

ยางโฟมเซลลูโลสใช้สำหรับเป็นวัสดุดูดซับน้ำมัน

CELLULOSE RUBBER FOAM COMPOSITE USED AS  
OIL ABSORBENT

ภาพรร คล้ายเข็ม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ  
คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2566

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

# ยางโฟมเซลลูโลสใช้สำหรับเป็นวัสดุดูดซับน้ำมัน



ภาพรร คล้ายเข็ม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2566

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์      ยางโฟมเซลลูโลสใช้สำหรับเป็นวัสดุดูดซับน้ำมัน  
Cellulose Rubber Foam Composite Used as Oil Absorbent  
ชื่อ - นามสกุล            นายภพร คล้ายเข็ม  
สาขาวิชา                    วิศวกรรมวัสดุ  
อาจารย์ที่ปรึกษา            รองศาสตราจารย์วารุณี อริยวิริยะนันท์, D.Eng.  
ปีการศึกษา                    2566

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
.....  
(รองศาสตราจารย์ถิรารุท พงศ์ประยูร, ปร.ด.)

ประธานกรรมการ

  
.....  
(รองศาสตราจารย์สรพงษ์ ภาสุปรีย์, Ph.D.)

กรรมการ

  
.....  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณรงค์ชัย โอเจริญ, Ph.D.)

กรรมการ

  
.....  
(รองศาสตราจารย์วารุณี อริยวิริยะนันท์, D.Eng.)

กรรมการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทฉบับนี้

  
.....  
(รองศาสตราจารย์สรพงษ์ ภาสุปรีย์, Ph.D.)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 17 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2567

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นงานวิจัยที่เกิดจากการค้นคว้าและวิจัย ขณะที่ข้าพเจ้าศึกษาอยู่ในคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ดังนั้นงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถือเป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และข้อความต่างๆในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอรับรองว่าไม่มีการคัดลอกหรือนำงานวิจัยของผู้อื่นมานำเสนอในชื่อของข้าพเจ้า

This thesis consists of research materials conducted at the Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi and hence the copyright owner. I hereby certify that the thesis does not contain any forms of plagiarism.

.....  
(นายภพธร คล้ายเข็ม)



COPYRIGHT © .....

FACULTY OF ENGINEERING

RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI

ลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2566

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ยางโพลีเอทิลีนสำหรับเป็นวัสดุดูดซับน้ำมัน
ชื่อ-นามสกุล	นายภพธร คล้ายเข็ม
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ วารุณี อริยวิริยะนันท์, D. Eng.
ปีการศึกษา	2566

## บทคัดย่อ

ปัญหาการปนเปื้อนของน้ำมันในธรรมชาติยังคงเป็นปัญหาใหญ่ ซึ่งการรั่วไหลหรือการปนเปื้อนของน้ำมันอาจส่งผลกระทบต่อธรรมชาติ วัสดุดูดซับทางการค้าทำจากพลาสติกที่มีรูพรุนจำนวนมากทำให้เป็นการเพิ่มขยะพลาสติก ซึ่งวัสดุดูดซับที่ทำจากวัสดุธรรมชาติจะสามารถช่วยในการลดปัญหาขยะพลาสติกดังกล่าวได้ งานวิจัยนี้สนใจศึกษาการผลิตยางโพลีเอทิลีนจากวัสดุธรรมชาติในประเทศนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์และสร้างมูลค่า

การผลิตยางโพลีเอทิลีน ประกอบด้วย 2 ส่วน ส่วนแรกคือการเตรียมเซลลูโลสนาโนคริสตัลจากเส้นใยุ่น โดยใช้วิธีการทางเคมี ประกอบด้วย 2 กระบวนการการปรับสภาพด้วยอัลคาไลน์ การฟอกขาว ทำการย่อยด้วยกรดเพื่อให้ได้เซลลูโลสนาโนคริสตัล ส่วนที่สองการขึ้นรูปยางโพลีเอทิลีน กระบวนการตัดลอปโดยปริมาณเซลลูโลสนาโนคริสตัลที่ใช้ในการศึกษาคือ 0, 1, 2.5 และ 5 phr นำโพลีเอทิลีนที่ผลิตได้มาศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา สมบัติทางกายภาพ และทดสอบความสามารถในการดูดซับน้ำมัน

จากการทดสอบด้วยนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี ( $^{13}\text{C}$ -NMR) พบว่าการปรับสภาพด้วยอัลคาไลน์และการฟอกขาวของเส้นใยุ่นส่งผลให้สามารถกำจัดลิกนินและเฮมิเซลลูโลสได้ ในกระบวนการไฮโดรไลซิสทำให้ได้เซลลูโลสนาโนคริสตัล ที่สภาวะความเข้มข้นกรดซัลฟิวริก 50% อุณหภูมิ 50°C เวลา 40 นาที โดยได้ผลผลิต 72% ความสามารถในการดูดซับน้ำมันของยางโพลีเอทิลีนที่ 1 phr ดูดซับน้ำมันสูงสุดคือ 17.8 กรัม/กรัม พบว่ารูพรุนมีขนาดเล็กและปริมาณที่เพียงพอในการดูดซับและกักเก็บน้ำมัน เมื่อเทียบกับยางโพลีเอทิลีนที่ 0, 2.5 และ 5 phr ยางโพลีเอทิลีนจะเลือกดูดซับน้ำมันก่อนดูดซับน้ำเมื่อน้ำและน้ำมันปนกัน เพราะยางโพลีเอทิลีนมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำจึงดูดซับน้ำมันที่ลอยอยู่บนผิวน้ำก่อน นอกจากนี้ยางโพลีเอทิลีนยังสามารถนำมาใช้ซ้ำได้มากกว่า 50 ครั้ง ประสิทธิภาพการดูดซับน้ำมันขึ้นอยู่กับรูพรุนของวัสดุซึ่งเซลลูโลสนาโนคริสตัลมีส่วนช่วยเสริมการเกิดรูพรุนในยางโพลีเอทิลีนอีกด้วย

**คำสำคัญ:** เซลลูโลสนาโนคริสตัล, ยางโพลีเอทิลีน, วัสดุดูดซับน้ำมัน, วัสดุรูพรุน

<b>Thesis Title</b>	Cellulose Rubber Foam Composite Used as Oil Absorbent
<b>Name-Surname</b>	Mr. Poptorn Klaykhem
<b>Program</b>	Materials Engineering
<b>Thesis Advisor</b>	Associate Professor Warunee Ariyawiriyanan, D. Eng.
<b>Academic Year</b>	2023

## ABSTRACT

The problem of oil pollution in nature has remained a major concern, as oil spills or contamination can have adverse effects on the environment. Commercial absorbent materials made from plastics contributed to plastic waste, whereas those crafted from natural materials provided a solution to this issue. This research aims to investigate the production of cellulose rubber foam (CRF) from natural materials within the country, aiming to utilize them for practical benefits and value creation.

The production of cellulose rubber foam consisted of two parts. The first part was the preparation of cellulose nanocrystals from kapok fibers by using chemical methods. These methods comprised 2 processes: alkaline pretreatment, and bleaching, of which acid hydrolysis was employed to obtain cellulose nanocrystals. The second part was the molding of rubber foam using the Dunlop process with cellulose nanocrystal quantities used in the study: 0, 1, 2.5 and 5 phr. The produced cellulose rubber foam was examined for its morphological characteristics, and physical properties and conducted testing of its ability to absorb oil.

Regarding the test by means of nuclear magnetic resonance spectroscopy ( $^{13}\text{C}$ -NMR), it was revealed that alkaline pretreatment and bleaching of kapok fibers resulted in the removal of lignin and hemicellulose. In the hydrolysis process, cellulose nanocrystals were obtained at the condition of sulfuric acid concentration of 50%, at 50°C, and for 40 min with a yield of 72%; the maximum oil absorption capacity of cellulose rubber foam at 1 phr was 17.8 g/g. It was found that the pores were small in size and sufficient in quantity to absorb and store oil. When compared with cellulose rubber foam at 0, 2.5, and 5 phr, rubber foam selectively absorbed oil before absorbing water if water and oil were mixed together. This was due to the fact that cellulose rubber foam was less dense than water, it thus absorbed oil floating on the surface of the water first. In addition, cellulose rubber foam could be reused more than 50 times. The efficiency of absorbing oil depended on the pores of the material. In this regard, cellulose nanocrystals helped to enhance the formation of pores in cellulose rubber foam as well.

**Keywords:** cellulose nanocrystal, cellulose rubber foam, oil absorbent, porous material

## กิตติกรรมประกาศ

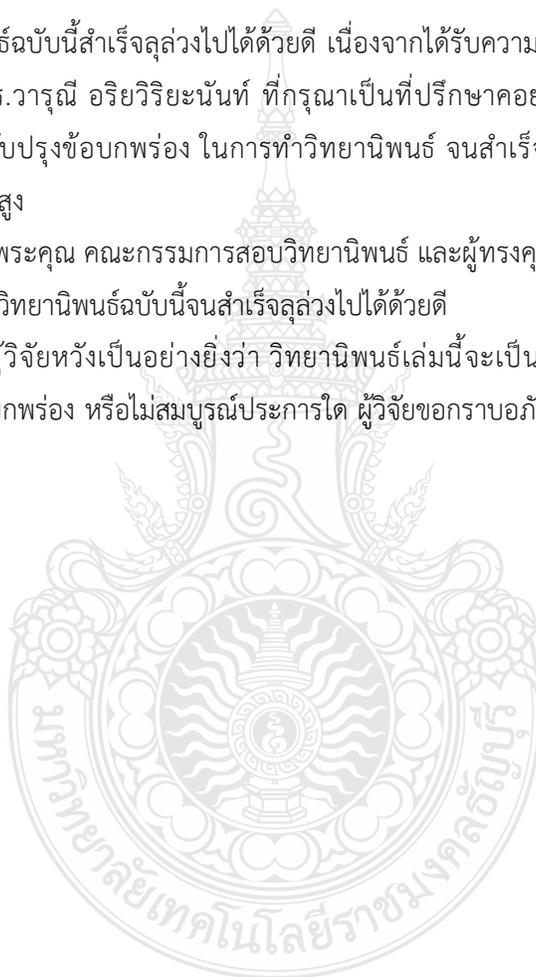
ขอขอบพระคุณโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจากกองทุนพื้นฐาน (FF) ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ภายใต้กองทุนการวิจัยและนวัตกรรมปี 2022 (FRB65E0708) งานวิจัยนี้สร้างขึ้นและประสบความสำเร็จด้วยความช่วยเหลือของบุคลากรหลายท่าน ในโอกาสนี้ข้าวิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความเมตตาของอาจารย์ที่ปรึกษารองศาสตราจารย์ ดร.วารุณี อริยวิริยะนันท์ ที่กรุณาเป็นที่ปรึกษาคอยให้คำแนะนำ แนวคิด และแนวทางการแก้ไขปรับปรุงข้อบกพร่อง ในการทำวิทยานิพนธ์ จนสำเร็จไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

กราบขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และผู้ทรงคุณวุฒิ ที่ให้คำแนะนำ ความรู้เป็นแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า วิทยานิพนธ์เล่มนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจ หากวิทยานิพนธ์นี้ขาดตกบกพร่อง หรือไม่สมบูรณ์ประการใด ผู้วิจัยขอกราบอภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

ภาพร คล้ายเข็ม



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(9)
บทที่ 1 บทนำ.....	12
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	12
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	13
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	13
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	13
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	14
2.1 วัสดุคอมโพสิต (Composite material).....	14
2.2 ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR).....	17
2.3 ยางโฟมธรรมชาติ (Natural rubber latex foam).....	20
2.4 เส้นใยธรรมชาติ (Natural fibers).....	27
2.5 เส้นใยนุ่น (Kapok fiber).....	32
2.6 ไมโครเซลลูโลส (Micro cellulose).....	34
2.7 นาโนเซลลูโลส (Nano cellulose).....	34
2.8 การดูดซับ (Adsorption).....	40
2.9 วัสดุดูดซับ (Absorbent materials).....	45
2.10 วัสดุรูพรุน (Porous materials).....	46
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	49
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	54
3.1 แผนการดำเนินงาน.....	54
3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	55
3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	55

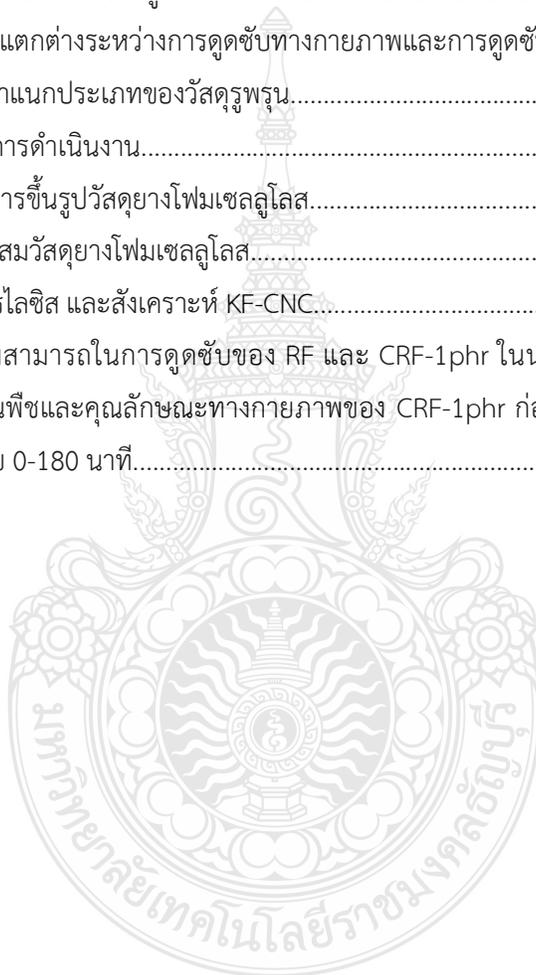
## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	54
3.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	56
3.5 การทดสอบสมบัติต่างๆ.....	56
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล.....	66
4.1 สมบัติของเส้นใย.....	66
4.2 สมบัติของยางโฟมเซลลูโลส.....	69
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย การอภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	76
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	76
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	77
บรรณานุกรม.....	78
ภาคผนวก.....	84
ประวัติผู้เขียน.....	95



## สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2.1	สารเคมีที่ใช้ทำผลิตภัณฑ์ยางโฟมธรรมชาติและหน้าที่.....	24
ตารางที่ 2.2	สารเคมีที่ใช้ทำผลิตภัณฑ์ยางโฟมธรรมชาติ.....	25
ตารางที่ 2.3	การเตรียมนาโนเซลลูโลสในนาโนคอมโพสิต.....	40
ตารางที่ 2.4	ความแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี.....	42
ตารางที่ 2.5	การจำแนกประเภทของวัสดุรูพรุน.....	49
ตารางที่ 3.1	แผนการดำเนินงาน.....	53
ตารางที่ 3.2	สูตรการขึ้นรูปวัสดุยางโฟมเซลลูโลส.....	58
ตารางที่ 3.3	การผสมวัสดุยางโฟมเซลลูโลส.....	58
ตารางที่ 4.1	ไฮโดรไลซิส และสังเคราะห์ KF-CNC.....	67
ตารางที่ 4.2	ความสามารถในการดูดซับของ RF และ CRF-1phr ในน้ำ ตารางแสดง น้ำมันพืชและคุณลักษณะทางกายภาพของ CRF-1phr ก่อนและหลังการ ดูดซับ 0-180 นาที.....	74



## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างเคมีของยางธรรมชาติ.....	17
รูปที่ 2.2 ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จากยางน้ำข้น.....	19
รูปที่ 2.3 ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จากยางแห้ง.....	19
รูปที่ 2.4 ยางโฟม หรือ โฟมยางธรรมชาติ.....	20
รูปที่ 2.5 ที่นอนยางพารา.....	21
รูปที่ 2.6 เบาะรองนั่งยางพารา.....	22
รูปที่ 2.7 หมอนยางพารา.....	22
รูปที่ 2.8 โฟมยางกันกระแทก.....	23
รูปที่ 2.9 เสื่อโฟมยางพารา/แผ่นรองคลาน.....	23
รูปที่ 2.10 เครื่องบดขนาดเล็ก (Ball mill).....	24
รูปที่ 2.11 ขั้นตอนการผลิตยางโฟมหรือโฟมยาง.....	24
รูปที่ 2.12 ใยฝ้าย (Cotton).....	27
รูปที่ 2.13 ใยนุ่น (Kapok).....	28
รูปที่ 2.14 ใยลินิน (Linen).....	28
รูปที่ 2.15 ใยปอ (Jute).....	29
รูปที่ 2.16 ใยสับปะรด (Pine apple).....	29
รูปที่ 2.17 ใยป่านศรนารายณ์ (Sisal).....	30
รูปที่ 2.18 ขนสัตว์ (Wool).....	30
รูปที่ 2.19 ไหม (Silk).....	31
รูปที่ 2.20 แร่ใยหิน (Asbestos).....	31
รูปที่ 2.21 ลักษณะนุ่น.....	32
รูปที่ 2.22 ลักษณะเส้นใยนุ่น.....	33
รูปที่ 2.23 โครงสร้างทางเคมีของ cellulose.....	34
รูปที่ 2.24 ภาพการจำลองเส้นใยหน่วยเล็กๆ ของเส้นใยที่ฝังตัวอยู่ในเนื้อของลิกนิน และเฮมิเซลลูโลส.....	36
รูปที่ 2.25 องค์ประกอบของไมโครไฟบริลที่อยู่ภายในเส้นใย.....	37
รูปที่ 2.26 ลำดับชั้นของ Nanocellulose ตาม TAPPI จัดขึ้นที่เมืองอาร์ลิงตัน.....	37

## สารบัญญรูป (ต่อ)

			หน้า
รูปที่ 2.27	ความแตกต่างระหว่าง เซลลูโลสนาโนคริสตัล และเซลลูโลสนาโนไฟบริล (1)		38
รูปที่ 2.28	ความแตกต่างระหว่าง เซลลูโลสนาโนคริสตัล และเซลลูโลสนาโนไฟบริล (2)		39
รูปที่ 2.29	กราฟเบรคทรู และบริเวณถ่ายโอนมวลสาร.....		45
รูปที่ 2.30	รูพรุนรูปแบบต่างๆ (ก) แบบทรงกระบอก (ข) แบบทรงกลม (ค) แบบที่เป็นแผ่นและ (ง) แบบที่บิดเป็นเกลียว.....		47
รูปที่ 2.31	แผนภูมิขนาดรูพรุนพร้อมตัวอย่างวัสดุประเภทเซรามิกส์ที่อยู่ในช่วงต่างๆกัน		48
รูปที่ 2.32	วัสดุรูพรุนประเภทโลหะ(ซ้าย) และ โลหะ(ขวา).....		48
รูปที่ 3.1	ขั้นตอนการเตรียมเส้นใย cellulose nanocrystals จากเส้นใยนุ่น.....		56
รูปที่ 3.2	ขั้นตอนการเตรียมยางโฟมเซลลูโลสขนาด cellulose nanocrystals เพื่อขึ้นรูปชิ้นงาน.....		57
รูปที่ 3.3	แผนการทดสอบวัสดุยางโฟมเซลลูโลส.....		59
รูปที่ 3.4	ตัวอย่างการติดตัวอย่างลงบน Stub ที่ถูกติดด้วยเทปคาร์บอนและเคลือบทอง.....		60
รูปที่ 3.5	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....		60
รูปที่ 3.6	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบทรานสมิส (TEM).....		61
รูปที่ 3.7	เครื่องวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน (FT-IR).....		62
รูปที่ 3.8	เครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโคปี (NMR).....		63
รูปที่ 3.9	เครื่อง compression.....		63
รูปที่ 3.10	วิธีการทดสอบความสามารถในการดูดซับน้ำมัน.....		65
รูปที่ 4.1	ภาพของ (a) เส้นใยนุ่นดิบ, (b) เส้นใยนุ่นที่ทำความสะอาดด้วยวิธีทางเคมี		66
รูปที่ 4.2	ผลการทดสอบลักษณะสัณฐานวิทยาของ (a,b) KF, (c,d) MCC ถูกสังเกตโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....		67
รูปที่ 4.3	สัณฐานวิทยาของ KF-CNC (a,b) ถูกสังเกตโดยใช้เครื่อง TEM รูปที่ 4.3a และ 4.3b แสดงให้เห็นภาพจาก TEM ของ KF-CNC ผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิส.....		68

