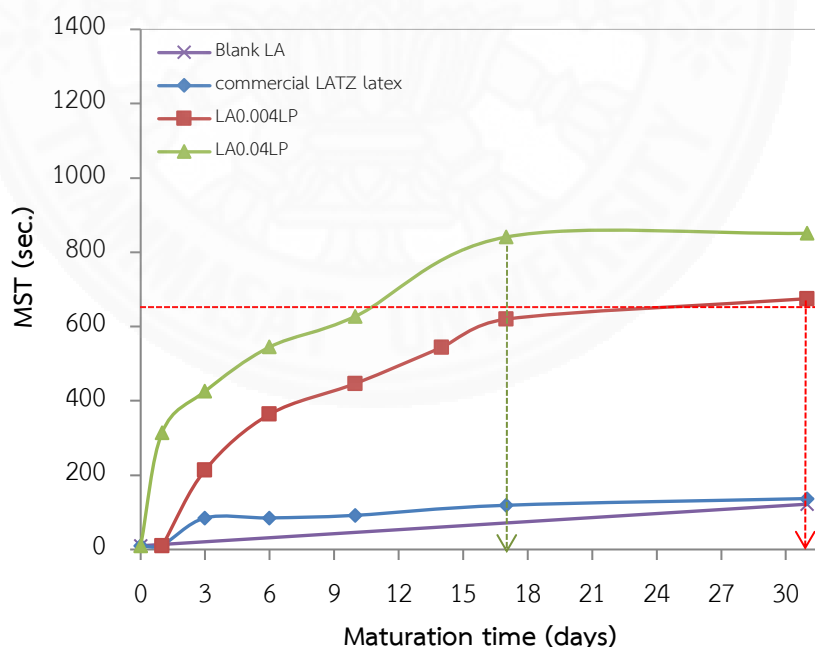
Sample	Property							
	TSC (%)		DRC (%)		%NH ₃		pH	
	0 วัน	40 วัน	0 วัน	40 วัน	0 วัน	40 วัน	0 วัน	40 วัน
Blank LA	61.62	61.02	60.33	60.40	0.30	0.23	9.78	9.28
LA latex treated with LP1	61.62	61.68	60.33	60.42	0.30	0.25	9.78	9.33
LA latex treated with LP2	61.62	61.93	60.33	60.37	0.30	0.25	9.78	9.26
Blank HA	61.47	61.64	60.24	59.75	0.60	0.55	10.29	9.73
HA latex treated with LP1	61.47	61.86	60.24	60.04	0.60	0.54	10.29	9.77
HA latex treated with LP2	61.47	61.07	60.24	59.97	0.60	0.54	10.29	9.67

4.2 ผลของปริมาณเอนไซม์ในน้ำยางชั้นต่อค่า MST และสมบัติพื้นฐานอื่น ๆ ของน้ำยางชั้น

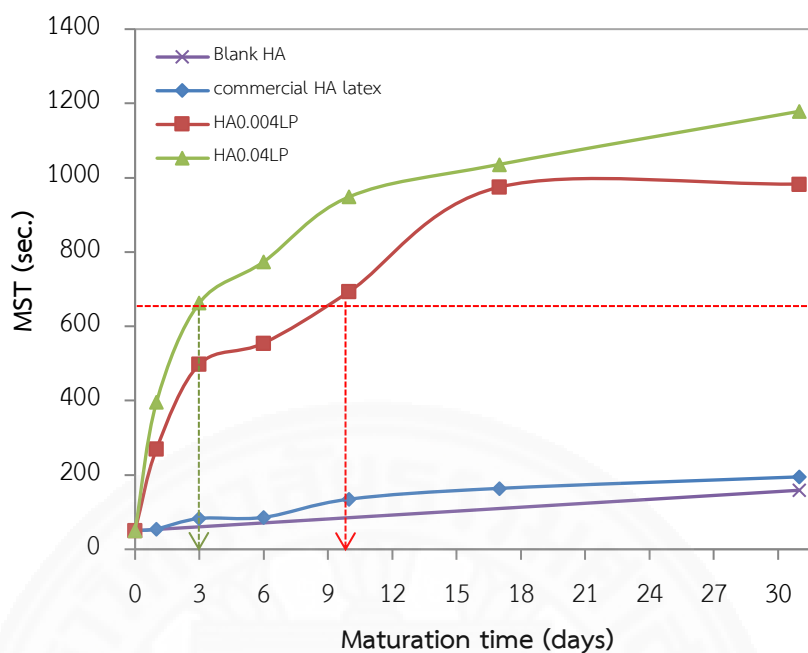
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของการใช้เอนไซม์ไลเปสในปริมาณ 0.004 และ 0.04% v/v ต่อค่า MST ของน้ำยางชั้นที่มีปริมาณเอนไซม์แตกต่างกัน 2 ชนิด ได้แก่ น้ำยางชั้นชนิด LA latex และ HA latex โดยจะใช้น้ำยางชั้น 3 ชุดตัวอย่าง ซึ่งเป็นน้ำยางชั้นที่ได้จากกระบวนการปั่นเหวี่ยงใหม่ๆ จากโรงงานเดียวกัน แต่ผลิตใหม่ในช่วงเวลาต่างกัน

4.2.1 ผลการวัดค่า MST ของน้ำยางชั้นชุดที่ 1

จากการศึกษาการใช้เอนไซม์ไลเปสปริมาณ 0.004 และ 0.04% v/v ในการบ่มเร่งความเสถียรของน้ำยางชั้นชุดที่ 1 ซึ่งเป็นน้ำยางชั้นที่ผลิตในช่วงเดือนตุลาคม โดยทำการศึกษาที่ระยะเวลาบ่ม 31 วัน เปรียบเทียบกับการใช้แอมโมเนียมลอสเลต 0.04wt% ในน้ำยางชั้นเกรดการค้า (commercial LATZ latex และ commercial HA latex) พบว่าค่า MST ของน้ำยางชั้นชนิด LA latex ที่บ่มเร่งความเสถียรด้วยเอนไซม์ไลเปสในปริมาณ 0.004% v/v และ 0.04% v/v (ตัวอย่าง LA0.004LP และ LA0.04LP ตามลำดับ) มีค่าสูงเกินค่ามาตรฐาน (650 วินาที) ในระยะเวลา 31 และ 17 วัน ตามลำดับ ในขณะที่ค่า MST ของน้ำยางชั้น commercial LATZ latex ยังมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานมาก ดังแสดงในภาพที่ 4.4 ส่วนการบ่มเร่งความเสถียรด้วยเอนไซม์ ไลเปสในน้ำยางชั้นชนิด HA latex พบว่าค่า MST ของน้ำยางชั้นที่บ่มเร่งความเสถียรด้วยเอนไซม์ไลเปสในปริมาณ 0.004% v/v และ 0.04% v/v (ตัวอย่าง HA0.004LP และ HA0.04LP ตามลำดับ) มีค่าสูงเกินค่ามาตรฐานในระยะเวลา 10 และ 3 วัน ตามลำดับ ในขณะที่ค่า MST ของน้ำยางชั้น commercial HA latex มีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยและยังมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานมาก ดังแสดงในภาพที่ 4.5

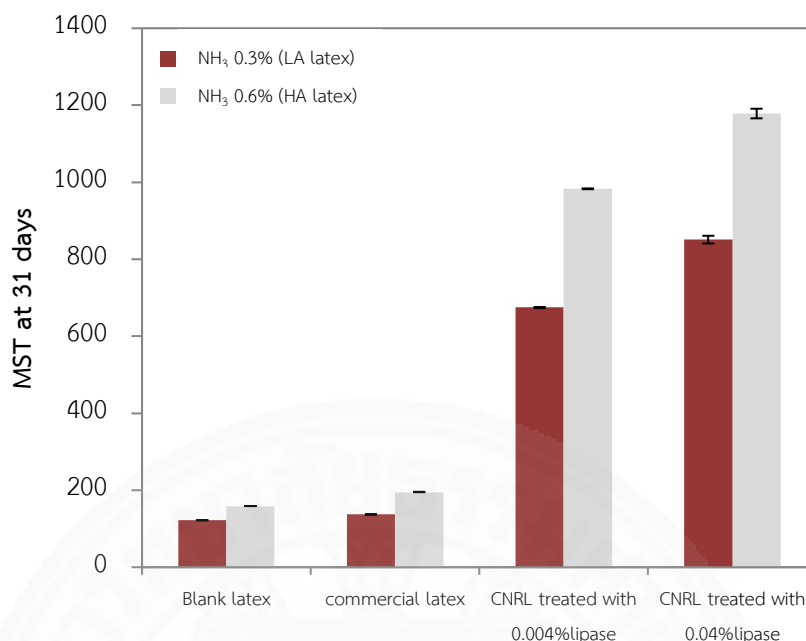


ภาพที่ 4.4 ค่า MST ของตัวอย่างน้ำยางชั้นชนิด LA latex ชุดตัวอย่างที่ 1 ตามระยะเวลาบ่ม 1 เดือน



ภาพที่ 4.5 ค่า MST ของตัวอย่างน้ำยางข้นชนิด HA latex ชุดตัวอย่างที่ 1 ตามระยะเวลาบ่ม 1 เดือน

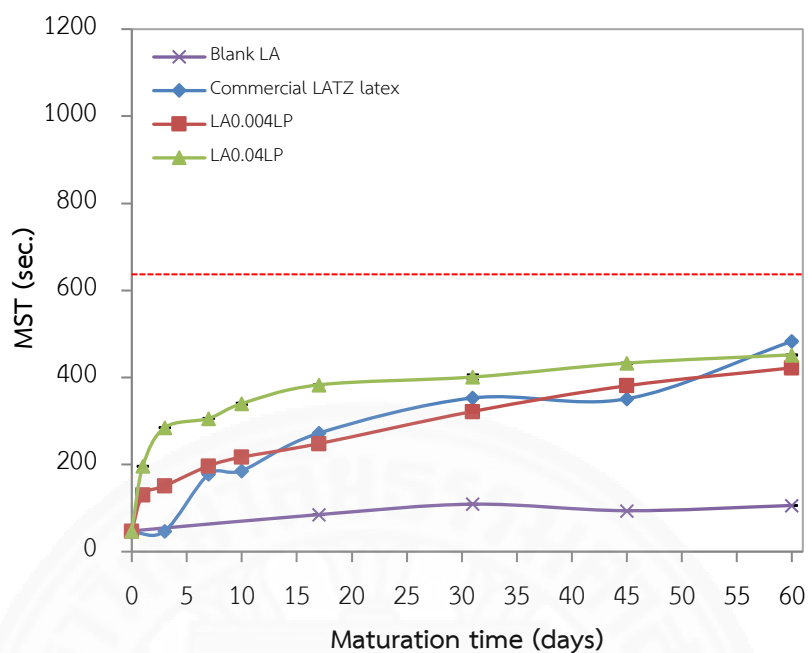
เมื่อทำการเปรียบเทียบค่า MST ของน้ำยางข้นชนิด LA latex และ HA latex ของน้ำยางข้นชุดที่ 1 ที่ระยะเวลาบ่ม 31 วัน ดังแสดงในภาพที่ 4.6 พบว่า น้ำยางข้นชนิด HA latex ทุกตัวอย่างมีค่า MST มากกว่าน้ำยางข้นชนิด LA latex ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณแอมโมเนียในน้ำยางข้ันมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่า MST ด้วยเช่นกัน



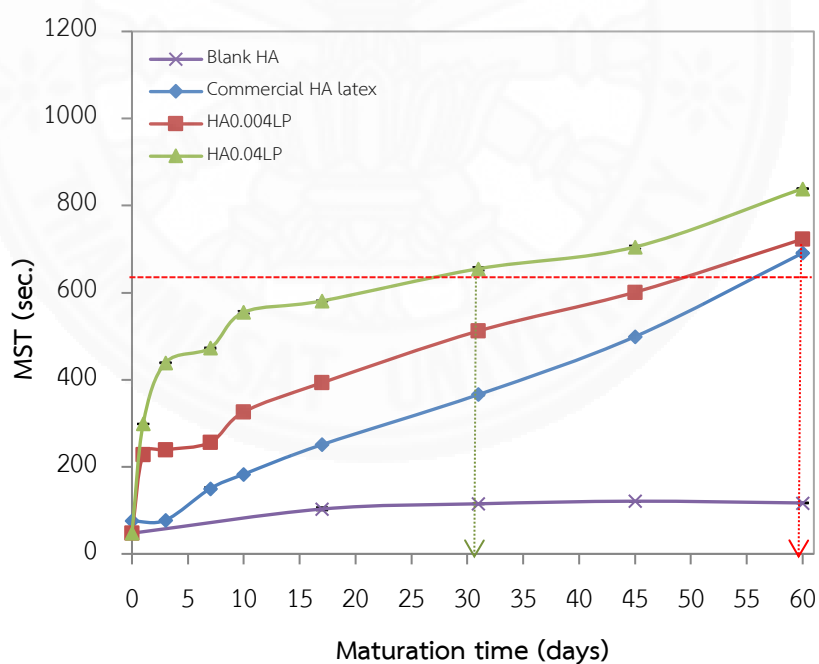
ภาพที่ 4.6 ค่า MST ของน้ำยางข้นชนิด LA latex และ HA latex ชุดที่ 1 ที่ระยะเวลาบ่ม 31 วัน

4.2.2 ผลการวัดค่า MST ของน้ำยางข้นชุดที่ 2

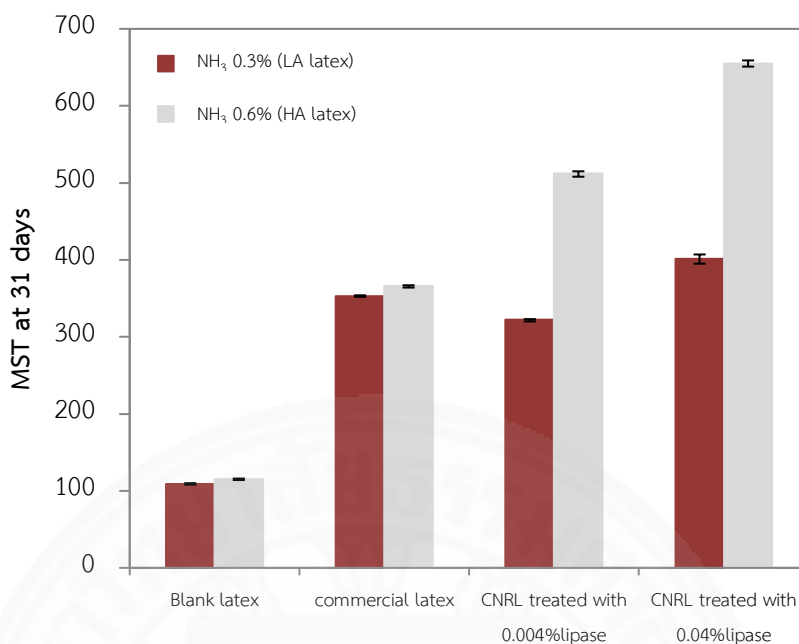
การศึกษาการบ่มเร่งความเสถียรด้วยเอนไซม์ไลเปสในน้ำยางข้นชุดที่ 2 ซึ่งเป็นน้ำยางข้นที่ผลิตช่วงเดือนกุมภาพันธ์ จะทำการศึกษาค่า MST ตามระยะเวลาบ่ม 60 วัน โดยพบว่าน้ำยางข้นชนิด LA latex ชุดที่ 2 ทุกตัวอย่างมีค่า MST ที่ต่ำกว่าค่ามาตรฐาน ดังแสดงในภาพที่ 4.7 โดยจะเห็นได้ว่าที่ระยะเวลาบ่มเดียวกัน การใช้เอนไซม์ไลเปสในปริมาณ 0.04% v/v จะทำให้น้ำยางข้นมีค่า MST ที่สูงกว่าน้ำยางข้น commercial LATZ latex ในขณะที่การใช้เอนไซม์ไลเปสในปริมาณ 0.004% v/v จะพบว่าน้ำยางข้นจะมีค่า MST ที่ใกล้เคียงกับน้ำยางข้น commercial LATZ latex ส่วนในกรณีของน้ำยางข้นชนิด HA latex พบว่าค่า MST ของน้ำยางข้นที่บ่มเร่งความเสถียรด้วยเอนไซม์ไลเปสในปริมาณ 0.004 และ 0.04% v/v มีค่าสูงกว่าน้ำยางข้น commercial HA latex โดยการใช้เอนไซม์ไลเปสในปริมาณ 0.04%v/v จะทำให้น้ำยางข้นมีค่า MST สูงเกินค่ามาตรฐานในระยะเวลา 31 วัน ในขณะที่น้ำยางข้นที่บ่มเร่งความเสถียรด้วยเอนไซม์ไลเปสในปริมาณ 0.004% v/v และน้ำยางข้น commercial HA latex ที่บ่มเร่งด้วยแอมโมเนียมลอลेट 0.04wt% จะมีค่า MST ถึงค่ามาตรฐานในระยะเวลา 60 วัน ดังแสดงในภาพที่ 4.8 นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบค่า MST ของน้ำยางข้นทั้ง 2 ชนิด ยังพบว่า น้ำยางข้นชนิด HA latex จะมีค่า MST เพิ่มขึ้นเร็วกว่าน้ำยางข้นชนิด LA latex ดังแสดงใน ภาพที่ 4.9 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณแอมโมเนียยังมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่า MST ของน้ำยางข้น เช่นเดียวกับน้ำยางข้นชุดที่ 1



ภาพที่ 4.7 ค่า MST ของตัวอย่างน้ำยางข้นชนิด LA latex ชุดตัวอย่างที่ 2 ตามระยะเวลาบ่ม 1 เดือน



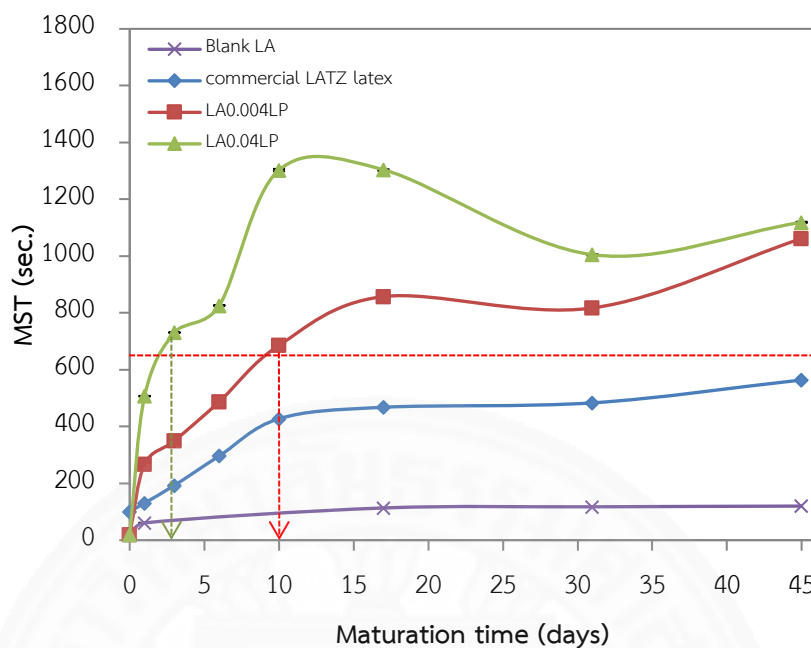
ภาพที่ 4.8 ค่า MST ของตัวอย่างน้ำยางข้นชนิด HA latex ชุดตัวอย่างที่ 2 ตามระยะเวลาบ่ม 1 เดือน



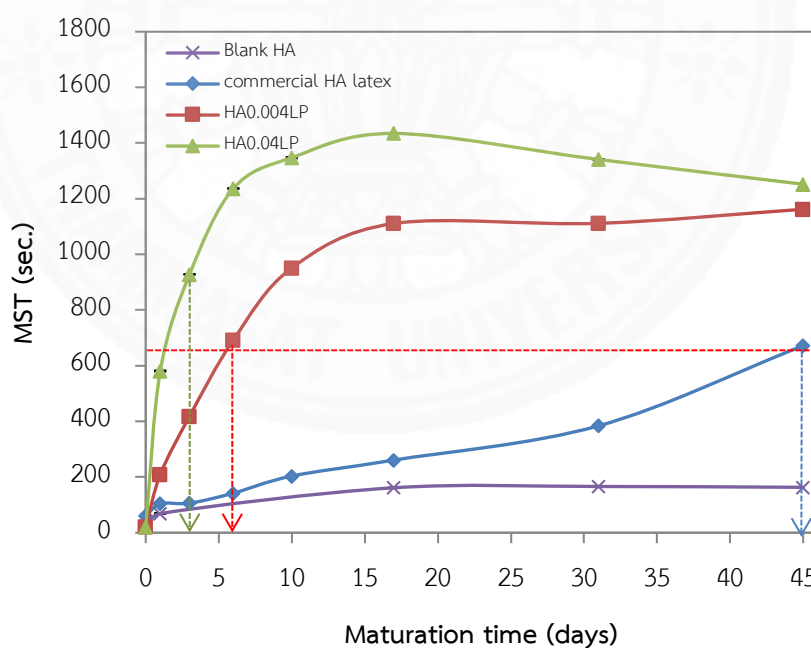
ภาพที่ 4.9 ค่า MST ของน้ำยางข้นชนิด LA latex และ HA latex ชุดที่ 2 ที่ระยะเวลาบ่ม 31 วัน

4.2.3 ผลการวัดค่า MST ของน้ำยางข้นชุดที่ 3

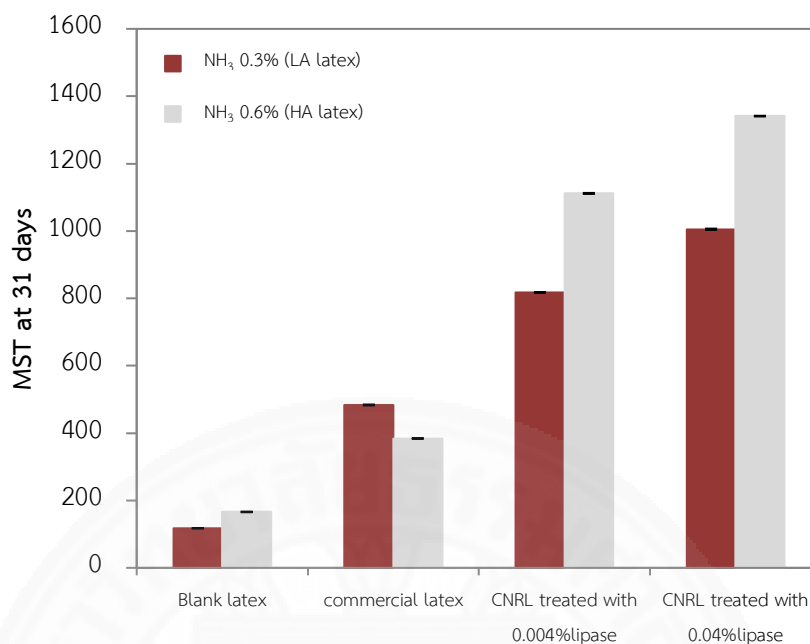
การศึกษาการบ่มเร่งความเสถียรด้วยเอนไซม์ไลเปสที่ระยะเวลาบ่ม 45 วัน ของน้ำยางข้นชุดที่ 3 ซึ่งเป็นน้ำยางข้นที่ผลิตช่วงเดือนพฤศจิกายน พบว่า น้ำยางข้นทั้งชนิด LA latex และ HA latex ที่บ่มเร่งด้วยเอนไซม์ไลเปสในปริมาณ 0.004 และ 0.04% v/v มีค่า MST ที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยพบว่าค่า MST ของน้ำยางข้นชนิด LA latex ที่บ่มเร่งความเสถียรด้วยเอนไซม์ไลเปสปริมาณ 0.004 และ 0.04% v/v มีค่าสูงเกินค่ามาตรฐานที่กำหนดในระยะเวลา 10 วัน และ 3 วันตามลำดับ ในขณะที่น้ำยางข้น commercial LATZ latex ยังมีค่า MST ที่ต่ำกว่าค่ามาตรฐาน ดังแสดงในภาพที่ 4.10 ส่วนค่า MST ของน้ำยางข้นชนิด HA latex ที่บ่มเร่งความเสถียรด้วยเอนไซม์ไลเปสปริมาณ 0.004 และ 0.04% v/v มีค่าสูงเกินค่ามาตรฐานที่กำหนดในระยะเวลา 6 วัน และ 3 วันตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4.11 ในขณะที่น้ำยางข้น commercial HA latex มีค่าสูงเกินค่ามาตรฐานที่กำหนดในระยะเวลา 45 วัน และเมื่อเปรียบเทียบค่า MST ของน้ำยางข้นชนิด LA latex กับ HA latex ที่ระยะเวลาบ่ม 31 วัน ดังแสดงในภาพที่ 4.12 จะเห็นได้ว่า ค่า MST ของน้ำยางข้นชนิด HA latex มีค่าสูงกว่าน้ำยางข้นชนิด LA latex ดังเช่นน้ำยางข้นชุดที่ 1 และชุดที่ 2 ด้วยเช่นกัน



ภาพที่ 4.10 ค่า MST ของตัวอย่างน้ำยางข้นชนิด LA latex ชุดตัวอย่างที่ 3 ตามระยะเวลาบ่ม 1 เดือน



ภาพที่ 4.11 ค่า MST ของตัวอย่างน้ำยางข้นชนิด HA latex ชุดตัวอย่างที่ 3 ตามระยะเวลาบ่ม 1 เดือน



ภาพที่ 4.12 ค่า MST ของน้ำยางชั้นชนิด LA latex และ HA latex ชุดที่ 3 ที่ระยะเวลาบ่ม 31 วัน