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.4 ผลของสเปกตรัม NMR ของ (a) เส้นใยนุ่นดิบ, (b) เส้นใยนุ่นที่ทำความสะอาดด้วยวิธีทางเคมี, (c) เส้นใยที่ผ่านการไฮโดรไลซิสด้วยกรด.....	69
รูปที่ 4.5 โครงสร้างเซลล์ของยางพาราธรรมชาติและยางพาราเซลลูโลส (a) RF, (b) CRF-1phr, (c) CRF-2.5phr, (d) CRF-5phr.....	69
รูปที่ 4.6 ผลของ SEM ที่กำลังขยาย 75x ของ RF และ CRF (a) RF, (b) CRF-1phr, (c) CRF-2.5phr, (d) CRF-5phr.....	70
รูปที่ 4.7 ผลของสเปกตรัม FTIR ของ RF และ CRF.....	71
รูปที่ 4.8 เฟอร์เซนต์ Compression set ของ RF และ CRF.....	71
รูปที่ 4.9 ความหนาแน่นของ RF และ CRF.....	72
รูปที่ 4.10 ความสามารถในการดูดซับของ RF และ CRF จากกราฟ (a) น้ำมันพืช และ (b) น้ำมันเครื่อง.....	73
รูปที่ 4.11 ความสามารถในการดูดซับน้ำมันของ RF และ CRF จากกราฟแสดงน้ำมันพืชและน้ำมันเครื่อง.....	74
รูปที่ 4.12 การนำ CRF มาใช้ซ้ำ จากกราฟ (ก) น้ำมันพืช และ (ข) น้ำมันเครื่อง.....	75



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันปัญหาการปนเปื้อนของน้ำมันในธรรมชาติยังคงเป็นปัญหาใหญ่ในทุกๆ ที่ทั่วโลก การปนเปื้อนของน้ำมันเกิดขึ้นได้ทั้งทางธรรมชาติ และมนุษย์มีส่วนเกี่ยวข้องเนื่องจากมีการใช้น้ำมันในชีวิตประจำวัน ซึ่งการรั่วไหลหรือการปนเปื้อนของน้ำมันอาจจะส่งผลกระทบต่อธรรมชาติ เช่น แม่น้ำ คลอง และบึง ที่เป็นที่อยู่อาศัยของสิ่งมีชีวิตเป็นต้น รวมถึงแหล่งน้ำที่ใช้ประโยชน์ของมนุษย์ ในปัจจุบันมีการใช้วัสดุมากมายที่จะกำจัดปัญหาน้ำมันปนเปื้อนในแหล่งน้ำต่างๆ วัสดุดูดซับทางการค้าที่ใช้ในการกำจัดน้ำมันส่วนใหญ่จะเป็นวัสดุที่ทำจากพลาสติก มีรูปทรงจำนวนมาก วัสดุทางการค้าอาจทำให้เป็นการเพิ่มขยะพลาสติกที่ย่อยสลายยากเกิดขึ้นได้ ซึ่งวัสดุดูดซับที่มาจากวัสดุธรรมชาติจะสามารถช่วยในการลดปัญหาขยะพลาสติกได้มากขึ้น ซึ่งวัสดุที่สามารถพัฒนาเป็นวัสดุดูดซับได้คือ ยางธรรมชาติ การผลิตยางธรรมชาติของประเทศไทยเป็นอันดับหนึ่งของโลก โดยส่วนใหญ่แล้วจะส่งออกในรูปแบบของน้ำยางดิบ ดังนั้นการนำยางธรรมชาติมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อเพิ่มมูลค่า หรือเพิ่มประโยชน์ในด้านการใช้งานให้มากขึ้น ยางโฟมเป็นอีกทางเลือกที่ดีอีกทางเลือกหนึ่ง ยางโฟมเป็นวัสดุที่มีรูปทรง มีน้ำหนักเบาสามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย เช่น วัสดุดูดซับ วัสดุกันกระแทก วัสดุดูดซับเสียง เป็นต้น

วัสดุคอมโพสิตที่มีส่วนประกอบจากเส้นใยธรรมชาติได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในหลายๆ แขนงอุตสาหกรรม ไม่ว่าจะเป็นงานขึ้นรูปพลาสติกหรืองานทางด้านอุตสาหกรรมอื่น ๆ เนื้อธรรมชาติของวัสดุคอมโพสิตที่ทำมาจากเส้นใยมีข้อดีอย่างมาก เช่น ราคาถูกและมีความเป็นพิษต่ำ การหาวัสดุเส้นใยธรรมชาติที่ใช้ในการผลิตก็เป็นเรื่องง่าย และหลายชนิดของเส้นใยธรรมชาติที่มีอยู่ในประเทศไทยมีคุณสมบัติ เช่น ผักตบชวา ไม้ไผ่ แกลบ และชานอ้อย เป็นต้น [1] และมีอีกชนิดหนึ่งที่มีมากในประเทศไทยแต่ยังคงนำมาใช้ไม่มากนักคือ เส้นใยนุ่น ส่วนใหญ่เราจะเห็นนุ่นในรูปแบบของไส้ยัดหมอน เพราะมีน้ำหนักที่เบาและมีความนุ่ม ซึ่งนุ่นเป็นหนึ่งในเส้นใยที่มีความเป็นเซลลูโลสสูง สามารถนำมาใช้ประโยชน์เพิ่มสมบัติ และมูลค่าให้แก่วัสดุได้ ซึ่งเส้นใยนุ่นมีสมบัติที่พิเศษและน่าสนใจเป็นอย่างมาก เช่น เส้นใยนุ่นมีสารเคลือบผิวตามธรรมชาติ ซึ่งจะป้องกันน้ำทำให้เส้นใยนุ่นไม่เปียก แต่มีสมบัติดูดซับน้ำมัน [2] ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับงานหลายๆด้าน เช่น ด้านสิ่งแวดล้อม รวมถึงคราบน้ำมันต่างๆ ที่เกิดขึ้นในชีวิตประจำวัน เป็นต้น ดังนั้นจึงเป็นที่น่าสนใจที่จะนำทรัพยากรที่มีในประเทศมาพัฒนาเป็นยางโฟมเซลลูโลสดูดซับน้ำมัน

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะนำเส้นใยธรรมชาติคือ ใยนุ่น เป็นอีกหนึ่งเส้นใยที่มีปริมาณเซลลูโลสที่เหมาะสมกับการนำมาใช้ในงานวิจัย มีสมบัติดูดซับน้ำมัน การดูดซับน้ำมันเสริมด้วยการเพิ่มเส้น

ไยอนุ่นในปริมาณที่มากขึ้นทำให้ความสามารถในการดูดซับน้ำมันเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ แต่ถ้านำเส้นใยธรรมชาติมาใช้เลยอาจจะส่งผลต่อสมบัติของวัสดุลดลง จึงต้องนำเส้นใยอนุ่นมาทำความสะอาดโดยทำการฟอกขาวด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกหรือสิ่งที่ไม่ต้องการ เช่น เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และสิ่งเจือปนอื่น ๆ จากนั้น ทำการสังเคราะห์นาโนเซลลูโลส ฎุกไฮโดรไลซ์ด้วยกรดในกรดซัลฟิวริก จากนั้นผสมกันระหว่างยางพอมธรรมชาติและนาโนเซลลูโลสจากเส้นใยอนุ่นเข้าด้วยกัน โดยใช้อัตราส่วนของนาโนเซลลูโลสที่แตกต่างกัน ทดสอบสมบัติของยางพอมเซลลูโลส เช่น สมบัติทางเคมี สมบัติทางสัณฐานวิทยา สมบัติทางกายภาพ และความสามารถในการดูดซับน้ำมันของวัสดุ เป็นต้น

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการขึ้นรูปวัสดุยางพอมเซลลูโลส
- 1.2.2 เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพและสัณฐานวิทยาของวัสดุยางพอมเซลลูโลส
- 1.2.3 เพื่อศึกษาความสามารถในการดูดซับน้ำมันของวัสดุยางพอมเซลลูโลส

## 1.3 ขอบเขต

- 1.3.1 เส้นใยธรรมชาติที่ใช้คือใยอนุ่นขนาดนาโนเซลลูโลส
- 1.3.2 เตรียมการขึ้นรูปวัสดุยางพอมเซลลูโลส
- 1.3.3 ตรวจสอบสมบัติ เช่น สมบัติทางเคมี สมบัติทางสัณฐานวิทยา สมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางกล ของวัสดุยางพอมเซลลูโลส
- 1.3.4 ตรวจสอบความสามารถในการดูดซับน้ำมันของวัสดุยางพอมเซลลูโลส

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ได้ทราบถึงกระบวนการเตรียมเส้นใยอนุ่นขนาดนาโนเซลลูโลส
- 1.4.2 ได้ทราบถึงการขึ้นรูปวัสดุยางพอมเซลลูโลส
- 1.4.3 สามารถพัฒนาวัสดุยางพอมเซลลูโลส เพื่อใช้เป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถนำไปปรับใช้ในการแก้ไขคราบน้ำมันได้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วัสดุคอมโพสิตจากวัสดุธรรมชาติเป็นที่นิยมน้อยกว่าแพร่หลายในปัจจุบัน เนื่องจากช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมและเป็นการนำวัสดุเหลือใช้จากธรรมชาติมาสร้างมูลค่า และประโยชน์ได้มากมาย เช่น ด้านสิ่งแวดล้อมการกำจัดคราบน้ำมันในชีวิตประจำวัน ที่เกิดจากธรรมชาติและมนุษย์ ซึ่งมีการใช้วัสดุดูดซับทางการค้าที่ผลิตจากพลาสติก อาจส่งผลกระทบต่อขยะพลาสติกที่เพิ่มมากขึ้น จึงมีการนำวัสดุธรรมชาติที่สามารถนำมาผลิตเป็นวัสดุดูดซับนั้นคือ ยางพาราธรรมชาติ ยางธรรมชาติเป็นอีกสิ่งหนึ่งที่ประเทศไทยมีผลผลิตและการส่งออกมาก แต่เป็นการส่งออกที่ไม่ผ่านการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการนำมาเป็นวัสดุคอมโพสิตกับเส้นใยธรรมชาติ ซึ่งหลายองค์กรให้ความสนใจเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อม เนื่องจากสภาวะที่เกิดขึ้นกับโลกมีการเปลี่ยนแปลง การใช้วัสดุจากธรรมชาติเป็นสิ่งสำคัญในหลายประเทศ เส้นใยธรรมชาตินั้นเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุคอมโพสิต ซึ่งเป็นวัสดุคอมโพสิตที่ทำจากเส้นใยธรรมชาติ เช่น เส้นใยจากไม้ยางพารา ไยปอ เส้นใยผักตบชวา ป่านศรনারาย ไยสับปะรด ไยกล้วย เป็นต้น [3] เส้นใยปอ เป็นอีกหนึ่งเส้นใยธรรมชาติที่มีอยู่ในประเทศไทยในภาคกลางและภาคใต้บางจังหวัด ที่มีการปลูกเพื่อการค้า สมบัติของเส้นใยปอนี้มีความพิเศษที่สามารถดูดซับน้ำมันได้ดี ซึ่งเป็นข้อดีที่สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุคอมโพสิตที่ช่วยเสริมสมบัติในการดูดซับได้ จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการนำมาเป็นวัสดุยางพาราเซลลูโลสจากเส้นใยปอ เพื่อเพิ่มสมบัติการดูดซับ และสมบัติด้านอื่นๆ ให้ดียิ่งขึ้น สามารถพัฒนาเป็นวัสดุที่มีประโยชน์ต่อสิ่งแวดล้อมได้ในอนาคต โดยทำการศึกษาจากทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

#### 2.1 วัสดุคอมโพสิต (Composite material)

##### 2.1.1 ความหมายวัสดุคอมโพสิต

วัสดุคอมโพสิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากการผสมสารต่าง ๆ เพื่อให้ได้คุณสมบัติที่ต่างกัน โดยส่วนประกอบสำคัญประกอบด้วยเมทริกซ์และส่วนเสริมความแข็งแรง การผสมวัสดุที่แตกต่างกันนี้ช่วยเสริมคุณสมบัติของวัสดุโดยมีโครงสร้างที่แยกต่างหากกันอย่างชัดเจน การปรับปรุงเมทริกซ์และเพิ่มส่วนเสริมความแข็งแรงช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ และผู้ผลิตสามารถเลือกส่วนผสมที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ตรงตามความต้องการของตลาดและการใช้งานแต่ละประเภท วัสดุคอมโพสิตมีศักยภาพในการใช้งานที่หลากหลายในอุตสาหกรรมและสร้างคุณค่าทางการเศรษฐกิจโดยสามารถลดต้นทุนและเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตได้

#### 2.1.1.1 เมทริกซ์ (Matrix) [4]

พอลิเมอร์คอมโพสิต โดยเมทริกซ์ที่ใช้ อาจจะเป็นพวกเทอร์มอเซต (Thermosets) หรือ เทอร์มอพลาสติก (Thermoplastic) โดยหน้าที่เมทริกซ์ ได้แก่

- (1) ป้องกันการเกิดความเสียหายกับเส้นใย
- (2) สามารถส่งถ่ายแรงหรือกระจายตัวกับแรงที่ได้รับจากภายนอกได้
- (3) ทำให้เส้นใยกระจายและเชื่อมต่อกันตามแนวทางที่ต้องการ
- (4) ต้องเชื่อมต่อกับตัวเสริมแรง
- (5) สามารถช่วยกำหนดขนาดและรูปร่างวัสดุได้

#### 2.1.1.2 ตัวเสริมแรง (Reinforcement)

เป็นตัวที่จะช่วยเพิ่มความแข็งแรง (Reinforcement) ให้กับวัสดุ มีบทบาทในการเสริมความแข็งแรงของวัสดุ โดยสามารถมีรูปร่างหลายแบบได้ เช่น แผ่น ใยหรืออนุภาค เนื่องจากทั่วไปแล้วมักจะเลือกใช้ตัวเสริมที่มีลักษณะเป็นเส้นใย การผลิตพอลิเมอร์คอมโพสิตมีเส้นใยที่ใช้ในการเสริมแรงสำหรับได้แก่ เส้นใยอะรามิด เส้นใยคาร์บอน เส้นใยแก้ว และเส้นใยธรรมชาติต่างๆ หน้าที่ของตัวเสริมแรงในคอมโพสิตมีดังต่อไปนี้

- 1) เพิ่มความแข็งแรงให้กับพอลิเมอร์คอมโพสิต
- 2) สามารถรับแรงกระแทกจากภายนอกได้ ช่วยไม่ให้เกิดการเสียหายหรือการผิรุภายในได้เองกระทำนั้นๆ โดยแรงจะถูกส่งไปตามเส้นใย

#### 2.1.2 หลักการขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิต [5]

การขึ้นรูปคอมโพสิตเป็นกระบวนการที่ผสมวัสดุสองชนิดหรือมากกว่ากันเข้าด้วยกัน โดยมีวัสดุหนึ่งทำหน้าที่เป็นแกนหลัก (Matrix) และวัสดุอีกชนิดหนึ่งทำหน้าที่เป็นเฟสที่กระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ (Dispersed phase) หรือเรียกว่าเฟสเสริมแรง ซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติของคอมโพสิตโดยเพิ่มประสิทธิภาพ เช่น เส้นใยชนิดหนึ่งมีข้อดีที่เหนือกว่าเส้นใยชนิดอื่น ๆ และเส้นใยอีกชนิดมีปริมาณที่เพียงพอ การจัดเรียงตัวของเส้นใยที่แตกต่างกัน การยึดติดระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ เป็นต้น ผลจากงานวิจัยเรื่องอัตราส่วนของเส้นใยธรรมชาติมีบทบาทสำคัญในการใช้ในการผลิตวัสดุที่มีคุณสมบัติที่ต้องการ [5]

#### 2.1.2.1 โครงสร้างของวัสดุคอมโพสิตผลิตภัณฑ์

การยึดเกาะติดกันระหว่างเส้นใยธรรมชาติหรือในการก่อรูปเป็นวัสดุผลิตภัณฑ์ สามารถทำได้หลายวิธีการ ดังนี้

1) การปรับปรุงโครงสร้างของเมทริกซ์ วิธีนี้เน้นการปรับปรุงโครงสร้างของเมทริกซ์เพื่อให้ความแข็งแรงและความยืดหยุ่นที่ดีขึ้น โดยการผสมวัสดุจากธรรมชาติที่มีคุณสมบัติทางกายภาพที่ต้องการ เช่น เส้นใย และเมทริกซ์เพื่อสร้างคอมโพสิตที่มีคุณสมบัติที่ต้องการ

2) การใส่สารช่วยให้เข้ากัน วิธีนี้เน้นการเติมสารเสริมแรงเข้าไปในเมทริกซ์เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและความเสถียรภาพของวัสดุ โดยสารเสริมแรงนี้อาจสารเพิ่มความแข็งแรง เพิ่มความเสถียร หรือสารลดการแตกต่างออกซิเดชัน

3) การปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใย วิธีนี้เน้นการปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใย เพื่อเพิ่มความหนาแน่นและการยึดติดระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ ทำให้วัสดุผลิตภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติที่ต้องการอย่างเหมาะสม

### 2.1.3 ปัจจัยการเลือกใช้วัสดุคอมโพสิต

การเลือกปัจจัยวัสดุคอมโพสิตส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะและความต้องการของผลิตภัณฑ์ ซึ่งส่งผลต่อปัจจัยต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อการเลือกใช้วัสดุคอมโพสิต ได้แก่ สมบัติทางเคมีและกายภาพ, ราคา, ความมั่นคง, ความสามารถในการนำเสนอลูกค้า, สิ่งแวดล้อม, ความสามารถในการตอบสนองต่อการปรับเปลี่ยน การเลือกใช้วัสดุคอมโพสิตจึงเป็นกระบวนการที่ต้องพิจารณาคูณลักษณะและความต้องการของผลิตภัณฑ์อย่างรอบคอบเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพและประสิทธิภาพในการใช้งานที่ต้องการ เส้นใยธรรมชาติที่ใช้เป็นเส้นใยเสริมแรงมี เพื่อใช้เป็นเส้นใยในการเสริมแรงพอลิเมอร์ เนื่องจากเส้นใยเหล่านี้มีสมบัติเด่นหลายด้าน [5] ดังนี้

- ราคาถูกและมีจำหน่ายมากในธรรมชาติ เส้นใยธรรมชาติมักมีราคาถูกกว่าและมีจำนวนมากในธรรมชาติ เช่น เส้นใยแก้ว คาร์บอน และอะรามิด ซึ่งทำให้เป็นตัวเลือกที่น่าสนใจในการใช้เสริมแรงพอลิเมอร์

- คุณสมบัติทางกายภาพที่ดี เส้นใยธรรมชาติมีคุณสมบัติทางกายภาพที่ดี เช่น น้ำหนักเบา ความแข็งแรงและความยืดหยุ่น ซึ่งทำให้เป็นตัวเลือกที่ดีในการเสริมแรงพอลิเมอร์

- การย่อยสลายทางธรรมชาติ เส้นใยธรรมชาติมีความสามารถในการย่อยสลายเองตามธรรมชาติ ทำให้ไม่เป็นปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม

- ความปลอดภัยและไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ เส้นใยธรรมชาติมักจะไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์ เช่น เส้นใยแก้ว เพราะไม่มีสารพิษที่อาจก่อให้เกิดอันตรายต่อร่างกาย

- ความยากลำบากในการยึดเกาะ โดยทั่วไปการยึดเกาะระหว่างเส้นใยธรรมชาติกับพอลิเมอร์ไม่เหมาะสม ซึ่งอาจทำให้เส้นใยไม่สามารถทำหน้าที่เสริมแรงได้อย่างเต็มที่

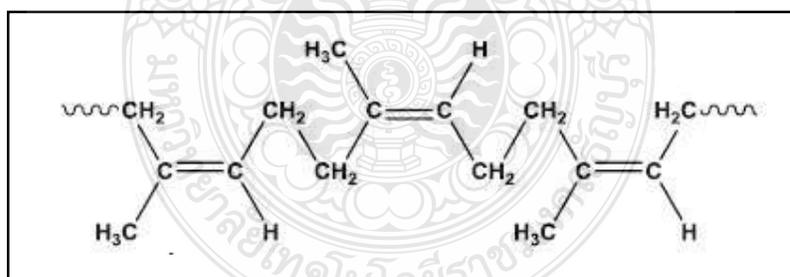
- ความสามารถในการยับยั้งของยาง การใช้เส้นใยธรรมชาติสามารถทำให้คุณสมบัติยับยั้งของยางลดลง ซึ่งอาจมีผลกระทบต่อการใช้งานไปใช้ในการผลิตสิ่งที่ต้องการคุณสมบัติยืดหยุ่นของวัสดุและสมบัติยับยั้งของยางที่น้อยลง

- เส้นใยธรรมชาติมีความชื้นได้สูงเนื่องจากมีโครงสร้างเป็นเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) เป็นองค์ประกอบ ซึ่งทำให้เส้นใยมีการดูดซับความชื้นจากสภาพแวดล้อมได้มากขึ้น สมบัติเชิงกลเหล่านี้ อาจมีผลต่อคุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิตที่ได้จากการนำเส้นใยธรรมชาติมาใช้ โดยอาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ อย่างไรก็ตาม เส้นใยธรรมชาติยังมีคุณสมบัติทางด้านอื่น ๆ ที่มีความสำคัญในการใช้งาน เช่น ความแข็งแรง ความยืดหยุ่น และน้ำหนักเบา ซึ่งทำให้เส้นใยธรรมชาติยังคงเป็นตัวเลือกที่น่าสนใจในการเสริมแรงพอลิเมอร์ได้แก่พอลิเมอร์คอมโพสิต

## 2.2 ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR)

### 2.2.1 ความหมายของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติที่มาจากต้นยางพารามีลักษณะคล้ายน้ำมันเนื่องจากมีความเหนียวเป็นสัดส่วนที่มาก น้ำยางธรรมชาติมีลักษณะเป็นคอลลอยด์ และมีสูตรทางเคมี  $C_5H_8$  โดยโมเลกุลมีลักษณะการจัดเรียงแบบ cis-1,4-polyisoprene ทำให้มีคุณสมบัติที่ยืดหยุ่นและแข็งแรง อาจส่งผลกระทบต่อ การรับแสงและคุณภาพของวัสดุในบางกรณี นอกจากนี้ ความสมบูรณ์และสภาพดินก็มีผลต่อผลิตผลของ ต้นยางพาราและคุณภาพของน้ำยางธรรมชาติที่ได้ด้วย



รูปที่ 2.1 โครงสร้างเคมีของยางธรรมชาติ [6]

### 2.2.2 สมบัติของยางธรรมชาติ

โดยยางธรรมชาตินำมาใช้ประโยชน์อย่างมากและกว้างขวางในอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติ เพราะมีคุณสมบัติโดดเด่น [6] คือ

1) ความยืดหยุ่น (Elasticity) ยางธรรมชาติมีความยืดหยุ่นที่ดีและสามารถยืดต่อได้ดี โดยไม่แตกหัก ทำให้มีความเหมาะสมสำหรับการใช้ในผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความยืดหยุ่น เช่น ยางรถยนต์, ยางหุ้มสายไฟ, หรือยางอื่น ๆ ที่ต้องการความยืดหยุ่นในการใช้งานประจำวัน

2) ความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ยางธรรมชาติมีความแข็งแรงอย่างพอเหมาะที่จะรับน้ำหนักและแรงกระแทกในการใช้งาน ทำให้มันเป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการผลิตทั้งในงานอุตสาหกรรมและการใช้งานทั่วไป

3) ความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear strength) ของยางธรรมชาติเป็นองค์ประกอบสำคัญที่มีความทนทานต่อการฉีกขาดสูง สาเหตุมาจากความสามารถในการพลิกเมื่อได้รับแรงดึงของยางธรรมชาติ ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจะเรียงตัวในแนวเดียวกับแรงดึงและตั้งฉากกับรอยฉีกขาด ทำให้ขัดขวางการฉีกขาดที่เกิดขึ้น

### 2.2.3 ผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติ

ผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติคือผลิตภัณฑ์ที่ผลิตขึ้นจากวัสดุพอลิเมอร์ที่มาจากธรรมชาติ เช่น ยางจากต้นยางพารา (*Hevea brasiliensis*) หรือจากต้นยางสังเคราะห์อื่น ๆ ที่มีอยู่ในธรรมชาติ เช่น ยางที่ได้จากต้นยางขาว (*Ficus elastica*) หรือยางที่ได้จากต้นยางซึ่งเป็นพืชในวงศ์ *Ficus spp.* ผลิตภัณฑ์เหล่านี้มักถูกใช้ในหลายอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมยางและยางและอุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น ส่วนผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติทั่วไปรวมถึงแผ่นยาง, ลูกบิด, ท่อยาง, ยางซิลิโคน, แผ่นยางป้องกันกระเด็น, ยางที่ใช้ในอุปกรณ์การเกษตร, สายยาง, และถุงยาง เป็นต้น ผลิตภัณฑ์เหล่านี้มักถูกนำมาใช้ในการป้องกันการชนกัน, ในการสร้างศิลาจารึก, ในงานบรรจุภัณฑ์, ในการทำซีล, ในการผลิตอุปกรณ์การแพทย์, และในอุตสาหกรรมยางและยาง และอุตสาหกรรมอื่น ๆ อีกมาก [6] ในอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติ สามารถแบ่งผลิตภัณฑ์ออกเป็น 2 กลุ่ม คือ

- 1) ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จากยางน้ำชั้น ได้แก่
  - (1) ผลิตภัณฑ์จุ่ม เช่น ถุงมือผ้าตัด จุกนมยาง เป็นต้น
  - (2) ผลิตภัณฑ์น้ำยางในอุตสาหกรรมพรม เช่น พรม
  - (3) ผลิตภัณฑ์ยางฟองน้ำ เช่น หมอน เบาะรองนั่ง เป็นต้น
  - (4) สายยางยืด เช่น ยางยืดขอบกางเกงใน ถุงเท้า เป็นต้น
  - (5) ใช้น้ำยางเป็นตัวยึดฟูกใยขนสัตว์



รูปที่ 2.2 ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จากยางน้ำขึ้น [6]

2) ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จากยางแข็ง ได้แก่

- (1) ยางยานพาหนะ เช่น ล้อรถยนต์ ยึดรถยนต์ต่อแรงกระแทกและแรงดึงได้ดี
- (2) ผลิตภัณฑ์ในงานก่อสร้าง เช่น บล็อกยางปูพื้น
- (3) รองเท้าและพื้นรองเท้า จากยางธรรมชาติ
- (4) ยางรัดของ



รูปที่ 2.3 ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จากยางแข็ง [6]

## 2.3 ยางโฟมหรือโฟมยางธรรมชาติ (Natural rubber latex foam)

### 2.3.1 ยางโฟมหรือโฟมยางพารา คือ

ยางโฟมหรือโฟมยางพาราเป็นกระบวนการที่นำน้ำยางธรรมชาติมาตีให้ขึ้นฟูเป็นโครงสร้างของโฟมโดยการเติมอากาศ (เทคนิคการเติมอากาศ) คล้ายกับกระบวนการของวิปครีม จากนั้น โฟมยางจะถูกเทหรือฉีด (Injection) ลงในแม่พิมพ์เพื่อให้ได้รูปทรงที่ต้องการ หลังจากนั้น โฟมยางจะถูกอบด้วยความร้อนและถูกล้างเพื่อกำจัดส่วนผสมที่ไม่ใช่ยางพารา ซึ่งจะทำให้คงเหลือยางพาราเป็นจำนวน 100% หลังจากนั้น โฟมยางพาราจะถูกอบลมร้อนเพื่อขจัดความชื้นออกไปทั้งหมด ซึ่งจะช่วยให้ได้โฟมยางพาราที่มีลักษณะคล้ายกับฟองน้ำ มีสีขาวครีม และมีกลิ่นหอมอ่อนๆของยางพารา โดยทั่วไปโฟมยางพาราจะมีความสะอาด นุ่มนวลและทนต่อแรงดึงกันได้ และยังสามารถยืดหยุ่นคืนตัวได้ดีอีกด้วย [7]



รูปที่ 2.4 ยางโฟม หรือ โฟมยางธรรมชาติ [7]

โฟมยางพาราธรรมชาติครั้งแรกถูกผลิตขึ้นในปี ค.ศ. 1929 โดยบริษัท Dunlop Rubber Company โดยใช้น้ำยางพาราแท้ 100% ในกระบวนการผลิต โฟมยางพาราถูกนำมาใช้ในการผลิตเบาะหุ้มแผงรถยนต์ในหัวเครื่องบินเป็นครั้งแรก ซึ่งต่อมาก็ได้ถูกนำมาใช้ในการผลิตเบาะรองนั่งในรถยนต์ ออสติน นับเป็นการเริ่มต้นของการใช้น้ำยางพาราในธุรกิจทำเครื่องนอนและอุตสาหกรรมอื่น ๆ ต่อมาในภายหลังน้ำยางพาราได้ถูกส่งออกมาใช้ในธุรกิจทำเครื่องนอนและอุตสาหกรรมอื่น ๆ อย่างแพร่หลาย

ด้วยคุณสมบัติของโฟมยางพาราธรรมชาติที่มีความเหนียวทนทานอย่างยิ่ง อีกทั้งยังอ่อนนุ่มตามแบบที่ต้องการและสามารถรองรับแรงกระแทกได้อย่างดีเยี่ยม นอกจากนี้ยังสามารถต้านแบคทีเรียอย่างมีประสิทธิภาพได้แบบธรรมชาติ ทำให้โฟมยางพาราเป็นวัสดุที่ปลอดภัยต่อสุขภาพอนามัย ไม่มีสารพิษและฝุ่น ดังนั้น โฟมยางพารากลายเป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมอย่างมากในการใช้ในการออกแบบเครื่องนอนและเฟอร์นิเจอร์ในบ้านทั่วไป

### 2.3.2 ผลิตภัณฑ์ยางโฟมหรือโฟมยางธรรมชาติ

2.3.2.1 ผลิตภัณฑ์โฟมยางหรือยางพองน้ำเป็นผลิตภัณฑ์ที่สร้างจากยางธรรมชาติ มีลักษณะเป็นรูพรุนทำให้เหมาะสำหรับการนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์

1) ที่นอนยางพาราถูกผลิตจากน้ำยางพาราธรรมชาติ 100% และเป็นที่นอนที่โออบอุ่มสรีระของร่างกายอย่างมีคุณภาพ เส้นใยน้ำยางพารามีความยืดหยุ่นและคลาดเคลื่อนได้อย่างอิสระ ทำให้ไม่กีดขวางความชื้นและฝุ่นละออง ทำให้ไม่มีกลิ่นอับและการนอนไม่แออัด ชนิด Topper จะวางไว้บนฟูกอันเดิม ส่วนชนิด Core mattress จะวางไว้บนเตียงแบบธรรมดา ทำให้ผู้ใช้รู้สึก สะดวกสบายตลอดเวลา



รูปที่ 2.5 ที่นอนยางพารา [7]

2) ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากยางพาราเป็นเบาะรองนั่งที่ออกแบบมาเพื่อให้เหมาะสำหรับการใช้งานในเบาะอาสนะและเบาะของโซฟา มีความสามารถในการรองรับน้ำหนักได้อย่างดี ช่วยในการบรรเทาอาการปวดเกร็งบริเวณกระดูกสันหลัง ลดความเหนื่อยล้า และมีประสิทธิภาพในการลดอาการเจ็บป่วยของผู้ที่มีผลกดทับ อีกทั้งยังช่วยให้การระบายอากาศในห้องนั่งเป็นไปอย่างสะดวกและไม่ร้อน



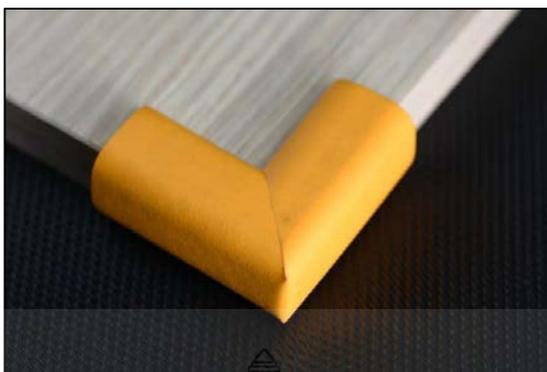
รูปที่ 2.6 เบาะรองนั่งยางพารา [7]

3) หมอนยางพาราที่มีคุณสมบัติที่ยืดหยุ่นในการรองรับและปรับรูปร่าง ศีรษะอย่างมีความสม่ำเสมอในทุกท่าของการนอน จะช่วยกระจายแรงกดทับและเพิ่มการไหลเวียนของ เลือด นอกจากนี้ยังสามารถระบายอากาศออกได้ดีเช่นกัน ทำให้หมอนไม่เกิดความชื้น ป้องกันสารก่อภูมิ และสร้างความเย็นสบายให้กับศีรษะตลอดเวลาขณะพักผ่อนนอนหลับ สินค้านี้ประกอบไปด้วยหมอน ธรรมชาติ หมอนรองคอ และหมอนตุ๊กตา



รูปที่ 2.7 หมอนยางพารา [7]

4) โฟมยางกันกระแทก โฟมยางที่ติดกับขอบโต๊ะเพื่อป้องกันการกระแทก จากโต๊ะที่มีเหลี่ยมคมเหมาะสำหรับครอบครัวที่มีเด็กเล็ก ช่วยเพิ่มความปลอดภัยภายในบ้าน



รูปที่ 2.8 โฟมยางกันกระแทก [7]

5) เสื่อโฟมยางพารา/แผ่นรองคลาน นอกจากจะช่วยป้องกันการลื่น และลดแรงกระแทกสำหรับเด็กเล็กแล้ว แผ่นรอง หรือ เสื่อที่ทำจากโฟมยางพารายังช่วยระบายอากาศและลดกลิ่นอับได้ดี



รูปที่ 2.9 เสื่อโฟมยางพารา/แผ่นรองคลาน [7]

### 2.3.3 กระบวนการผลิตยางโฟมหรือโฟมยาง (Rubber foam)

หลักการสำคัญของการผลิตยางฟองน้ำ คือ การทำให้น้ำยางเกิดฟองของอากาศหรือของก๊าซต่างๆ แล้วทำให้ฟองยาง คงรูปหรือการวัลคาไนซ์ด้วยสารเคมีและความร้อน

#### 2.3.3.1 อุปกรณ์และสารเคมีการทำยางโฟม [8]

1) เครื่องบดขนาดเล็ก (Ball mill) ใช้ในการบดสารเคมีให้มีขนาดเล็กลง (แสดงดังรูปที่ 2.10)

2) เครื่องผสม (Blender) ใช้ในการผสมสารเคมีกับน้ำยางและใช้การตีน้ำยางเพื่อให้เกิดเป็นฟองยาง

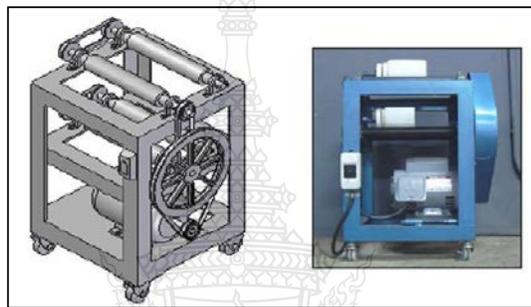
3) หม้อกระเบื้อง และลูกบดอะลูมินา

4) ตู้อบความร้อน (Hot oven) ใช้ในการทำให้ฟองยางคงรูป

5) หม้อนึ่งไอน้ำ

6) เบ้าหล่อปูนพลาสติก

7) เครื่องชั่งสาร



รูปที่ 2.10 เครื่องบดขนาดเล็ก (Ball mill) [8]

### 2.3.3.2 สูตรการผสมเคมียางฟองน้ำธรรมชาติ

ตารางที่ 2.1 สารเคมีที่ใช้ทำผลิตภัณฑ์ยางโฟมธรรมชาติและหน้าที่ [8]

สารเคมี-ดีสเพนชัน	หน้าที่
10% แอมโมเนียมโอเลต (Ammonium oleate)	ช่วยให้เกิดฟอง
50% กำมะถัน (Sulfur)	ทำให้ยางคงรูป
50% แซดดีอีซี (ZDEC)	ตัวเร่งให้ยางสุก
50% แซดเอ็มบีที (ZMBT)	ตัวเร่งให้ยางสุก
50% วิงสเตย์แอล (Wingstay L)	กันยางเสื่อม
50% ซิงค์ออกไซด์ (ZnO)	กระตุ้นตัวเร่ง
33% ดีพีจี (DPG)	ตัวเร่งให้ยางสุก
12.5% เอสเอสเอฟ (SSF)	ช่วยให้ฟองจับตัว

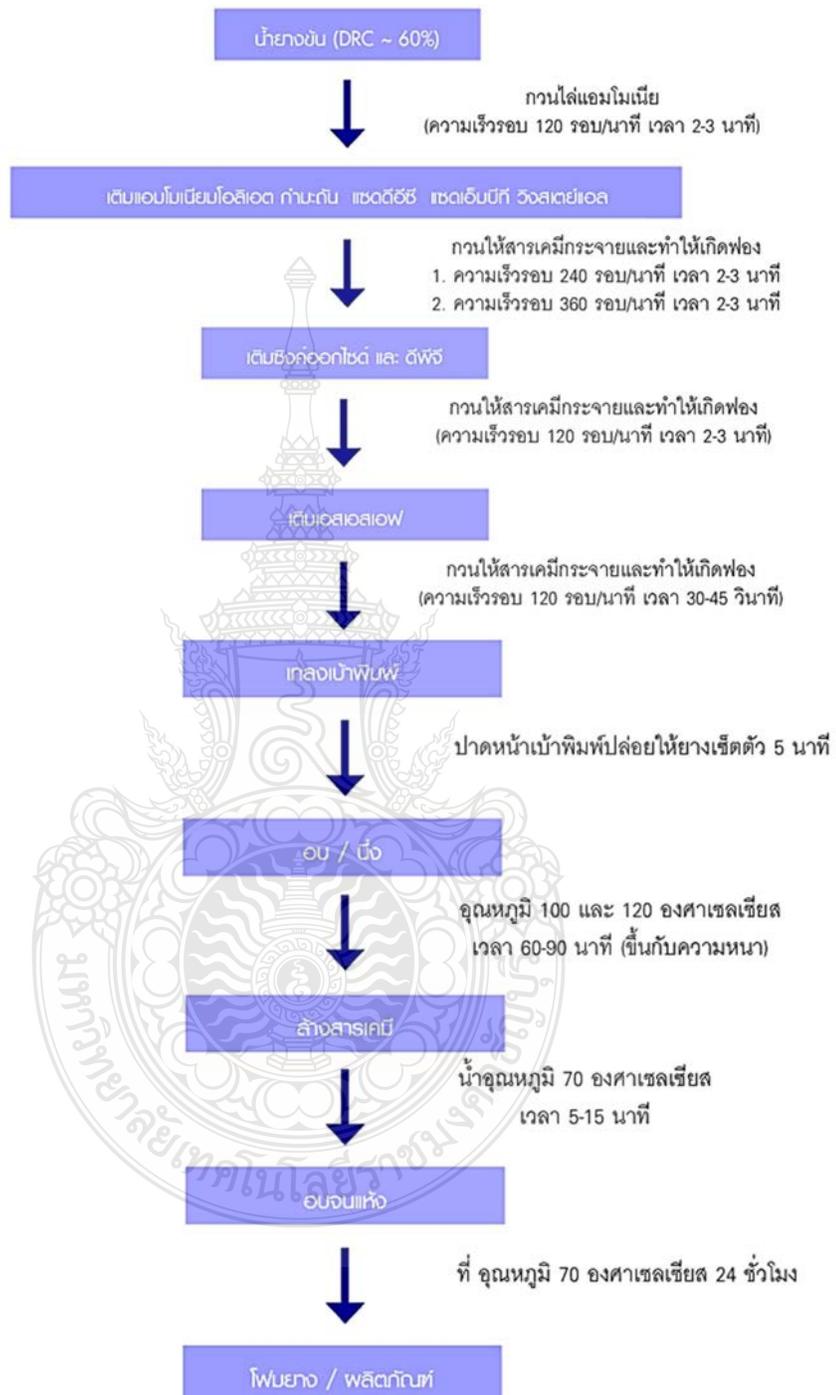
ตารางที่ 2.2 สารเคมีที่ใช้ทำผลิตภัณฑ์ยางโฟมธรรมชาติ [8]

phr\* : part per hundred of rubber (ส่วนในร้อยส่วนของยางโดยน้ำหนัก)