จากการศึกษาการบ่มเร่งความเสถียรด้วยเอนไซม์ไลเปสในน้ำยางชั้นทั้ง 3 ชุดตัวอย่าง จะเห็นได้ว่า การบ่มเร่งความเสถียรด้วยเอนไซม์ไลเปสสามารถเร่งค่า MST ของน้ำยางชั้นได้เร็วกว่าการบ่มเร่งความเสถียรด้วยแอมโมเนียมคลอไรด์ในน้ำยางชั้นเกรดการค้า โดยการใช้เอนไซม์ไลเปสสามารถช่วยเร่งค่า MST ให้กับน้ำยางชั้นทั้งชนิด LA latex และ HA latex ได้ เนื่องจากเอนไซม์ไลเปสจะช่วยเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของฟอสโฟลิปิดที่อยู่บนผิวอนุภาคยางเกิดเป็นกรดไขมันสายโซ่ยาว ซึ่งจะรวมตัวกับแอมโมเนียในน้ำยางกลายเป็นสบู่กรดไขมันและถูกดูดซับที่ผิวอนุภาคยางทำให้อนุภาคยางมีความเสถียรเพิ่มมากขึ้น โดยการเติมเอนไซม์ไลเปสในปริมาณที่มากขึ้นยังส่งผลให้ค่า MST ของน้ำยางชั้นมีค่าเพิ่มเร็วขึ้นอีกด้วย นอกจากนี้ จากการศึกษาพบว่าค่า MST ของน้ำยางชั้นชนิด HA latex จะมีค่าที่สูงกว่าค่า MST ของน้ำยางชั้นชนิด LA latex เนื่องจากการไฮโดรไลซิสของฟอสโฟลิปิดจะเกิดขึ้นได้ดีในสภาวะที่มีแอมโมเนียสูง ทำให้น้ำยางชั้นชนิด HA latex มีสบู่กรดไขมันเกิดขึ้นมากกว่า จึงส่งผลให้มีค่า MST ที่สูงกว่าน้ำยางชั้นชนิด LA latex (บุญธรรม นิธิอุทัย และคณะ, 1995) อย่างไรก็ตามจากการศึกษาจะเห็นได้ว่าน้ำยางชั้นชนิด LA latex ที่บ่มเร่งความเสถียรด้วยเอนไซม์ไลเปสในปริมาณ 0.004 และ 0.04%v/v มีค่า MST เพิ่มขึ้นเร็วกว่าน้ำยางชั้น Commercial HA latex อย่างเห็นได้ชัด แสดงให้เห็นว่าการใช้เอนไซม์ไลเปสสามารถลดปริมาณการใช้แอมโมเนียในกระบวนการผลิตน้ำยางชั้น จาก 0.6% เหลือเพียง 0.3% โดยยังสามารถเพิ่มค่า MST ได้เร็วกว่าเมื่อใช้แอมโมเนียในปริมาณที่สูง (0.6%) ซึ่งจะเป็นแนวทางในการลดปัญหาผลกระทบจากการใช้แอมโมเนียในกระบวนการผลิตน้ำยางชั้นได้อีกด้วย

4.2.4 ผลการวัดสมบัติพื้นฐานอื่น ๆ ของน้ำยางชั้น

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมบัติพื้นฐานของน้ำยางชั้น ได้แก่ ค่า %TSC, %DRC, %NH₃, pH และ VFA number โดยผลการศึกษา %TSC, %DRC, %NH₃ และ pH ที่ระยะเวลาบ่ม 1 วัน และ 31 วัน ของน้ำยางชั้น Blank, น้ำยางชั้นเกรดการค้าและน้ำยางชั้นที่บ่มเร่งความเสถียรด้วย เอนไซม์ไลเปสของน้ำยางชั้นชุดที่ 1, 2 และ 3 แสดงดังตารางที่ 4.3, 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ โดยเมื่อเปรียบเทียบสมบัติพื้นฐานของน้ำยางชั้นตามระยะเวลาบ่มที่เปลี่ยนไปพบว่า สมบัติพื้นฐานของน้ำยางชั้นที่บ่มเป็นระยะเวลา 1 วัน และ 31 วัน มีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ระยะเวลาบ่มมีผลน้อยมากต่อสมบัติพื้นฐานของน้ำยางชั้น โดยค่า %TSC และ %DRC ของน้ำยางชั้นมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากสารที่เป็นของแข็งทั้งหมดในน้ำยางและเนื้อยางไม่เกิดการย่อยสลายตามระยะเวลาบ่ม ในขณะที่เมื่อระยะเวลาบ่มนานขึ้น ค่า %NH₃ และ pH ของน้ำยางชั้นมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากแอมโมเนียที่มีอยู่ในน้ำยางเกิดการระเหยได้ง่าย จึงส่งผลให้ปริมาณแอมโมเนียในน้ำยางมีค่าลดลงตามระยะเวลาบ่ม ซึ่งจะส่งผลให้ค่า pH ของน้ำยางชั้นมีแนวโน้มที่ลดลงด้วยเช่นกัน

ตารางที่ 4.3

สมบัติพื้นฐานต่าง ๆ ของตัวอย่างน้ำยางชั้นชุดที่ 1

Sample	Property							
	%TSC		%DRC		%NH ₃		pH	
	1 วัน	31 วัน	1 วัน	31 วัน	1 วัน	31 วัน	1 วัน	31 วัน
Blank LA	62.39	62.56	61.16	61.45	0.25	0.22	10.15	10.14
Commercial LATZ latex	62.30	61.76	61.20	61.84	0.26	0.22	10.16	10.26
LA0.004LP	62.39	61.91	61.16	61.41	0.25	0.20	10.15	10.12
LA0.04LP	62.39	62.47	61.16	61.59	0.25	0.20	10.15	10.13
Blank HA	61.57	61.16	60.38	60.02	0.64	0.53	10.81	10.82
Commercial HA latex	61.59	61.85	60.39	60.22	0.66	0.61	10.83	10.99
HA0.004LP	61.57	61.91	60.38	61.27	0.64	0.54	10.81	10.78
HA0.04LP	61.57	61.57	60.38	59.15	0.64	0.53	10.81	10.86

ตารางที่ 4.4

สมบัติพื้นฐานต่าง ๆ ของตัวอย่างน้ำยางชั้นชุดที่ 2

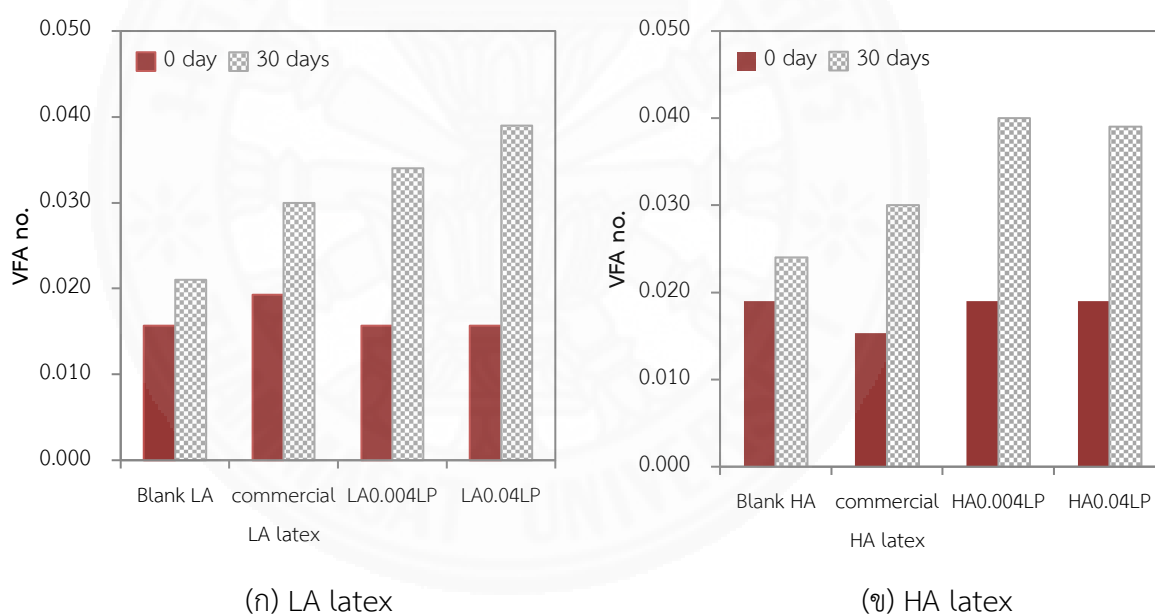
Sample	Property							
	%TSC		%DRC		%NH ₃		pH	
	1 วัน	31 วัน	1 วัน	31 วัน	1 วัน	31 วัน	1 วัน	31 วัน
Blank LA	63.92	64.19	62.83	62.67	0.23	0.22	10.14	10.05
Commercial LATZ latex	63.07	63.72	61.94	62.31	0.23	0.23	10.09	10.05
LA0.004LP	64.12	64.43	62.30	62.81	0.23	0.22	10.12	9.87
LA0.04LP	64.74	64.02	62.48	63.00	0.22	0.21	10.08	10.05
Blank HA	62.62	63.69	62.12	62.23	0.67	0.65	10.78	10.81
Commercial HA latex	63.11	63.99	61.91	62.03	0.67	0.63	10.76	10.81
HA0.004LP	63.27	63.61	62.13	62.50	0.63	0.63	10.86	10.86
HA0.04LP	62.53	63.45	61.93	62.44	0.63	0.63	10.84	10.85

ตารางที่ 4.5

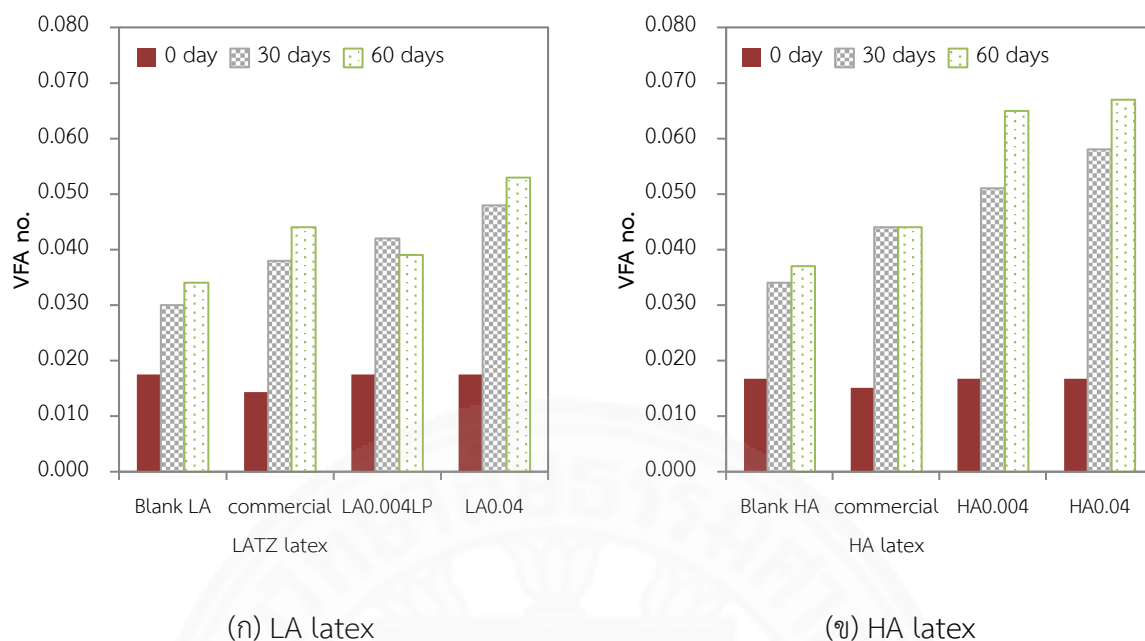
สมบัติพื้นฐานต่าง ๆ ของตัวอย่างน้ำยางชั้นชุดที่ 3

Sample	Property							
	%TSC		%DRC		%NH ₃		pH	
	1 วัน	31 วัน	1 วัน	31 วัน	1 วัน	31 วัน	1 วัน	31 วัน
Blank LA	62.82	62.88	61.47	61.76	0.20	0.20	9.82	9.69
Commercial LATZ latex	62.53	62.76	61.37	61.67	0.19	0.18	9.77	9.60
LA0.004LP	62.82	63.25	61.47	61.93	0.20	0.19	9.82	9.72
LA0.04LP	62.82	63.16	61.47	61.67	0.20	0.18	9.82	9.70
Blank HA	62.90	63.04	61.64	61.72	0.68	0.66	10.59	10.47
Commercial HA latex	62.82	63.22	61.76	62.11	0.59	0.59	10.56	10.43
HA0.004LP	62.90	63.04	61.64	61.94	0.68	0.63	10.59	10.60
HA0.04LP	62.90	63.15	61.64	62.06	0.68	0.64	10.59	10.57

ส่วนการศึกษการบูดเน่าของน้ำยางชั้นเมื่อระยะเวลาบ่มนานขึ้น จะศึกษาโดยทำการวัดค่ากรดไขมันระเหยได้ (Volatile fatty acid number; VFA number) ของน้ำยางชั้นที่ระยะเวลาบ่มที่กำหนด ซึ่งจากการศึกษาค่า VFA number ของน้ำยางชั้นชุดที่ 1 ที่ระยะเวลาบ่ม 0 และ 30 วัน พบว่า ค่า VFA number ของน้ำยางชั้นทั้งชนิด LA latex และ HA latex มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาบ่ม ดังแสดงในภาพที่ 4.13 เนื่องจากจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติจะเข้าไปย่อยสารที่ไม่ใช่น้ำยางในน้ำยางทำให้เกิดกรดไขมันสายโซ่สั้น (short chain fatty acid) ซึ่งเป็นกรดไขมันระเหยได้ ดังนั้นเมื่อบ่มน้ำยางเป็นระยะเวลานานมากขึ้น จุลินทรีย์จะเข้าไปย่อยสารที่มีอยู่ในน้ำยางมากขึ้น เกิดเป็นกรดไขมันระเหยได้มากขึ้น ค่า VFA number จึงมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาบ่ม โดยเมื่อทำการศึกษาค่า VFA number ของน้ำยางชั้นชุดที่ 2 ที่ระยะเวลาบ่ม 0, 30 และ 60 วัน พบว่า ค่า VFA number ของน้ำยางชั้นชุดที่ 2 ยังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาบ่มเช่นเดียวกับน้ำยางชั้นชุดที่ 1 ดังแสดงในภาพที่ 4.14



ภาพที่ 4.13 ค่า VFA number ของน้ำยางชั้นชุดที่ 1 (ก) LA latex และ (ข) HA latex



ภาพที่ 4.14 ค่า VFA number ของน้ำยางข้นชุดที่ 2 (น) LA latex และ (ข) HA latex

เมื่อทำการศึกษาค่า VFA number ของน้ำยางข้นชุดที่ 3 ที่ระยะเวลาบ่ม 0, 30 และ 45 วัน พบว่า ที่ระยะเวลาบ่ม 30 วัน ค่า VFA number ของน้ำยางข้นทั้งชนิด LA latex และ HA latex มีแนวโน้มลดลง แต่เมื่อทำการวัดค่า VFA number ที่ระยะเวลาบ่ม 45 วัน กลับพบว่าคุณค่า VFA number ของน้ำยางข้นมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4.15 โดยเมื่อศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่า VFA number ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงการเน่าเสียของน้ำยางข้น กับค่า MST ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงความเสถียรของน้ำยางข้น จะเห็นได้ว่าค่า VFA number และค่า MST มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาบ่ม เนื่องจากเมื่อระยะเวลาบ่มนานขึ้น จุลินทรีย์จะย่อยสลายสารที่อยู่ในน้ำยางมากขึ้น เกิดเป็นกรดระเหยได้มากขึ้นส่งผลทำให้ค่า VFA number มีค่าที่เพิ่มมากขึ้น ในขณะเดียวกัน ฟอสโฟลิปิดที่อยู่ผิวอนุภาคยางเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเกิดเป็นกรดไขมันสายโซ่ยาวมากขึ้นตามระยะเวลาบ่ม จึงส่งผลให้น้ำยางมีความเสถียรมากขึ้น ทำให้ค่า MST ของน้ำยางข้นมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วยเช่นกัน

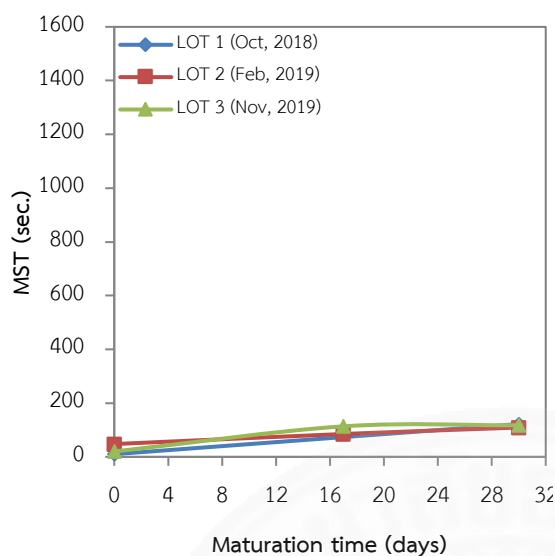


ภาพที่ 4.15 ค่า VFA number ของน้ำยางข้นชุดที่ 3 (ก) LA latex และ (ข) HA latex

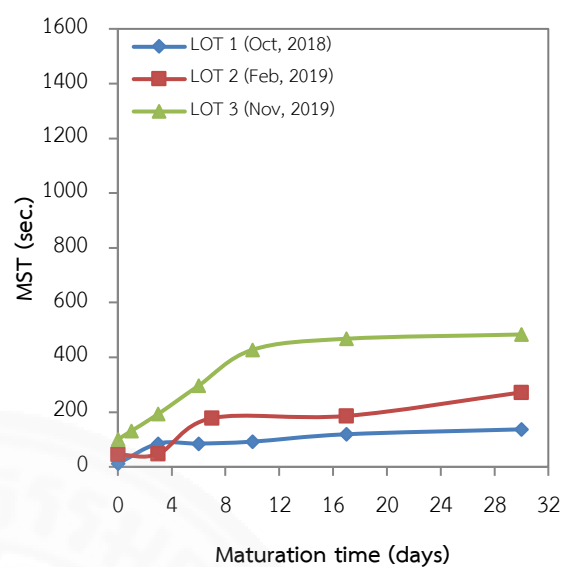
4.3 ผลของชุดน้ำยางข้นต่อการบ่มเร่งความเสถียรด้วยเอนไซม์ไลเปส

4.3.1 ผลการบ่มเร่งความเสถียรเชิงกลในน้ำยางข้นชนิด LA latex

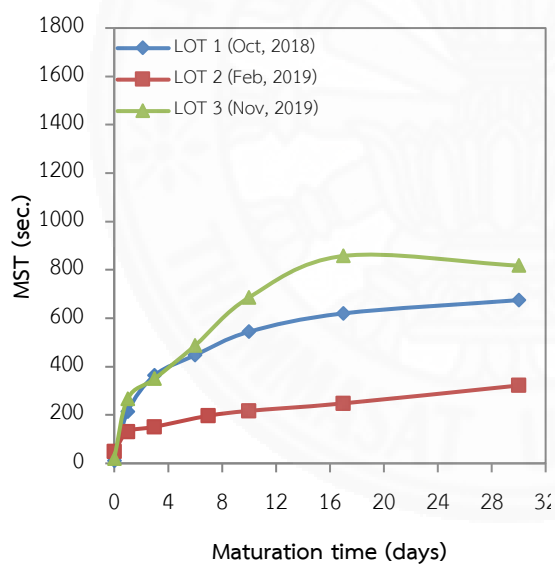
จากการบ่มเร่งความเสถียรเชิงกลของน้ำยางข้นชนิด LA latex ของน้ำยางข้นทั้ง 3 ชุด ตามระยะเวลาบ่ม 31 วัน พบว่า น้ำยางข้นเกรดการค้าและน้ำยางข้นที่บ่มเร่งความเสถียรด้วยเอนไซม์ไลเปส มีค่า MST เพิ่มขึ้นเร็วต่างกัน โดยเมื่อเปรียบเทียบค่า MST ของน้ำยางข้นแต่ละตัวอย่าง จะเห็นได้ว่า ค่า MST ของน้ำยางข้น Blank ทั้ง 3 ชุด มีค่าเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกัน ดังแสดงในภาพที่ 4.16(ก) แต่เมื่อเติมเอนไซม์ไลเปสเพื่อบ่มเร่งความเสถียรของน้ำยางข้นในปริมาณ 0.004 และ 0.04% v/v จะเห็นได้ว่าค่า MST ของน้ำยางข้นชุดที่ 3 มีค่าเพิ่มขึ้นเร็วที่สุดและมีค่าแตกต่างจากน้ำยางข้นชุดที่ 2 อย่างเห็นได้ชัดที่ระยะเวลาบ่มเดียวกัน ดังแสดงในภาพที่ 4.16(ค) และ 4.16(ง) ตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบค่า MST ของน้ำยางข้นเกรดการค้าทั้ง 3 ชุด ดังแสดงในภาพที่ 4.16(ข) พบว่าค่า MST ของน้ำยางข้นเกรดการค้าชุดที่ 3 ยังมีค่าสูงกว่าน้ำยางข้นชุดที่ 1 และชุดที่ 2 ด้วยเช่นกัน



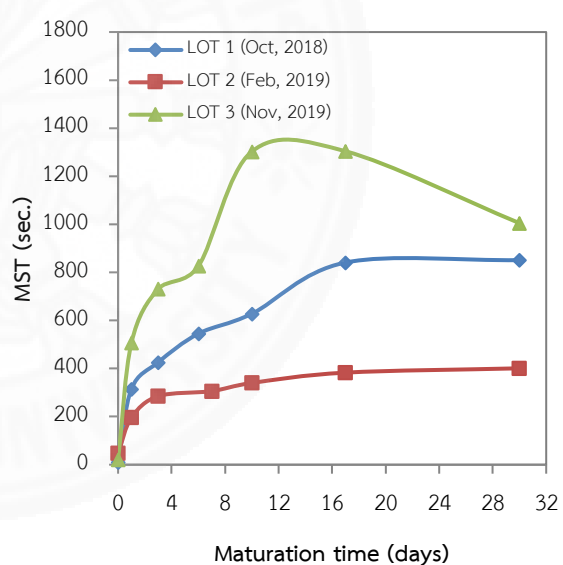
(ก) น้ำยางชั้น Blank



(ข) น้ำยางชั้นเกรดการค้า



(ค) น้ำยางชั้นที่เติมเอนไซม์ไลเปส 0.004%v/v

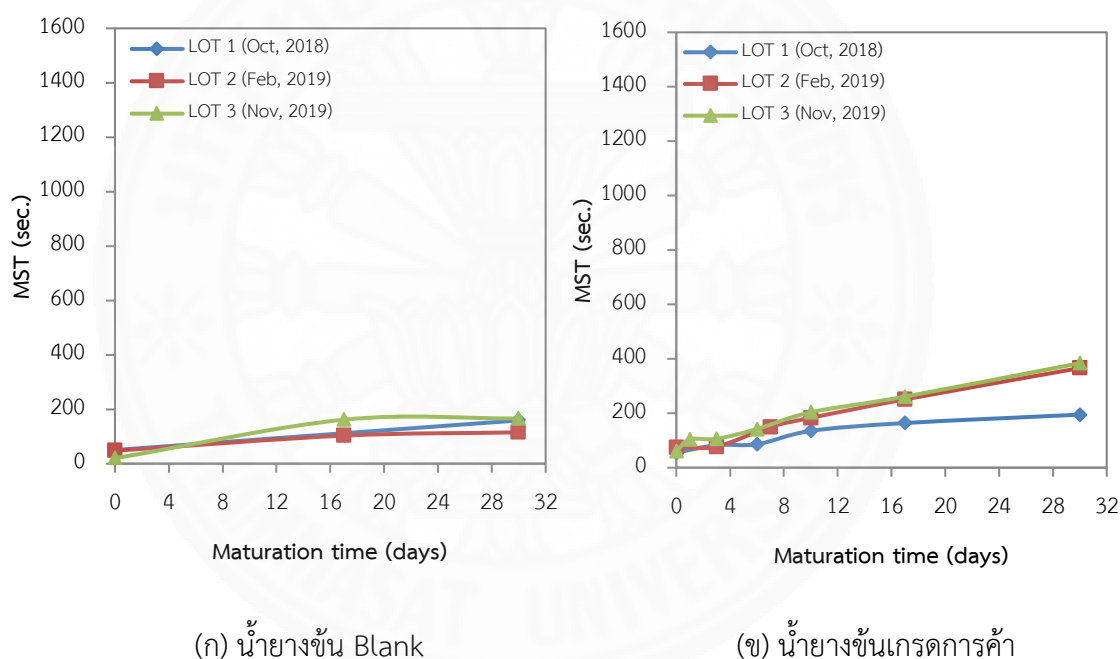


(ง) น้ำยางชั้นที่เติมเอนไซม์ไลเปส 0.04%v/v

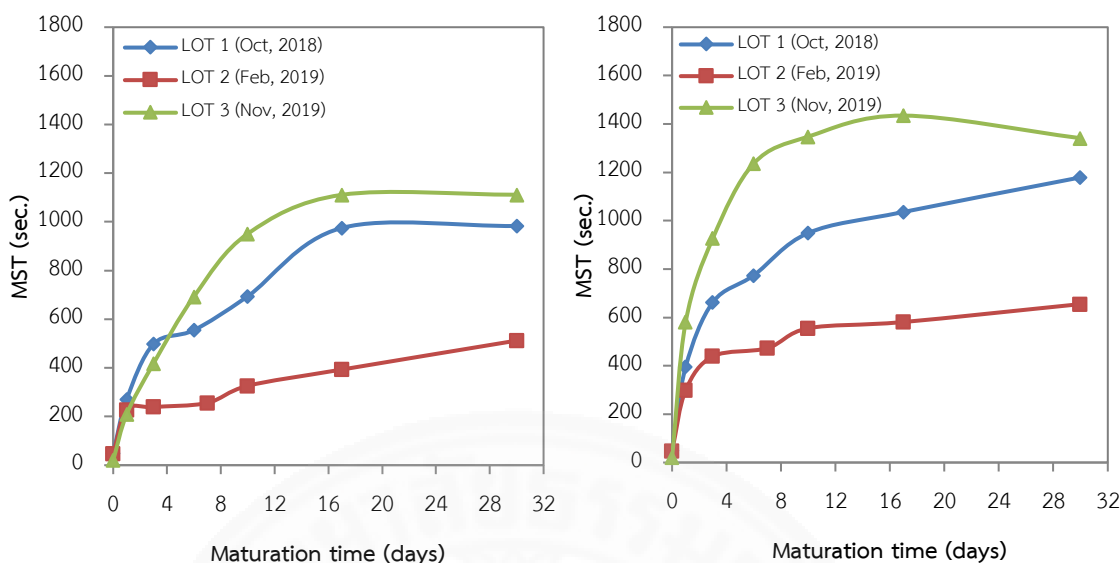
ภาพที่ 4.16 เปรียบเทียบค่า MST น้ำยางชั้นชนิด LA latex ของน้ำยางชั้น 3 ชุดตัวอย่าง

4.3.2 ผลการบ่มเร่งความเสถียรเชิงกลในน้ำยางชั้นชนิด HA latex

เมื่อศึกษาการบ่มเร่งความเสถียรเชิงกลของน้ำยางชั้นชนิด HA latex ตามระยะบ่ม 31 วัน ของน้ำยางชั้นทั้ง 3 ชุดพบว่า ค่า MST ของน้ำยางชั้นเกรดการค้าและน้ำยางชั้นที่บ่มเร่งความเสถียรด้วยเอนไซม์ไลเปส มีค่าเพิ่มขึ้นเร็วแตกต่างกัน ในขณะที่ค่า MST ของน้ำยางชั้น Blank มีค่าเพิ่มขึ้นที่ใกล้เคียงกัน ดังแสดงในภาพที่ 4.17 โดยจะเห็นได้ว่าน้ำยางชั้นชุดที่ 3 ที่บ่มเร่งความเสถียรด้วยเอนไซม์ไลเปสในปริมาณต่าง ๆ มีค่า MST เพิ่มขึ้นเร็วที่สุด เช่นเดียวกับผลการศึกษาในน้ำยางชั้นชนิด LA latex ในขณะที่น้ำยางชั้นเกรดการค้าชุดที่ 2 และชุดที่ 3 มีค่า MST เพิ่มขึ้นใกล้เคียงกันและมีค่าสูงกว่าน้ำยางชั้นเกรดการค้าชุดที่ 1