น้ำยางและสารเคมี	ปริมาณ (phr*)
60% น้ำยางข้น (LA-TZ)	100
10% แอมโมเนียมโอเลต (Ammonium oleate)	1.5
50% กำมะถัน (Sulfur)	2.0
50% แซดดีอีซี (ZDEC)	2.0
50% แซดเอ็มบีที (ZMBT)	2.0
50% ริงสเตย์แอล (Wingstay L)	2.0
50% ซิงค์ออกไซด์ (ZnO)	5.0
33% ดีพีจี (DPG)	1.4
12.5% เอสเอสเอฟ (SSF)	0.25



### 2.3.3.3 ขั้นตอนการผลิตยางโฟมหรือโฟมยาง



รูปที่ 2.11 ขั้นตอนการผลิตยางโฟมหรือโฟมยาง [8]

## 2.4 เส้นใยธรรมชาติ (Natural fibers)

### 2.4.1 ความหมายเส้นใยธรรมชาติ

เส้นใยธรรมชาติเป็นเส้นใยที่เกิดขึ้นธรรมชาติโดยไม่ผ่านกระบวนการผลิตหรือการปรับเปลี่ยนจากมนุษย์ มีคุณสมบัติที่หลากหลายและนำมาใช้ประโยชน์ในหลายอุตสาหกรรม เส้นใยธรรมชาติมีความหลากหลายและมีประโยชน์มากมายในหลายด้านของชีวิตประจำวันและอุตสาหกรรมต่าง ๆ ทั้งในด้านการผลิตผลิตภัณฑ์, การออกแบบ, และการใช้ในงานศิลปะและวัฒนธรรมต่าง ๆ ด้วยคุณสมบัติที่หลากหลายและความทนทานที่ดีต่อสภาพแวดล้อมและการใช้งานในชีวิตประจำวัน เส้นใยธรรมชาติที่นำมาใช้ประโยชน์สามารถแบ่งเป็น 3 ชนิด [9] คือ

1) เส้นใยจากพืช หรือเส้นใยจากเซลลูโลส (Cellulose fibers) ซึ่งได้จากส่วนต่างๆ ของพืช เช่น

(1) เส้นใยที่หุ้มเมล็ด ได้แก่



รูปที่ 2.12 ใยฝ้าย (Cotton) [11]

- ใยฝ้าย (Cotton) เป็นเส้นใยธรรมชาติที่มาจากเมล็ดพืชฝ้าย (Gossypium) มีความนุ่มนวลและดูดซับน้ำได้ดี ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์เสื้อผ้าและผ้าปูที่นอนที่ต้องการความสบาย มีคุณสมบัติที่ทนทานและสวยงาม นอกจากนี้ยังนำมาใช้ในหลายวงการอุตสาหกรรม เช่น การผลิตเครื่องนุ่งห่ม ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาด และในเทคโนโลยีสูง ๆ อีกด้วย ปัจจุบันมีการปรับปรุงพันธุ์เพื่อเพิ่มผลผลิตและคุณภาพของใยฝ้ายอีกด้วย



รูปที่ 2.13 ไยนุ่น (Kapok) [11]

- ไยนุ่น (Kapok) เป็นเส้นใยธรรมชาติที่มาจากเมล็ดของต้นนุ่น มีลักษณะเบาและนุ่มนวล เป็นวัสดุที่ใช้ในการเติมหมอนหรือเตียงนอนเพื่อให้ความสบาย นอกจากนี้ยังใช้ในการผลิตเสื้อผ้า และอุปกรณ์ทำความสะอาด เนื่องจากมีความสามารถในการดูดซับน้ำได้ดี

(2) เส้นใยจากลำต้น ไต้แก่



รูปที่ 2.14 ไยลินิน (Linen) [11]

- ไยลินิน (Linen) เป็นเส้นใยธรรมชาติที่ได้จากเส้นใยของพืชลินิน (Flax plant) มีลักษณะแข็งและทนทาน นิยมใช้ในการผลิตผ้าเพื่อเสื้อผ้าและของที่นอน นอกจากนี้ ยังมี ความต้านทานต่อเชื้อราและแมลงด้วย



รูปที่ 2.15 ไยปอ (Jute) [11]

- ไยปอ (Jute) เป็นเส้นใยธรรมชาติที่ได้จากเปลือกของพืชปอ มีคุณสมบัติ ทนทานและคงรูปที่ดีในสภาพแวดล้อมที่ชื้น นิยมใช้ในการผลิตถุงกระสอบ พับพรรณและวัสดุตกแต่ง ต่างๆ นอกจากนี้ยังใช้ในการผลิตวัสดุเส้นเปลือยที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

(3) เส้นใยจากใบ ได้แก่



รูปที่ 2.16 ไยสับปะรด (Pine apple) [11]

- ไยสับปะรด (Pine apple) เป็นเส้นใยธรรมชาติที่ได้มาจากใบสับปะรด มีความแข็งแรงและคงรูปที่ดี สามารถใช้ในการผลิตเสื้อผ้าและวัสดุตกแต่งได้



รูปที่ 2.17 ไยป่านศรนารายณ์ (Sisal) [11]

- ไยป่านศรนารายณ์ (Sisal) มักนำมาใช้ในการผลิตเชือกและเครื่องใช้ในทางเกษตรและอุตสาหกรรม มีความแข็งแรงและทนทาน

(4) เส้นใยจากผล ได้แก่ เส้นใยมะพร้าว (Coir) ได้จากเปลือกของผลมะพร้าว เส้นใยแข็งกระด้าง ทนต่อความเปียกชื้นและการทำลายของจุลินทรีย์ได้ดี

2) เส้นใยจากสัตว์ หรือเส้นใยโปรตีน (Protein fibers) เป็นเส้นใยที่ประกอบด้วยสารประเภทโปรตีน [10] ได้แก่



รูปที่ 2.18 ขนสัตว์ (Wool) [11]

- ขนสัตว์ (Wool) เป็นเส้นใยที่ได้จากขนของสัตว์ เช่น แกะ แพะ และ กระต่าย มีคุณสมบัติที่อ่อน นุ่ม และดูดซับความชื้นได้ดี นิยมใช้ในการผลิตเสื้อผ้า ผ้าห่ม และผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการอุ่นตัวในช่วงหน้าหนาว



รูปที่ 2.19 ไหม (Silk) [11]

- ไหม (Silk) เป็นเส้นใยที่ได้จากหนอนไหม มีคุณสมบัติเหมาะแก่การทำเสื้อผ้า

3) เส้นใยจากสินแร่ (Mineral fibers) เช่น แร่ใยหิน (Asbestos) มีคุณสมบัติทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี ทนความร้อนได้สูง มีความเหนียว และไม่นำไฟฟ้า [10]



รูปที่ 2.20 แร่ใยหิน (Asbestos) [11]

โดยเส้นใยธรรมชาติที่ใช้มากที่สุดคือ เส้นใยจากพืชเป็นลำดับแรก และเส้นใยจากสัตว์เป็นลำดับที่สอง เพราะเส้นใยพืชมีราคาค่อนข้างถูกกว่า พบหาได้ง่าย และมีปริมาณของเส้นใยพืชมีมากกว่าเส้นใยจากสัตว์ [11]

## 2.5 เส้นใยนุ่น (Kapok fiber)

### 2.5.1 ประวัตินุ่น

นุ่นเป็นพืชที่ปลูกทั่วประเทศไทยเพื่อใช้ประโยชน์ โดยจะนำใช้เป็นไส้ในหมอนนอนหรือส่วนที่เหลือจากการผลิตจะนำไปขาย นุ่นทั่วไปจะถูกปลูกในบริเวณบ้านเรือน ซึ่งประเทศไทยเป็นผู้ส่งออกนุ่นในปริมาณมากที่สุดของโลก ดอกของนุ่นจะมีสีขาวปนเหลืองและจะออกเป็นกระจุก ฝักของนุ่นจะยาวปานกลางเมื่อสุกจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเหลืองๆเปลือกจะมีความเรียบและเปลือกบางทำให้สามารถแกะเปลือกออกได้ง่าย การปลูกนุ่นเป็นสิ่งที่ง่าย ๆ โดยการปลูกด้วยเมล็ดโดยตรงนอกจากนี้ยังสามารถเพาะเมล็ดในแปลงเพาะก่อนแล้วนำต้นที่มีลักษณะดีแข็งแรงไปปลูกในไร่ได้ โดยการตัดยอดออกก่อนเพื่อลดการคายน้ำ เป็นที่ที่ดินมีความชื้นอย่างเหมาะสมและมีฝนตกในปริมาณสม่ำเสมอ และควรปลูกให้มีระยะห่าง [12]



รูปที่ 2.21 ลักษณะนุ่น [12]

นุ่นจะออกดอกและมีผลผลิตครั้งแรกเมื่ออายุประมาณ 2-4 ปี การบานดอกนุ่นจะเกิดขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงการบานที่สมบูรณ์ของต้น ฝักจึงจะแก่และพร้อมกันในเวลาเดียวกัน ดังนั้น ควรเลือกเก็บนุ่นที่ไม่เขียวเกินไป เพราะจะส่งผลให้ปุยนุ่นมีคุณภาพต่ำ ในกรณีที่ผลผลิตดอกนุ่นไม่มีผิวล็กเรียบ ควรรอให้ปลายเปลือกแตกขีดของเปลือกเห็นชัดเจนก่อนที่จะเก็บ เพราะการแกะเปลือกจะทำให้ยากและต้นนุ่นอาจได้ปุยนุ่นสีขาวอมเหลืองที่คุณภาพต่ำมาก ในกรณีที่ต้นนุ่นแก่แล้วและเปลือกไม่แตกควรรอให้ต้น

นุ่นแก่พร้อมกันก่อนที่จะเก็บ เพื่อการผลิตผลนุ่นในปีถัดไปอยู่ในระดับสูง ในปีแรกจะให้ผลต่อตันประมาณ 20-30 ฝัก ในแต่ละฝักปุยจะประกอบด้วยเปลือกประมาณ 44% เมล็ดประมาณ 32% ใส้และก้านประมาณ 7% และเส้นใยหรือปุยประมาณ 17% ราคาขายต่อกิโลกรัมของฝักนุ่นอยู่ที่ 4 บาท หลังจากเอาเปลือกออกแล้ว ในขณะที่ปุยนุ่นมีราคาประมาณ 30-35 บาทต่อกิโลกรัม

### 2.5.2 ลักษณะเส้นใยนุ่น

เส้นใยนุ่น ฝักนุ่นมีลักษณะเป็นเปลือกที่แข็งแรงและมีลวดลายเรียบ มักจะมีขนาดใหญ่และมีลวดลายธรรมชาติที่ทำให้ดูเป็นเค้าโครงเล็กๆ ภายในฝักนุ่นจะมีเส้นใยที่เรียกว่าเส้นใยนุ่นซึ่งมีสีขาวหรือสีครีม และมีความแข็งแรงเมื่อเปียกน้ำ ลักษณะนี้ทำให้เส้นใยนุ่นเป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการใช้ในการทำเสื้อผ้า ผ้าปูพื้น เป็นต้น [13]



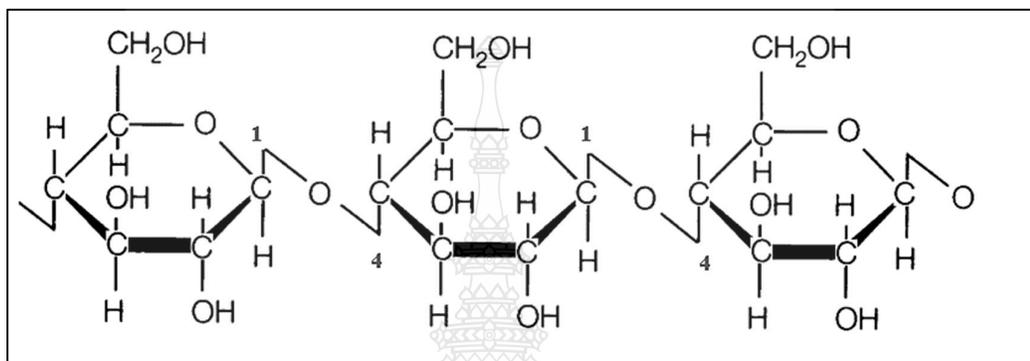
รูปที่ 2.22 ลักษณะเส้นใยนุ่น [13]

### 2.5.3 คุณสมบัติและศักยภาพที่แท้จริงของวัสดุนุ่น

"เส้นใยนุ่น" ของแบรนด์ "จาร์ภูณท์" ได้รับการรับรองจาก Material ConneXion, Inc. ประเทศอเมริกา ว่ามีคุณสมบัติเฉพาะต่างๆ ที่น่าสนใจ [14] เช่น มีน้ำหนักเบา ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ไม่ก่อให้เกิดอาการภูมิแพ้ สามารถลอยน้ำได้ และมีความสามารถในการควบคุมอุณหภูมิ นอกจากนี้ยังสามารถใช้งานในหลากหลายแพลตฟอร์ม เช่น ผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้องกับการนอน และเสื้อผ้าชุมชนเชิงสุขภาพ ซึ่งมีศักยภาพในเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมในประเทศไทยได้เป็นอย่างดี เป็นต้น

## 2.6 ไมโครเซลลูโลส (Micro cellulose)

ไมโครเซลลูโลสหรือไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลส คือคาร์โบไฮเดรต(Carbohydrate) ที่มีโครงสร้างเป็นเซลลูโลส (Cellulose) สายสั้น ต้นกำเนิดของมันเป็นพอลิเมอร์ยาวของน้ำตาลกลูโคสที่ผ่านกระบวนการทำให้สั้นลง (Depolymerization) และมีความบริสุทธิ์



รูปที่ 2.23 โครงสร้างทางเคมีของ Cellulose [15]

ไมโครเซลลูโลสผลิตโดยการย่อย Alpha-cellulose ที่ได้จากเส้นใยพืช ด้วยกรดจนได้ ไมโครเซลลูโลส ที่มี Degree of polymerization น้อยกว่า 400 และ อนุภาคปริมาณ 10% ของ ไมโครเซลลูโลส มีขนาดเล็กกว่า 5 ไมครอน [15]

## 2.7 นาโนเซลลูโลส (Nano cellulose)

### 2.7.1 การผลิตเส้นใยนาโนเซลลูโลส

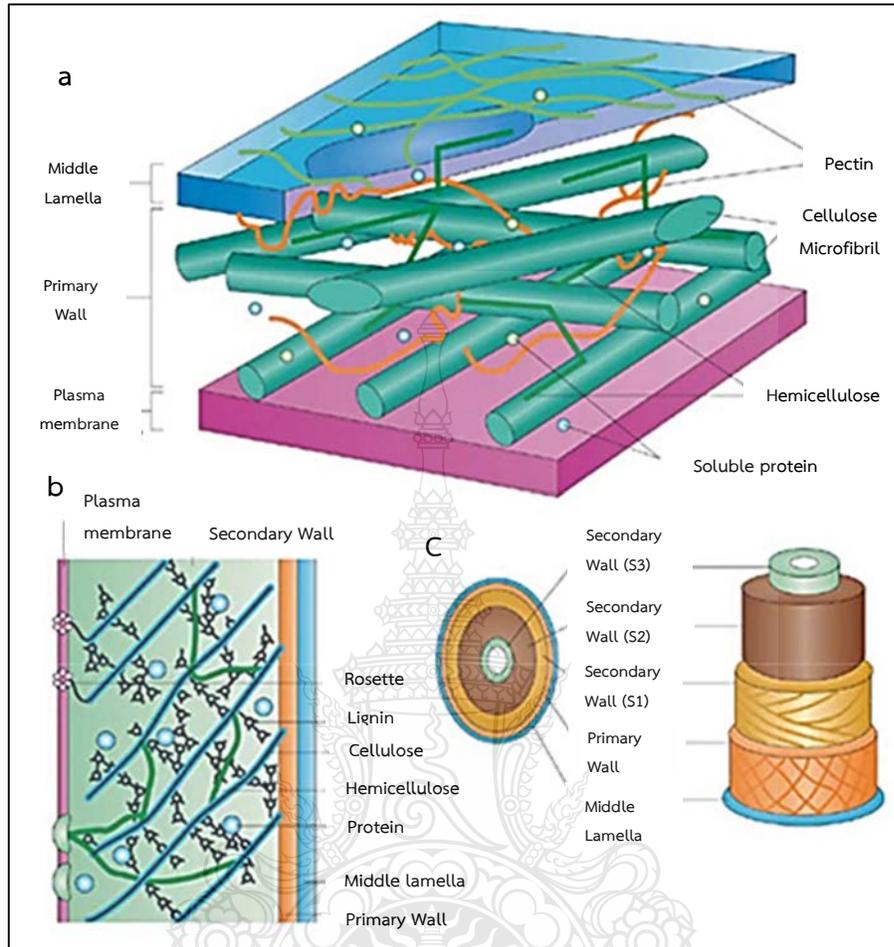
เส้นใยนาโนเซลลูโลส ถูกผลิตขึ้นจากเนื้อและผล เช่น ยางพารา กล้าย และสับปะรด มีขนาดที่อยู่ในระดับนาโนเมตรและความแข็งแรงสูง สำหรับเส้นใยเซลลูโลสขนาดเส้นใยปกติที่ใช้ในกระบวนการผลิตกระดาษต่างๆ สามารถเตรียมโดยการสกัดหรือสังเคราะห์เส้นใยจากพืชได้ เช่นเดียวกับการใช้วัสดุอื่น เช่น แก้วหรือคาร์บอน การนำเส้นใยนาโนเซลลูโลสไปใช้งานสามารถเพิ่มความแข็งแรงและความทนทานให้แก่วัสดุอื่นๆ อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นได้

### 2.7.2 ลักษณะทั่วไปของนาโนเซลลูโลส

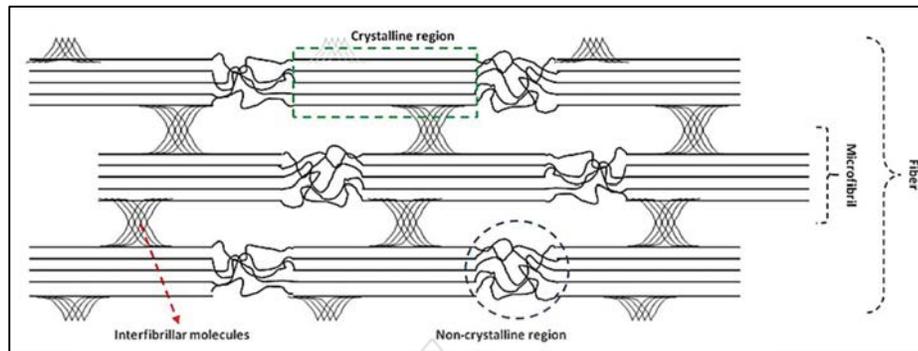
นาโนเซลลูโลสเป็นวัสดุที่มีลักษณะที่น่าสนใจมากในหลายอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมเครื่องมือแพทย์ อุตสาหกรรมยา และอุตสาหกรรมพลาสติก

และเครื่องประดับ เนื่องจากมีคุณสมบัติเฉพาะที่มีประโยชน์ ได้แก่ น้ำหนักเบากว่าเส้นใยธรรมชาติอื่น ๆ, ปลอดสารพิษต่อสิ่งแวดล้อม, ไม่ก่อให้เกิดอาการภูมิแพ้, สามารถลอยน้ำได้และมีแรงต้านน้ำสูง, ควบคุมอุณหภูมิได้ดี, และสามารถซึมซับคราบน้ำมันได้เป็นอย่างดี การนำนาโนเซลลูโลสมาใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ยังมีการวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและปลอดภัยในการใช้งานในระยะยาว ดังนั้น นาโนเซลลูโลสมีศักยภาพสูงในการสร้างผลิตภัณฑ์ที่มีประโยชน์และมีคุณค่าในหลายด้านของชีวิตประจำวันและอุตสาหกรรมต่าง ๆ ในปัจจุบันและในอนาคต

ลักษณะของนาโนเซลลูโลส เส้นใยในพืชมักจะเรียงตัวอย่างมีระเบียบ ซิดในใบไม้ ผลไม้ และลำต้น คล้ายทั้งชนิด ภายในมีเส้นใยเล็กๆที่เรียกว่า Elementary fibrils ที่รวมกันด้วยสารเพคติน (Pectinous gums) จะพบเจอในส่วนผนังเซลล์ปฐมภูมิ (Primary wall) และส่วนของลำต้น มิติเดิลลามลลา (Middle lamella) ซึ่งรวมเซลล์สองเซลล์เข้าด้วยกัน เมื่อพืชเติบโต ผนังเซลล์ปฐมภูมิจะขยายขนาด แต่เมื่อเติบโตเสร็จสิ้น ไฮโดรพลาสซึมที่อยู่ในเนื้อเยื่อ Sclerenchyma จะเกิดความแห้ง ส่งผลให้ผนังของเซลล์มีความหนาขึ้น โดยเกิดจากการเพิ่มขนาด และมีความแข็งแรงของผนังเซลล์ทุติยภูมิ ซึ่งจะเกิดอยู่ที่ภายในผนังเซลล์ปฐมภูมิ และจะเกิดการสร้างเส้นใยเซลลูโลส ผนังเซลล์ทุติยภูมิเกิดมาจากการทับถมกันอย่างต่อเนื่องของชั้นเซลลูโลส แบ่งออกเป็นสามชั้นย่อย ชั้นกลางเป็นชั้นสำคัญที่สุด เนื่องจากมีผลต่อสมบัติทางกายภาพของเส้นใย ประกอบด้วยไมโครไฟบริล ที่จัดเรียงเป็นมัด เส้นผ่าศูนย์กลางของไมโครไฟบริล อยู่ระหว่าง 10-30 นาโนเมตร ลักษณะเฉพาะของโครงสร้างผนังเซลล์ทุติยภูมิคือมุมการเรียงเซลลูโลสมาตรฐานกับทิศทางหลักของเส้นใย แต่ละชั้นย่อยมีลำดับการเรียงต่างกัน และจากความหนาของผนังเซลล์ทุติยภูมิทำให้ช่องว่างระหว่างเซลล์หรือลูเมนเล็กลง (ดังรูปที่ 2.24 และ 2.25) ผนังของเซลล์พืช ทั้งส่วนของผนังเซลล์ปฐมภูมิและผนังเซลล์ทุติยภูมิ เป็นวัสดุผสม (Composite) ซึ่งจะประกอบไปด้วยเส้นใยเซลลูโลสไฟบริล ซึ่งอยู่ในเนื้อที่ลิกนินและเฮมิเซลลูโลส [16]



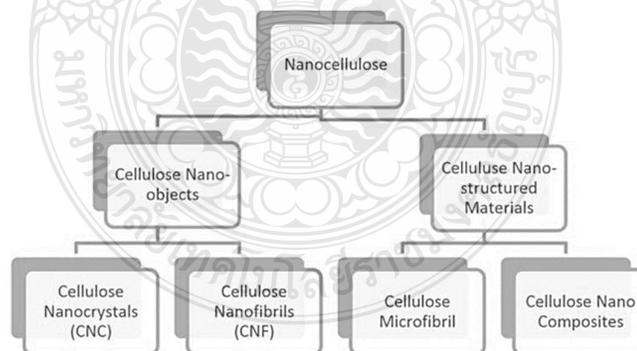
รูปที่ 2.24 ภาพการจำลองเส้นใยหน่วยเล็กๆ ของเส้นใยที่ฝังตัวอยู่ในเนื้อของลิกนิน และเฮมิเซลลูโลส (A) ผนังเซลล์ที่มีไมโครไฟบริลเซลลูโลสเฮมิเซลลูโลส, เพคติน, ลิกนินและโปรตีนที่ ละลายน้ำได้ B) เอนไซม์เซลลูโลส Synthase ซึ่งลอยในเยื่อหุ้มพลาสมาเมมเบรน C) Lignification เกิดขึ้นในชั้น S1, S2 และ S3 ของผนังเซลล์ [17]



รูปที่ 2.25 องค์ประกอบของไมโครไฟบริลที่อยู่ภายในเส้นใย [18]

### 2.7.3 การแบ่งประเภทของนาโนเซลลูโลส

นาโนเซลลูโลสเป็นเส้นใยเซลลูโลสที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 10-200 นาโนเมตร และมักเรียกว่านาโนคริสตัล วิสเกอร์ (Whiskers) หรือ นาโนไฟบริล หรือ นาโนไฟเบอร์ มี 2 ประเภทหลักคือ Cellulose nanocrystal และ Cellulose microfibrils หรือ Cellulose nanofibrils การแบ่งนาโนเซลลูโลสออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ (รูปที่ 2.26) คือ แบ่งตามประเภทและตามโครงสร้าง นาโนเซลลูโลสสามารถสกัดมาจากผนังเซลล์ของลิกโนเซลลูโลส ด้วยวิธีต่างๆ เช่น เชิงกล, เคมีเชิงกล, และเทคนิคเอนไซม์ [19] การวิจัยและพัฒนาในด้านนี้เป็นที่สำคัญเพื่อพัฒนาวัสดุใหม่ที่มีคุณสมบัติพิเศษและมีความหลากหลายในการใช้งานในหลายอุตสาหกรรมและงานวิจัยต่างๆ ในระยะยาว



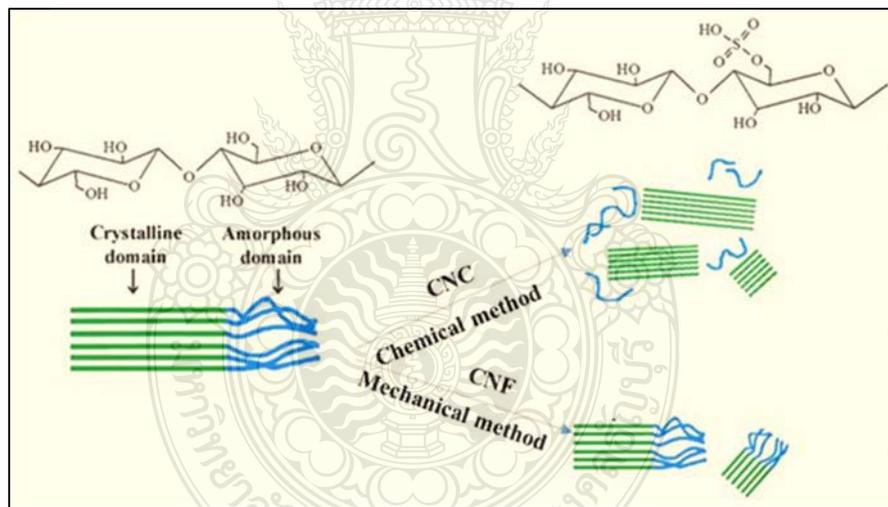
รูปที่ 2.26 ลำดับชั้นของ Nanocellulose ตาม TAPPI จัดขึ้นที่เมืองอาร์ลิงตัน [19]

จากรูปที่ 2.26 สามารถแบ่งได้ดังนี้

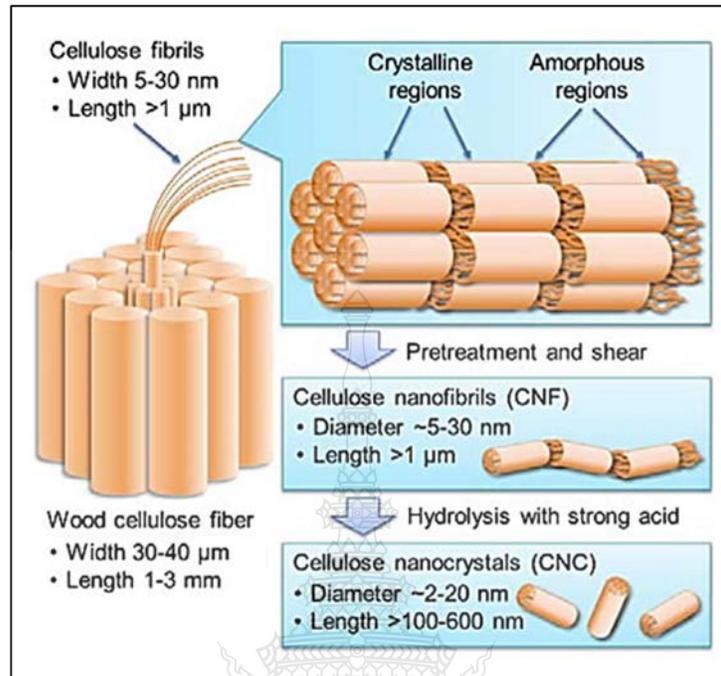
1) Cellulose nano-objects มีวิธีการผลิต 2 แบบ คือ เซลลูโลสนาโนคริสตัล และเซลลูโลสนาโนไฟบริล จากรูปที่ 2.27 และ 2.28 จากรูปจะบอกความแตกต่างระหว่าง เซลลูโลสนาโนคริสตัล และเซลลูโลสนาโนไฟบริล

(1) เซลลูโลสนาโนคริสตัล (CNC) ได้มาจากการใช้สารเคมีทำปฏิกิริยาตัดสายโซ่โมเลกุลระหว่างโครงสร้างที่เป็นผลึกและ Amorphous หรือเรียกว่าอสังฐาน ใช้สารเคมีเอนไซม์ ต่าง หรือกรด เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือกรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) ซึ่งเซลลูโลสนาโนคริสตัลจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง อยู่ทีระหว่าง 2-20 นาโนเมตร และมีความยาวมากกว่า 100-600 นาโนเมตร [20]

(2) เซลลูโลสนาโนไฟบริล (CNF) ซึ่งเซลลูโลสนาโนไฟบริล เป็นนาโนเซลลูโลสที่เกิดจากการอาศัยปฏิกิริยาเชิงกล (Mechanical method) ในการทำให้โครงสร้างเกิดการแตกหักระหว่างโครงสร้างที่เป็นผลึกกับผลึก ทำให้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเซลลูโลสนาโนไฟบริล อยู่ที่ประมาณ 5-30 นาโนเมตร และมีความยาวมากกว่า 1 ไมโครเมตร [22]



รูปที่ 2.27 ความแตกต่างระหว่าง เซลลูโลสนาโนคริสตัล และเซลลูโลสนาโนไฟบริล (1) [20]



รูปที่ 2.28 ความแตกต่างระหว่าง เซลลูโลสนาโนคริสตัล และเซลลูโลสนาโนไฟบริล (2) [21]

2) Cellulose nano-structured materials เป็นการแบ่งตามสมบัติของวัสดุ

(1) เซลลูโลสไมโครไฟบริล (CMF) ซึ่งโครงสร้างของ CMF เกิดจากการรวมตัวของไฟบริลแบบปฐมภูมิจำนวนมาก ซึ่งเซลลูโลสไมโครไฟบริลมีสมบัติเชิงกลที่ดีเยี่ยม และมีค่า Young's modulus สูงถึง 138 GPa และมีความต้านทานแรงดึงสูงถึง 2 GPa และมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายความร้อนที่ต่ำมาก [22]

(2) เซลลูโลสนาโนคอมโพสิต เป็นการนำนาโนเซลลูโลสมาทำปฏิกิริยาร่วมกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ด้วยการเอกซ์ทรูด, ทำแผ่นเรียบ (Casting) เพื่อเป็นการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุ การเตรียมนาโนเซลลูโลสในนาโนคอมโพสิตมีขั้นตอนหลายขั้นตอน ประกอบด้วย การสกัดเซลลูโลสจากวัตถุดิบพืชหรือเปลือกไม้ จากนั้นเตรียมเป็นรูปผง และพัฒนานาโนคอมโพสิต โดยนำเซลลูโลสผสมกับวัสดุอื่นๆ เพื่อเพิ่มคุณสมบัติ หลังจากนั้นนาโนเซลลูโลสจะถูกจัดระเบียบโครงสร้างใหม่และทดสอบคุณสมบัติ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีประสิทธิภาพและคุณภาพสูงที่สุดในการใช้งานดังตารางที่ 2.3

**ตารางที่ 2.3** การเตรียมนาโนเซลลูโลสในนาโนคอมโพสิต [23]

Type of modification	Functionalization method	NC	Polymer matrix	Composite processing method
Non-covalent	Anionic surfactant	CNC	PLA	Extrusion
	Nonionic surfactant	CNC	PS	Solvent casting
	Ionic exchange	CNF	PLA	Solvent casting
Covalent	Silylation	CNC	PLA	Solvent casting
	Acetylation	CNF	PLA	Extrusion
	Acetylation	TOC-CNF	PLA	Casting
	Acetylation	BC	Acrylic	Impregnation
	Pol grafting	CNC-PEG	PS	Extrusion
	Esterification	BC	PLA	Extrusion
	Alkylation	MCC	PLA	Solvent casting
	Silanization	CNF	PLA	Solvent casting
	Pol. grafting	CNC-PCL	PCL	Extrusion
	Glyoxalization	BC	PLA	Impregnation
	Silylation	CNC, CNF	PLA	Extrusion
	Esterification	CNC, CNF	PLA	Extrusion

## 2.8 การดูดซับ (Adsorption)

### 2.8.1 การดูดซับคือ

การดูดซับ (Adsorption) เป็นกระบวนการที่สารละลายหรือก๊าซถูกดูดซับโดยสารอื่นๆ ที่เรียกว่า สารดูดซับ (Adsorbent) ซึ่งสามารถเป็นของแข็งที่มีลักษณะการต่อเรียงต่อตัวได้ การดูดซับนั้นเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นที่พื้นผิวของสื่อดูดซับโดยมีแรงดันของโมเลกุลในสารละลายที่มีทั้งแรงดันแม่เหล็กซึ่งเป็นการดูดซับแบบดิโพลาร์ และแรงดันวานด์วาลส์ และมีผลกระทบจากแรงดันทางกล (ความคลาดเคลื่อนทางโมเลกุล) ซึ่งเป็นการดูดซับแบบฟิสิกส์ การดูดซับมักจะมีพื้นที่ผิวของสารดูดซับที่มีโครงสร้างที่ซับซ้อนและมีพื้นที่ผิวที่มากในหน่วยปริมาณของวัสดุและมีการสัมผัสที่ใกล้ชิดกับสารละลายหรือก๊าซที่ต้องการดูดซับ [24]

## 2.8.2 กระบวนการหรือกลไกการดูดติดผิว

การดูดติดผิว (Adsorption) เป็นกระบวนการที่สารละลายหรือสารแขวนลอยขนาดเล็กถูกกักไว้บนผิวของสารอีกชนิดหนึ่งที่เรียกว่า Adsorbent กระบวนการดูดติดผิวนี้เกิดขึ้นในระหว่างสถานะต่างๆ โดยเฉพาะในรูปแบบของของเหลว-ของแข็ง (Liquid–solid interface ในกระบวนการเกาะติดนี้ มี Driving force 2 แบบ คือ การดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี ทั้งสองแบบนี้ เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อกระบวนการดูดติดผิวได้โดยตรง การดูดซับทางกายภาพเกิดจากแรงแม่เหล็กแรง Van der Waals หรือแรงประมาณซึ่งเป็นแรงปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดระหว่างโมเลกุลของสารละลายกับพื้นผิวของสารดูดซับ ส่วนการดูดซับทางเคมีเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของสารละลายมีการปฏิกิริยาเคมีกับตัวดูดซับ ซึ่งทั้งสองแบบนี้ส่งผลให้โมเลกุลหรืออนุภาคของสารละลายถูกดูดซับไปยังพื้นผิวของตัวดูดซับ และสร้างแรงดึงดูดที่ทำให้เกิดการดูดติดผิว [24]

## 2.8.3 การดูดซับแต่ละประเภท

การระบุชนิดของกระบวนการดูดซับสามารถพิจารณาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสารละลายกับพื้นผิวของตัวดูดซับได้ ถ้าการดูดติดเกิดจากแรงแม่เหล็ก แรง Van der Waals หรือแรงประมาณซึ่งไม่เกี่ยวข้องกับการปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารละลายกับตัวดูดซับ จะเป็นการดูดซับทางกายภาพ แต่ถ้การดูดติดเกิดจากการปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารละลายกับตัวดูดซับ ซึ่งความแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมีจะแสดงในตารางที่ 2.4 การดูดซับทางเคมียังมีบทบาทสำคัญในการกำจัดสารประกอบอันตราย หรือการตัดสิ้นใจในกระบวนการเลือกตัวดูดซับที่เหมาะสมสำหรับการใช้ในแผนกต่าง ๆ ของอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมสารเคมี อุตสาหกรรมอาหาร และอุตสาหกรรมพิมพ์และสื่อสาร การดูดซับที่มีการเปิดเผยพื้นที่ผิวมากจะมีประสิทธิภาพมากขึ้นในการดูดซับทางกายภาพ ในขณะที่การดูดซับที่มีการเคลือบพื้นผิวด้วยกลุ่มหรือเครื่องหมายที่สามารถสร้างปฏิกิริยาเคมีได้จะมีประสิทธิภาพมากขึ้นในการดูดซับทางเคมี [24]

### (1) การดูดซับทางกายภาพ

เป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander waals forces) เกิดจากการรวมแรง 2 ชนิด คือ แรงไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic force) และแรงกระจาย (London dispersion force) [24] การดูดซับทางกายภาพเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลหรืออนุภาคขนาดเล็กของสารละลายถูกดึงหรือถูกพิจารณาในพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ โมเลกุลแรงทางกายภาพนี้ มักจะไม่มีปฏิกิริยาเคมีกับตัวดูดซับ เนื่องจากนิเวศน์กายภาพนั้นมาจากแรงซึ่งไม่เกี่ยวข้องกับการแปรผันทางเคมี เช่น แรงแม่เหล็ก แรง Van der Waals และแรงโมเลกุล-พื้นผิว โมเลกุลหรืออนุภาคขนาดเล็กของสารละลายจะแปรผันตรงในพื้นที่ผิวดังกล่าว โดยส่วนมากจะเกาะติดกับผิวของตัวดูดซับด้วยแรง Van der Waals หรือแรงแม่เหล็ก คุณสมบัติที่สำคัญคือความสามารถในการดูดซับและ

ถูกเกี่ยวข้องกับพื้นผิวของตัวดูดซับ พื้นผิวที่มีพื้นที่ผิวมากจะมีความสามารถในการดูดซับทางกายภาพมากขึ้น เนื่องจากมีพื้นที่ที่โมเลกุลของสารละลายสามารถเกาะติดได้มากขึ้น ในการใช้งานจริง การดูดซับทางกายภาพมักนำมาใช้ในหลายด้าน

## (2) การดูดซับทางเคมี

การดูดซับทางเคมีเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลหรืออนุภาคขนาดเล็กของสารละลายถูกดึงหรือถูกพิจารณาในพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ โมเลกุลที่ถูกดูดซับทางเคมีมักมีการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับตัวดูดซับ และทำให้โมเลกุลเหล่านั้นถูกเกาะติดอยู่บนพื้นผิวด้วยแรงดึงดูดที่แข็งแกร่งกว่าแรงดึงดูดที่เกิดขึ้นในการดูดซับทางกายภาพ การดูดซับทางเคมีสามารถแบ่งออกเป็นหลายประเภทตามแรงที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ การดูดซับไฮโดรฟิสิก เช่น การดูดซับออกซิเจนในกระบวนการออกซิเจนที่เกิดขึ้นในเซลล์ เป็นต้น การดูดซับทางเคมีมีความสำคัญในหลายแง่ของชีวิตประจำวันและอุตสาหกรรม เช่น ในการใช้เพื่อทำให้สารพิษหรือสารตกค้างถูกนำออกจากสิ่งแวดล้อม การใช้ในกระบวนการกำจัดสารเคมีไม่พึงประสงค์ในน้ำ เป็นต้น นอกจากนี้ การดูดซับทางเคมียังมีความสำคัญในการผลิต การแยกแยะสาร และการทำความสะอาดในอุตสาหกรรม