ภาพที่ 4.17 เปรียบเทียบค่า MST น้ำยางชั้นชนิด HA latex ของน้ำยางชั้น 3 ชุดตัวอย่าง



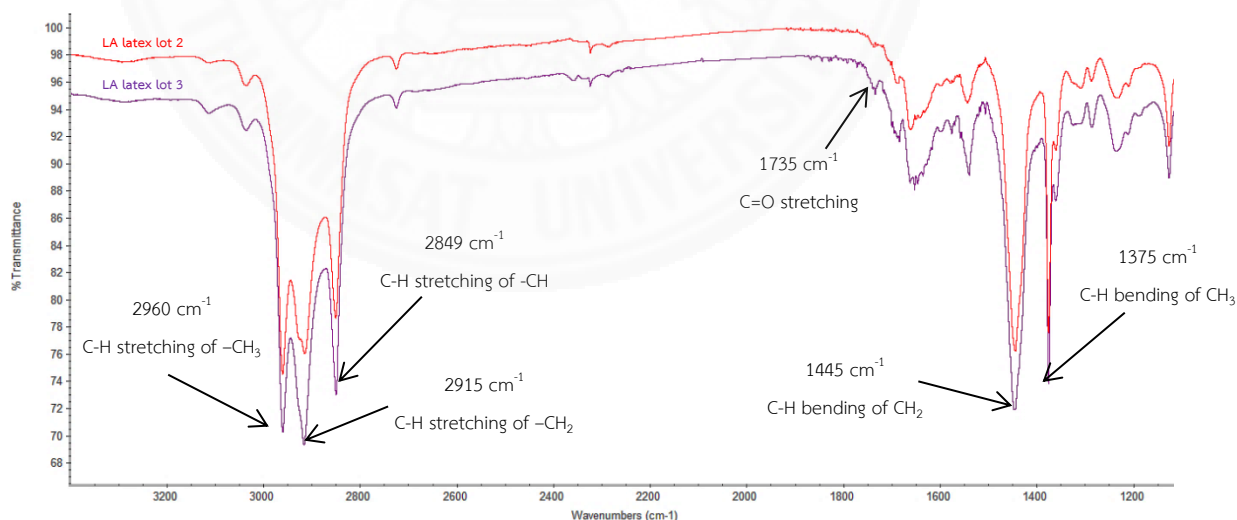
(ค) น้ำยางชั้นที่เติมเอนไซม์ไลเปส 0.004%v/v (ง) น้ำยางชั้นที่เติมเอนไซม์ไลเปส 0.04%v/v

ภาพที่ 4.17 (ต่อ) เปรียบเทียบค่า MST น้ำยางชั้นชนิด HA latex ของน้ำยางชั้น 3 ชุดตัวอย่าง

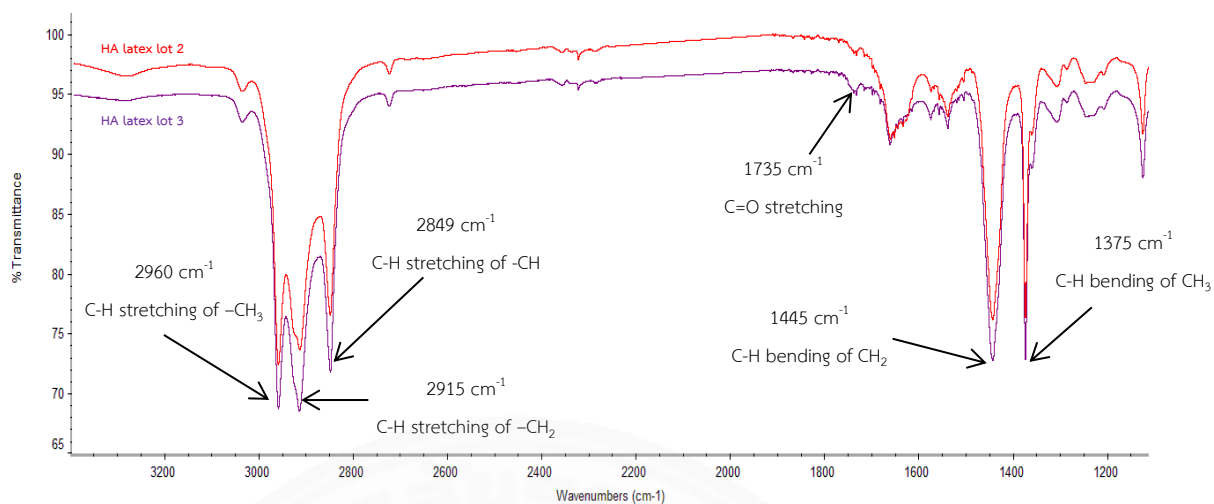
จากการศึกษาการบ่มเร่งความเสถียรด้วยเอนไซม์ไลเปสในน้ำยางชั้นทั้ง 3 ชุดตัวอย่าง จะเห็นได้ว่า น้ำยางชั้นทั้ง 3 ชุดตัวอย่าง ซึ่งเป็นน้ำยางชั้นชนิดเดียวกันจากโรงงานผลิตเดียวกัน มีค่า MST เพิ่มขึ้นต่างกัน ทั้งในน้ำยางชั้น LA latex และน้ำยางชั้น HA latex ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในชุดตัวอย่างน้ำยางชั้นที่แตกต่างกัน ที่ผลิตในช่วงเวลาต่างกัน จะมีการเพิ่มขึ้นของค่า MST ที่แตกต่างกันด้วยเช่นกัน โดยความแตกต่างของการเพิ่มขึ้นของค่า MST ในน้ำยางชั้นชุดที่ 1, 2 และ 3 แสดงถึงคุณภาพของน้ำยางธรรมชาติที่มีการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล ซึ่งอาจเกิดจากความแตกต่างขององค์ประกอบที่ผิวอนุภาคยางในแต่ละชุดตัวอย่างที่ส่งผลให้ค่า MST เพิ่มขึ้นแตกต่างกัน (Hasma, H., 1991)

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาถึงความแตกต่างของน้ำยางชั้นแต่ละชุดตัวอย่างด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared (FTIR) โดยศึกษาเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างน้ำยางชั้นชุดตัวอย่างที่ 2 และ 3 ซึ่งเป็นชุดตัวอย่างน้ำยางชั้นที่มีการเพิ่มขึ้นของค่า MST แตกต่างกัน ซึ่งผลการทดสอบ FTIR ของน้ำยางชั้นชนิด LA latex และ HA latex แสดงดังภาพที่ 4.18 และ 4.19 ตามลำดับ โดยเมื่อเปรียบเทียบปริมาณลิปิดที่อยู่ในน้ำยางชั้น (%Lipid in CNRL) และอัตราส่วนการดูดกลืน (Absorbance ratio: AR) ของน้ำยางชั้นทั้ง 2 ชุดตัวอย่าง ที่แถบความยาวคลื่น 1735 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคของ C=O stretching (Ester ; Carbonyl group) ของฟอสโฟลิปิดในยางธรรมชาติ กับแถบการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 1445 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคของ C-H ดังแสดงในตาราง

ที่ 4.6 พบว่า ค่า AR มีความสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของค่า MST ของน้ำยางชั้น และยังมีความสอดคล้องกับปริมาณลิปิดในน้ำยางชั้น โดยน้ำยางชั้นที่มีค่า AR มาก (มีฟอสโฟลิปิดในปริมาณที่มาก) จะมีค่า MST เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งจากการศึกษาจะเห็นได้ว่า น้ำยางชั้นชุดตัวอย่างที่ 3 ทั้งชนิด LA latex และ HA latex มีค่า AR มากกว่าน้ำยางชั้นชุดที่ 2 และมีการเพิ่มขึ้นของค่า MST ที่เร็วกว่าน้ำยางชั้นชุดที่ 2 เนื่องจากในน้ำยางชั้นที่มีฟอสโฟลิปิดมาก (substrate มาก) เมื่อเอนไซม์ไลเปสเข้าไปทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับฟอสโฟลิปิดที่มีอยู่ใน น้ำยาง จึงทำให้เกิดกรดไขมันสายโซ่ยาวในปริมาณที่มาก ซึ่งกรดไขมันสายโซ่ยาวนี้จะไปรวมตัวกับแอมโมเนียในน้ำยางกลายเป็นสบู่กรดไขมันและเข้าไปล้อมรอบอยู่ที่ผิวของอนุภาคยาง ทำให้น้ำยางมีความเสถียรที่เพิ่มมากขึ้น จึงทำให้ค่า MST ของน้ำยางชั้นชุดที่ 3 มีค่า MST เพิ่มขึ้นได้เร็วกว่าน้ำยางชั้นชุดที่ 2 นั้นเอง อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาค้นคว้าในน้ำยางชั้นชุดที่ 3 ค่า AR ของน้ำยางชั้นชนิด LA latex มีค่ามากกว่าน้ำยางชั้นชนิด HA latex แต่เมื่อพิจารณาค่า AR ประกอบกับค่า MST กลับพบว่า น้ำยางชั้นชนิด LA latex มีค่า MST ที่เพิ่มขึ้นช้ากว่าน้ำยางชั้นชนิด HA latex เล็กน้อย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากน้ำยางชั้นชนิด HA latex มีปริมาณแอมโมเนียในน้ำยางที่มากกว่า ซึ่งแอมโมเนียจะมีส่วนช่วยในการไฮโดรไลซ์ฟอสโฟลิปิดที่มีอยู่ในน้ำยาง จึงทำให้น้ำยางชั้นชนิด HA latex มีค่า MST ที่เพิ่มขึ้นเร็วกว่าน้ำยางชั้นชนิด LA latex (บุญธรรม นิธิอุทัย และคณะ, 1995)



ภาพที่ 4.18 FTIR spectrum ของน้ำยางชั้นชนิด LA latex ชุดตัวอย่างที่ 2 และ 3



ภาพที่ 4.19 FTIR spectrum ของน้ำยางชั้นชนิด HA latex ชุดตัวอย่างที่ 2 และ 3

ตารางที่ 4.6

ปริมาณลิพิดในน้ำยางชั้น อัตราส่วนการดูดกลืน (Absorbance ratio: AR) และค่า Zeta potential เริ่มต้นของน้ำยางชุดที่ 2 และชุดที่ 3

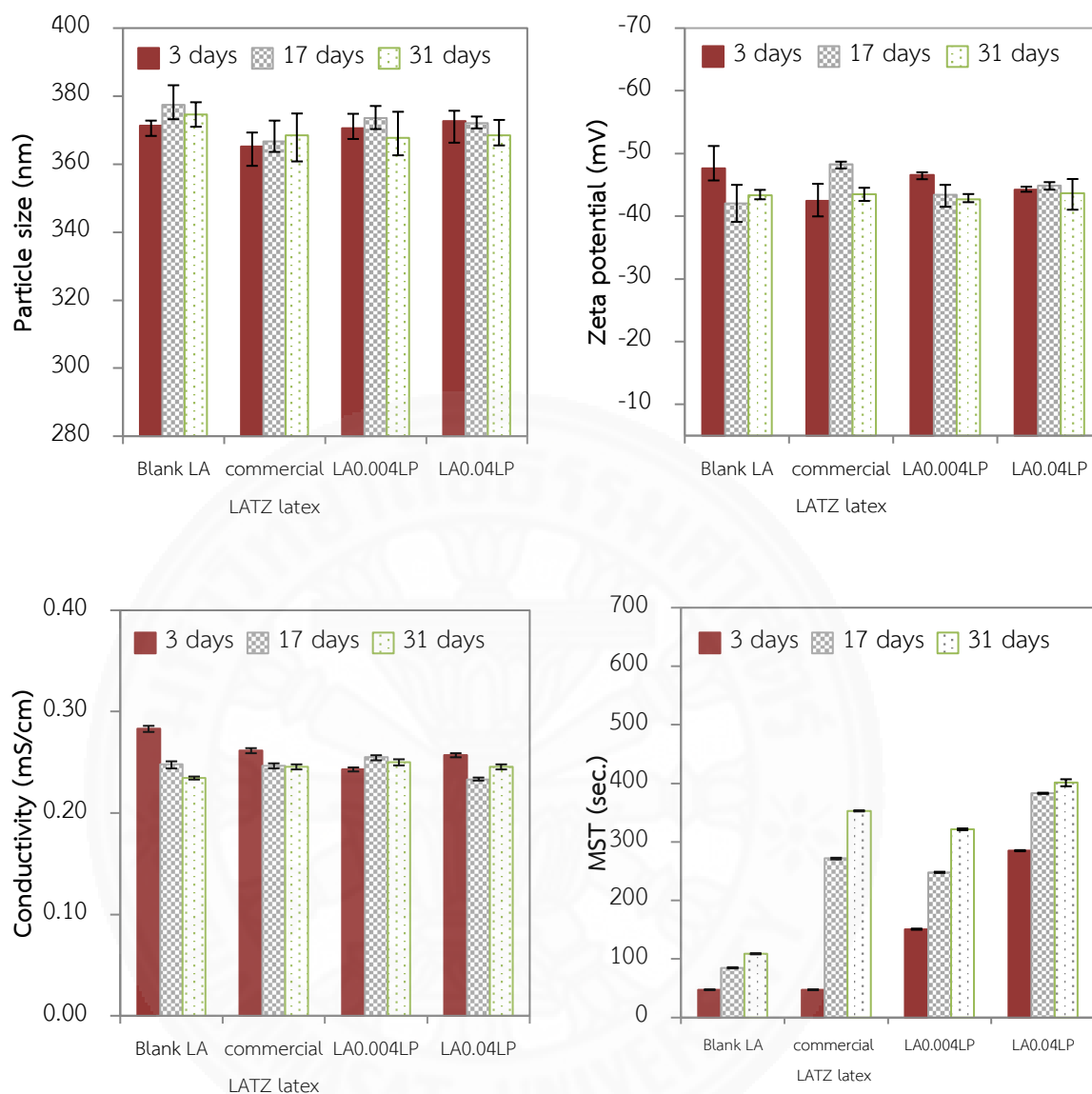
ตัวอย่าง	%Lipid in CNRL	Absorbance ratio (AR)	Zeta potential เริ่มต้นของน้ำยาง
Blank LA ชุดที่ 2	2.4	0.051	-47.7
Blank LA ชุดที่ 3	4.6	0.091	-47.8
Blank HA ชุดที่ 2	2.6	0.068	-44.4
Blank HA ชุดที่ 3	2.9	0.078	-52.8

4.4 ความสัมพันธ์ของผลการทดสอบความเสถียรด้วยเทคนิคการกระเจิงแสง (light scattering technique) กับค่า MST ของน้ำยางข้น

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบความเสถียรด้วยเทคนิค light scattering เพื่อวัดขนาดของอนุภาค (Particle size) ค่าศักย์ซีต้า (Zeta potential) และค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) ของน้ำยางข้น และศึกษาความสัมพันธ์ของผลการทดสอบด้วยวิธีดังกล่าวกับผลการทดสอบค่า MST โดยทำการศึกษาผลการทดสอบความเสถียรของน้ำยางข้นชุดที่ 2 และชุดที่ 3 ทั้งชนิด LA latex และ HA latex ซึ่งเป็นน้ำยางข้นที่มีการเพิ่มขึ้นของค่า MST ที่เร็วแตกต่างกันที่ระยะเวลาบ่ม 3, 17 และ 31 วัน

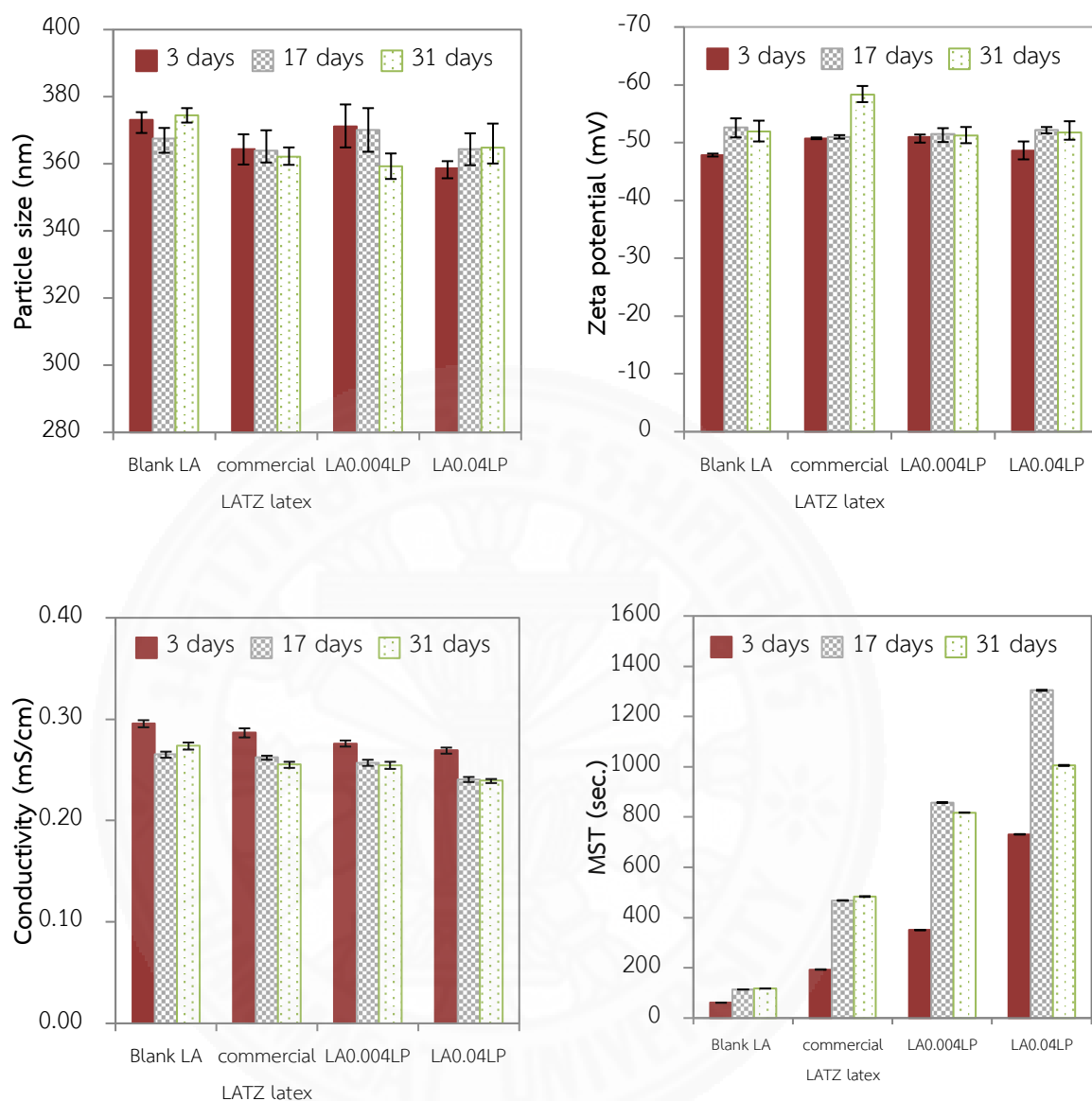
4.4.1 ผลการทดสอบความเสถียรของน้ำยางข้นชนิด LA latex

จากการทดสอบความเสถียรของน้ำยางข้นโดยการวัดขนาดอนุภาค, ค่า zeta potential และ ค่า conductivity ของน้ำยางข้นชนิด LA latex ชุดที่ 2 พบว่ามีค่าที่ไม่สัมพันธ์กับค่า MST ของน้ำยางข้น ดังแสดงในภาพที่ 4.20 โดยค่า MST ของน้ำยางข้นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาบ่มนานขึ้น ในขณะที่ขนาดอนุภาค, ค่า zeta potential และ ค่า conductivity ของน้ำยางข้นกลับมีค่าเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของค่าที่ได้จากการทดสอบความเสถียรแต่ละค่าพบว่า ไม่มีความสัมพันธ์กันด้วยเช่นกัน



ภาพที่ 4.20 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาค ค่า zeta potential และค่า conductivity กับค่า MST ของน้ำยางชั้นชนิด LA latex ชุดที่ 2

เมื่อทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาค, ค่า zeta potential และค่า conductivity กับค่า MST ของน้ำยางชั้นชนิด LA latex ชุดที่ 3 พบว่า ขนาดอนุภาค และค่า zeta potential ไม่มีความสัมพันธ์กับค่า MST ในขณะที่ค่า conductivity มีแนวโน้มลดลงตามค่า MST ที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4.21 นอกจากนี้ยังพบว่าค่าที่ได้จากการทดสอบความเสถียรแต่ละค่าไม่มีความสัมพันธ์กัน เช่นเดียวกับน้ำยางชั้นชนิด LA latex ชุดที่ 2

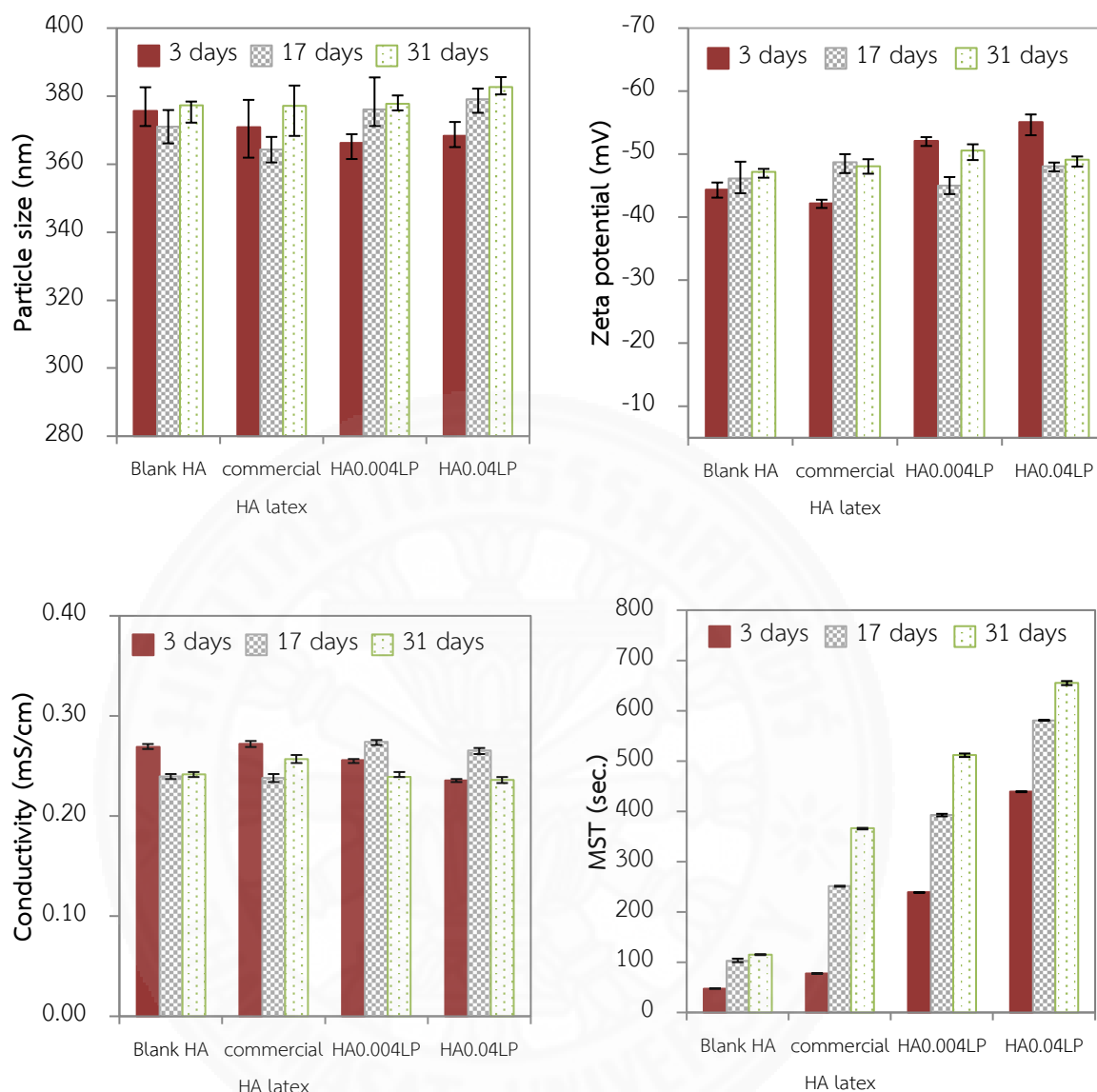


ภาพที่ 4.21 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาค ค่า zeta potential และค่า conductivity กับค่า MST ของน้ำยางชั้นชนิด LA latex ชุดที่ 3

จากการศึกษาความสัมพันธ์ของขนาดอนุภาค, ค่า zeta potential และ ค่า conductivity ของน้ำยางข้นชนิด LA latex ทั้ง 2 ชุดตัวอย่าง พบว่าผลการทดสอบดังกล่าวข้างต้นไม่มีความสัมพันธ์กับค่า MST ของน้ำยางข้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการทดสอบความเสถียรด้วยวิธีดังกล่าวอาจไม่สามารถใช้เพื่อบ่งบอกถึงความเสถียรเชิงกลของน้ำยางข้นชนิด LA latex ได้ แต่อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่า การใช้เอนไซม์ไลเปสในการบ่มเร่งความเสถียรของน้ำยางข้นจะส่งผลต่อการเพิ่มค่า MST ของน้ำยางข้นโดยไม่แสดงความสัมพันธ์ต่อขนาดอนุภาค, ค่า zeta potential และ ค่า conductivity ของน้ำยางข้น เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำยางข้น Blank และน้ำยางข้นเกรดการค้า