### ตารางที่ 2.4 ความแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี

ตัวแปร	การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
1. ค่าความร้อนของการดูดซับ	$\leq 20 \text{ kJ mol}^{-1}$	$\geq 50 \text{ kJ mol}^{-1}$
2. อุณหภูมิที่เกิดการดูดซับ	ต่ำ (ประมาณจุดเดือดของ Absorbate)	สูง
3. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล	แรงแวนเดอร์วาลส์	พันธะเคมี
4. การผันกลับของปฏิกิริยา	ผันกลับได้โดยลดความดันทำให้ก๊าซที่ถูกดูดซับหลุดจากผิวในลักษณะเดิม	ไม่มีการผันกลับ แต่การ Desorption สามารถเกิดขึ้นได้ โดยการใช้ความร้อน แต่อาจเกิดการสร้างผลิตภัณฑ์ใหม่
5. การดูดซับบนก๊าซ-ของแข็ง	เกิดได้เกือบทุกชนิดที่ความดันและอุณหภูมิเหมาะสม	เกิดได้เฉพาะบางระบบที่มีแนวโน้มที่จะเกิดสารประกอบได้
6. พลังงานก่อกัมมันต์ในกระบวนการเกิด	ไม่เกี่ยวข้อง	เกี่ยวข้อง
7. รูปแบบชั้นของการดูด	ชั้นเดียว และ/หรือ หลายชั้น	ชั้นเดียว

#### 2.8.4 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับมีหลายประการและอาจแบ่งได้เป็นสองหมวดหลัก คือ ปัจจัยทางกายภาพ และ ปัจจัยทางเคมี [25,26] ได้แก่

##### 1) ปัจจัยทางกายภาพ

(1) พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุน การดูดซับมีความสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับและโครงสร้างของรูพรุน โมเลกุลที่เกาะติดกับพื้นผิวของตัวดูดซับมีโอกาสที่จะถูกดูดซับได้มากขึ้น การมีโครงสร้างรูพรุนช่วยเพิ่มพื้นที่ในการดูดซับ ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้น

(2) ขนาดของตัวดูดซับ ขนาดของตัวดูดซับมีผลต่อพื้นที่ผิวในการดูดซับ การลดขนาดของตัวดูดซับจะเพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดซับ ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้น

(3) การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น การปรับอุณหภูมิและความดัน สามารถมีผลต่อพื้นที่ผิวในการดูดซับ

##### 2) ปัจจัยทางเคมี

(1) หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว การหมุนหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวดูดซับสามารถทำให้เกิดการดูดซับทางเคมีได้

(2) ความสามารถในการละลายและความสามารถในการดูดซับของสารละลาย สารละลายที่ไม่สามารถละลายหรือละลายได้น้อยกว่าจะมีความสามารถในการเกาะติดกับพื้นผิวของตัวดูดซับได้ดีกว่า

(3) น้ำหนักและขนาดของโมเลกุล น้ำหนักและขนาดของโมเลกุลมีผลต่อการเกิดการดูดซับ โมเลกุลที่มีน้ำหนักและขนาดของโมเลกุลมากขึ้นมักจะมีความสามารถในการเกาะติดกับพื้นผิวของตัวดูดซับได้ดีกว่า

#### 2.8.5 หลักการของกระบวนการดูดซับ

การเคลื่อนย้ายมวลสารเกิดจากการที่โมเลกุลของสารในของเหลวถูกเคลื่อนย้ายมาสะสมหรือเกาะติดบนพื้นผิวของของแข็ง ซึ่งสามารถกำจัดสารนั้นออกจากของเหลวได้ โมเลกุลของสารต่างๆ ที่มีสะสมหรือถูกดูดซับติดที่พื้นผิวเรียกว่า สารถูกดูดซับ (Adsorbate) และเรียกของแข็งที่ทำการดูดซับว่า สารดูดซับ (Absorbent) มีขั้นตอนการดูดซับ 3 ขั้นตอน ดังนี้

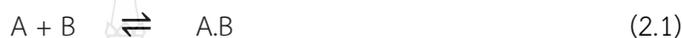
1) การเคลื่อนย้ายเชิงมหภาค เป็นการเคลื่อนย้ายของสารถูกดูดซับผ่านน้ำเข้าสู่พื้นผิวสารดูดซับ โดยมักเกิดขึ้นในระหว่างการนำสารละลายหรือสารแขวนลอยมาสัมผัสกับตัวดูดซับ

2) การเคลื่อนย้ายเชิงจุลภาค เป็นการแพร่กระจายของสารถูกดูดซับเข้าหาช่องว่างภายในของพื้นผิวสารดูดซับ ประกอบด้วย 2 ขั้นตอนย่อย คือ

(1) การแพร่ผ่านชั้นฟิล์มของน้ำ (Film diffusion) เป็นการเคลื่อนย้ายของโมเลกุลสารละลายที่อยู่บนผิวสารดูดซับผ่านชั้นของน้ำที่เป็นฟิล์มที่อาจมีความหนาและความหนาแน่นต่างกัน

(2) การแพร่สู่ช่องว่างหรือโพรง (Pore diffusion) เป็นการเคลื่อนย้ายของโมเลกุลสารละลายที่อยู่ในช่องโพรงหรือช่องว่างของสารดูดซับ

ในกระบวนการดูดซับนี้สามารถเขียนปฏิกิริยาเคมีง่ายๆ ได้ โดยปกติแล้วการดูดซับเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญในการทำให้สารละลายถูกกำจัดหรือแยกออกจากสารอื่นๆ ในของเหลว [27] ดังสมการที่ 2.1



โดยที่ A คือ สารถูกดูดซับ

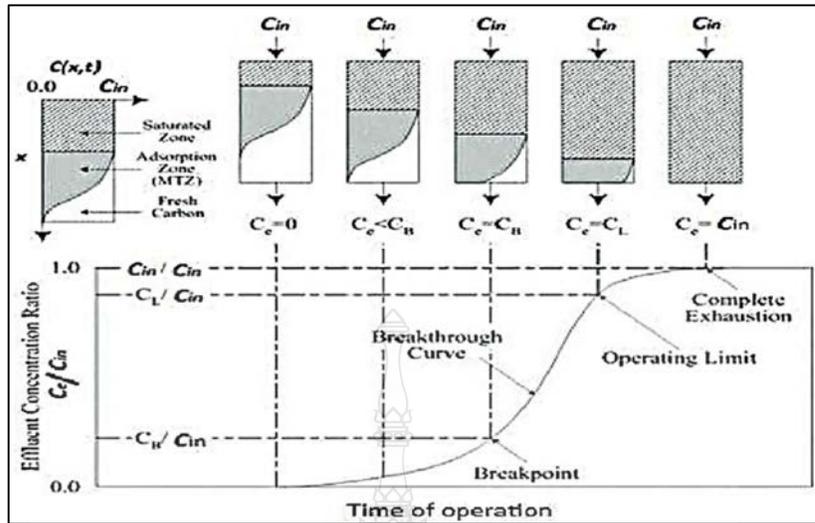
B คือ สารดูดซับ

A.B คือ สารประกอบ เกิดจากการดูดซับ

ไอโซเทอร์มของการดูดซับเป็นความสัมพันธ์ที่อธิบายปริมาณของสารที่ถูกดูดซับ (Adsorbate) ที่ถูกดูดซับไปยังพื้นผิวของสารดูดซับ (Adsorbent) ในสภาวะสมดุล กับปริมาณของสารถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายที่อยู่ในสถานะที่คงที่ (เช่น น้ำ) ที่อุณหภูมิที่คงที่ กราฟของไอโซเทอร์มของการดูดซับมักแสดงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณของสารถูกดูดซับที่ถูกดูดซับติดกับสารดูดซับเทียบกับปริมาณของสารถูกดูดซับที่เหลือในสารละลายที่คงที่

เพื่อหาไอโซเทอร์มของการดูดซับ อาจทำการทดลองโดยใช้สารละลายที่รู้ปริมาณของสารถูกดูดซับที่ต้องการกำจัดในปริมาตรที่คงที่ และทำการทำการแปรเปลี่ยนปริมาณของสารดูดซับ โดยที่ระยะเวลาการสัมผัสถูกกำหนดไว้ จากนั้น สารละลายที่ผ่านการทดลองจะถูกเก็บรวบรวมและวัดปริมาณของสารถูกดูดซับที่เหลือในน้ำที่ผ่านการทดลอง โดยสามารถคำนวณหาค่าขีดความสามารถในการดูดติดผิว (Adsorption capacity) ได้ [27]

บริเวณถ่ายโอนมวลสาร เป็นบริเวณที่เกิดกระบวนการดูดซับในชั้นของสารดูดซับ (Bed) โดยค่าความเข้มข้นของสารถูกดูดซับบนพื้นผิวของสารดูดซับจะเพิ่มขึ้นจากศูนย์ไปถึงจุดอิ่มตัว (Saturated) ในกรณีที่บรรจุสารดูดซับในคอลัมน์ปิดแบบชั้นสารดูดซับอยู่กับที่ (Fixed bed) การเกิดบริเวณถ่ายโอนมวลสารเกิดขึ้นดังรูปที่ 2.29 [27]



รูปที่ 2.29 กราฟ Breakthrough และบริเวณถ่ายโอนมวลสาร [27]

## 2.9 วัสดุดูดซับ (Absorbent materials)

วัสดุดูดซับ เป็นวัสดุที่มีความสามารถในการดูดซับสารหรือของเหลวในสถานะที่อยู่ โดยมีโครงสร้างที่ช่วยให้สามารถดูดซับได้มากขึ้น มักใช้ในการทำความสะอาด การดูดความชื้น การกำจัดกลิ่น หรือแม้กระทั่งในการดูดซับสารพิษและสารเคมีในกระบวนการทำลายสารเคมีที่เป็นอันตราย

การกำจัดคราบน้ำมันด้วยวัสดุดูดซับจากธรรมชาติเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม วัสดุดูดซับจากธรรมชาติที่ใช้กำจัดคราบน้ำมันมักเป็นวัสดุที่สามารถดูดซับน้ำมันและสารไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ ได้ดี นั่นคือ เส้นใยธรรมชาติ เช่น

- 1) ฟางข้าว [29] ซึ่งมีสมบัติดูดซับน้ำมันได้ดี เมื่อนำไปใช้ในการกำจัดคราบน้ำมันที่ระเบิดหรือรั่วไหล
- 2) ขี้เถ้า เป็นวัสดุที่สามารถใช้กำจัดคราบน้ำมันในทะเล มีความสามารถในการดูดซับน้ำมัน และเมื่อเข้าสัมผัสกับน้ำมันจะลู่กล้ำเพื่อดูดซับได้
- 3) กระจาดขี้ กระจาดขี้ที่ไม่มีการเคลือบสารพิเศษสามารถใช้เป็นตัวดูดซับน้ำมันได้ โดยการวางกระจาดขี้ลงบนพื้นผิวที่มีคราบน้ำมันและกระจาดขี้จะดูดซับคราบน้ำมันออก
- 4) เปลือกถั่ว เปลือกถั่วสามารถใช้เป็นตัวดูดซับน้ำมันในทะเล โดยมีความสามารถในการดูดซับน้ำมันอย่างมีประสิทธิภาพ

การใช้วัสดุดูดซับจากธรรมชาติในการกำจัดคราบน้ำมันไม่เพียงแต่มีประสิทธิภาพและมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม แต่ยังช่วยลดความเสี่ยงทางสุขภาพและความเสี่ยงที่เกี่ยวข้องกับการใช้สารเคมีที่เป็นอันตรายในการกำจัดคราบน้ำมันด้วย [30]

วัสดุดูดซับมักจะมีคุณสมบัติที่ช่วยให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับ ได้แก่

- 1) พื้นที่ผิว
- 2) โครงสร้างของรูพรุน
- 3) ความสามารถในการเปลี่ยนรูปร่าง
- 4) ความสามารถในการเชื่อมโยงโมเลกุล
- 5) ความต้านทานต่อสารเคมี

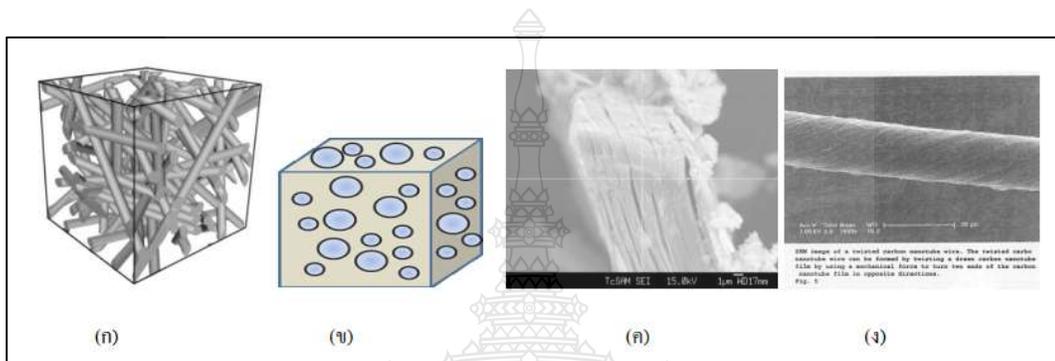
วัสดุดูดซับสามารถทำจากวัสดุธรรมชาติหรือสังเคราะห์ขึ้นมา และมีความหลากหลายในลักษณะของวัสดุ รวมถึงในรูปแบบของฟอง ผง และเส้นใย ซึ่งใช้งานในหลายสถานการณ์ต่างๆ ตามความเหมาะสมและการต้องการใช้งานที่แตกต่างกัน

## 2.10 วัสดุรูพรุน (Porous materials)

วัสดุรูพรุนหมายถึงวัสดุที่มีโครงสร้างที่มีช่องว่างหรือรูพรุนภายใน ซึ่งช่องว่างเหล่านี้สามารถมีลักษณะของรูเล็ก ๆ หรือรูขนาดใหญ่มากกว่า และมีการกระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอ ซึ่งสามารถใช้ในการตรวจวัด แยกแยะ หรือกระตุ้นการสัมผัสของสารต่างๆ ในกระบวนการต่างๆ โดยลักษณะทางกายภาพของวัสดุรูพรุนส่วนใหญ่มีความหลากหลายมาก และอาจมีการจัดเรียงโครงสร้างอย่างซับซ้อน เช่น โครงสร้างเชรามิก โมเลกุลชีวภาพ หรือโครงสร้างโปรตีน ซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติและประสิทธิภาพในการใช้งานของวัสดุ วัสดุรูพรุนมักมีการนำไปใช้ในหลายสถานการณ์ รวมถึงในอุตสาหกรรมและงานวิจัย เช่น ในอุตสาหกรรมเครื่องดื่ม: ใช้ในกระบวนการกรองและตรวจสอบคุณภาพของสาร, ในเทคโนโลยีการทำน้ำตาล: ใช้ในกระบวนการกรองแยกแยะน้ำตาลจากสารอื่น ๆ ในน้ำตาลเหลือง, ในการคัดแยกและกรองน้ำ: ใช้เป็นตัวกรองในกระบวนการทำน้ำดื่มมาตรฐาน, ในการกำจัดมลพิษในน้ำ: สามารถนำไปใช้ในกระบวนการล้างน้ำเพื่อกำจัดสารมลพิษออกจากน้ำ วัสดุรูพรุนมักถูกพัฒนาขึ้นเพื่อตอบสนองความต้องการในการแยกแยะสารหรือกระตุ้นการสัมผัสของสารในหลายอุตสาหกรรมและงานวิจัย และมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับการออกแบบและวัตถุประสงค์การใช้งานที่แตกต่างกัน

วัสดุรูพรุน หรืออาจเรียกว่าตัวคัดแยกโมเลกุล เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษในการนำไปใช้ประโยชน์ในหลายด้าน นอกจากการใช้เป็นตัวคัดแยกโมเลกุลแล้ว วัสดุรูพรุนยังสามารถนำไปใช้ในวัตถุประสงค์อื่นๆ อย่างเช่นการดูดซับสารเคมี หรือเป็นเซ็นเซอร์ และยังสามารถนำมาใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ตามความเหมาะสมของการใช้งานวัสดุรูพรุนมักมีความพรุนอยู่ระหว่าง 0.2-0.95

โดยมีรูพรุนที่แบ่งออกเป็นสองประเภท คือ รูพรุนแบบเปิด และรูพรุนแบบปิด วัสดุรูพรุนยังมีหลายโครงสร้างและรูปแบบที่แตกต่างกันไป เช่น รูพรุนแบบทรงกระบอก แบบทรงกลม และแบบแผ่น และยัง มีรูพรุนที่มีโครงสร้างที่ซับซ้อน เช่น รูพรุนแบบหกเหลี่ยม โดยรูพรุนสามารถเป็นแบบเส้นตรง หรือ โค้ง หรือ เป็นแบบที่บิดเป็นเกลียวได้ตามลักษณะของการออกแบบและการใช้งานที่ต้องการ [31] ดังแสดงในรูปที่ 2.30



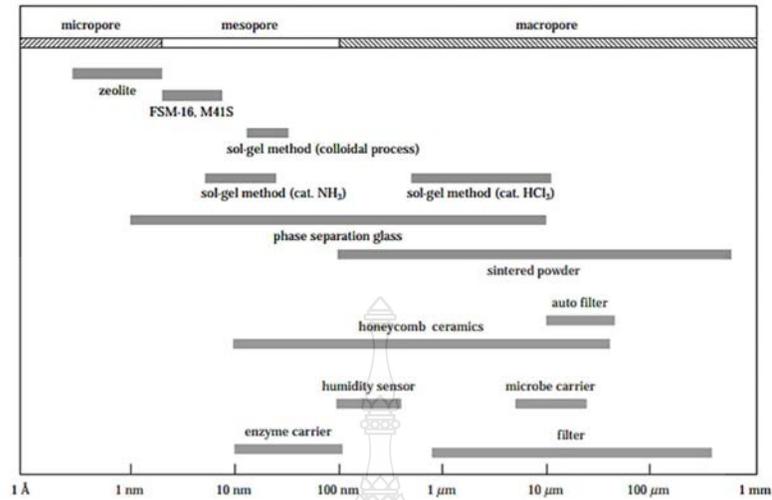
รูปที่ 2.30 รูพรุนรูปแบบต่างๆ (ก) แบบทรงกระบอก (ข) แบบทรงกลม (ค) แบบที่เป็นแผ่นและ (ง) แบบที่บิดเป็นเกลียว [31]

วัสดุรูพรุนสามารถแบ่งได้ตามขนาดของรูพรุนตามนิยามของสหภาพเคมีบริสุทธิ์และเคมีประยุกต์ระหว่างประเทศหรือชื่อย่อ เรียกว่า IUPAC โดยจัดแบ่งได้เป็น 3 ประเภทคือ

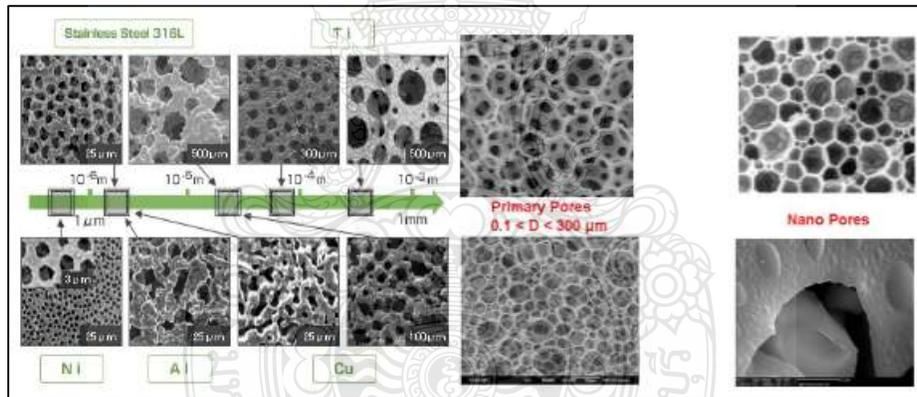
1) รูพรุนขนาดเล็ก (Micropores) มีขนาดน้อยกว่า 2 นาโนเมตร ซึ่งเหมาะสำหรับการดูดซับสารที่มีขนาดเล็กมาก โดยเฉพาะสารที่มีขนาดโมเลกุลเล็กกว่าขนาดของรูพรุน

2) รูพรุนขนาดกลาง (Mesopores) มีขนาดระหว่าง 2 ถึง 50 นาโนเมตร ซึ่งเหมาะสำหรับการดูดซับสารที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่าขนาดของรูพรุน และมีปริมาณมากขึ้น