4.4.2 ผลการทดสอบความเสถียรของน้ำยางข้นชนิด HA latex

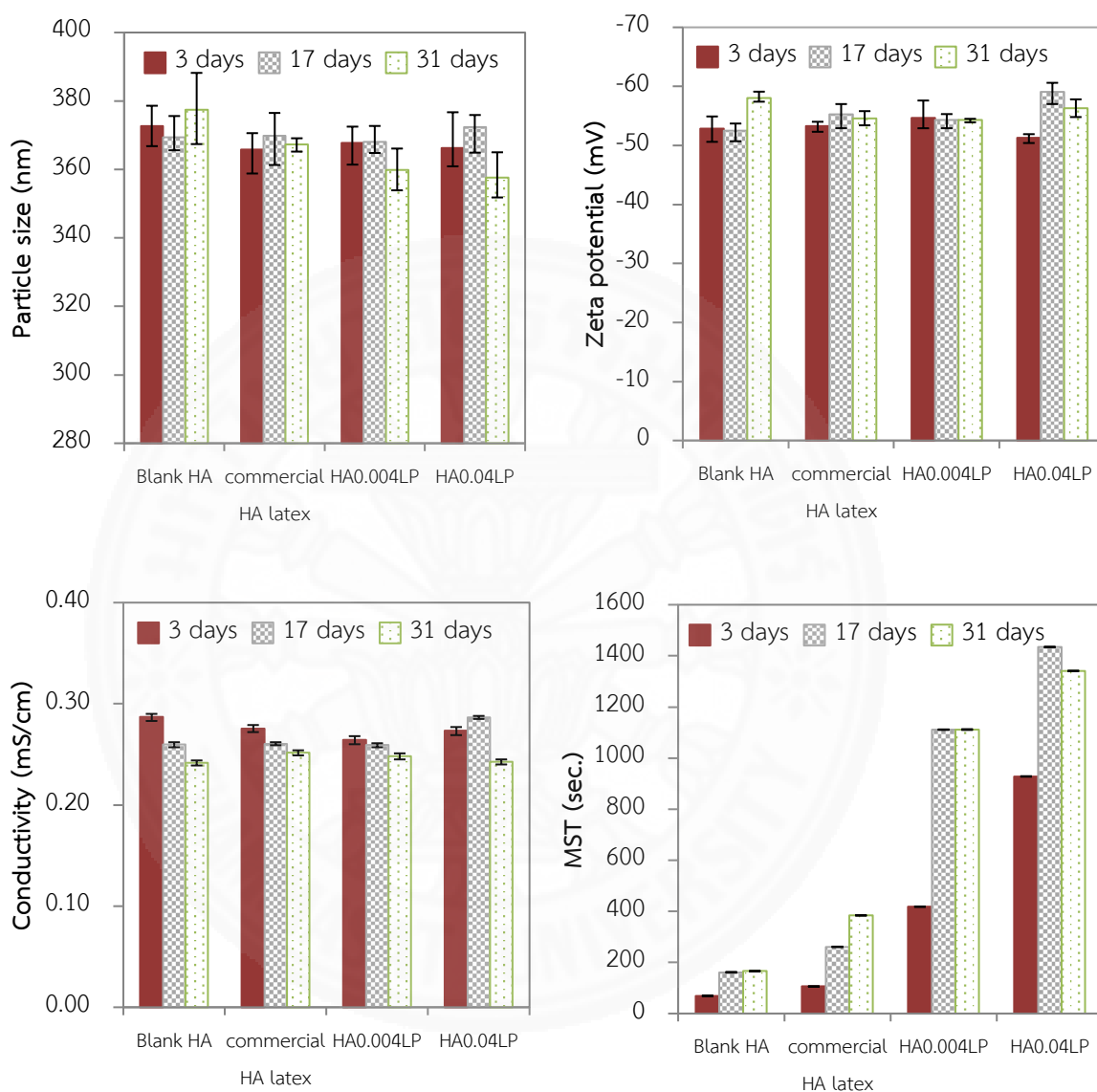
ผลการวัดขนาดอนุภาค, ค่า zeta potential และ ค่า conductivity เปรียบเทียบกับค่า MST ของน้ำยางข้นชนิด HA latex ชุดที่ 2 แสดงดังภาพที่ 4.22 โดยจากการศึกษาพบว่าขนาดอนุภาค, ค่า zeta potential และค่า conductivity ของน้ำยางข้นมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่สัมพันธ์กับค่า MST ของน้ำยางข้น เมื่อระยะเวลาบ่มนานขึ้น และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าต่าง ๆ ยังพบว่าการเปลี่ยนแปลงที่ไม่สัมพันธ์กันอีกด้วย



ภาพที่ 4.22 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาค ค่า zeta potential และค่า conductivity กับค่า MST ของน้ำยางข้นชนิด HA latex ชุดที่ 2

เมื่อศึกษาขนาดอนุภาค, ค่า zeta potential และ ค่า conductivity เปรียบเทียบกับค่า MST ของน้ำยางข้นชนิด HA latex ชุดที่ 3 พบว่าผลการทดสอบความเสถียรดังกล่าวข้างต้นไม่มีความสัมพันธ์กับค่า MST ของน้ำยางข้น และเมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์แต่ละค่าพบว่า มีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่สัมพันธ์กันด้วยเช่นกัน ดังแสดงในภาพที่ 4.23 ซึ่งจากผลการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างการทดสอบความเสถียรด้วยเทคนิค light scattering กับค่า MST ของน้ำยางข้น HA latex

ทั้ง 2 ชุดตัวอย่าง จะเห็นได้ว่าผลการทดสอบที่ได้ไม่มีความสัมพันธ์กันและอาจไม่สามารถใช้เพื่อบ่งบอกความเสถียรของน้ำยางข้นในงานวิจัยนี้ เช่นเดียวกับน้ำยางข้นชนิด LA latex



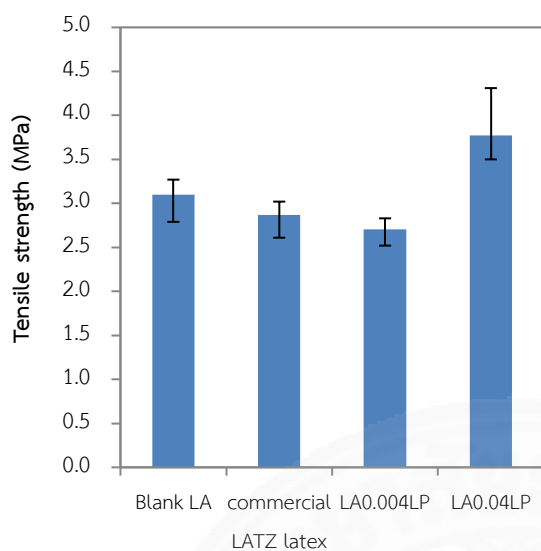
ภาพที่ 4.23 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาค ค่า zeta potential และค่า conductivity กับค่า MST ของน้ำยางข้นชนิด HA latex ชุดที่ 3

4.5 ผลของการบ่มเร่งความเสถียรด้วยเอนไซม์ไลเปสต่อการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ

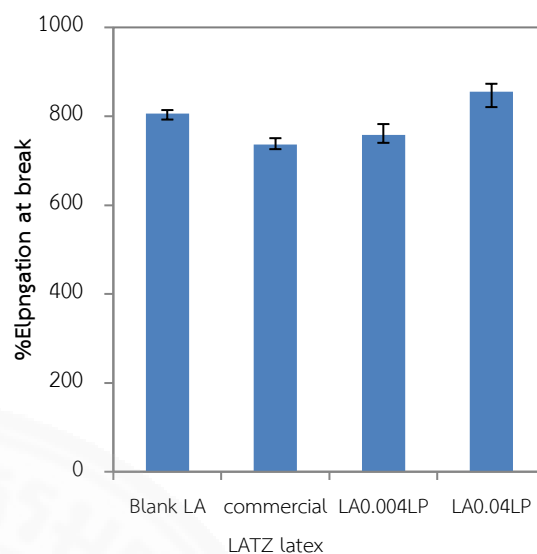
4.5.1 ผลของการบ่มเร่งความเสถียรด้วยเอนไซม์ไลเปสต่อการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์

ยางแบบจุ่ม

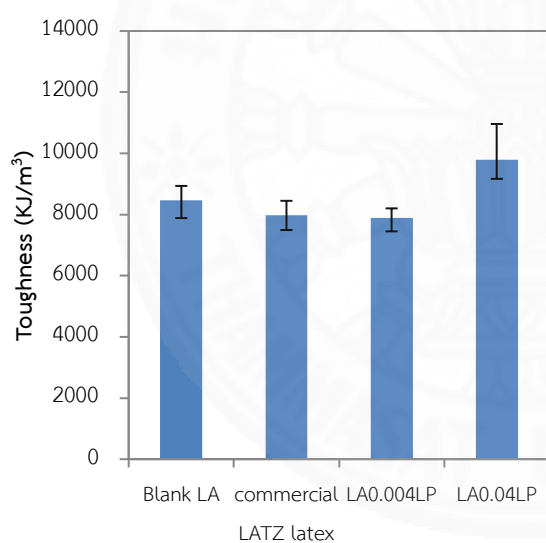
การศึกษาสมบัติของฟิล์มยางที่จุ่มขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางชั้นที่บ่มเร่งความเสถียรด้วยเอนไซม์ไลเปสในปริมาณต่าง ๆ เทียบกับฟิล์มยางที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางชั้นเกรดการค้าจะทำการศึกษาโดยใช้น้ำยางชั้นชุดที่ 2 ที่บ่มเป็นระยะเวลา 60 วัน ในการนำมาขึ้นรูป โดยจากการศึกษาฟิล์มยางที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางชั้นชนิด LA latex พบว่า ฟิล์มยางที่จุ่มขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางชั้นที่บ่มเร่งความเสถียรด้วยเอนไซม์ไลเปส มีค่า tensile strength, %elongation at break, toughness และ modulus ที่ใกล้เคียงกับน้ำยางชั้นเกรดการค้าและน้ำยางชั้น Blank ดังแสดงในภาพที่ 4.24 โดยเมื่อทดสอบอัตราการบวมตัว (swelling ratio) เพื่อศึกษาปริมาณการเชื่อมโยง (crosslink) ของอนุภาคยาง ดังแสดงในภาพที่ 4.25 พบว่า เมื่อ swelling ratio เพิ่มขึ้น ค่า tensile strength, %elongation at break และ toughness มีแนวโน้มที่ลดลง ในขณะที่ค่า modulus ของฟิล์มยางมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น โดยจากการศึกษาจะเห็นได้ว่าการเติมเอนไซม์ไลเปสเพื่อบ่มเร่งความเสถียรของน้ำยางชั้นชนิด LA latex ไม่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของฟิล์มยาง นอกจากนี้จากการศึกษายังพบว่า การเติมเอนไซม์ไลเปสลงในน้ำยางชั้นในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นยังส่งผลให้สมบัติต่าง ๆ ฟิล์มยางมีแนวโน้มที่ดีขึ้น



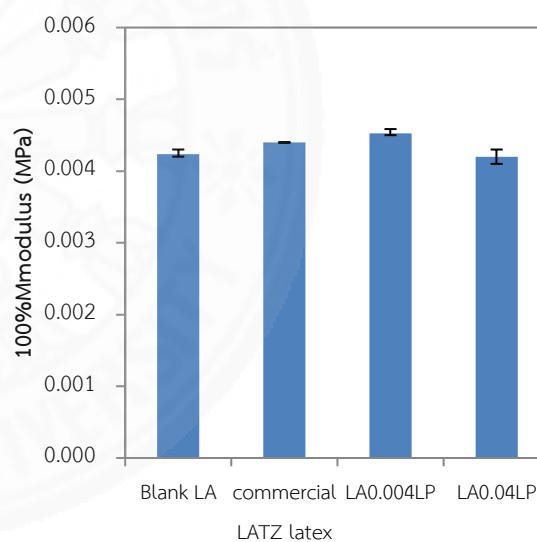
(ก) Tensile strength



(ข) %Elongation at break

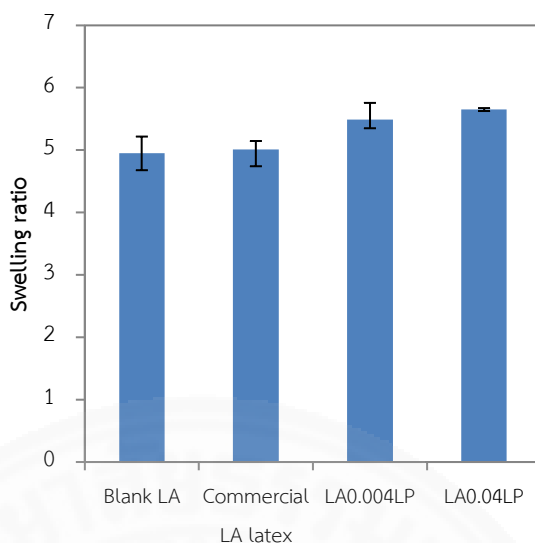


(ค) Toughness



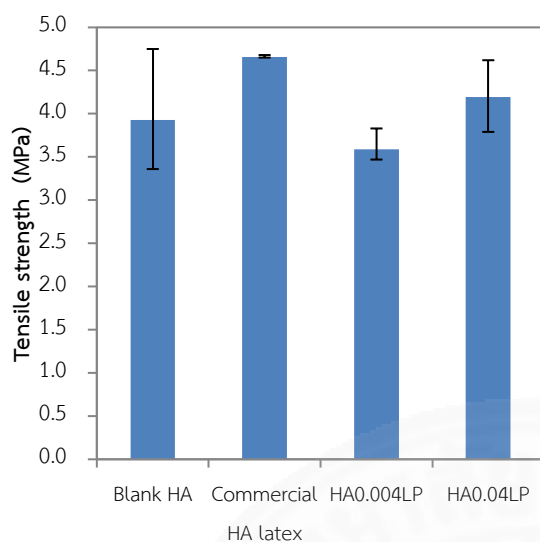
(ง) 100%modulus

ภาพที่ 4.24 สมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มยางที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางข้นชนิด LA latex

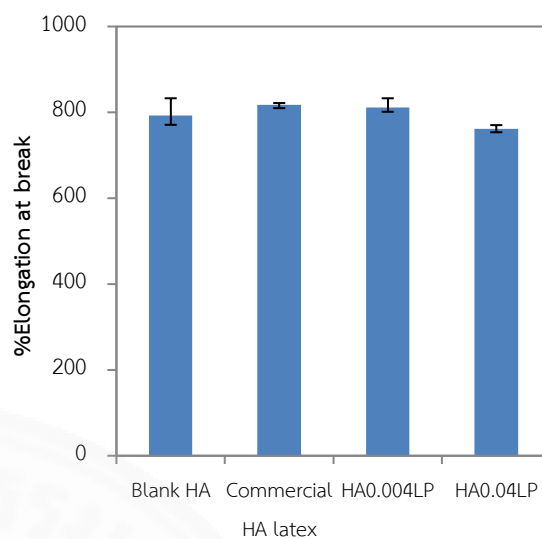


ภาพที่ 4.25 อัตราการบวมตัว (Swelling ratio) ของฟิล์มยางที่จุ่มขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางข้นชนิด LA latex

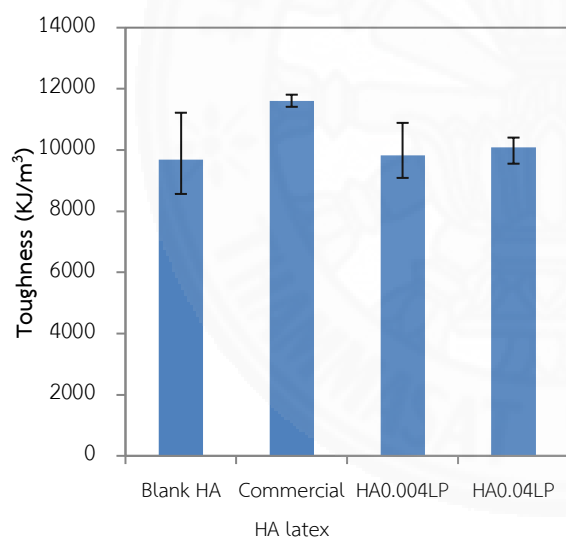
เมื่อศึกษาสมบัติของฟิล์มยางที่จุ่มขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางข้นชนิด HA latex พบว่าฟิล์มยางที่จุ่มขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางข้นเกรดการค้า น้ำยางข้น Blank และน้ำยางข้นที่บ่มแรงความเสถียรด้วยเอนไซม์ไลเปสมีค่า tensile strength, %elongation at break, toughness และ modulus ที่ใกล้เคียงกัน ดังแสดงในภาพที่ 4.26 เช่นเดียวกับฟิล์มยางที่จุ่มขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางข้นชนิด LA latex และเมื่อทดสอบอัตราการบวมตัวของฟิล์มยาง ดังแสดงในภาพที่ 4.27 พบว่า อัตราการบวมตัวมีค่าที่ไม่สัมพันธ์กับสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มยาง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสมบัติของฟิล์มยางไม่ได้ขึ้นอยู่กับการเชื่อมโยงของอนุภาคยางเพียงอย่างเดียว แต่ยังเกิดจากความสามารถของการรวมตัวกันของอนุภาคยางในขณะการจุ่มขึ้นรูปฟิล์มยางอีกด้วย (N. M. Claramma, 1997)



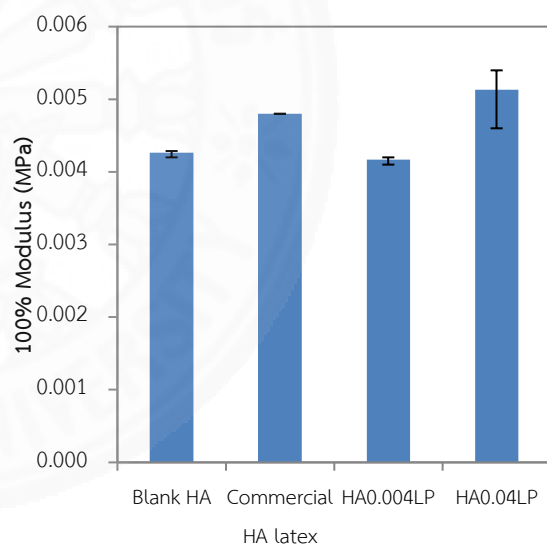
(ก) Tensile strength



(ข) %Elongation at break

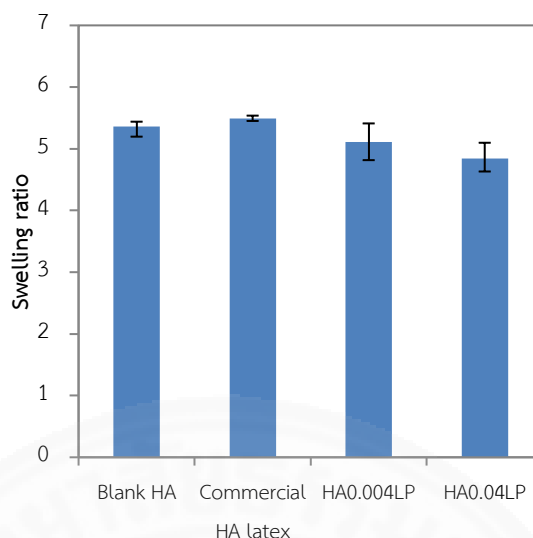


(ค) Toughness



(ง) 100%modulus

ภาพที่ 4.26 สมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มยางที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางชั้นชนิด HA latex



ภาพที่ 4.27 อัตราการบวมตัว (Swelling ratio) ของฟิล์มยางที่จุ่มขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางข้นชนิด HA latex

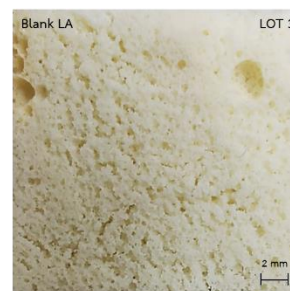
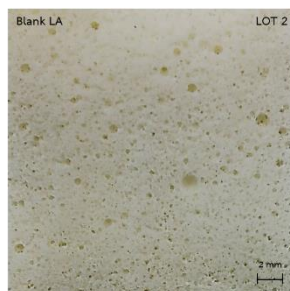
4.5.2 ผลของการบ่มเร่งความเสถียรด้วยเอนไซม์ไลเปสต่อการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ยางฟองน้ำ

การศึกษาผลของการบ่มเร่งความเสถียรด้วยเอนไซม์ไลเปสต่อการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ยางฟองน้ำ จะใช้น้ำยางข้นชุดที่ 2 และชุดที่ 3 ซึ่งเป็นน้ำยางข้นที่มีค่า MST เพิ่มขึ้นเร็วแตกต่างกัน โดยเปรียบเทียบสมบัติของยางฟองน้ำที่ได้จากน้ำยางข้นที่บ่มเร่งความเสถียรด้วยเอนไซม์ไลเปสกับ น้ำยางข้นเกรดการค้า และเปรียบเทียบสมบัติของยางฟองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางข้นทั้ง 2 ชุดตัวอย่าง

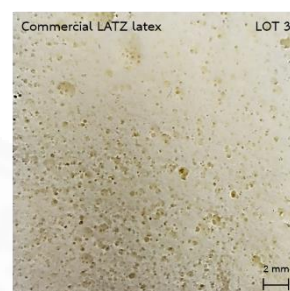
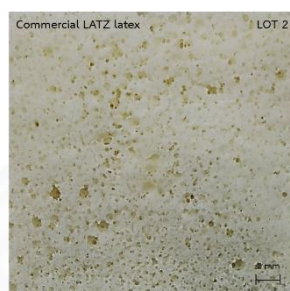
4.5.2.1 ลักษณะรูพรุนและขนาดรูพรุนของยางฟองน้ำ

เมื่อศึกษาลักษณะรูพรุนและขนาดรูพรุนของยางฟองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางข้นชนิด LA latex ทั้ง 2 ชุด พบว่า ยางฟองน้ำแต่ละตัวอย่างที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางข้นชุดเดียวกันมีลักษณะรูพรุนและขนาดของรูพรุนที่ไม่แตกต่างกันมากนัก ดังแสดงในรูปที่ 4.28 และ 4.29 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการบ่มเร่งความเสถียรด้วยเอนไซม์ไลเปสไม่ส่งผลต่อลักษณะรูพรุนและขนาดรูพรุนของยางฟองน้ำ แต่อย่างไรก็ตามจากการศึกษาจะเห็นว่า ยางฟองน้ำที่ได้จากน้ำยางข้นชุดที่ 3 จะมีปริมาณรูพรุนมากกว่ายางฟองน้ำที่ได้จากน้ำยางข้นชุดที่ 2 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากน้ำยางข้นชุดที่ 3 เป็นน้ำยางข้นที่มีค่า MST สูงกว่าน้ำยางข้นชุดที่ 2 ดังนั้นจึงเกิดฟองอากาศได้มาก และส่งผลให้ยางฟองน้ำที่ได้มีปริมาณรูพรุนที่มากนั่นเอง

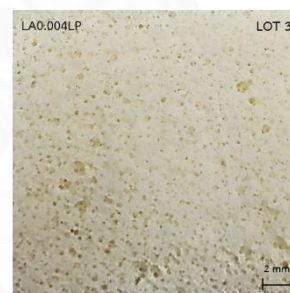
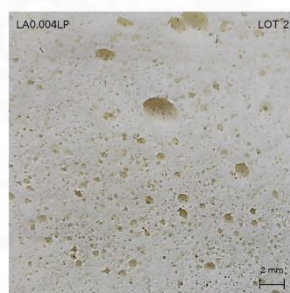
(1) Blank LA



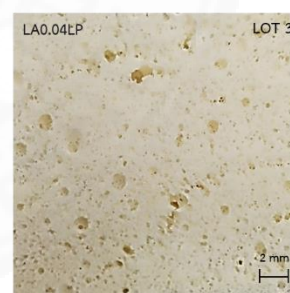
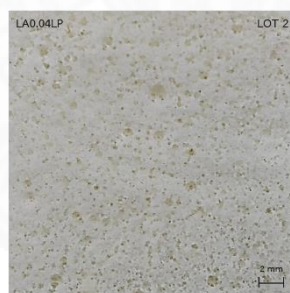
(2) Commercial
LATZ latex



(3) LA0.004LP



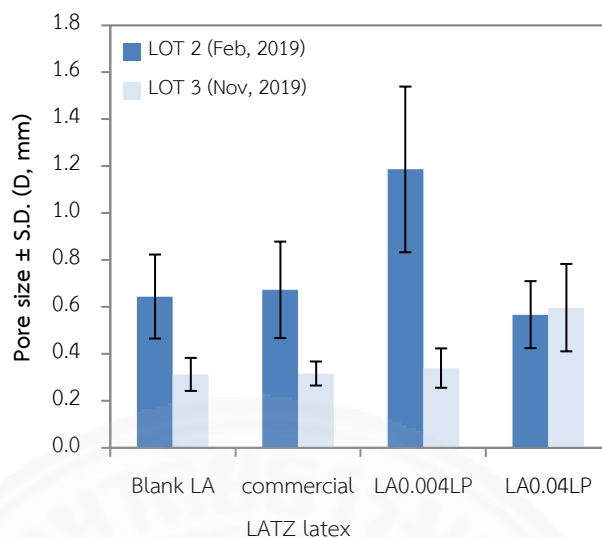
(4) LA0.04LP



(ก) ยางพองน้ำชุดที่ 2

(ข) ยางพองน้ำชุดที่ 3

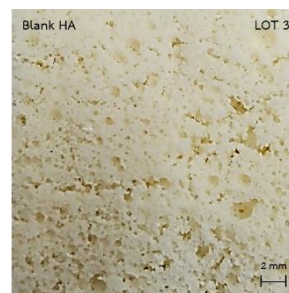
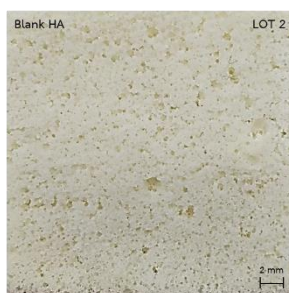
ภาพที่ 4.28 ลักษณะรูพรุนของยางพองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางข้น LA latex



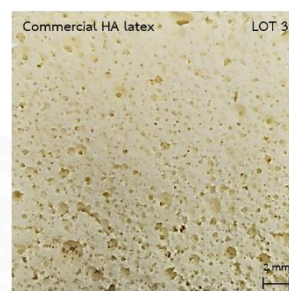
ภาพที่ 4.29 ขนาดรูพรุนของยางฟองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางชั้น LA latex

เมื่อศึกษาลักษณะรูพรุนและขนาดรูพรุนของยางฟองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางชั้นชนิด HA latex ทั้ง 2 ชุดตัวอย่าง พบว่า ยางฟองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางชั้นที่บ่มแรงความเสถียรด้วยเอนไซม์ไลเปสทั้งในปริมาณ 0.004 และ 0.04 v/v มีลักษณะรูพรุนและขนาดของรูพรุนที่ใกล้เคียงกับยางฟองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางชั้นเกรดการค้าและน้ำยางชั้น Blank แสดงในภาพที่ 4.30 และ 4.31 ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบลักษณะรูพรุนของยางฟองน้ำที่ได้จากน้ำยางชั้นชุดตัวอย่างที่แตกต่างกัน พบว่า ยางฟองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางชั้นชุดที่ 3 มีปริมาณรูพรุนที่มากกว่ายางฟองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางชั้นชุดที่ 2 เช่นเดียวกับยางฟองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางชั้นชนิด LA latex

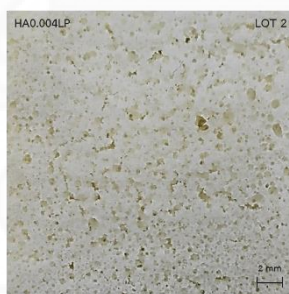
(1) Blank HA



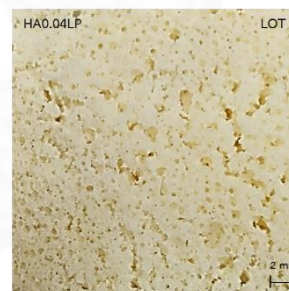
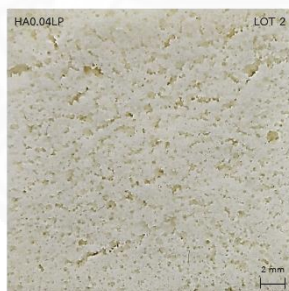
(2) Commercial
HA latex



(3) HA0.004LP



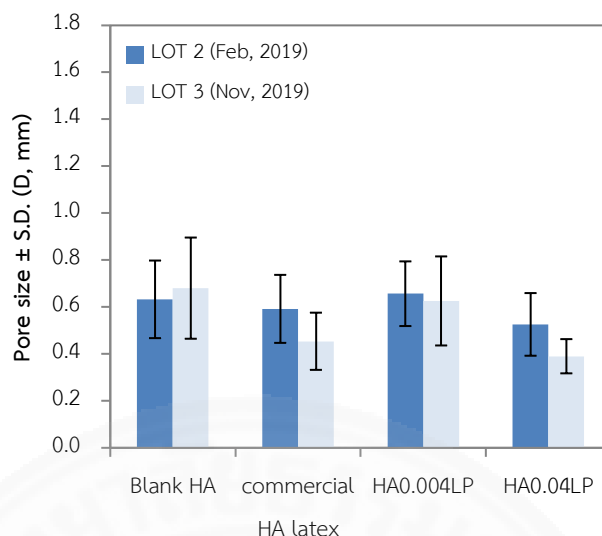
(4) HA0.04LP



(ก) ยางฟองน้ำชุดที่ 2

(ข) ยางฟองน้ำชุดที่ 3

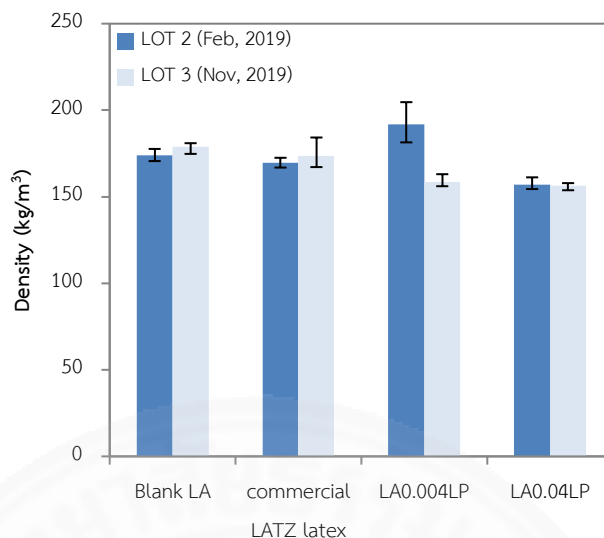
ภาพที่ 4.30 ลักษณะรูพรุนของยางฟองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางชั้น HA latex



ภาพที่ 4.31 ขนาดรูพรุนของยางฟองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางข้น HA latex

4.5.2.2 ความหนาแน่นของยางฟองน้ำ

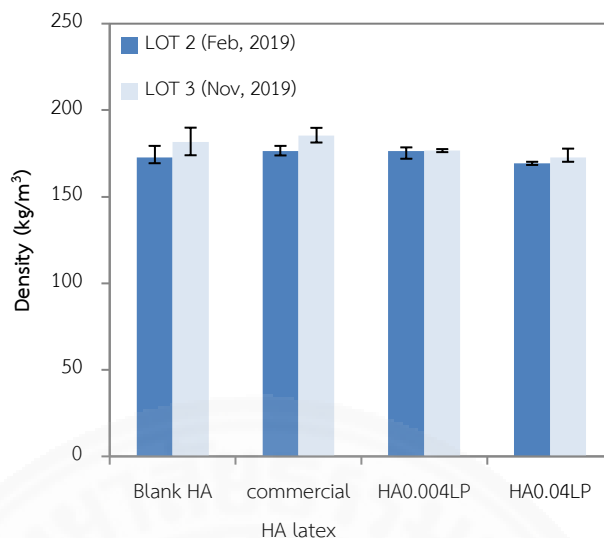
จากผลการศึกษาความหนาแน่นของยางฟองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางข้นชนิด LA latex ทั้ง 2 ชุด ซึ่งเป็นน้ำยางข้นที่มีค่า MST เพิ่มขึ้นเร็วต่างกัน พบว่า ยางฟองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางข้นที่บ่มแรงความเสถียรด้วยเอนไซม์ไลเปสมีความหนาแน่นที่น้อยกว่ายางฟองน้ำที่ได้จากน้ำยางข้นเกรดการค้าและน้ำยางข้น Blank และมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณเอนไซม์ไลเปสที่เพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4.32 แต่อย่างไรก็ตามจากการศึกษาพบว่า ยางฟองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางข้นชุดที่ 2 ที่บ่มแรงความเสถียรด้วยเอนไซม์ไลเปสในปริมาณ 0.004% v/v มีความหนาแน่นสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับยางฟองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางข้นชุดเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องจากโฟมยางเหลวเกิดการคงรูปอย่างรวดเร็ว ทำให้โฟมยางเหลวบางส่วนเกิดการจับตัวในขณะที่ลงในแม่พิมพ์ จึงทำให้ยางฟองน้ำที่ได้มีความหนาแน่นมาก นอกจากนี้จากการศึกษาพบว่า ยางฟองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางข้นชนิด LA latex ที่มีค่า MST แตกต่างกันมาก (น้ำยางข้นชุดที่ 2 และชุดที่ 3) มีความหนาแน่นที่แตกต่างกันเล็กน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่า MST ของน้ำยางข้น ไม่ส่งผลต่อความหนาแน่นของยางฟองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางข้นชนิด LA latex



ภาพที่ 4.32 ความหนาแน่นของยางฟองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางข้นชนิด LA latex

เมื่อทำการศึกษาความหนาแน่นของยางฟองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางข้นชนิด HA latex ทั้ง 2 ชุด พบว่า ยางฟองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางข้นที่บ่มเร่งความเสถียรด้วยเอนไซม์ไลเปส มีความหนาแน่นแตกต่างจากยางฟองน้ำที่ได้จากน้ำยางข้นเกรดการค้าและน้ำยางข้น Blank เพียงเล็กน้อย ดังแสดงในภาพที่ 4.33 นอกจากนี้ยังพบว่ายางฟองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางข้นที่มีค่า MST แตกต่างกัน จะมีความหนาแน่นที่แตกต่างกันเล็กน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ความหนาแน่นของยางฟองน้ำไม่ขึ้นกับค่า MST ของน้ำยางข้น

จากการศึกษาความหนาแน่นของยางฟองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางข้นทั้ง 2 ชนิด แสดงให้เห็นว่า การบ่มเร่งความเสถียรด้วยเอนไซม์ไลเปสไม่ส่งผลต่อความหนาแน่นของยางฟองน้ำเมื่อเทียบกับการบ่มเร่งความเสถียรด้วยวิธีการปัจจุบัน (การเติมแอมโมเนียมลอลเลต) โดยการเติมเอนไซม์ไลเปสในปริมาณที่มากขึ้น ($\geq 0.04\%$ v/v) ยังส่งผลให้ความหนาแน่นของยางฟองน้ำมีแนวโน้มที่ลดลง ซึ่งแสดงถึงศักยภาพในการผลิตยางฟองน้ำความหนาแน่นต่ำได้ดียิ่งขึ้นอีกด้วย

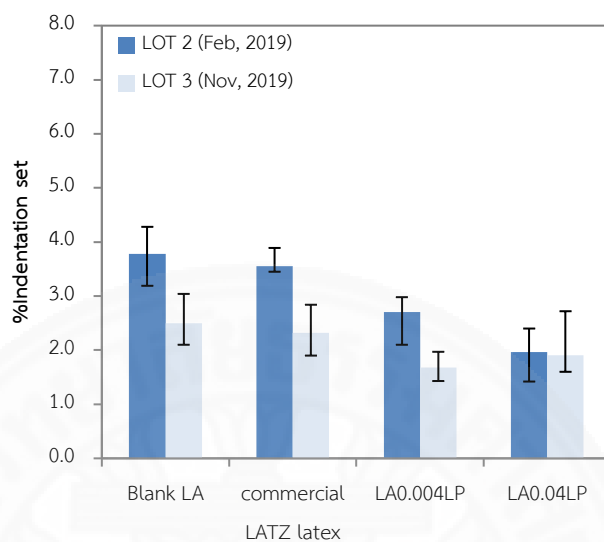


ภาพที่ 4.33 ความหนาแน่นของยางฟองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางข้นชนิด HA latex

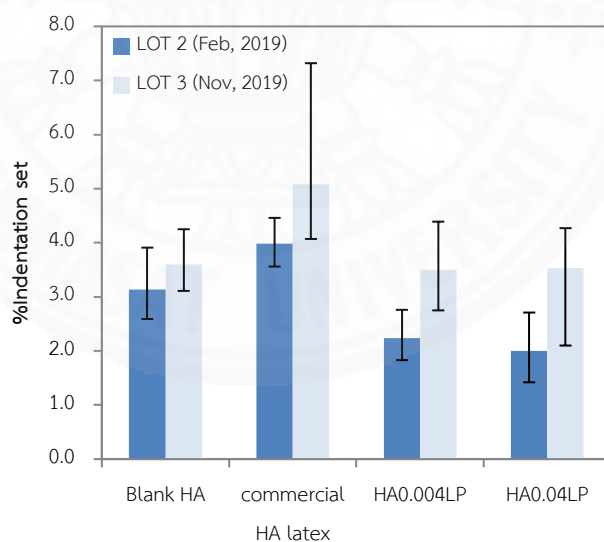
4.5.2.3 การยุบตัวเนื่องจากแรงกด

จากการศึกษาการยุบตัวเนื่องจากแรงกดของยางฟองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางข้นชุดที่ 2 และชุดที่ 3 พบว่า ยางฟองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางข้นที่บ่มเร่งความเสถียรด้วยเอนไซม์ไลเปสมีการยุบตัวเนื่องจากแรงกดน้อยกว่าน้ำยางข้นเกรดการค้าและน้ำยางข้น Blank ทั้งในน้ำยางข้นชนิด LA latex และ HA latex โดยการเติมเอนไซม์ไลเปสลงในน้ำยางข้นในปริมาณมากขึ้นยังส่งผลให้การยุบตัวเนื่องจากแรงกดของยางฟองน้ำมีแนวโน้มลดลง ดังแสดงในภาพที่ 4.34 และ 4.35 ทั้งนี้อาจเนื่องจากเอนไซม์ไลเปสจะไปช่วยเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของพอสโพลิปิดที่อยู่ผิวอนุภาคยาง ทำให้พอสโพลิปิดที่ผิวอนุภาคยางมีปริมาณลดลง จึงส่งผลให้อนุภาคยางสามารถสร้างพันธะที่มีความแข็งแรงมากขึ้นเมื่อนำมาขึ้นรูปเป็นยางฟองน้ำ ดังนั้นยางฟองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางข้นที่บ่มเร่งความเสถียรด้วยเอนไซม์ไลเปสจึงมีโครงสร้างเซลล์ที่แข็งแรง โดยโครงสร้างเซลล์ที่แข็งแรงนี้จะสามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้มากหลังจากได้รับแรงกด จึงทำให้ยางฟองน้ำมี %การยุบตัวเนื่องจากแรงกดที่น้อยลง นอกจากนี้ จากการศึกษาจะเห็นได้ว่า ยางฟองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางข้นเกรดการค้าชนิด HA latex ทั้ง 2 ชุดตัวอย่าง มีแนวโน้มของการยุบตัวเนื่องจากแรงกดที่ไม่สัมพันธ์กับน้ำยางข้น Blank และน้ำยางข้นที่เติมเอนไซม์ไลเปส เนื่องจากน้ำยางข้นเกรดการค้ามีการเติมสารชนิดอื่นเพื่อเร่งความเสถียรเชิงกล ซึ่งอาจส่งผลต่อกระบวนการขึ้นรูป จึงทำให้ยางฟองน้ำที่ได้มีแนวโน้มการยุบตัวเนื่องจากแรงกดไม่สัมพันธ์กับยางฟองน้ำที่ได้จากน้ำยางข้น Blank และน้ำยางข้นที่เติมเอนไซม์ไลเปส ซึ่งจากการศึกษา %การยุบตัวเนื่องจากแรงกดของยางฟองน้ำที่ได้จากน้ำยางข้นทั้ง 2 ชุดตัวอย่าง แสดงให้เห็นว่า วิธีการบ่มเร่งความเสถียรของน้ำยางข้นด้วยเอนไซม์ไลเปสไม่ส่งผลเสีย

ต่อการนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ยางพองน้ำ แต่ยังส่งผลทำให้การยุบตัวเนื่องจากแรงกดของยางพองน้ำมีแนวโน้มที่ลดลงอีกด้วย



ภาพที่ 4.34 %การยุบตัวเนื่องจากแรงกดของยางพองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางข้นชนิด LA latex



ภาพที่ 4.35 %การยุบตัวเนื่องจากแรงกดของยางพองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางข้นชนิด HA latex

4.6 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ระหว่างน้ำยางชั้นเกรดการค้าและน้ำยางชั้นที่บ่มเร่งความเสถียรด้วยเอนไซม์ไลเปส

การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของน้ำยางชั้น จะทำการเปรียบเทียบระหว่างน้ำยางชั้นเกรดการค้ากับน้ำยางชั้นที่บ่มเร่งความเสถียรด้วยเอนไซม์ไลเปสปริมาณ 0.04% v/v ซึ่งเป็นปริมาณที่เทียบเท่ากับการใช้กรดลอริกเพื่อบ่มเร่งความเสถียรในน้ำยางชั้นเกรดการค้า โดยจากการศึกษาพบว่า การผลิตน้ำยางชั้นที่ใช้เอนไซม์ไลเปสเป็นสารช่วยเร่งความเสถียรจะมีต้นทุนการผลิตต่อหน่วยที่สูงกว่า โดยจะมีต้นทุนการผลิตเพิ่มขึ้นประมาณ 3.8% แต่เนื่องจากการใช้เอนไซม์ไลเปสจะช่วยเพิ่มกำลังการผลิตได้มากขึ้นถึง 8 เท่า ซึ่งส่งผลให้ได้กำไรสุทธิที่มากกว่าน้ำยางชั้นเกรดการค้าประมาณ 7.5 เท่า ดังแสดงในตารางที่ 4.7 ซึ่งจากการวิเคราะห์เปรียบเทียบความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์จะเห็นได้ว่า การใช้เอนไซม์ไลเปสเหมาะสำหรับการเพิ่มกำลังการผลิตน้ำยางชั้น ในช่วงที่น้ำยางชั้นมีความต้องการของตลาดมากโดยที่ไม่ต้องขยายโรงงาน เนื่องจากการใช้เอนไซม์ไลเปสจะมีต้นทุนการผลิตต่อหน่วยที่สูงกว่าน้ำยางชั้นเกรดการค้า จึงจะต้องผลิตในปริมาณมากเพื่อให้ได้กำไรสุทธิที่มากกว่าการผลิตน้ำยางชั้นเกรดการค้าโดยทั่วไป

ตารางที่ 4.7

เปรียบเทียบความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ระหว่างน้ำยางชั้นเกรดการค้าและน้ำยางชั้นที่บ่มเร่งความเสถียรด้วยเอนไซม์ไลเปส

	Commercial latex		CNRL treated with lipase	
เวลาบ่ม	25	days	3	days
กำลังการผลิต	60	tons/25 days	500	tons/25 days
ราคาสาร	132	Baht/kg	2,850	Baht/kg
ปริมาณที่ใช้	0.4	kg/ton	0.4	kg/ton
ค่าสารเคมีที่ใช้	3,168	Baht/tons	570,000	Baht/tons
ต้นทุนต่อหน่วย	28,553	Baht/ton	29,640	Baht/ton
ราคาขายต่อหน่วย	40,000	Baht/ton	40,000	Baht/ton
กำไรต่อหน่วย	11,447	Baht/ton	10,360	Baht/ton
กำไรสุทธิ	686,832	Baht/25 days	5,180,000	Baht/25 days
รายปี (220 วัน)	6,044,122	Baht/year	379,866,667	Baht/year

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการใช้เอนไซม์ไลเปสในการเร่งความเสถียรเชิงกลของน้ำยางชั้น โดยได้ทำการศึกษา activity ของเอนไซม์ไลเปสแต่ละเกรด และเลือกเอนไซม์ไลเปสเกรดที่เหมาะสมมาศึกษาการเร่งความเสถียรเชิงกลของน้ำยางชั้น โดยศึกษาค่า MST และสมบัติพื้นฐานอื่นๆ ได้แก่ %TSC, %DRC, %NH₃, pH และ VFA no. ของน้ำยางชั้น LA latex และ HA latex จำนวน 3 ชุด ตัวอย่าง ที่บ่มเร่งความเสถียรด้วยเอนไซม์ไลเปสปริมาณ 0.004% และ 0.04% โดยปริมาตรของน้ำยางชั้น เปรียบเทียบกับน้ำยางชั้นเกรดการค้า และศึกษาความสัมพันธ์ของค่า MST กับผลการทดสอบความเสถียรด้วยเทคนิค light scattering นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษานำน้ำยางชั้นที่ผ่านการบ่มเร่งความเสถียรเชิงกลด้วยเอนไซม์ไลเปสไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ยาง ได้แก่ ลูกโป่งและยางฟองน้ำ และศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของผลิตภัณฑ์ที่ได้เทียบกับผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางชั้นเกรดการค้า โดยสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1.1 เอนไซม์ไลเปสแต่ละเกรดจะมีประสิทธิภาพในการเร่งความเสถียรเชิงกลของน้ำยางชั้นที่ต่างกัน โดยจากการศึกษาพบว่าเอนไซม์ไลเปสเกรดที่มีค่า activity สูงสุด จะมีประสิทธิภาพในการเร่งความเสถียรเชิงกลของน้ำยางชั้นได้ดีที่สุด ดังนั้นการคัดเลือกเกรดของเอนไซม์ไลเปสในเพื่อใช้ในการบ่มเร่งความเสถียรเชิงกลของน้ำยางชั้นจึงควรเลือกเอนไซม์ไลเปสเกรดที่เหมาะสมต่อสภาวะความเป็นด่างของน้ำยาง เพื่อให้เอนไซม์ไลเปสสามารถทำงานได้ดีในช่วงสภาวะนั้น ๆ

5.1.2 การใช้เอนไซม์ไลเปสสามารถเร่งความเสถียรเชิงกลของน้ำยางชั้นได้เร็วกว่าการใช้แอมโมเนียมลอเลตในน้ำยางชั้นเกรดการค้า ทั้งในน้ำยางชั้นชนิด LA latex และ HA latex โดยไม่ส่งผลกระทบต่อสมบัติพื้นฐานอื่นๆ ของน้ำยางชั้น ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่า MST ของน้ำยางชั้นที่บ่มเร่งความเสถียรด้วยเอนไซม์ไลเปสกับน้ำยางชั้นเกรดการค้า พบว่า ค่า MST ของน้ำยางชั้นจะเพิ่มได้เร็วขึ้นตามปริมาณเอนไซม์ไลเปสที่เพิ่มมากขึ้น โดยน้ำยางชั้นชนิด LA latex ที่เติมเอนไซม์ไลเปสปริมาณ 0.004% v/v มีค่า MST เพิ่มขึ้นเร็วกว่าน้ำยางชั้นเกรดการค้าประมาณ 2-5 เท่า ในขณะที่การเติมเอนไซม์ไลเปสปริมาณ 0.04% v/v จะทำให้ค่า MST เพิ่มขึ้นเร็วกว่าน้ำยางชั้นเกรดการค้าประมาณ 4-8 เท่า ส่วนผลการเติมเอนไซม์ไลเปสลงในน้ำยางชั้นชนิด HA latex ในปริมาณ 0.004% และ

0.04% v/v ส่งผลให้น้ำยางข้นมีค่า MST เพิ่มขึ้นเร็วกว่าน้ำยางข้นเกรดการค้าประมาณ 1-5 เท่า และ 2-9 เท่า ตามลำดับ นอกจากนี้จากการศึกษายังพบว่า น้ำยางข้นชนิด HA latex จะมีค่า MST เพิ่มขึ้นเร็วกว่าน้ำยางข้นชนิด LA latex ประมาณ 1-2 เท่า เนื่องจากฟอสโฟลิปิดจะเกิดการไฮโดรไลซิสได้ดีในสถานะที่มีแอมโมเนียสูง ทำให้น้ำยางข้นชนิด HA latex มีสบู่กรดไขมันเกิดขึ้นมากกว่า จึงส่งผลให้ มีค่า MST เพิ่มขึ้นเร็วกว่าน้ำยางข้นชนิด LA latex

5.1.3 น้ำยางข้นชนิด LA latex ที่บ่มเร่งความเสถียรด้วยเอนไซม์ไลเปสมีค่า MST ที่เพิ่มขึ้นเร็วกว่าน้ำยางข้น Commercial HA latex แสดงให้เห็นว่าการใช้เอนไซม์ไลเปสเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการเร่งความเสถียรให้กับน้ำยางข้นแม้ในน้ำยางข้นที่มีปริมาณแอมโมเนียต่ำ ดังนั้นการเติมเอนไซม์ไลเปสในปริมาณที่เหมาะสมลงในน้ำยางข้นที่มีแอมโมเนียต่ำ จึงสามารถนำมาใช้ทดแทนการผลิตน้ำยางข้น Commercial HA latex เพื่อลดปริมาณการใช้แอมโมเนียในน้ำยางข้น ซึ่งจะช่วยลดปัญหาผลกระทบจากการใช้แอมโมเนียในกระบวนการผลิตน้ำยางข้นได้อีกด้วย

5.1.4 น้ำยางข้นแต่ละชุดตัวอย่างที่ได้รับในช่วงฤดูกาลที่ต่างกัน จะมีค่า MST เพิ่มขึ้นเร็วต่างกัน โดยเมื่อเปรียบเทียบระยะเวลาบ่มที่ทำให้น้ำยางข้นมีค่า MST ถึงค่ามาตรฐานที่กำหนดพบว่า น้ำยางข้นชุดที่ 1 และชุดที่ 3 ทั้งชนิด LA latex และ HA latex ที่บ่มเร่งความเสถียรด้วยเอนไซม์ไลเปส มีค่า MST เพิ่มขึ้นเร็วกว่าน้ำยางข้นชุดที่ 2 อย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เนื่องจากน้ำยางที่ได้รับมาในแต่ละช่วงเวลาจะมีคุณภาพที่แตกต่างกัน โดยในงานวิจัยนี้พบว่า เกิดจากความแตกต่างของปริมาณลิปิดที่อยู่ในน้ำยางที่ส่งผลให้น้ำยางข้นมีค่า MST เพิ่มขึ้นแตกต่างกัน โดยน้ำยางข้นชุดตัวอย่างที่มีปริมาณลิปิดมากจะมีค่า MST เพิ่มขึ้นเร็ว

5.1.5 การทดสอบความเสถียรด้วยเทคนิค light scattering ไม่สามารถใช้เพื่อบ่งบอกความเสถียรเชิงกลของน้ำยางข้นในงานวิจัยนี้ได้ โดยจะเห็นได้ว่าผลการทดสอบที่ได้จากการวัดด้วยเทคนิค light scattering กับผลการวัดค่า MST ไม่มีความสัมพันธ์กัน

5.1.6 เมื่อเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ยางที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางข้นที่บ่มเร่งความเสถียรด้วยเอนไซม์ไลเปสกับน้ำยางข้นที่ไม่ได้ใส่สารเร่งความเสถียร (Blank) และน้ำยางข้นเกรดการค้า พบว่าการใช้เอนไซม์ไลเปสในการบ่มเร่งความเสถียรของน้ำยางข้น ไม่ส่งผลเสียต่อการนำน้ำยางข้นไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ยางแบบจุ่มและการขึ้นรูปยางฟองน้ำ ทั้งในระหว่างกระบวนการจุ่มขึ้นรูปและสมบัติเบื้องต้นของฟิล์มยางที่ได้ ยิ่งกว่านั้นยังพบว่าการบ่มด้วยไลเปสมีแนวโน้มทำให้ยางฟองน้ำมีความสามารถในการคืนตัวจากแรงกดเพิ่มขึ้นตามปริมาณเอนไซม์ไลเปสที่เพิ่มขึ้น

5.1.7 เมื่อเปรียบเทียบความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ระหว่างน้ำยางชั้นด้วยที่บ่มเร่งความเร็วด้วยเอนไซม์ไลเปสกับน้ำยางชั้นเกรดการค้าพบว่า น้ำยางชั้นที่บ่มเร่งความเร็วด้วยเอนไซม์ไลเปสจะมีต้นทุนการผลิตต่อหน่วยที่สูงกว่าน้ำยางชั้นเกรดการค้าประมาณ 3.8% แต่เนื่องจากการใช้เอนไซม์ไลเปสจะช่วยลดระยะเวลาในการบ่มน้ำยางชั้น ทำให้สามารถเพิ่มกำลังการผลิตน้ำยางชั้นได้มากขึ้นถึง 8 เท่า โดยไม่ต้องขยายขนาดโรงงาน ซึ่งส่งผลให้ได้กำไรสุทธิที่มากกว่าน้ำยางชั้นเกรดการค้าประมาณ 7.5 เท่า ดังนั้นการใช้เอนไซม์ไลเปสในการเร่งความเร็วความเสถียรเชิงกลของน้ำยางชั้น จะเหมาะสำหรับการผลิตในช่วงที่ตลาดมีความต้องการน้ำยางชั้นในปริมาณมาก

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลการบ่มเร่งความเร็วความเสถียรในน้ำยางชั้น โดยศึกษาผลการทำซ้ำในน้ำยางชั้น 3 ชุดตัวอย่างที่ผลิตในช่วงเวลาต่างกัน ซึ่งพบว่าน้ำยางชั้นแต่ละชุดมีการเพิ่มขึ้นของค่า MST ที่แตกต่างกัน จึงได้ทำการศึกษาปัจจัยที่อาจส่งผลต่อความแตกต่างของการเพิ่มขึ้นของค่า MST คือปริมาณฟอสโฟลิปิดในน้ำยางชั้นชุดตัวอย่างที่ 2 และ 3 ด้วยเทคนิค FTIR และวิธีการสกัดลิปิด โดยพบว่าในน้ำยางชั้นทั้ง 2 ชุดตัวอย่าง มีปริมาณฟอสโฟลิปิดที่แตกต่างกัน แต่อย่างไรก็ตาม ควรมีการกำหนดช่วงระยะเวลาที่แน่นอนในการชื้อน้ำยางชั้นสำหรับนำมาทดลองบ่มเร่งความเร็ว และใช้เทคนิคอื่นเพิ่มเติมในการศึกษาปริมาณสารอื่น ๆ ในน้ำยางที่ผลิตในแต่ละฤดูกาล ซึ่งอาจส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่า MST ของน้ำยางชั้น ด้วยเช่นกัน

5.2.2 ในงานวิจัยนี้ได้ทำการจัดเก็บน้ำยางชั้นทั้งชนิด LA latex และ HA latex ที่บ่มเร่งความเร็วด้วยเอนไซม์ไลเปส น้ำยางชั้นเกรดการค้าและน้ำยางชั้นที่ไม่ได้เติมสารเร่งความเร็วไว้ที่อุณหภูมิห้อง เพื่อศึกษาการบูดเน่าของน้ำยางชั้น พบว่าน้ำยางชั้นที่จัดเก็บไว้เป็นระยะเวลานานมากกว่า 1 ปีนับจากวันผลิต ยังไม่เกิดการบูดเน่า ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวิธีการบ่มเร่งความเร็วความเสถียรไม่ส่งผลต่อการบูดเน่าของน้ำยางชั้น

รายการอ้างอิง

หนังสือและบทความในหนังสือ

- จิตต์ลัดดา ศักดาภิพาณิขย์. (2553). *เทคโนโลยียางธรรมชาติ*. กรุงเทพฯ: เทคโนบิซ คอมมิวนิเคชั่นส์.
- เสาวนีย์ ก่ออุฒิกุลรังษี. (2543). *การผลิตยางธรรมชาติ* (พิมพ์ครั้งที่ 2). ปัตตานี: สำนักวิทยบริการ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี.
- วรภรณ์ ขจรไชยกูล. (2559). *เทคโนโลยีน้ำยาง*. กรุงเทพฯ: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.).
- Blackley, D. C. (1997). *Polymer Latices*. London: Chapman & Hall.
- Hwee, E. A. (2013). Non-Rubbers and Abnormal Groups in Natural Rubber. In *Natural Rubber Materials* (pp. 53-72). The Royal Society of Chemistry United Kingdom.
- Rahman, N. Z. R. A., & Basri, M. (2006). *New lipases and proteases*. New York: Nova Publishers
- Thomas, S., Chan, C. H., Pothen, L. A., Rajisha, K. R., & Maria, H. (Eds.). (2013). *Natural Rubber Materials: Volume 1: Blends and IPNs* (Vol. 7). Cambridge: Royal society of Chemistry.
- Williams, G. (2015). *Advanced Biology for you*. Oxford University Press-Children.