3) รูพรุนขนาดใหญ่ (Macropores) มีขนาดมากกว่า 50 นาโนเมตร ซึ่งเหมาะสำหรับการดูดซับสารที่มีขนาดใหญ่เช่นการดูดซับของของเหลวที่มีขนาดของเซลล์หรืออนุภาคใหญ่ การแบ่งวัสดุรูพรุนตามขนาดนี้ช่วยให้เราเข้าใจและเลือกใช้วัสดุดูดซับที่เหมาะสมกับการใช้งานและคุณลักษณะของสารที่ต้องการดูดซับได้อย่างมีประสิทธิภาพและเหมาะสม เพื่อเปรียบเทียบให้เห็นความแตกต่างระหว่างขนาดของรูพรุนทั้ง 3 แบบ แสดงเป็นแผนภาพขนาดรูพรุนพร้อมตัวอย่างประกอบดังในรูปที่ 2.31 แผนภูมิขนาดรูพรุนพร้อมตัวอย่างวัสดุประเภทเซรามิกส์ที่อยู่ในช่วงต่างๆกัน [31] สารที่เป็นองค์ประกอบของวัสดุรูพรุนมีอยู่มากมายหลายประเภท



รูปที่ 2.31 แผนภูมิขนาดรูพรุนพร้อมตัวอย่างวัสดุประเภทเซรามิกส์ที่อยู่ในช่วงต่างๆกัน [31]



รูปที่ 2.32 วัสดุรูพรุนประเภทโลหะ(ซ้ำ) และ อโลหะ(ขวา) [31]

วิธีหนึ่งในการจำแนกประเภทรูพรุนคือวิธี IUPAC มีพื้นฐานมาจากการจัดประเภทของ Russel โดยซึ่งรูพรุนจะถูกจัดประเภทโดยส่วนใหญ่โดยใช้ผลลัพธ์จากการทดลองดูดซับไนโตรเจนเป็นหลัก ควรระมัดระวังและเข้าใจในเรื่องการจัดประเภทโดยใช้โมเลกุลไนโตรเจนและต้องพิจารณาถึงรูพรุนด้วย เมื่อมีโมเลกุลที่ใหญ่กว่าไนโตรเจน การดูดซับที่มีลักษณะคล้ายการเติมไมโครพอร์ (Micropore) จะเกิดขึ้นในช่วงเมโซพอร์ (Mesopore) ต้องระมัดระวังอย่างมากเกี่ยวกับโมเลกุลที่มีขนาดเล็กกว่าโมเลกุลไนโตรเจน เช่น ไฮโดรเจนและน้ำ ตัวอย่างเช่น ถึงแม้ว่าวัสดุจะไม่มีรูพรุนต่อโมเลกุลไนโตรเจน มักเป็นกรณีที่ไม่จำเป็นต้องไม่มีรูพรุนสำหรับโมเลกุลขนาดเล็ก ดังนั้นเราจึงคิดว่าจำเป็นต้องมีดัชนี เช่น ขนาดรูพรุน

สัมพัทธ์ที่แสดงในตารางที่ 2.5 ในการจำแนกประเภทรูพรุน อย่างไรก็ตาม โมเลกุลของไนโตรเจนเป็นแบบโต้ตอบแบบสี่เท่า โดยทั่วไปในการดูดซับไนโตรเจน สามารถเห็นได้บ่อยในการสร้างโครงสร้างหลายชั้นเช่นเดียวกับในทฤษฎี BET แต่ปรากฏการณ์ที่เทียบเคียงกันไม่จำเป็นต้องเกิดขึ้นกับโมเลกุลอื่น ๆ ดังนั้นการจำแนกตามการมีอยู่ของโมเลกุลในรูพรุนอาจเป็นวิธีการที่ใช้ได้จริง จากที่กล่าวมาข้างต้น และใช้การจำแนกประเภท IUPAC เป็นมาตรฐาน ตารางที่ 2.5 นำเสนอการจำแนกประเภทตามการแสดงออกของฟังก์ชันที่กล่าวถึงข้างต้นและปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในรูพรุน รวมถึงการจำแนกประเภทของรูพรุนที่จัดโดยการพิจารณาวิธีการสังเคราะห์สำหรับวัสดุที่มีรูพรุนที่มีอยู่ [32]

**ตารางที่ 2.5** การจำแนกประเภทของวัสดุรูพรุน [32]

Category	Pore radius	Origin of pore	State of atoms or molecules in pore	Characterization methods	Relative pore radius*
Atom and molecule pore	Micropore <2 nm	Space among atoms or ions, Crystal lattice, Trace of solvent molecules after drying	Microporefilling, Atom, Ion, Molecule	Gas adsorption, TEM, XRD	<6
Aggregate Molecules pore	Micropore I 2-10 nm	Micelle or liquid crystal templating	Intermediate state of microporefilling and condensation, Molecules interact with pore wall	Gas adsorption, TEM, XRD	6-30
Liquid phase pore	Micropore II 2-50 nm	Phase separation, Space among particles	Capillary condensation, Liquid phase	Gas adsorption, SEM, XRD	30-141
Spatial pore	Micropore 50 nm<	Bubble, Cavity, Space among particles, Particle templating	The same on a flat surface, Pore is just a space	Porosimetry SEM	141<

\* Pore radius divided by diameter of nitrogen molecule (0.354 nm)

## 2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ภัทรวดี คล้ายคลึง [33] การวิจัยนำยางพารามาใช้ในการพัฒนาวัสดุดูดซับน้ำมันเพื่อใช้แทนวัสดุการค้า ได้ทำการปรับสูตรโฟมยางโดยใช้โพแทสเซียมโอเลตเพิ่มเข้าไป ในสัดส่วนต่าง ๆ พร้อมทั้งทำการปรับเปลี่ยนพื้นผิวโดยใช้ซีเมนนาโนซิงค์ออกไซด์และโตเดเคนไรออล เพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับน้ำมัน ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าโฟมยางที่มีการปรับสูตรและการปรับเปลี่ยนพื้นผิวนี้มีคุณสมบัติดีกว่าโฟมยางปกติ มีความไม่ชอบน้ำและมีรูพรุนมากกว่า ซึ่งทำให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำมันและ

สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้มากกว่า 5 ครั้ง วัสดุดูดซับจากโพลียาไมด์ที่ผ่านการปรับสูตรและการปรับเปลี่ยนพื้นผิวนี้จึงมีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการใช้แทนวัสดุดูดซับจากเส้นใยสังเคราะห์ได้ โดยมีประสิทธิภาพในการดูดซับเทียบเท่ากับวัสดุดูดซับทางการค้า การวิจัยนี้เสนอแนวทางในการพัฒนาวัสดุดูดซับที่มีประสิทธิภาพและสามารถใช้ทดแทนวัสดุดูดซับจากเส้นใยสังเคราะห์ได้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ อย่างยั่งยืนและมีประสิทธิภาพ

Siripak Songsaeng และคณะ [34] การวิจัยนี้เกี่ยวกับการใช้กราฟีนออกไซด์ (rGO) ในการปรับปรุงวัสดุดูดซับสีเขียวที่ประกอบด้วยน้ำยางธรรมชาติ (NR) โดยการเพิ่ม rGO เข้าไปใน NR เพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับน้ำมันปิโตรเลียม ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าการเพิ่ม rGO ทำให้ความสามารถในการดูดซับน้ำมันปิโตรเลียมของวัสดุดูดซับเพิ่มขึ้น โดยตัวอย่างที่ผ่านการปรับปรุงด้วย rGO (NRG) มีความสามารถในการดูดซับน้ำมันมากกว่าวัสดุดูดซับเชิงพาณิชย์ โดยที่ค่าน้ำมันดูดซับที่เหมาะสมที่สุดเป็นเวอร์ชันที่มีปริมาณ rGO เป็น 0.5 phr นอกจากนี้ สภาพแวดล้อมและความยืดหยุ่นของวัสดุดูดซับนี้ยังมีผลต่อความสามารถในการดูดซับน้ำมัน โดยมีการศึกษาและเปรียบเทียบกับกลไกการดูดซับเชิงพาณิชย์ สรุปว่า rGO ช่วยเพิ่มความแข็งแกร่งของวัสดุดูดซับเมื่อเทียบกับ NR บริสุทธิ์

Azwan Mat Lazim และคณะ [35] การวิจัยนี้เน้นการพัฒนาโพลียาไมด์ธรรมชาติที่มีรูพรุนขนาดใหญ่และชอบน้ำมัน (NR) โดยใช้กระบวนการวัลคาไนเซชันด้วยเมทานอลเป็นตัวทำละลาย เป็นการลดน้ำหนักของโมเลกุล NR ผ่านวิธีโพโตเคมีคอลออกซิเดชันเพื่อผลิตยางธรรมชาติเหลว (LNR) โพลียาไมด์ที่เกิดจาก LNR นี้มีลักษณะเป็นรูพรุนและผลิตโครงสร้างเซลล์เปิดที่เชื่อมต่อกัน โดยมีปริมาตรรูพรุนและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างกัน โดยที่มีความสามารถในการดูดซับน้ำมันคล้ายกับวัสดุที่มีเส้นใยฝ้าย โพลี LNR มีความสามารถในการดูดซับน้ำมันสูงและสามารถใช้ซ้ำได้มากถึง 20 ครั้ง โดยยังคงความสามารถในการดูดซับน้ำมันสูงไว้ในระดับสูงตลอดช่วงการใช้งาน ดังนั้น โพลี LNR นี้มีศักยภาพที่จะเป็นที่ยอมรับในการใช้งานเชิงพาณิชย์ เป็นวัสดุดูดซับที่มีคุณสมบัติน้ำมันและความทนทานที่ดี และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้หลายครั้ง

Li Zou และคณะ [36] การศึกษานี้เกี่ยวกับการเตรียมและการกำหนดลักษณะของโพลียาไมด์ธรรมชาติ High density polyethylene (HDPE) ที่เคลือบด้วยยางธรรมชาติ (Natural rubber latex foam; NRLF) ที่มีลักษณะพิเศษที่ไม่ชอบน้ำและเป็น Superoleophilic ทำให้มีความสามารถในการดูดซับน้ำมันและน้ำอย่างดี เป็นวัสดุที่มีศักยภาพในการแยกน้ำมันและน้ำ โดยได้รับการตรวจสอบแล้วว่า HDPE aerogel และวัสดุเคลือบ NRLF ที่ผ่านการเตรียมด้วยกระบวนการทำความเย็นจากสารละลาย HDPE ในตัวทำละลายไซลีน ได้แสดงสัญญาณวิทยาของพื้นผิวที่มีรูพรุนพร้อมคุณสมบัติโครงสร้างที่คล้ายกับอนุภาค NRLF ที่เคลือบด้วย HDPE aerogel ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความไม่ชอบน้ำโดยมุมสัมผัสน้ำคงที่ >150 โมดูลัสเฉื่อยและความแข็งแรงเฉื่อยของ NRLF ที่เคลือบด้วย HDPE aerogel ได้เพิ่มขึ้นเมื่อความ

เข้มข้นของโพล HDPE เพิ่มขึ้น โดย NRLF ที่เคลือบด้วย HDPE aerogel แสดงคุณสมบัติที่ดีทางกล โดยมีความทนทานที่ดีภายใต้สภาวะที่เป็นกรดและด่าง ซึ่งเป็นสิ่งที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในกระบวนการแยกน้ำมันและน้ำโดยการล้างคราบน้ำมัน นอกจากนี้ วัสดุที่มีรูพรุนนี้ยังมีความสามารถในการใช้ซ้ำได้ในการแยกน้ำมันและน้ำอีกด้วย

Dewi Sartika และคณะ [37] การศึกษานี้มุ่งเน้นการแยกนาโนคริสตัลไลน์เซลลูโลส (NCC) จากเส้นใยปอ (Ceiba pentandra) โดยใช้กระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยกรดไฮโดรไลซิสในช่วงเวลาต่างๆ และตรวจสอบลักษณะคุณสมบัติของเส้นใยเพื่อเสริมแรงให้กับเมมเบรนไฮโดรเจลแอลจินेट-นาโนคริสตัลลีน (Alg-NCC) พบว่า NCC และ Alg-NCC มีลักษณะเฉพาะโดยใช้เทคนิคต่างๆ โดย NCC มีการเปลี่ยนแปลงในกลุ่มฟังก์ชัน ลดความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลาง เพิ่มระดับผลึก และความเสถียรทางความร้อน การแยก NCC จากเส้นใยปอโดยใช้กระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยสารเคมีในเวลา 50 นาที เพื่อให้ได้ผลผลิต 38.92% ซึ่งเป็นการระบุความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความยาวถึงเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/d) และผลผลิตของ NCC อีกด้วย Alg-NCC ที่ผ่านการรวม NCC บนเมมเบรน Alg ไฮโดรเจลแสดงให้เห็นถึงการเพิ่มความแข็งแรงและการลดไซเนเรซิส ซึ่งทำให้ Alg-NCC มีศักยภาพในการนำไปใช้ในด้านต่างๆ ดังนั้น NCC สามารถนำไปใช้เป็นสารเสริมแรงในเมมเบรนไฮโดรเจล Alg-NCC ซึ่งมีศักยภาพในการนำไปใช้อย่างกว้างขวางในด้านต่างๆ

Kanokwan Yantaboot และ Phanthakan Kaewarsa [38] การปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยตาลด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อเสริมความแข็งแรงของวัสดุคอมโพสิตยางพาราธรรมชาติมีผลในการเพิ่มค่าอัตราส่วนระหว่างความยาวของเส้นใยต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) เมื่อเส้นใยเข้าสัมผัสกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำให้มีความแข็งแรงและยืดหยุ่นมากขึ้น การเพิ่มปริมาณของเส้นใยตาลยังช่วยเพิ่มความหนาแน่นของวัสดุคอมโพสิตยางพาราธรรมชาติได้ และลดรอยละการยุบตัวจากแรงอัดของวัสดุ เมื่อมีการเพิ่มปริมาณเส้นใย การศึกษาดังกล่าวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดยังพบว่าเส้นใยตาลจะแทรกตัวอยู่ระหว่างเซลล์พารา ผลลัพธ์ที่ได้ช่วยเสริมคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ ซึ่งมีศักยภาพในการนำไปใช้ในหลากหลายด้าน

Pungpai, P., Watankornsiri, A., และ Kangkun, N. [39] การศึกษานี้ทดลองใช้วัสดุที่มีรูพรุนนาโนธรรมชาติ เพื่อดูดซับคราบไขมันในสภาพที่แตกต่างกันของน้ำมัน ผลการวิจัยพบว่า กาบมะพร้าวและผักตบชวาแบบแห้งมีประสิทธิภาพในการดูดซับคราบไขมันทุกชนิดอย่างดี โดยเฉพาะกาบมะพร้าวมีประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับคราบไขมันทุกชนิด โดยที่สามารถดูดซับได้ในระดับที่ดีที่สุด และชนิดของน้ำมันที่กาบมะพร้าวดูดซับได้มากที่สุดคือ น้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ใช้งาน (100%) เนื่องจากกาบมะพร้าวมีลักษณะที่เหมาะสมในการดูดซับน้ำมัน ส่วนผักตบชวาแบบแห้งก็มีประสิทธิภาพในการดูดซับคราบไขมันอยู่ในระดับที่ดี และชนิดของน้ำมันที่ผักตบชวาแบบแห้งดูดซับได้มากที่สุดคือ น้ำมันสัตว์

และน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้งานแล้ว (96% และ 96%) เนื่องจากผักตบชวาแบบแห้งมีลักษณะที่เหมาะสมในการดูดซับน้ำมัน เช่น มีน้ำหนักเบา และมีรูพรุนขนาดใหญ่ภายในวัสดุโดยไม่มีน้ำอยู่ในโพรงที่คอยกีดขวางการดูดซับคราบน้ำมันชนิดต่าง ๆ จึงทำให้น้ำมันเข้าไปในโพรงได้มากทำให้ผักตบชวาแบบแห้งดูดซับคราบน้ำมันได้ดี

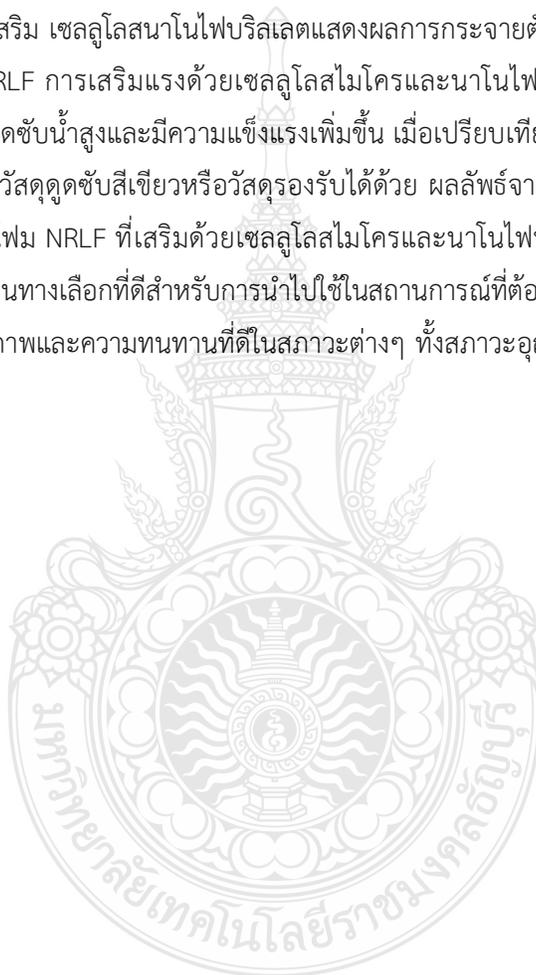
เอื้อการย์ ด้านชัยประเสริฐ และคณะ [40] การวิจัยนี้เป็นการศึกษาเรื่องประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำมันของพืชชื่อว่า *Hanguana malayana* (Jack) Merr. ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อสำรวจปริมาณและเวลาที่เหมาะสมของใยและวัตถุก่อตัวก่อนการปรับปรุงของพืชนี้ในการดูดซับน้ำมัน และการศึกษาประสิทธิภาพของใยและวัตถุก่อตัวก่อนการปรับปรุงในการดูดซับน้ำมัน ในการศึกษาครั้งนี้ใช้น้ำเสมือนสร้างที่เตรียมโดยการผสมน้ำมันพืชกับน้ำ เพื่อทดลองดูดซับน้ำมัน ผลลัพธ์ของการวิจัยพบว่า การใช้ใยและวัตถุก่อตัวก่อนการปรับปรุงของ *Hanguana malayana* (Jack) Merr. ในปริมาณ 4 กรัม และเวลา 10 นาที ให้ประสิทธิภาพการดูดซับน้ำมันที่ดีที่สุดที่ 98.97% และ 96.22% ตามลำดับ ซึ่งช่วยเสริมสร้างความเข้าใจเกี่ยวกับศักยภาพในการใช้พืชชนิดนี้ในการดูดซับน้ำมันได้ด้วยประสิทธิภาพสูง

Huimin Zhang และคณะ [41] การศึกษานี้เน้นการสร้าง superabsorbent ที่มีคุณสมบัติพิเศษ เช่น มีต้นทุนต่ำ ประสิทธิภาพสูง และสามารถรีไซเคิลได้ เพื่อใช้ในการล้างน้ำมันที่หกรั่วไหลเสนอกลยุทธ์ง่ายๆ ในการผลิตโฟมที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้จากเส้นใยนุ่มที่เหลือทิ้งทางการเกษตร โดยใช้โฟมเซลลูโลสนาโนไฟบริลส์ (KNFs) ที่ได้มาจากเส้นใยนุ่ม เรียกว่า KNF แสดงคุณสมบัติเป็น Superhydrophobic ซึ่งมีโครงสร้างที่มีรูพรุนในลำดับชั้นที่ระดับไมโคร และมีความหนาแน่นต่ำมาก โดยสามารถดูดซับน้ำมันได้ดี (126.8–320.4 กรัม/กรัม) และมีประสิทธิภาพในการแยกน้ำมันและน้ำวิธีการง่ายๆ ที่ออกแบบมาสำหรับการนำ KNF กลับมาใช้ใหม่ได้อย่างง่ายดายด้วยระบบปล่อยน้ำมันแบบโฮมเมด ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการนำกลับมาใช้ใหม่ได้อย่างสมบูรณ์ และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้จำนวนมาก โดยที่ยังคงดูดซับน้ำมันได้ดีเยี่ยมและประสิทธิภาพการปลดปล่อย ข้อดีเหล่านี้ชัดเจนว่า KNF เป็นทางเลือกที่ดีสำหรับการบำบัดน้ำมันที่หกรั่วไหล ซึ่งสรุปอย่างชัดเจนว่า KNF เป็นทางเลือกที่ดีสำหรับการบำบัดน้ำมันที่หกรั่วไหลและควรได้รับความสนใจในการนำไปใช้ในการแยกน้ำมันและน้ำในอนาคต