บทความในวารสาร

- ศิริภา สันติทานุโสภณ, และ สอาด รียะจันทร์. (2012). อิทธิพลของปริมาณแอมโมเนียในน้ำยางสด และระยะเวลาเก็บรักษาน้ำยางสดต่อค่าความคงตัวเชิงกล ปริมาณกรดไขมันระเหยได้ ปริมาณเจล ปริมาณฟอสเฟตของน้ำยางข้นและการจับตัวของน้ำยางสกิม. *โครงการคลังความรู้ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์*, 1-10.
- สุวดี ก้องพารากุล. (2013). เทคโนโลยีการตัดแปะยางธรรมชาติและการประยุกต์ใช้. *วารสารวิทยาศาสตร์ มช.*, 41(3), 567-581.
- Chen, S. F., & Ng, C. S. (1984). The natural higher fatty acid soaps in natural rubber latex and their effect on the mechanical stability of the latex. *Rubber chemistry and technology*, 57(2), 243-253.

- Claramma, N. M., & Mathew, N. M. (1997). Effect of temperature on sulfur prevulcanization of natural rubber latex. *Journal of applied polymer science*, 65(10), 1913-1920.
- Davies, R. T., & Pendle, T. D. (1992). Thermally-induced changes in the mechanical stabilities of natural rubber latex concentrates. *Natural Rubber Research*, 6, 12-19.
- Hasma, H. (1991). Lipids associated with rubber particles and their possible role in mechanical stability of latex concentrates. *J Nat Rubber Res*, 6, 105-114.
- Karunanayake, L., & Perera, G. P. (2006). Effect of magnesium and phosphate ions on the stability of concentrated natural rubber latex and the properties of natural rubber latex-dipped products. *Journal of applied polymer science*, 99(6), 3120-3124.
- Kumarn, S., Churinthorn, N., Nimpailoon, A., Sriring, M., Ho, C. C., Takahara, A., & Sakdapipanich, J. (2018). Investigating the mechanistic and structural role of lipid hydrolysis in the stabilization of ammonia-preserved Hevea rubber latex. *Langmuir*, 34(43), 12730-12738.
- Manroshan, S., Amir-Hashim, M. Y., & Booten, K. (2007). The effect of hydrophobically modified inulin on the properties of natural rubber latex concentrates. *Journal of Rubber Research*, 10(3), 161-170.
- Liengprayoon, S., Bonfils, F., Sainte-Beuve, J., Sriroth, K., Dubreucq, E., & Vaysse, L. (2008). Development of a new procedure for lipid extraction from Hevea brasiliensis natural rubber. *European journal of lipid science and technology*, 110(6), 563-569.
- Nawamawat, K., Sakdapipanich, J. T., Ho, C. C., Ma, Y., Song, J., & Vancso, J. G. (2011). Surface nanostructure of Hevea brasiliensis natural rubber latex particles. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 390(1-3), 157-166.
- Pendle, T. D., & Gorton, A. D. T. (1978). The mechanical stability of natural rubber latexes. *Rubber Chemistry and Technology*, 51(5), 986-1005.
- Sansatsadeekul, J., Sakdapipanich, J., & Rojruthai, P. (2011). Characterization of associated proteins and phospholipids in natural rubber latex. *Journal of bioscience and bioengineering*, 111(6), 628-634.

Silva, K. M. D., & Walpalage, S. (2009). Effects of added ammonium laurate soap on natural rubber latex. *Rubber Research*, 12, 59-70.

Tanaka, Y., Hioki, Y., Hayashi, M., Ichikawa, N., & Sakaki, T. (1997). *U.S. Patent No. 5,610,212*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

วิทยานิพนธ์

เดชณรงค์ พิมาลัย, & ยศธร วงศ์งาม. (2014). *การศึกษานวทางในการเร่งความเสถียรเชิงกลของน้ำยางข้น*. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, คณะวิศวกรรมศาสตร์, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี.

บุญธรรม นิธิอุทัย, พรพรรณ นิธิอุทัย, ปรีชา ป้องภัย, สาโรจน์ สำเนาเงิน, นิรันตร์ โนรีวงษ์, และชัยอรุณ วุฒิชาย. (1995). *การเร่งความเสถียรเชิงกลของน้ำยางธรรมชาติ*. ปัตตานี: ม.สงขลานครินทร์.

สื่ออิเล็กทรอนิกส์

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2544). *หลักปฏิบัติเพื่อป้องกันมลพิษ (เทคโนโลยีการผลิตที่สะอาด) สำหรับอุตสาหกรรมรายสาขา*. สืบค้นจาก http://php.diw.go.th/ctu/files/pdf/codeofpractice_rubber_th.pdf

ชนิดของน้ำยางข้นและสารเคมีรักษาสภาพ. สืบค้นจาก <http://dc.oas.psu.ac.th/dcims/files/01854/Chapter2.pdf>

ชินรัตน์ ลาภพูลชนะอนันต์. (2558). *เทคโนโลยีการผลิตและทดสอบโฟมยางจากน้ำยางธรรมชาติ*. สืบค้นจาก http://rubber.oie.go.th/rrd/file/latex_foam.pdf

แนวหน้า. (2562). *วิทยาศาสตร์ สำหรับเยาวชน : ยางสังเคราะห์และยางธรรมชาติ*. สืบค้นจาก <https://www.naewna.com/sport/426291>

ChemSrc. (2018). L-2-O-methyl-chiro-inositol. สืบค้นจาก https://www.chemsrc.com/en/cas/642-38-6_255820.html

สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.). (2555). *สารจับตัวน้ำล้างเครื่องปั่นน้ำยางที่มีประสิทธิภาพสูง GRASS 2*. สืบค้นจาก <https://www.nstda.or.th/th/contact-nstda>

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. (2552). *มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม น้ำยางข้นธรรมชาติ มอก. 980-2552*. สืบค้นจาก http://tla-latex.org/activity_pic/20160201105436.pdf

สถาบันพลาสติก. (2559). รายงานการศึกษาเชิงลึก เรื่อง อนาคตถุงมือยางไทยในตลาดโลก (น.11).

สืบค้นจาก <http://rubber.oie.go.th/box/Article/42174/%E0%B9%80%E0%B8%8A%E0%B8%B4%E0%B8%87%E0%B8%A5%E0%B8%B6%E0%B8%81%E0%B8%96%E0%B8%B8%E0%B8%87%E0%B8%A1%E0%B8%B7%E0%B8%AD%E0%B8%A2%E0%B8%B2%E0%B8%87%20RIU%20website.pdf>

Rebecca Howard. (2013). Latex Mattresses. สืบค้นจาก <https://sleepacademy.org/2013/12/17/latex-mattresses/>



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

การคำนวณกิจกรรมของเอนไซม์ไลเปส (Lipase activity)

กิจกรรมของเอนไซม์ไลเปส สามารถคำนวณได้จากสูตร ดังนี้

$$\text{Lipase unit activity } (\mu\text{mole/min}) = \frac{\left(\frac{C_{\text{NaOH}} (V_{\text{NaOH}} - V_{\text{NaOH-blank}})}{1000} \right) \times 10^6}{20}$$

เมื่อ C_{NaOH} คือ ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่ใช้ในการไตเตรท (M)

V_{NaOH} คือ ปริมาตรสารละลาย NaOH ที่ใช้ไตเตรทซบสเตรทผสมเอนไซม์ (ml)

$V_{\text{NaOH-blank}}$ คือ ปริมาตรสารละลาย NaOH ที่ใช้ไตเตรทซบสเตรท (ml)

ตัวอย่างการคำนวณ

กำหนดให้ ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH = 0.05 M

ปริมาตรสารละลาย NaOH ที่ใช้ในการไตเตรทซบสเตรทผสมเอนไซม์ = 10.3 ml

ปริมาตรสารละลาย NaOH ที่ใช้ในการไตเตรทซบสเตรท = 0.9 ml

$$\begin{aligned} \text{Lipase unit activity} &= \frac{\left(\frac{(0.05)(10.3 - 0.9)}{1000} \right) \times 10^6}{20} \\ &= 23.5 \mu\text{mole/min} \end{aligned}$$

ข.3 การคำนวณปริมาณความเป็นต่างในรูปของแอมโมเนีย (Alkalinity as ammonia; %NH₃)
สามารถคำนวณได้จากสูตร ดังนี้

$$\text{ความเป็นต่าง (ในรูปแอมโมเนีย), ร้อยละ} = \frac{FcV}{m}$$

เมื่อ $F = 1.7$

c = ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานกรดเกลือ (mol/dm³)

V = ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานกรดเกลือที่ใช้ (cm³)

m = น้ำหนักตัวอย่างทดสอบ (กรัม)

ตัวอย่างการคำนวณ

กำหนดให้ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานกรดเกลือ = 0.1 mol/dm³

ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานกรดเกลือที่ใช้ = 4.9 cm³

น้ำหนักตัวอย่างทดสอบ = 4.1032 กรัม

$$\text{ความเป็นต่าง (ในรูปแอมโมเนีย)} = \frac{FcV}{m} = \frac{1.7 \times 0.1 \times 4.9}{4.1032} = 0.20\%$$

ข.4 การคำนวณความหนาแน่นของยางพองน้ำ (Density)

สามารถคำนวณได้จากสูตร ดังนี้

$$\text{ความหนาแน่น (kg/m}^3\text{)} = \frac{m}{V} \times 10^6$$

เมื่อ m คือ น้ำหนักของยางพองน้ำ (กรัม)

V คือ ปริมาตรของยางพองน้ำ (mm^3)

ตัวอย่างการคำนวณ

กำหนดให้ น้ำหนักของยางพองน้ำ = 11.402 กรัม

ปริมาตรของยางพองน้ำ = 66168.762 mm^3

$$\text{ความหนาแน่น (kg/m}^3\text{)} = \frac{m}{V} \times 10^6 = \frac{11.402}{66168.762} \times 10^6 = 172.32 \text{ kg/m}^3$$

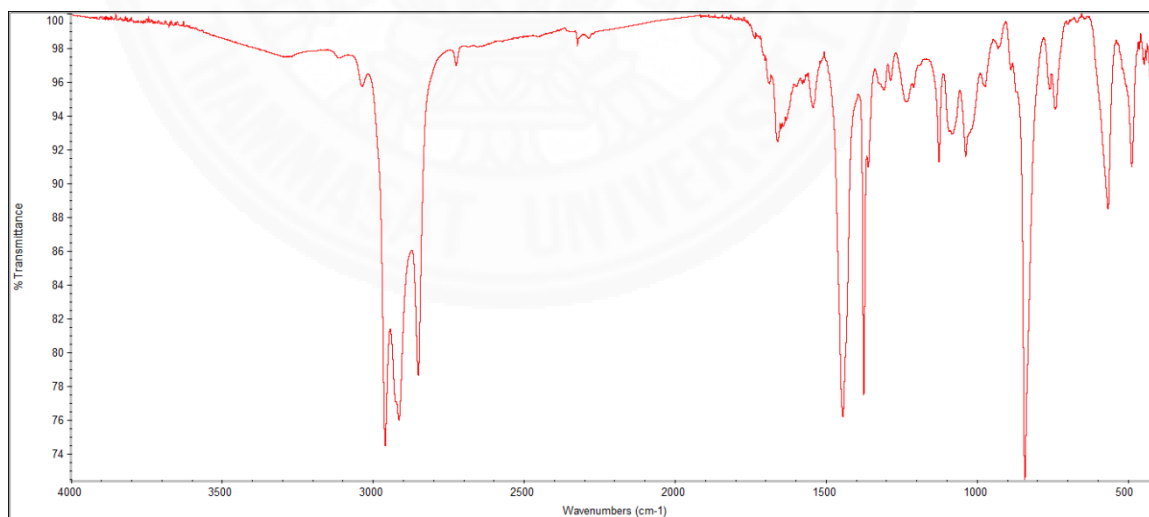
ภาคผนวก ค

ผลการทดสอบหมู่ฟังก์ชันของยางธรรมชาติชุดตัวอย่างที่ 2 และชุดตัวอย่างที่ 3

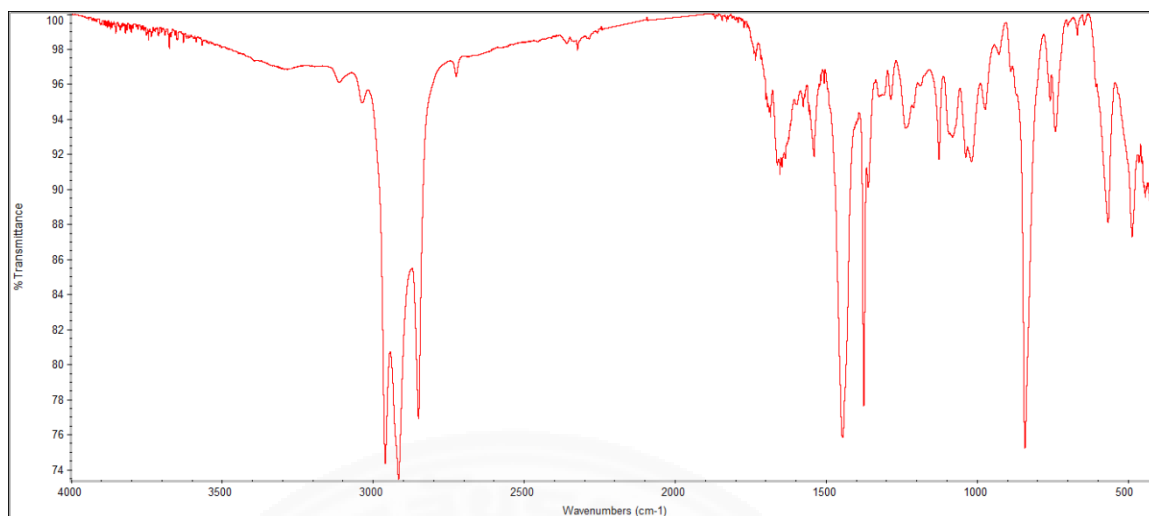
ตารางที่ ค.1

แถบดูดกลืนของหมู่ฟังก์ชันของยางธรรมชาติที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ

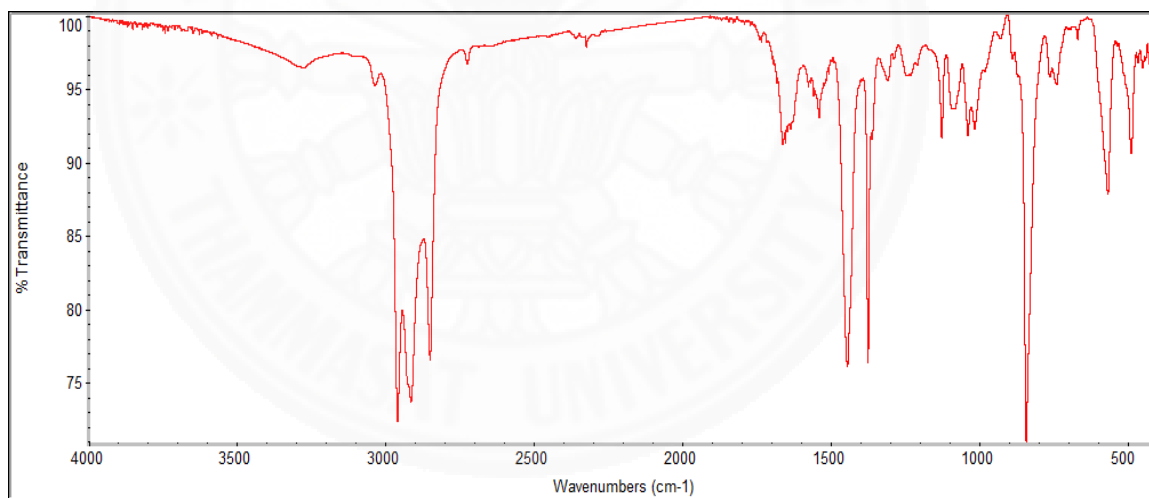
Functional group	Wavenumber (cm ⁻¹)
C-H bending	841
C-H bending of CH ₃	1375
C-H bending of CH ₂	1445
C=C stretching	1653
C-H stretching of -CH	2849
C-H stretching of -CH ₂	2915
C-H stretching of -CH ₃	2960



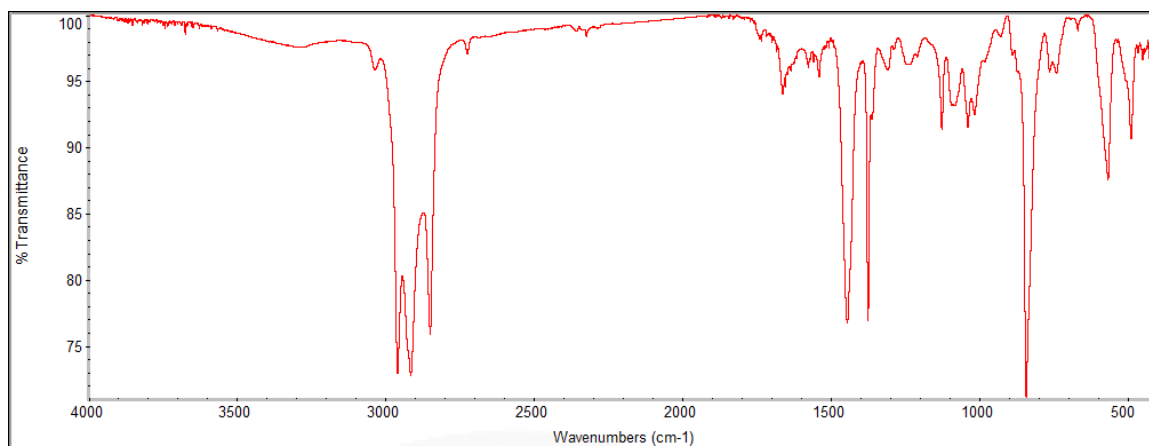
ภาพที่ ค.1 ผลการทดสอบ FTIR ของน้ำยางข้นชนิด LA latex ชุดตัวอย่างที่ 2



ภาพที่ ค.2 ผลการทดสอบ FTIR ของน้ำยางข้นชนิด LA latex ชุดตัวอย่างที่ 3



ภาพที่ ค.3 ผลการทดสอบ FTIR ของน้ำยางข้นชนิด HA latex ชุดตัวอย่างที่ 2



ภาพที่ ค.4 ผลการทดสอบ FTIR ของน้ำยางข้นชนิด HA latex ชุดตัวอย่างที่ 3

จากผลการทดสอบ FTIR ของน้ำยางข้นชนิด LA latex และ HA latex ของน้ำยางข้นชุดตัวอย่างที่ 2 และชุดตัวอย่างที่ 3 สามารถคำนวณอัตราส่วนการดูดกลืนคลื่นแสง (Absorbance ratio: AR) ที่แถบความยาวคลื่น 1735 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคของ C=O stretching (Ester ; Carbonyl group) โดยมีแถบการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 1445 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคของ C-H เป็นพีคอ้างอิง ได้ตามสมการ ค-1

$$\text{Absorbance ratio} = \frac{A}{B} \quad \text{ค-1}$$

เมื่อ A คือ ค่าการดูดกลืนคลื่นแสง (Absorbance) ของพีค C=O

B คือ ค่าการดูดกลืนคลื่นแสง (Absorbance) ของพีค C-H

ตารางที่ ค.2

อัตราส่วนการดูดกลืน (Absorbance ratio: AR) ของน้ำยางข้นชุดที่ 2 และชุดที่ 3

ตัวอย่าง	Wavenumbers (cm^{-1})	Absorbance	Wavenumbers (cm^{-1})	Absorbance	Absorbance ratio (AR)
Blank LA ชุดที่ 2	1735	0.006	1445	0.118	0.051
Blank LA ชุดที่ 3	1735	0.011	1445	0.121	0.091
Blank HA ชุดที่ 2	1735	0.008	1445	0.118	0.068
Blank HA ชุดที่ 3	1735	0.009	1445	0.115	0.078

ภาคผนวก ง

ค่า MST ของน้ำยางชั้นที่นำมาใช้ในการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ยาง

ตารางที่ ง.1

ค่า MST ของน้ำยางชั้นที่ใช้ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางแบบจุ่ม ที่ระยะเวลาบ่ม 60 วัน

ตัวอย่าง	ชนิดของน้ำยาง	
	LA latex	HA latex
Blank	106	117
Commercial latex	483	691
CNRL treated with 0.004%lipase	422	723
CNRL treated with 0.04%lipase	452	839

ตารางที่ ง.2

ค่า MST ของน้ำยางชั้นชนิด LA latex 2 ชุดตัวอย่าง ที่ใช้ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางฟองน้ำ

ตัวอย่าง	ชุดตัวอย่างน้ำยางชั้น	
	น้ำยางชั้นชุดที่ 2 (ที่ระยะเวลาบ่ม 60 วัน)	น้ำยางชั้นชุดที่ 3 (ที่ระยะเวลาบ่ม 45 วัน)
Blank LA	106	120
Commercial LATZ latex	483	564
LA0.004LP	422	1062
LA0.04LP	452	1119

ตารางที่ ง.3

ค่า MST ของน้ำยางชั้นชนิด HA latex 2 ชุดตัวอย่าง ที่ใช้ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางพองน้ำ

ตัวอย่าง	ชุดตัวอย่างน้ำยางชั้น	
	น้ำยางชั้นชุดที่ 2 (ที่ระยะเวลาบ่ม 60 วัน)	น้ำยางชั้นชุดที่ 3 (ที่ระยะเวลาบ่ม 45 วัน)
Blank HA	117	163
Commercial HA latex	691	672
HA0.004LP	723	1162
HA0.04LP	839	1252

ภาคผนวก จ

ผลการวัดขนาดรูพรุนและการคำนวณขนาดรูพรุนของยางฟองน้ำ

จ.1 ข้อมูลขนาดรูพรุนของยางฟองน้ำ

จ.1.1 ข้อมูลขนาดขนาดรูพรุนของยางฟองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางชั้นชุดที่ 2

ตารางที่ จ.1

ขนาดรูพรุนของยางฟองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางชั้น Blank LA ชุดที่ 2

No.	Area (mm ²)	Radius (mm)	Diameter (mm)	No.	Area (mm ²)	Radius (mm)	Diameter (mm)
1	0.469	0.386	0.773	20	0.381	0.348	0.697
2	0.365	0.341	0.682	21	0.102	0.180	0.360
3	0.342	0.330	0.660	22	0.184	0.242	0.484
4	1.328	0.650	1.301	23	0.864	0.525	1.049
5	0.283	0.300	0.600	24	0.234	0.273	0.546
6	0.219	0.264	0.528	25	0.179	0.239	0.478
7	0.461	0.383	0.766	26	0.154	0.221	0.443
8	0.410	0.361	0.723	27	0.250	0.282	0.564
9	0.242	0.278	0.555	28	0.126	0.200	0.401
10	0.360	0.339	0.677	29	0.155	0.222	0.444
11	0.166	0.230	0.460	30	0.059	0.137	0.274
12	0.346	0.332	0.664	31	0.067	0.146	0.292
13	0.331	0.325	0.649	32	0.184	0.242	0.484
14	0.154	0.221	0.443	33	0.155	0.222	0.444
15	0.179	0.239	0.478	34	0.102	0.180	0.360
16	0.198	0.251	0.502	35	0.163	0.228	0.456
17	0.138	0.210	0.419	36	0.138	0.210	0.419
18	0.283	0.300	0.600	37	0.054	0.131	0.262
19	0.506	0.401	0.803	38	0.054	0.131	0.262

No.	Area (mm ²)	Radius (mm)	Diameter (mm)	No.	Area (mm ²)	Radius (mm)	Diameter (mm)
39	0.070	0.149	0.299	63	0.054	0.131	0.262
40	0.155	0.222	0.444	64	0.054	0.131	0.262
41	0.096	0.175	0.350	65	0.070	0.149	0.299
42	0.166	0.230	0.460	66	0.283	0.300	0.600
43	0.112	0.189	0.378	67	0.219	0.264	0.528
44	0.360	0.339	0.677	68	0.461	0.383	0.766
45	0.070	0.149	0.299	69	0.410	0.361	0.723
46	0.128	0.202	0.404	70	0.242	0.278	0.555
47	0.102	0.180	0.360	71	0.331	0.325	0.649
48	0.102	0.180	0.360	72	0.154	0.221	0.443
49	0.166	0.230	0.460	73	0.179	0.239	0.478
50	0.115	0.191	0.383	74	0.198	0.251	0.502
51	0.166	0.230	0.460	75	0.138	0.210	0.419
52	0.346	0.332	0.664	76	0.283	0.300	0.600
53	0.331	0.325	0.649	77	0.506	0.401	0.803
54	0.154	0.221	0.443	78	0.381	0.348	0.697
55	0.179	0.239	0.478	79	0.166	0.230	0.460
56	0.250	0.282	0.564	80	0.112	0.189	0.378
57	0.126	0.200	0.401	81	0.360	0.339	0.677
58	0.155	0.222	0.444	82	0.070	0.149	0.299
59	0.059	0.137	0.274	83	0.128	0.202	0.404
60	0.067	0.146	0.292	84	0.102	0.180	0.360
61	0.163	0.228	0.456	85	0.102	0.180	0.360
62	0.138	0.210	0.419	86	0.283	0.300	0.600
						Average	0.645±0.179

ตารางที่ จ.2

ขนาดรูพรุนของยางฟองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางชั้น Commercial LATZ latex ชุดที่ 2

No.	Area (mm ²)	Radius (mm)	Diameter (mm)	No.	Area (mm ²)	Radius (mm)	Diameter (mm)
1	0.173	0.235	0.469	29	0.100	0.178	0.357
2	0.663	0.460	0.919	30	0.160	0.226	0.451
3	0.786	0.500	1.001	31	0.087	0.166	0.333
4	0.132	0.205	0.410	32	0.533	0.412	0.824
5	0.085	0.165	0.329	33	0.317	0.318	0.635
6	0.640	0.451	0.903	34	0.375	0.346	0.691
7	0.333	0.326	0.651	35	0.115	0.191	0.383
8	0.133	0.206	0.412	36	0.073	0.152	0.305
9	0.273	0.295	0.590	37	0.087	0.166	0.333
10	0.107	0.185	0.369	38	0.986	0.560	1.121
11	0.117	0.193	0.386	39	0.057	0.135	0.269
12	0.107	0.185	0.369	40	0.187	0.244	0.488
13	0.132	0.205	0.410	41	0.087	0.166	0.333
14	0.062	0.141	0.281	42	0.052	0.129	0.257
15	0.243	0.278	0.556	43	0.320	0.319	0.638
16	0.500	0.399	0.798	44	0.062	0.141	0.281
17	0.317	0.318	0.635	45	0.062	0.141	0.281
18	0.260	0.288	0.576	46	0.060	0.138	0.276
19	0.210	0.259	0.517	47	0.192	0.247	0.495
20	0.638	0.451	0.902	48	0.663	0.460	0.919
21	0.187	0.244	0.488	49	0.100	0.178	0.357
22	0.243	0.278	0.556	50	0.070	0.149	0.299
23	0.397	0.356	0.711	51	0.187	0.244	0.488
24	0.170	0.233	0.465	52	0.243	0.278	0.556
25	0.100	0.178	0.357	53	0.397	0.356	0.711
26	0.087	0.166	0.333	54	0.170	0.233	0.465
27	0.192	0.247	0.495	55	0.100	0.178	0.357
28	0.173	0.235	0.469	56	0.087	0.166	0.333

No.	Area (mm ²)	Radius (mm)	Diameter (mm)	No.	Area (mm ²)	Radius (mm)	Diameter (mm)
57	0.192	0.247	0.495	74	0.087	0.166	0.333
58	0.173	0.235	0.469	75	0.192	0.247	0.495
59	0.100	0.178	0.357	76	0.173	0.235	0.469
60	0.160	0.226	0.451	77	0.100	0.178	0.357
61	0.986	0.560	1.121	78	0.160	0.226	0.451
62	0.057	0.135	0.269	79	0.087	0.166	0.333
63	0.187	0.244	0.488	80	0.057	0.135	0.269
64	0.062	0.141	0.281	81	0.187	0.244	0.488
65	0.062	0.141	0.281	82	0.087	0.166	0.333
66	0.060	0.138	0.276	83	0.052	0.129	0.257
67	0.192	0.247	0.495	84	0.320	0.319	0.638
68	0.663	0.460	0.919	85	0.062	0.141	0.281
69	0.062	0.141	0.281	86	0.333	0.326	0.651
70	0.243	0.278	0.556	87	0.133	0.206	0.412
71	0.500	0.399	0.798	88	0.273	0.295	0.590
72	0.317	0.318	0.635	89	0.107	0.185	0.369
73	0.132	0.205	0.410	90	0.117	0.193	0.386
						Average	0.673±0.206

ตารางที่ จ.3

ขนาดรูพรุนของยางฟองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางชั้น LA latex ชุดที่ 2 ที่เติมเอนไซม์ไลเปส
0.004%v/v

No.	Area (mm ²)	Radius (mm)	Diameter (mm)	No.	Area (mm ²)	Radius (mm)	Diameter (mm)
1	0.346	0.332	0.664	28	0.850	0.520	1.041
2	0.483	0.392	0.784	29	0.283	0.300	0.600
3	0.613	0.442	0.884	30	0.166	0.230	0.460
4	0.864	0.525	1.049	31	0.275	0.296	0.592
5	1.038	0.575	1.150	32	0.381	0.348	0.697
6	1.203	0.619	1.238	33	0.242	0.278	0.555
7	0.320	0.319	0.638	34	0.333	0.326	0.651
8	0.384	0.350	0.699	35	0.250	0.282	0.564
9	0.661	0.459	0.918	36	0.242	0.278	0.555
10	0.235	0.274	0.547	37	0.219	0.264	0.528
11	4.082	1.140	2.280	38	0.360	0.339	0.677
12	0.283	0.300	0.600	39	0.070	0.149	0.299
13	0.163	0.228	0.456	40	0.184	0.242	0.484
14	0.365	0.341	0.682	41	0.266	0.291	0.582
15	0.614	0.442	0.884	42	0.266	0.291	0.582
16	0.219	0.264	0.528	43	3.510	1.057	2.115
17	0.365	0.341	0.682	44	0.134	0.207	0.413
18	0.941	0.547	1.095	45	0.250	0.282	0.564
19	0.166	0.230	0.460	46	0.365	0.341	0.682
20	0.283	0.300	0.600	47	0.163	0.228	0.456
21	0.819	0.511	1.021	48	0.331	0.325	0.649
22	0.282	0.300	0.599	49	0.256	0.286	0.571
23	0.166	0.230	0.460	50	0.083	0.163	0.325
24	0.307	0.313	0.625	51	0.346	0.332	0.664
25	0.163	0.228	0.456	52	0.483	0.392	0.784
26	0.179	0.239	0.478	53	0.613	0.442	0.884
27	0.234	0.273	0.546	54	0.864	0.525	1.049

No.	Area (mm ²)	Radius (mm)	Diameter (mm)	No.	Area (mm ²)	Radius (mm)	Diameter (mm)
55	3.510	1.057	2.115	66	0.483	0.392	0.784
56	0.134	0.207	0.413	67	0.320	0.319	0.638
57	0.250	0.282	0.564	68	0.384	0.350	0.699
58	0.365	0.341	0.682	69	0.661	0.459	0.918
59	0.381	0.348	0.697	70	0.242	0.278	0.555
60	0.242	0.278	0.555	71	0.333	0.326	0.651
61	0.333	0.326	0.651	72	0.250	0.282	0.564
62	0.250	0.282	0.564	73	0.242	0.278	0.555
63	0.256	0.286	0.571	74	0.219	0.264	0.528
64	0.083	0.163	0.325	75	0.360	0.339	0.677
65	0.346	0.332	0.664	76	0.346	0.332	0.664
						Average	1.186±0.353

ตารางที่ จ.4

ขนาดรพูนของยางพองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางชั้น LA latex ชุดที่ 2 ที่เติมเอนไซม์ไลเปส
0.04%v/v

No.	Area (mm ²)	Radius (mm)	Diameter (mm)	No.	Area (mm ²)	Radius (mm)	Diameter (mm)
1	0.638	0.451	0.902	13	0.187	0.244	0.488
2	0.375	0.346	0.691	14	0.227	0.269	0.538
3	0.207	0.257	0.514	15	0.227	0.269	0.538
4	0.227	0.269	0.538	16	0.345	0.331	0.663
5	0.243	0.278	0.556	17	0.192	0.247	0.495
6	0.317	0.318	0.635	18	0.192	0.247	0.495
7	0.320	0.319	0.638	19	0.400	0.357	0.714
8	0.320	0.319	0.638	20	0.143	0.213	0.427
9	0.173	0.235	0.469	21	0.227	0.269	0.538
10	0.260	0.288	0.576	22	0.273	0.295	0.590
11	0.187	0.244	0.488	23	0.207	0.257	0.514
12	0.357	0.337	0.674	24	0.173	0.235	0.469

No.	Area (mm ²)	Radius (mm)	Diameter (mm)	No.	Area (mm ²)	Radius (mm)	Diameter (mm)
25	0.115	0.191	0.383	57	0.260	0.288	0.576
26	0.380	0.348	0.696	58	0.187	0.244	0.488
27	0.503	0.400	0.800	59	0.227	0.269	0.538
28	0.243	0.278	0.556	60	0.115	0.191	0.383
29	0.273	0.295	0.590	61	0.380	0.348	0.696
30	0.115	0.191	0.383	62	0.503	0.400	0.800
31	0.085	0.165	0.329	63	0.243	0.278	0.556
32	0.100	0.178	0.357	64	0.273	0.295	0.590
33	0.287	0.302	0.605	65	0.087	0.166	0.333
34	0.187	0.244	0.488	66	0.057	0.135	0.269
35	0.117	0.193	0.386	67	0.090	0.169	0.339
36	0.227	0.269	0.538	68	0.357	0.337	0.674
37	0.085	0.165	0.329	69	0.187	0.244	0.488
38	0.052	0.129	0.257	70	0.227	0.269	0.538
39	0.317	0.318	0.635	71	0.227	0.269	0.538
40	0.057	0.135	0.269	72	0.087	0.166	0.333
41	0.087	0.166	0.333	73	0.375	0.346	0.691
42	0.057	0.135	0.269	74	0.207	0.257	0.514
43	0.107	0.185	0.369	75	0.187	0.244	0.488
44	0.100	0.178	0.357	76	0.227	0.269	0.538
45	0.100	0.178	0.357	77	0.227	0.269	0.538
46	0.087	0.166	0.333	78	0.345	0.331	0.663
47	0.060	0.138	0.276	79	0.192	0.247	0.495
48	0.060	0.138	0.276	80	0.192	0.247	0.495
49	0.090	0.169	0.339	81	0.187	0.244	0.488
50	0.062	0.141	0.281	82	0.227	0.269	0.538
51	0.087	0.166	0.333	83	0.115	0.191	0.383
52	0.057	0.135	0.269	84	0.380	0.348	0.696
53	0.107	0.185	0.369	85	0.057	0.135	0.269
54	0.100	0.178	0.357	86	0.090	0.169	0.339
55	0.100	0.178	0.357	87	0.357	0.337	0.674
56	0.087	0.166	0.333	88	0.187	0.244	0.488

No.	Area (mm ²)	Radius (mm)	Diameter (mm)	No.	Area (mm ²)	Radius (mm)	Diameter (mm)
89	0.087	0.166	0.333	92	0.227	0.269	0.538
90	0.260	0.288	0.576	93	0.115	0.191	0.383
91	0.187	0.244	0.488	94	0.227	0.269	0.538
						Average	0.568±0.143

ตารางที่ จ.5

ขนาดรูพรุนของยางฟองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางชั้น Blank HA ชุดที่ 2

No.	Area (mm ²)	Radius (mm)	Diameter (mm)	No.	Area (mm ²)	Radius (mm)	Diameter (mm)
1	0.119	0.195	0.389	22	0.427	0.369	0.738
2	0.324	0.321	0.642	23	0.101	0.179	0.359
3	0.624	0.446	0.892	24	0.170	0.233	0.465
4	0.298	0.308	0.616	25	0.350	0.334	0.668
5	0.170	0.233	0.465	26	0.170	0.233	0.465
6	0.205	0.256	0.511	27	0.138	0.210	0.419
7	0.190	0.246	0.492	28	0.166	0.230	0.460
8	0.087	0.166	0.333	29	0.138	0.210	0.419
9	0.227	0.269	0.538	30	0.166	0.230	0.460
10	0.170	0.233	0.465	31	0.221	0.265	0.531
11	0.269	0.293	0.585	32	0.263	0.289	0.579
12	0.138	0.210	0.419	33	0.170	0.233	0.465
13	0.190	0.246	0.492	34	0.277	0.297	0.594
14	0.103	0.181	0.362	35	0.103	0.181	0.362
15	0.115	0.191	0.383	36	0.170	0.233	0.465
16	0.158	0.224	0.449	37	1.264	0.634	1.269
17	0.221	0.265	0.531	38	0.350	0.334	0.668
18	0.087	0.166	0.333	39	0.087	0.166	0.333
19	0.269	0.293	0.585	40	0.170	0.233	0.465
20	0.288	0.303	0.606	41	0.101	0.179	0.359
21	0.051	0.127	0.255	42	0.103	0.181	0.362

No.	Area (mm ²)	Radius (mm)	Diameter (mm)	No.	Area (mm ²)	Radius (mm)	Diameter (mm)
43	0.411	0.362	0.724	67	0.411	0.362	0.724
44	0.115	0.191	0.383	68	0.190	0.246	0.492
45	0.156	0.223	0.446	69	0.087	0.166	0.333
46	0.205	0.256	0.511	70	0.227	0.269	0.538
47	0.101	0.179	0.359	71	0.170	0.233	0.465
48	0.138	0.210	0.419	72	0.269	0.293	0.585
49	0.158	0.224	0.449	73	0.166	0.230	0.460
50	0.136	0.208	0.416	74	0.221	0.265	0.531
51	0.205	0.256	0.511	75	0.263	0.289	0.579
52	0.101	0.179	0.359	76	0.170	0.233	0.465
53	0.138	0.210	0.419	77	0.227	0.269	0.538
54	0.158	0.224	0.449	78	0.138	0.210	0.419
55	0.136	0.208	0.416	79	0.166	0.230	0.460
56	0.170	0.233	0.465	80	0.138	0.210	0.419
57	0.138	0.210	0.419	81	0.166	0.230	0.460
58	0.166	0.230	0.460	82	0.190	0.246	0.492
59	0.624	0.446	0.892	83	0.087	0.166	0.333
60	0.103	0.181	0.362	84	0.227	0.269	0.538
61	0.115	0.191	0.383	85	0.170	0.233	0.465
62	0.103	0.181	0.362	86	0.350	0.334	0.668
63	0.170	0.233	0.465	87	0.190	0.246	0.492
64	1.264	0.634	1.269	88	0.087	0.166	0.333
65	0.350	0.334	0.668	89	0.227	0.269	0.538
66	0.103	0.181	0.362	90	0.170	0.233	0.465
						Average	0.633±0.165

ตารางที่ จ.6

ขนาดรูพรุนของยางฟองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางชั้น Commercial HA latex ชุดที่ 2

No.	Area (mm ²)	Radius (mm)	Diameter (mm)	No.	Area (mm ²)	Radius (mm)	Diameter (mm)
1	0.480	0.391	0.782	29	0.155	0.222	0.444
2	0.224	0.267	0.534	30	0.050	0.126	0.252
3	0.202	0.254	0.507	31	0.077	0.157	0.313
4	0.166	0.230	0.460	32	0.102	0.180	0.360
5	0.202	0.254	0.507	33	0.600	0.437	0.874
6	0.242	0.278	0.555	34	0.112	0.189	0.378
7	0.298	0.308	0.616	35	0.134	0.207	0.413
8	0.163	0.228	0.456	36	0.128	0.202	0.404
9	0.266	0.291	0.582	37	0.198	0.251	0.502
10	0.218	0.263	0.527	38	0.070	0.149	0.299
11	0.219	0.264	0.528	39	0.098	0.177	0.353
12	0.613	0.442	0.884	40	0.154	0.221	0.443
13	0.234	0.273	0.546	41	0.112	0.189	0.378
14	0.365	0.341	0.682	42	0.102	0.180	0.360
15	0.184	0.242	0.484	43	0.154	0.221	0.443
16	0.242	0.278	0.555	44	0.283	0.300	0.600
17	0.266	0.291	0.582	45	0.067	0.146	0.292
18	0.110	0.187	0.374	46	0.282	0.300	0.599
19	0.304	0.311	0.622	47	0.336	0.327	0.654
20	0.613	0.442	0.884	48	0.179	0.239	0.478
21	0.218	0.263	0.527	49	0.360	0.339	0.677
22	0.115	0.191	0.383	50	0.142	0.213	0.425
23	0.112	0.189	0.378	51	0.266	0.291	0.582
24	0.202	0.254	0.507	52	0.110	0.187	0.374
25	0.154	0.221	0.443	53	0.304	0.311	0.622
26	0.218	0.263	0.527	54	0.613	0.442	0.884
27	0.198	0.251	0.502	55	0.218	0.263	0.527
28	0.218	0.263	0.527	56	0.115	0.191	0.383

No.	Area (mm ²)	Radius (mm)	Diameter (mm)	No.	Area (mm ²)	Radius (mm)	Diameter (mm)
57	0.112	0.189	0.378	76	0.242	0.278	0.555
58	0.202	0.254	0.507	77	0.298	0.308	0.616
59	0.134	0.207	0.413	78	0.600	0.437	0.874
60	0.128	0.202	0.404	79	0.112	0.189	0.378
61	0.198	0.251	0.502	80	0.134	0.207	0.413
62	0.070	0.149	0.299	81	0.128	0.202	0.404
63	0.098	0.177	0.353	82	0.198	0.251	0.502
64	0.613	0.442	0.884	83	0.070	0.149	0.299
65	0.234	0.273	0.546	84	0.098	0.177	0.353
66	0.365	0.341	0.682	85	0.154	0.221	0.443
67	0.184	0.242	0.484	86	0.112	0.189	0.378
68	0.242	0.278	0.555	87	0.242	0.278	0.555
69	0.266	0.291	0.582	88	0.298	0.308	0.616
70	0.110	0.187	0.374	89	0.600	0.437	0.874
71	0.304	0.311	0.622	90	0.112	0.189	0.378
72	0.202	0.254	0.507	91	0.070	0.149	0.299
73	0.154	0.221	0.443	92	0.098	0.177	0.353
74	0.166	0.230	0.460	93	0.613	0.442	0.884
75	0.202	0.254	0.507	94	0.234	0.273	0.546
						Average	0.592±0.145

ตารางที่ จ.7

ขนาดรูพรุนของยางฟองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางชั้น HA latex ชุดที่ 2 ที่เติมเอนไซม์ไลเปส
0.004%v/v

No.	Area (mm ²)	Radius (mm)	Diameter (mm)	No.	Area (mm ²)	Radius (mm)	Diameter (mm)
1	0.576	0.428	0.857	28	0.163	0.228	0.456
2	0.650	0.455	0.910	29	0.406	0.360	0.719
3	0.446	0.377	0.754	30	0.247	0.280	0.561
4	0.320	0.319	0.638	31	0.227	0.269	0.538
5	0.360	0.339	0.677	32	0.357	0.337	0.674
6	0.252	0.283	0.567	33	0.293	0.305	0.611
7	0.425	0.368	0.736	34	0.170	0.233	0.465
8	0.228	0.269	0.539	35	0.170	0.233	0.465
9	0.357	0.337	0.674	36	0.133	0.206	0.412
10	0.753	0.490	0.979	37	0.233	0.272	0.545
11	0.247	0.280	0.561	38	0.320	0.319	0.638
12	0.456	0.381	0.762	39	0.143	0.213	0.427
13	0.468	0.386	0.772	40	0.133	0.206	0.412
14	0.310	0.314	0.628	41	0.160	0.226	0.451
15	0.295	0.307	0.613	42	0.317	0.318	0.635
16	0.357	0.337	0.674	43	0.382	0.349	0.698
17	0.295	0.307	0.613	44	0.357	0.337	0.674
18	0.320	0.319	0.638	45	0.273	0.295	0.590
19	0.252	0.283	0.567	46	0.100	0.178	0.357
20	0.347	0.332	0.665	47	0.140	0.211	0.422
21	0.173	0.235	0.469	48	0.243	0.278	0.556
22	0.207	0.257	0.514	49	0.133	0.206	0.412
23	0.143	0.213	0.427	50	0.380	0.348	0.696
24	0.162	0.227	0.454	51	0.446	0.377	0.754
25	0.357	0.337	0.674	52	0.133	0.206	0.412
26	0.222	0.266	0.532	53	0.456	0.381	0.762
27	0.117	0.193	0.386	54	0.468	0.386	0.772

No.	Area (mm ²)	Radius (mm)	Diameter (mm)	No.	Area (mm ²)	Radius (mm)	Diameter (mm)
55	0.310	0.314	0.628	76	0.252	0.283	0.567
56	0.295	0.307	0.613	77	0.347	0.332	0.665
57	0.357	0.337	0.674	78	0.173	0.235	0.469
58	0.295	0.307	0.613	79	0.207	0.257	0.514
59	0.320	0.319	0.638	80	0.143	0.213	0.427
60	0.252	0.283	0.567	81	0.162	0.227	0.454
61	0.357	0.337	0.674	82	0.357	0.337	0.674
62	0.222	0.266	0.532	83	0.753	0.490	0.979
63	0.317	0.318	0.635	84	0.247	0.280	0.561
64	0.382	0.349	0.698	85	0.252	0.283	0.567
65	0.320	0.319	0.638	86	0.357	0.337	0.674
66	0.252	0.283	0.567	87	0.222	0.266	0.532
67	0.347	0.332	0.665	88	0.317	0.318	0.635
68	0.173	0.235	0.469	89	0.382	0.349	0.698
69	0.207	0.257	0.514	90	0.320	0.319	0.638
70	0.143	0.213	0.427	91	0.252	0.283	0.567
71	0.320	0.319	0.638	92	0.140	0.211	0.422
72	0.252	0.283	0.567	93	0.243	0.278	0.556
73	0.357	0.337	0.674	94	0.133	0.206	0.412
74	0.295	0.307	0.613	95	0.380	0.348	0.696
75	0.320	0.319	0.638	96	0.446	0.377	0.754
Average							0.657±0.138

ตารางที่ จ.8

ขนาดรูพรุนของยางฟองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางชั้น HA latex ชุดที่ 2 ที่เติมเอนไซม์ไลเปส
0.04%v/v

No.	Area (mm ²)	Radius (mm)	Diameter (mm)	No.	Area (mm ²)	Radius (mm)	Diameter (mm)
1	0.053	0.130	0.260	28	0.087	0.166	0.333
2	0.062	0.141	0.281	29	0.115	0.191	0.383
3	0.120	0.195	0.391	30	0.162	0.227	0.454
4	0.350	0.334	0.668	31	0.107	0.185	0.369
5	0.087	0.166	0.333	32	0.073	0.152	0.305
6	0.100	0.178	0.357	33	0.073	0.152	0.305
7	0.192	0.247	0.495	34	0.133	0.206	0.412
8	0.277	0.297	0.594	35	0.133	0.206	0.412
9	0.107	0.185	0.369	36	0.132	0.205	0.410
10	0.160	0.226	0.451	37	0.100	0.178	0.357
11	0.192	0.247	0.495	38	0.207	0.257	0.514
12	0.207	0.257	0.514	39	0.093	0.172	0.344
13	0.107	0.185	0.369	40	0.143	0.213	0.427
14	0.143	0.213	0.427	41	0.187	0.244	0.488
15	0.117	0.193	0.386	42	0.107	0.185	0.369
16	0.227	0.269	0.538	43	0.060	0.138	0.276
17	0.053	0.130	0.260	44	0.143	0.213	0.427
18	0.057	0.135	0.269	45	0.117	0.193	0.386
19	0.070	0.149	0.299	46	0.160	0.226	0.451
20	0.100	0.178	0.357	47	0.132	0.205	0.410
21	0.107	0.185	0.369	48	0.143	0.213	0.427
22	0.107	0.185	0.369	49	0.203	0.254	0.509
23	0.160	0.226	0.451	50	0.926	0.543	1.086
24	0.100	0.178	0.357	51	0.107	0.185	0.369
25	0.293	0.305	0.611	52	0.143	0.213	0.427
26	0.210	0.259	0.517	53	0.117	0.193	0.386
27	0.060	0.138	0.276	54	0.227	0.269	0.538

No.	Area (mm ²)	Radius (mm)	Diameter (mm)	No.	Area (mm ²)	Radius (mm)	Diameter (mm)
55	0.926	0.543	1.086	74	0.093	0.172	0.344
56	0.107	0.185	0.369	75	0.143	0.213	0.427
57	0.073	0.152	0.305	76	0.187	0.244	0.488
58	0.133	0.206	0.412	77	0.107	0.185	0.369
59	0.133	0.206	0.412	78	0.060	0.138	0.276
60	0.132	0.205	0.410	79	0.053	0.130	0.260
61	0.100	0.178	0.357	80	0.062	0.141	0.281
62	0.207	0.257	0.514	81	0.120	0.195	0.391
63	0.093	0.172	0.344	82	0.350	0.334	0.668
64	0.107	0.185	0.369	83	0.087	0.166	0.333
65	0.060	0.138	0.276	84	0.100	0.178	0.357
66	0.160	0.226	0.451	85	0.207	0.257	0.514
67	0.100	0.178	0.357	86	0.093	0.172	0.344
68	0.293	0.305	0.611	87	0.926	0.543	1.086
69	0.133	0.206	0.412	88	0.107	0.185	0.369
70	0.107	0.185	0.369	89	0.143	0.213	0.427
71	0.060	0.138	0.276	90	0.117	0.193	0.386
72	0.053	0.130	0.260	91	0.227	0.269	0.538
73	0.207	0.257	0.514	92	0.133	0.206	0.412
Average							0.526±0.133

จ.1.2 ข้อมูลขนาดขนาดรูพรุนของยางพองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางชั้นชุดที่ 3

ตารางที่ จ.9

ขนาดรูพรุนของยางพองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางชั้น Blank LA ชุดที่ 3

No.	Area (mm ²)	Radius (mm)	Diameter (mm)	No.	Area (mm ²)	Radius (mm)	Diameter (mm)
1	0.062	0.141	0.281	26	0.095	0.174	0.348
2	0.090	0.169	0.339	27	0.062	0.141	0.281
3	0.094	0.173	0.346	28	0.100	0.178	0.357
4	0.072	0.151	0.303	29	0.067	0.146	0.292
5	0.055	0.132	0.265	30	0.038	0.110	0.220
6	0.088	0.167	0.335	31	0.090	0.169	0.339
7	0.079	0.159	0.317	32	0.045	0.120	0.239
8	0.100	0.178	0.357	33	0.018	0.076	0.151
9	0.062	0.141	0.281	34	0.055	0.132	0.265
10	0.087	0.166	0.333	35	0.087	0.166	0.333
11	0.074	0.154	0.307	36	0.123	0.198	0.396
12	0.072	0.151	0.303	37	0.113	0.190	0.379
13	0.051	0.127	0.255	38	0.079	0.159	0.317
14	0.079	0.159	0.317	39	0.113	0.190	0.379
15	0.051	0.127	0.255	40	0.062	0.141	0.281
16	0.055	0.132	0.265	41	0.113	0.190	0.379
17	0.051	0.127	0.255	42	0.051	0.127	0.255
18	0.045	0.120	0.239	43	0.044	0.118	0.237
19	0.055	0.132	0.265	44	0.046	0.121	0.242
20	0.100	0.178	0.357	45	0.046	0.121	0.242
21	0.067	0.146	0.292	46	0.072	0.151	0.303
22	0.067	0.146	0.292	47	0.045	0.120	0.239
23	0.045	0.120	0.239	48	0.123	0.198	0.396
24	0.044	0.118	0.237	49	0.146	0.216	0.431
25	0.062	0.141	0.281	50	0.123	0.198	0.396

No.	Area (mm ²)	Radius (mm)	Diameter (mm)	No.	Area (mm ²)	Radius (mm)	Diameter (mm)
51	0.153	0.221	0.441	70	0.045	0.120	0.239
52	0.081	0.161	0.321	71	0.023	0.086	0.171
53	0.067	0.146	0.292	72	0.022	0.084	0.167
54	0.106	0.184	0.367	73	0.046	0.121	0.242
55	0.188	0.245	0.489	74	0.078	0.158	0.315
56	0.065	0.144	0.288	75	0.062	0.141	0.281
57	0.038	0.110	0.220	76	0.067	0.146	0.292
58	0.033	0.103	0.205	77	0.055	0.132	0.265
59	0.028	0.094	0.189	78	0.037	0.109	0.217
60	0.022	0.084	0.167	79	0.055	0.132	0.265
61	0.062	0.141	0.281	80	0.067	0.146	0.292
62	0.041	0.114	0.229	81	0.038	0.110	0.220
63	0.028	0.094	0.189	82	0.090	0.169	0.339
64	0.028	0.094	0.189	83	0.038	0.110	0.220
65	0.028	0.094	0.189	84	0.022	0.084	0.167
66	0.067	0.146	0.292	85	0.024	0.087	0.175
67	0.079	0.159	0.317	86	0.023	0.086	0.171
68	0.033	0.103	0.205	87	0.022	0.084	0.167
69	0.023	0.086	0.171	88	0.038	0.110	0.220
						Average	0.313±0.070

ตารางที่ จ.10

ขนาดรูพรุนของยางฟองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางชั้น Commercial LATZ latex ชุดที่ 3

No.	Area (mm ²)	Radius (mm)	Diameter (mm)	No.	Area (mm ²)	Radius (mm)	Diameter (mm)
1	0.103	0.181	0.362	29	0.087	0.166	0.333
2	0.087	0.166	0.333	30	0.067	0.146	0.292
3	0.061	0.139	0.279	31	0.071	0.150	0.301
4	0.119	0.195	0.389	32	0.136	0.208	0.416
5	0.136	0.208	0.416	33	0.051	0.127	0.255
6	0.073	0.152	0.305	34	0.087	0.166	0.333
7	0.083	0.163	0.325	35	0.119	0.195	0.389
8	0.032	0.101	0.202	36	0.063	0.142	0.283
9	0.073	0.152	0.305	37	0.041	0.114	0.229
10	0.087	0.166	0.333	38	0.063	0.142	0.283
11	0.073	0.152	0.305	39	0.073	0.152	0.305
12	0.067	0.146	0.292	40	0.119	0.195	0.389
13	0.071	0.150	0.301	41	0.067	0.146	0.292
14	0.103	0.181	0.362	42	0.051	0.127	0.255
15	0.156	0.223	0.446	43	0.073	0.152	0.305
16	0.119	0.195	0.389	44	0.063	0.142	0.283
17	0.067	0.146	0.292	45	0.083	0.163	0.325
18	0.087	0.166	0.333	46	0.040	0.113	0.226
19	0.073	0.152	0.305	47	0.067	0.146	0.292
20	0.073	0.152	0.305	48	0.071	0.150	0.301
21	0.061	0.139	0.279	49	0.063	0.142	0.283
22	0.051	0.127	0.255	50	0.067	0.146	0.292
23	0.071	0.150	0.301	51	0.071	0.150	0.301
24	0.051	0.127	0.255	52	0.087	0.166	0.333
25	0.071	0.150	0.301	53	0.041	0.114	0.229
26	0.103	0.181	0.362	54	0.063	0.142	0.283
27	0.119	0.195	0.389	55	0.063	0.142	0.283
28	0.071	0.150	0.301	56	0.138	0.210	0.419

No.	Area (mm ²)	Radius (mm)	Diameter (mm)	No.	Area (mm ²)	Radius (mm)	Diameter (mm)
57	0.061	0.139	0.279	75	0.120	0.195	0.391
58	0.051	0.127	0.255	76	0.071	0.150	0.301
59	0.034	0.104	0.208	77	0.103	0.181	0.362
60	0.061	0.139	0.279	78	0.067	0.146	0.292
61	0.063	0.142	0.283	79	0.073	0.152	0.305
62	0.061	0.139	0.279	80	0.067	0.146	0.292
63	0.051	0.127	0.255	81	0.067	0.146	0.292
64	0.087	0.166	0.333	82	0.067	0.146	0.292
65	0.087	0.166	0.333	83	0.032	0.101	0.202
66	0.071	0.150	0.301	84	0.071	0.150	0.301
67	0.047	0.122	0.245	85	0.041	0.114	0.229
68	0.063	0.142	0.283	86	0.051	0.127	0.255
69	0.041	0.114	0.229	87	0.051	0.127	0.255
70	0.087	0.166	0.333	88	0.051	0.127	0.255
71	0.067	0.146	0.292	89	0.067	0.146	0.292
72	0.051	0.127	0.255	90	0.032	0.101	0.202
73	0.051	0.127	0.255	91	0.063	0.142	0.283
74	0.041	0.114	0.229	92	0.051	0.127	0.255
Average							0.317±0.051

ตารางที่ จ.11

ขนาดรูพรุนของยางฟองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางชั้น LA latex ชุดที่ 3 ที่เติมเอนไซม์ไลเปส
0.004%v/v

No.	Area (mm ²)	Radius (mm)	Diameter (mm)	No.	Area (mm ²)	Radius (mm)	Diameter (mm)
1	0.102	0.180	0.360	28	0.049	0.125	0.250
2	0.183	0.241	0.483	29	0.033	0.103	0.205
3	0.110	0.187	0.374	30	0.054	0.131	0.262
4	0.083	0.163	0.325	31	0.070	0.149	0.299
5	0.110	0.187	0.374	32	0.070	0.149	0.299
6	0.133	0.206	0.412	33	0.051	0.127	0.255
7	0.111	0.188	0.376	34	0.049	0.125	0.250
8	0.110	0.187	0.374	35	0.019	0.078	0.156
9	0.137	0.209	0.418	36	0.059	0.137	0.274
10	0.059	0.137	0.274	37	0.054	0.131	0.262
11	0.059	0.137	0.274	38	0.081	0.161	0.321
12	0.133	0.206	0.412	39	0.057	0.135	0.269
13	0.264	0.290	0.580	40	0.054	0.131	0.262
14	0.110	0.187	0.374	41	0.054	0.131	0.262
15	0.059	0.137	0.274	42	0.051	0.127	0.255
16	0.041	0.114	0.229	43	0.081	0.161	0.321
17	0.051	0.127	0.255	44	0.025	0.089	0.178
18	0.041	0.114	0.229	45	0.032	0.101	0.202
19	0.095	0.174	0.348	46	0.041	0.114	0.229
20	0.070	0.149	0.299	47	0.083	0.163	0.325
21	0.049	0.125	0.250	48	0.051	0.127	0.255
22	0.165	0.229	0.458	49	0.051	0.127	0.255
23	0.025	0.089	0.178	50	0.041	0.114	0.229
24	0.054	0.131	0.262	51	0.059	0.137	0.274
25	0.051	0.127	0.255	52	0.049	0.125	0.250
26	0.059	0.137	0.274	53	0.041	0.114	0.229
27	0.070	0.149	0.299	54	0.051	0.127	0.255

No.	Area (mm ²)	Radius (mm)	Diameter (mm)	No.	Area (mm ²)	Radius (mm)	Diameter (mm)
55	0.033	0.103	0.205	70	0.032	0.101	0.202
56	0.092	0.171	0.342	71	0.070	0.149	0.299
57	0.059	0.137	0.274	72	0.070	0.149	0.299
58	0.081	0.161	0.321	73	0.110	0.187	0.374
59	0.054	0.131	0.262	74	0.033	0.103	0.205
60	0.041	0.114	0.229	75	0.033	0.103	0.205
61	0.054	0.131	0.262	76	0.041	0.114	0.229
62	0.025	0.089	0.178	77	0.083	0.163	0.325
63	0.033	0.103	0.205	78	0.095	0.174	0.348
64	0.095	0.174	0.348	79	0.110	0.187	0.374
65	0.025	0.089	0.178	80	0.165	0.229	0.458
66	0.019	0.078	0.156	81	0.102	0.180	0.360
67	0.025	0.089	0.178	82	0.081	0.161	0.321
68	0.025	0.089	0.178	83	0.183	0.241	0.483
69	0.033	0.103	0.205	84	0.154	0.221	0.443
						Average	0.340±0.084

ตารางที่ จ.12

ขนาดรูพรุนของยางฟองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางชั้น LA latex ชุดที่ 3 ที่เติมเอนไซม์ไลเปส
0.04%v/v

No.	Area (mm ²)	Radius (mm)	Diameter (mm)	No.	Area (mm ²)	Radius (mm)	Diameter (mm)
1	0.176	0.237	0.474	28	0.094	0.173	0.346
2	0.129	0.203	0.405	29	0.081	0.161	0.321
3	0.129	0.203	0.405	30	0.081	0.161	0.321
4	0.127	0.201	0.402	31	0.059	0.137	0.274
5	0.129	0.203	0.405	32	0.048	0.124	0.247
6	0.147	0.216	0.433	33	0.048	0.124	0.247
7	0.735	0.484	0.968	34	0.096	0.175	0.350
8	0.731	0.482	0.965	35	0.039	0.111	0.223
9	0.830	0.514	1.028	36	0.048	0.124	0.247
10	0.252	0.283	0.567	37	0.068	0.147	0.294
11	0.485	0.393	0.786	38	0.062	0.141	0.281
12	0.672	0.463	0.925	39	0.048	0.124	0.247
13	0.325	0.322	0.643	40	0.066	0.145	0.290
14	0.287	0.302	0.605	41	0.059	0.137	0.274
15	0.632	0.449	0.897	42	0.059	0.137	0.274
16	0.068	0.147	0.294	43	0.059	0.137	0.274
17	0.107	0.185	0.369	44	0.037	0.109	0.217
18	0.048	0.124	0.247	45	0.062	0.141	0.281
19	0.068	0.147	0.294	46	0.062	0.141	0.281
20	0.081	0.161	0.321	47	0.062	0.141	0.281
21	0.059	0.137	0.274	48	0.068	0.147	0.294
22	0.048	0.124	0.247	49	0.029	0.096	0.192
23	0.077	0.157	0.313	50	0.048	0.124	0.247
24	0.110	0.187	0.374	51	0.127	0.201	0.402
25	0.268	0.292	0.584	52	0.081	0.161	0.321
26	0.062	0.141	0.281	53	0.129	0.203	0.405
27	0.096	0.175	0.350	54	0.048	0.124	0.247

No.	Area (mm ²)	Radius (mm)	Diameter (mm)	No.	Area (mm ²)	Radius (mm)	Diameter (mm)
55	0.039	0.111	0.223	73	0.068	0.147	0.294
56	0.059	0.137	0.274	74	0.057	0.135	0.269
57	0.077	0.157	0.313	75	0.081	0.161	0.321
58	0.037	0.109	0.217	76	0.081	0.161	0.321
59	0.037	0.109	0.217	77	0.096	0.175	0.350
60	0.127	0.201	0.402	78	0.077	0.157	0.313
61	0.059	0.137	0.274	79	0.059	0.137	0.274
62	0.110	0.187	0.374	80	0.059	0.137	0.274
63	0.132	0.205	0.410	81	0.059	0.137	0.274
64	0.094	0.173	0.346	82	0.419	0.365	0.731
65	0.191	0.247	0.493	83	0.062	0.141	0.281
66	0.110	0.187	0.374	84	0.110	0.187	0.374
67	0.127	0.201	0.402	85	0.059	0.137	0.274
68	0.048	0.124	0.247	86	0.110	0.187	0.374
69	0.077	0.157	0.313	87	0.127	0.201	0.402
70	0.059	0.137	0.274	88	0.538	0.414	0.828
71	0.039	0.111	0.223	89	0.039	0.111	0.223
72	0.062	0.141	0.281	90	0.037	0.109	0.217
						Average	0.597±0.186

ตารางที่ จ.13

ขนาดรูพรุนของยางฟองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางชั้น Blank HA ชุดที่ 3

No.	Area (mm ²)	Radius (mm)	Diameter (mm)	No.	Area (mm ²)	Radius (mm)	Diameter (mm)
1	0.138	0.210	0.419	29	0.130	0.203	0.407
2	0.381	0.348	0.697	30	0.095	0.174	0.348
3	0.943	0.548	1.096	31	0.067	0.146	0.292
4	0.173	0.235	0.469	32	0.080	0.160	0.319
5	0.649	0.455	0.909	33	0.080	0.160	0.319
6	1.016	0.569	1.138	34	0.173	0.235	0.469
7	0.653	0.456	0.912	35	0.056	0.134	0.267
8	0.151	0.219	0.439	36	0.069	0.148	0.296
9	0.450	0.379	0.757	37	0.095	0.174	0.348
10	0.296	0.307	0.614	38	0.095	0.174	0.348
11	0.186	0.243	0.487	39	0.151	0.219	0.439
12	0.151	0.219	0.439	40	0.074	0.154	0.307
13	0.110	0.187	0.374	41	0.171	0.233	0.467
14	0.186	0.243	0.487	42	0.110	0.187	0.374
15	0.110	0.187	0.374	43	0.069	0.148	0.296
16	0.316	0.317	0.634	44	0.056	0.134	0.267
17	0.296	0.307	0.614	45	0.151	0.219	0.439
18	0.755	0.490	0.981	46	0.156	0.223	0.446
19	0.095	0.174	0.348	47	0.125	0.200	0.399
20	0.681	0.466	0.931	48	0.069	0.148	0.296
21	1.021	0.570	1.140	49	0.110	0.187	0.374
22	0.337	0.328	0.655	50	0.125	0.200	0.399
23	0.149	0.218	0.436	51	0.035	0.106	0.211
24	0.171	0.233	0.467	52	0.151	0.219	0.439
25	0.225	0.268	0.535	53	0.069	0.148	0.296
26	0.151	0.219	0.439	54	0.095	0.174	0.348
27	0.186	0.243	0.487	55	0.067	0.146	0.292
28	0.138	0.210	0.419	56	0.190	0.246	0.492

No.	Area (mm ²)	Radius (mm)	Diameter (mm)	No.	Area (mm ²)	Radius (mm)	Diameter (mm)
57	0.074	0.154	0.307	69	0.056	0.134	0.267
58	0.045	0.120	0.239	70	0.149	0.218	0.436
59	0.045	0.120	0.239	71	0.056	0.134	0.267
60	0.074	0.154	0.307	72	0.078	0.158	0.315
61	0.069	0.148	0.296	73	0.080	0.160	0.319
62	0.069	0.148	0.296	74	0.035	0.106	0.211
63	0.080	0.160	0.319	75	0.056	0.134	0.267
64	0.056	0.134	0.267	76	0.035	0.106	0.211
65	0.080	0.160	0.319	77	0.110	0.187	0.374
66	0.095	0.174	0.348	78	0.095	0.174	0.348
67	0.130	0.203	0.407	79	0.035	0.106	0.211
68	0.045	0.120	0.239	80	0.035	0.106	0.211
						Average	0.680±0.216

ตารางที่ จ.14

ขนาดรูพรุนของยางฟองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางชั้น Commercial HA latex ชุดที่ 3

No.	Area (mm ²)	Radius (mm)	Diameter (mm)	No.	Area (mm ²)	Radius (mm)	Diameter (mm)
1	0.343	0.331	0.661	29	0.066	0.145	0.290
2	0.289	0.303	0.607	30	0.125	0.200	0.399
3	0.100	0.178	0.357	31	0.066	0.145	0.290
4	0.187	0.244	0.488	32	0.086	0.165	0.331
5	0.072	0.151	0.303	33	0.125	0.200	0.399
6	0.117	0.193	0.386	34	0.135	0.207	0.415
7	0.156	0.223	0.446	35	0.072	0.151	0.303
8	0.154	0.221	0.443	36	0.086	0.165	0.331
9	0.100	0.178	0.357	37	0.060	0.138	0.276
10	0.187	0.244	0.488	38	0.135	0.207	0.415
11	0.375	0.346	0.691	39	0.137	0.209	0.418
12	0.187	0.244	0.488	40	0.062	0.141	0.281
13	0.164	0.229	0.457	41	0.117	0.193	0.386
14	0.051	0.127	0.255	42	0.156	0.223	0.446
15	0.070	0.149	0.299	43	0.039	0.111	0.223
16	0.070	0.149	0.299	44	0.072	0.151	0.303
17	0.072	0.151	0.303	45	0.066	0.145	0.290
18	0.189	0.245	0.491	46	0.051	0.127	0.255
19	0.259	0.287	0.574	47	0.086	0.165	0.331
20	0.094	0.173	0.346	48	0.072	0.151	0.303
21	0.137	0.209	0.418	49	0.086	0.165	0.331
22	0.100	0.178	0.357	50	0.072	0.151	0.303
23	0.168	0.231	0.463	51	0.062	0.141	0.281
24	0.154	0.221	0.443	52	0.041	0.114	0.229
25	0.062	0.141	0.281	53	0.070	0.149	0.299
26	0.100	0.178	0.357	54	0.135	0.207	0.415
27	0.051	0.127	0.255	55	0.119	0.195	0.389
28	0.066	0.145	0.290	56	0.640	0.451	0.903

No.	Area (mm ²)	Radius (mm)	Diameter (mm)	No.	Area (mm ²)	Radius (mm)	Diameter (mm)
57	0.100	0.178	0.357	77	0.117	0.193	0.386
58	0.445	0.376	0.753	78	0.051	0.127	0.255
59	0.070	0.149	0.299	79	0.072	0.151	0.303
60	0.156	0.223	0.446	80	0.082	0.162	0.323
61	0.135	0.207	0.415	81	0.041	0.114	0.229
62	0.072	0.151	0.303	82	0.117	0.193	0.386
63	0.117	0.193	0.386	83	0.101	0.179	0.359
64	0.273	0.295	0.590	84	0.070	0.149	0.299
65	0.041	0.114	0.229	85	0.051	0.127	0.255
66	0.039	0.111	0.223	86	0.041	0.114	0.229
67	0.039	0.111	0.223	87	0.066	0.145	0.290
68	0.094	0.173	0.346	88	0.086	0.165	0.331
69	0.031	0.099	0.199	89	0.070	0.149	0.299
70	0.066	0.145	0.290	90	0.051	0.127	0.255
71	0.062	0.141	0.281	91	0.041	0.114	0.229
72	0.086	0.165	0.331	92	0.051	0.127	0.255
73	0.224	0.267	0.534	93	0.051	0.127	0.255
74	0.082	0.162	0.323	94	0.070	0.149	0.299
75	0.031	0.099	0.199	95	0.066	0.145	0.290
76	0.066	0.145	0.290	96	0.156	0.223	0.446
Average							0.454±0.122

ตารางที่ จ.15

ขนาดรูพรุนของยางฟองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางชั้น HA latex ชุดที่ 3 ที่เติมเอนไซม์ไลเปส
0.004%v/v

No.	Area (mm ²)	Radius (mm)	Diameter (mm)	No.	Area (mm ²)	Radius (mm)	Diameter (mm)
1	0.796	0.503	1.007	28	0.212	0.260	0.520
2	1.090	0.589	1.178	29	0.131	0.204	0.409
3	1.006	0.566	1.132	30	0.131	0.204	0.409
4	0.753	0.490	0.979	31	0.098	0.177	0.353
5	0.163	0.228	0.456	32	0.149	0.218	0.436
6	0.114	0.191	0.381	33	0.083	0.163	0.325
7	0.132	0.205	0.410	34	0.098	0.177	0.353
8	0.545	0.417	0.833	35	0.061	0.139	0.279
9	0.083	0.163	0.325	36	0.061	0.139	0.279
10	0.096	0.175	0.350	37	0.049	0.125	0.250
11	0.083	0.163	0.325	38	0.064	0.143	0.286
12	0.238	0.275	0.551	39	0.079	0.159	0.317
13	0.132	0.205	0.410	40	0.083	0.163	0.325
14	0.040	0.113	0.226	41	0.061	0.139	0.279
15	0.218	0.263	0.527	42	0.059	0.137	0.274
16	0.149	0.218	0.436	43	0.115	0.191	0.383
17	0.040	0.113	0.226	44	0.132	0.205	0.410
18	0.070	0.149	0.299	45	0.083	0.163	0.325
19	0.068	0.147	0.294	46	0.114	0.191	0.381
20	0.197	0.250	0.501	47	0.068	0.147	0.294
21	0.426	0.368	0.737	48	0.049	0.125	0.250
22	0.064	0.143	0.286	49	0.023	0.086	0.171
23	0.083	0.163	0.325	50	0.030	0.098	0.195
24	0.040	0.113	0.226	51	0.053	0.130	0.260
25	0.136	0.208	0.416	52	0.061	0.139	0.279
26	0.064	0.143	0.286	53	0.083	0.163	0.325
27	0.083	0.163	0.325	54	0.121	0.196	0.393

No.	Area (mm ²)	Radius (mm)	Diameter (mm)	No.	Area (mm ²)	Radius (mm)	Diameter (mm)
55	0.064	0.143	0.286	73	0.083	0.163	0.325
56	0.049	0.125	0.250	74	0.083	0.163	0.325
57	0.064	0.143	0.286	75	0.064	0.143	0.286
58	0.096	0.175	0.350	76	0.040	0.113	0.226
59	0.049	0.125	0.250	77	0.049	0.125	0.250
60	0.132	0.205	0.410	78	0.068	0.147	0.294
61	0.040	0.113	0.226	79	0.038	0.110	0.220
62	0.030	0.098	0.195	80	0.049	0.125	0.250
63	0.053	0.130	0.260	81	0.049	0.125	0.250
64	0.023	0.086	0.171	82	0.083	0.163	0.325
65	0.061	0.139	0.279	83	0.040	0.113	0.226
66	0.064	0.143	0.286	84	0.059	0.137	0.274
67	0.030	0.098	0.195	85	0.061	0.139	0.279
68	0.070	0.149	0.299	86	0.045	0.120	0.239
69	0.064	0.143	0.286	87	0.083	0.163	0.325
70	0.049	0.125	0.250	88	0.064	0.143	0.286
71	0.049	0.125	0.250	89	0.030	0.098	0.195
72	0.163	0.228	0.456	90	0.040	0.113	0.226
						Average	0.626±0.190

ตารางที่ จ.16

ขนาดรูพรุนของยางฟองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางชั้น HA latex ชุดที่ 3 ที่เติมเอนไซม์ไลเปส
0.04%v/v

No.	Area (mm ²)	Radius (mm)	Diameter (mm)	No.	Area (mm ²)	Radius (mm)	Diameter (mm)
1	0.107	0.185	0.369	28	0.120	0.195	0.391
2	0.145	0.215	0.430	29	0.076	0.156	0.311
3	0.105	0.183	0.366	30	0.163	0.228	0.456
4	0.145	0.215	0.430	31	0.124	0.199	0.397
5	0.107	0.185	0.369	32	0.200	0.252	0.505
6	0.074	0.154	0.307	33	0.124	0.199	0.397
7	0.074	0.154	0.307	34	0.066	0.145	0.290
8	0.105	0.183	0.366	35	0.275	0.296	0.592
9	0.091	0.170	0.340	36	0.149	0.218	0.436
10	0.105	0.183	0.366	37	0.070	0.149	0.299
11	0.132	0.205	0.410	38	0.074	0.154	0.307
12	0.074	0.154	0.307	39	0.076	0.156	0.311
13	0.124	0.199	0.397	40	0.105	0.183	0.366
14	0.105	0.183	0.366	41	0.091	0.170	0.340
15	0.076	0.156	0.311	42	0.107	0.185	0.369
16	0.064	0.143	0.286	43	0.091	0.170	0.340
17	0.124	0.199	0.397	44	0.165	0.229	0.458
18	0.163	0.228	0.456	45	0.163	0.228	0.456
19	0.070	0.149	0.299	46	0.091	0.170	0.340
20	0.142	0.213	0.425	47	0.142	0.213	0.425
21	0.107	0.185	0.369	48	0.132	0.205	0.410
22	0.142	0.213	0.425	49	0.124	0.199	0.397
23	0.099	0.178	0.355	50	0.076	0.156	0.311
24	0.132	0.205	0.410	51	0.126	0.200	0.401
25	0.064	0.143	0.286	52	0.237	0.275	0.549
26	0.211	0.259	0.518	53	0.070	0.149	0.299
27	0.165	0.229	0.458	54	0.145	0.215	0.430

No.	Area (mm ²)	Radius (mm)	Diameter (mm)	No.	Area (mm ²)	Radius (mm)	Diameter (mm)
55	0.107	0.185	0.369	76	0.142	0.213	0.425
56	0.091	0.170	0.340	77	0.124	0.199	0.397
57	0.076	0.156	0.311	78	0.066	0.145	0.290
58	0.066	0.145	0.290	79	0.041	0.114	0.229
59	0.064	0.143	0.286	80	0.029	0.096	0.192
60	0.145	0.215	0.430	81	0.105	0.183	0.366
61	0.054	0.131	0.262	82	0.145	0.215	0.430
62	0.165	0.229	0.458	83	0.107	0.185	0.369
63	0.070	0.149	0.299	84	0.064	0.143	0.286
64	0.064	0.143	0.286	85	0.091	0.170	0.340
65	0.076	0.156	0.311	86	0.120	0.195	0.391
66	0.076	0.156	0.311	87	0.076	0.156	0.311
67	0.076	0.156	0.311	88	0.145	0.215	0.430
68	0.091	0.170	0.340	89	0.076	0.156	0.311
69	0.142	0.213	0.425	90	0.070	0.149	0.299
70	0.070	0.149	0.299	91	0.070	0.149	0.299
71	0.091	0.170	0.340	92	0.066	0.145	0.290
72	0.215	0.262	0.523	93	0.054	0.131	0.262
73	0.124	0.199	0.397	94	0.066	0.145	0.290
74	0.054	0.131	0.262	95	0.054	0.131	0.262
75	0.076	0.156	0.311	96	0.064	0.143	0.286
						Average	0.390±0.073

จ.2 การคำนวณขนาดรูพรุนของยางพองน้ำ

การหาขนาดรูพรุนของยางพองน้ำ สามารถหาได้โดยการวัดขนาดรูพรุนของยางพองน้ำด้วยโปรแกรม image j และนำมาคำนวณหาขนาดรูพรุนเฉลี่ยโดยใช้สูตร ดังนี้

$$\text{Average diameter (mm)} = \frac{\sum A_i D_i}{\sum A_i}$$

เมื่อ A_i คือ พื้นที่รูพรุนของยางพองน้ำ (mm^2)

D_i คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนของยางพองน้ำ (mm)

ตัวอย่างการคำนวณ

กำหนดให้ขนาดรูพรุนของยางพองน้ำที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางชั้น Blank LA แสดงดังตารางที่

จ.1

สามารถคำนวณขนาดของรูพรุนของยางพองน้ำได้ดังนี้

$$\text{Average diameter (mm)} = \frac{\sum A_i D_i}{\sum A_i} = \frac{8.269}{12.027} = 0.688 \text{ mm}$$

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นางสาว จิราภรณ์ วงค์ขัติย์
 วันเดือนปีเกิด 14 กันยายน 2535
 วุฒิกการศึกษา ปีการศึกษา 2559: วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
 (วิศวกรรมเคมี)
 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ผลงานทางวิชาการ

- J. Wongkhat, T. Prathomtong and C. Pattamaprom (2017). *The synthesis of core-shell natural rubber with polymethyl methacrylate*. Proceeding of The 5th International Conference on Engineering, Energy and Environment.
- J. Wongkhat and C. Pattamaprom (2019). *The potential of enzyme in reducing the maturation time and the use of ammonia in concentrated natural rubber latex*. Proceedings of 2019 4th International Conference on Civil Engineering and Materials Science (ICCEMS 2019).