Jintao Wang และคณะ [42] การศึกษานี้เน้นการปรับปรุงประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำมันของเส้นใยนุ่ม โดยใช้การบำบัดด้วยตัวทำละลายต่างๆ เช่น น้ำ HCl NaOH NaClO<sub>2</sub> และคลอโรฟอร์ม เพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับน้ำมันของเส้นใย ผลลัพธ์จากการวิจัยนี้โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ต่างๆ เช่น FTIR, SEM, XRD, และ XPS แสดงให้เห็นว่าเส้นใยนุ่มที่ผ่านการบำบัดด้วยตัวทำละลายต่างๆ มีความสามารถในการดูดซับน้ำมันที่เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยนุ่มดิบ โดยเฉพาะเส้นใยนุ่มที่ผ่านการบำบัดด้วย NaClO<sub>2</sub> แสดงให้เห็นถึงการดูดซับน้ำมันสูงสุด นอกจากนี้ เส้นใยนุ่มที่ผ่านการบำบัดด้วย

ตัวทำละลายยังแสดงความสามารถในการนำกลับมาใช้ใหม่ได้ดีขึ้น ซึ่งเป็นสัญญาณที่ดีต่อการใช้ในการนำน้ำมันกลับมาใช้ใหม่ในอนาคต

Sirilak Phomrak และคณะ [43] การศึกษานี้เน้นการพัฒนาโพลีเอทิลีนเทอร์ฟทาเลต (NRLF) โดยการเสริมด้วยเซลลูโลสไมโครและนาโนไฟบริลเลตในปริมาณต่างๆ เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและความสามารถในการดูดซับน้ำมันของโพลีเอทิลีนเทอร์ฟทาเลต ผลลัพธ์จากการวิจัยพบว่าโพลีเอทิลีนเทอร์ฟทาเลตที่เสริมด้วยเซลลูโลสไมโครและนาโนไฟบริลเลตแสดงคุณสมบัติที่ดีในการดูดซับน้ำมัน โดยเฉพาะเมื่อเปรียบเทียบกับโพลีเอทิลีนเทอร์ฟทาเลตที่ไม่ได้รับการเสริม เซลลูโลสนาโนไฟบริลเลตแสดงผลการกระจายตัวที่ดีกว่าและมีการยึดเกาะที่สูงขึ้นกับเมทริกซ์ NRLF การเสริมแรงด้วยเซลลูโลสไมโครและนาโนไฟบริลเลตทำให้โพลีเอทิลีนเทอร์ฟทาเลตมีความสามารถในการดูดซับน้ำสูงและมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับโพลีเอทิลีนเทอร์ฟทาเลตที่ไม่ได้รับการเสริม และยังสามารถใช้เป็นวัสดุดูดซับสีเขียวหรือวัสดุรองรับได้ด้วย ผลลัพธ์จากการทดสอบแสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติที่ดีขึ้นของโพลีเอทิลีนเทอร์ฟทาเลตที่เสริมด้วยเซลลูโลสไมโครและนาโนไฟบริลเลตในการดูดซับน้ำและความแข็งแรง ทำให้เป็นทางเลือกที่ดีสำหรับการนำไปใช้ในสถานการณ์ที่ต้องการความสามารถในการดูดซับน้ำมันที่มีประสิทธิภาพและความทนทานที่ดีในสภาวะต่างๆ ทั้งสภาวะอุณหภูมิและสภาวะความดัน



### บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินงาน

กิจกรรม	ระยะเวลา (เดือน)												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
ศึกษาและค้นคว้า ข้อมูลงานวิจัยและวาง แผนการดำเนินงาน	— — —	— — —											
จัดเตรียมอุปกรณ์และ วัสดุที่ใช้ในการวิจัย		— —											
เตรียมเซลล์จาก เส้นใยุ่น			— — —										
สอบหัวข้อโครงการ					— —								
เตรียมการขึ้นรูปยาง โฟมเซลล์						— — —							
ทดสอบสมบัติต่างๆ							— — — — —						
วิเคราะห์และสรุปผล การทดลอง									— — —	— — —			
จัดทำรูปเล่มและ ตีพิมพ์วารสาร										— — — — —			

— — แสดงแผนการดำเนินงาน

— แสดงแผนการดำเนินงานจริง

### 3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 3.2.1 เส้นใยปุน (Kapok fiber)
- 3.2.2 น้ำยางธรรมชาติแอมโมเนียมสูง HANR 60% DRC
- 3.2.3 น้ำกลั่น (Distilled water)
- 3.2.4 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH)
- 3.2.5 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)
- 3.2.6 กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)
- 3.2.7 สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 10 wt% (Potassium hydroxide, KOH)
- 3.2.8 สารละลายกำมะถัน 50 wt% (Sulphur, S)
- 3.2.9 สารละลายซิงก์ไดเอทิลไดไทโอคาร์บาเมต 50 wt% (Zinc diethyldithiocarbamate, ZDEC)
- 3.2.10 สารละลายซิงค์เมอร์แคปโตเบนโซไทโธล 50 wt% (Zinc-2 mercaptobenzothiazole, ZMBT)
- 3.2.11 สารละลายวิงสแตย์แอล 50 wt% (Wingstay L)
- 3.2.12 สารละลายซิงค์ออกไซด์ 50 wt% (Zinc oxide, ZnO)
- 3.2.13 Diphenyl guanidine dispersion 33%
- 3.2.14 Sodium silicofluoride dispersion 12.5%

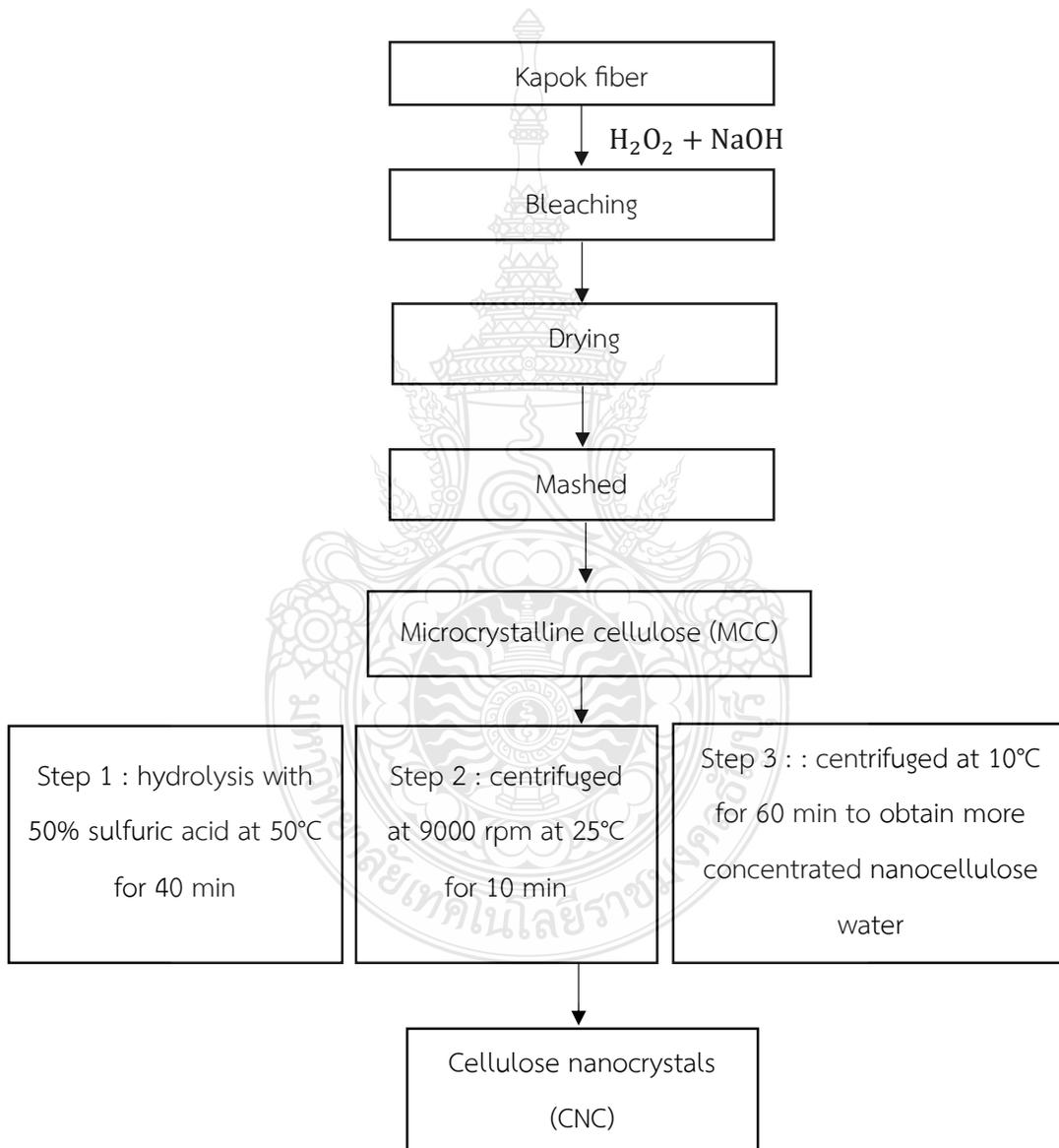
### 3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 3.3.1 บีกเกอร์ (Beaker)
- 3.3.2 ช้อนตักสาร (Spatula)
- 3.3.3 แท่งแก้ว (Stirring rod)
- 3.3.4 กระบอกตวง (Cylinder)
- 3.3.5 หลอดหยด (Dropper)
- 3.3.6 เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer)
- 3.3.7 คีมคีบ (Forcep)
- 3.3.8 จานเพาะเชื้อ (Petri dish)
- 3.3.9 หลอดทดลอง (Test tube)
- 3.3.10 แท่งแม่เหล็กกวนสาร (Magnetic bar)
- 3.3.11 กระดาษลิตมัส (Litmus paper)
- 3.3.12 ถาดขึ้นรูปชิ้นงาน (Forming tray)

- 3.3.13 เครื่องชั่งแบบวิเคราะห์ ชนิดอ่านค่าได้ละเอียด 0.0001 กรัม (Analytical balance)
- 3.3.14 เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifugation)
- 3.3.15 เครื่องตีน้ำยาง

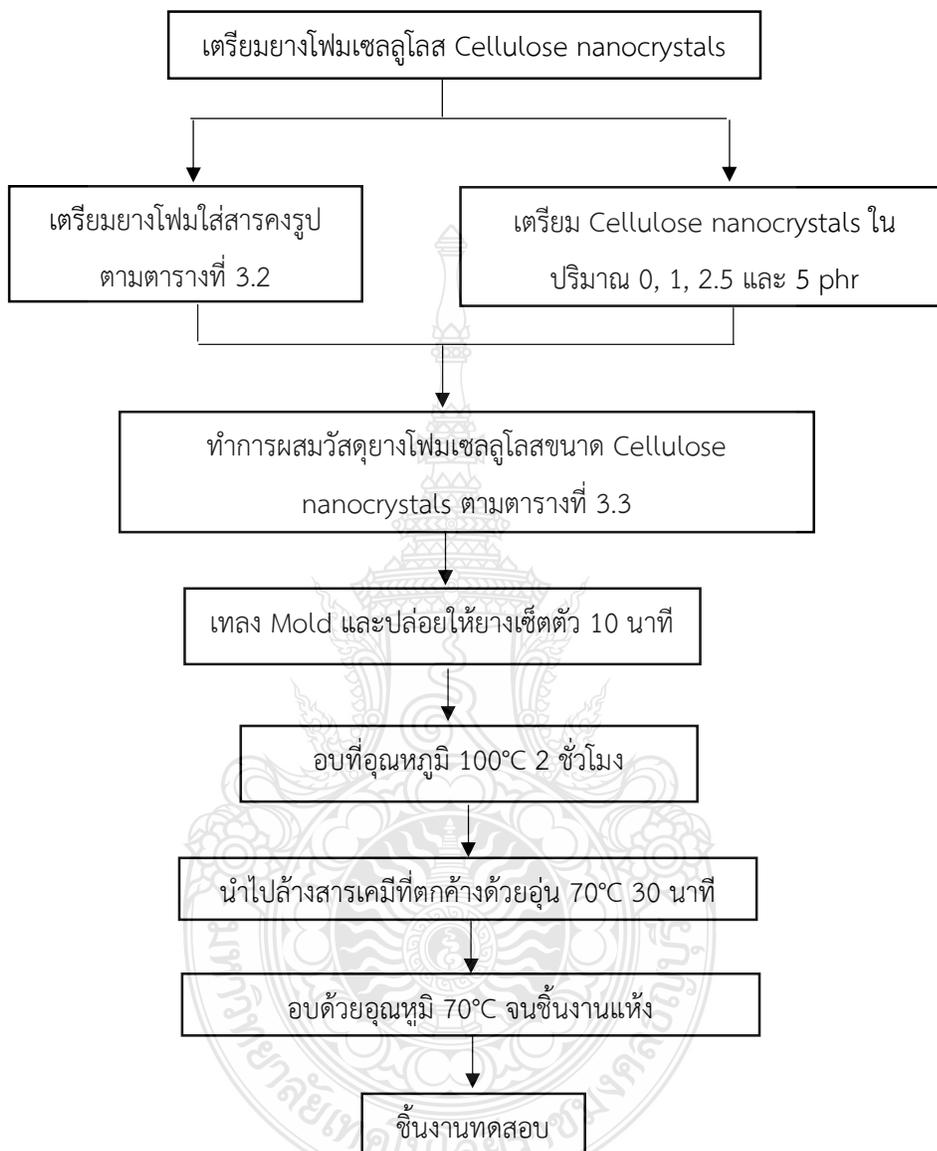
### 3.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

#### 3.4.1 การเตรียมเส้นใย Cellulose nanocrystals จากเส้นใยนุ่ม



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการเตรียมเส้นใย Cellulose nanocrystals จากเส้นใยนุ่ม

### 3.4.2 การเตรียมยางพอมเซลลูโลสขนาด Cellulose nanocrystals เพื่อขึ้นรูปชิ้นงาน



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการเตรียมยางพอมเซลลูโลสขนาด Cellulose nanocrystals เพื่อขึ้นรูปชิ้นงาน

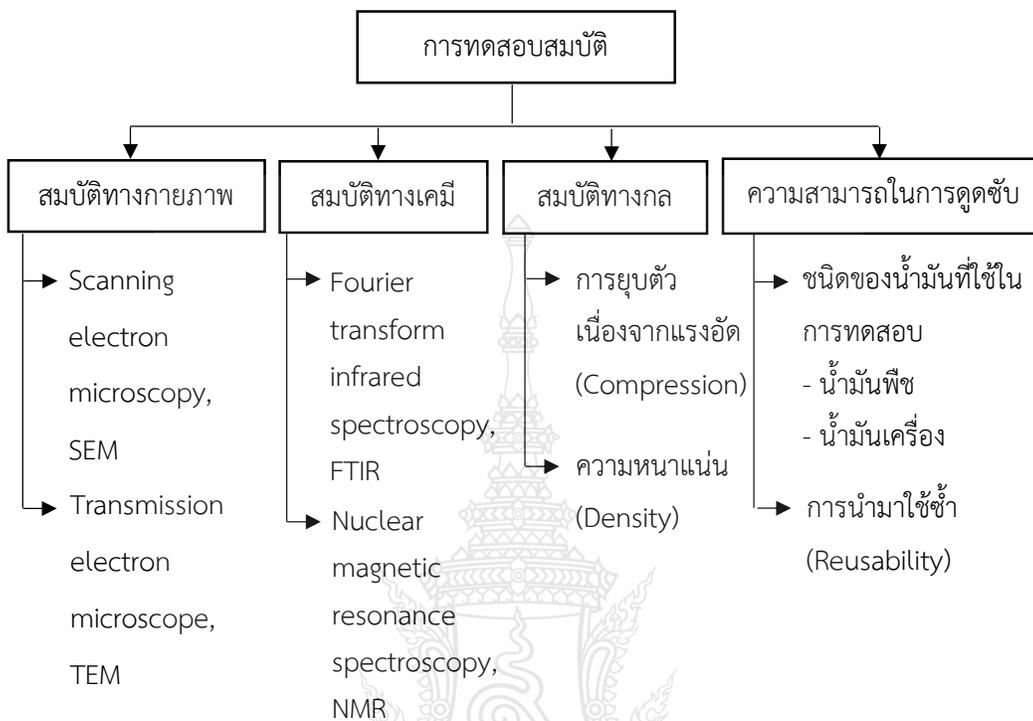
**ตารางที่ 3.2** สูตรการขึ้นรูปวัสดุยางพอมเซลลูโลส

Chemical substances	Weight
	Dry (phr)
NR latex 60% DRC	100
Potassium-Oleate solution 10%	1.0
Sulphur dispersion 50%	2.5
ZDEC dispersion 50%	1.0
ZMBT dispersion 50%	1.0
Wingstay L dispersion 50%	1.0
ZnO dispersion 50%	5.0
Diphenyl guanidine dispersion 33%	1.0
Sodium silicofluoride dispersion 12.5%	0.5
Cellulose nanocrystals	0, 1, 2.5, 5

**ตารางที่ 3.3** การผสมวัสดุยางพอมเซลลูโลส

Order	Ingredient	Mixing time (min)
1	Latex (DRC 60%)	1
2	10% Potassium-Oleate, Sulphur, ZDEC, ZMBT, Wingstay L, Cellulose nanocrystals	3
3	Zinc oxide, Diphenyl guanidine	1
4	SFF dispersion	1

### 3.4.3 การทดสอบสมบัติ



รูปที่ 3.3 แผนการทดสอบวัสดุอย่างโพลีเอทิลีน

## 3.5 การทดสอบสมบัติต่างๆ

### 3.5.1 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ

3.5.1.1 ทดสอบลักษณะพื้นฐานวิทยาศาสตร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electronic microscopy, SEM)

1) การเตรียมตัวอย่าง

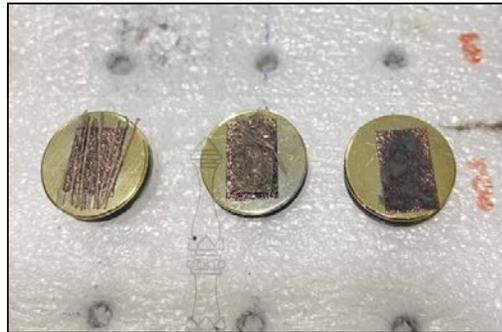
- เตรียมตัวอย่างเส้นใยที่ไม่ผ่านการฟอก และเส้นใยไมโครเซลลูโลสที่ผ่านการฟอกทำความสะอาดแล้ว

2) วิธีการทดสอบ

- นำตัวอย่างที่ตัดไว้ติดลงบน Stub ที่ถูกติดด้วยเทปคาร์บอน ดังแสดง

ในรูปที่ 3.4

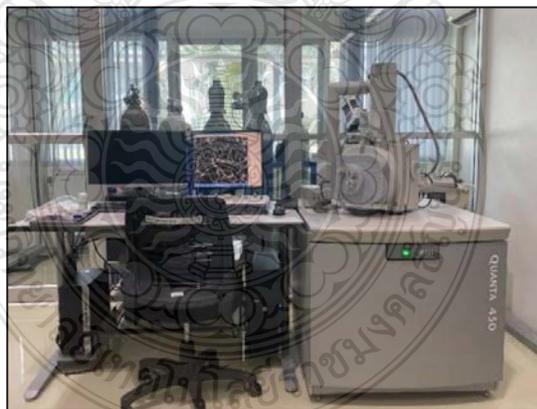
- จากนั้นนำไปเคลือบทองเป็นเวลา 2 นาที ดังรูปที่ 3.4 กระแสไฟอยู่ที่ 15 มิลลิแอมป์ ทำการแวคคัม  $9 \times 10^{-2}$  ปาสคาล เข้าเครื่องสุญญากาศเป็นเวลา 5 นาที



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างการติดตัวอย่างลงบน Stub ที่ถูกติดด้วยเทปคาร์บอนและเคลือบทอง

- นำไปส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดด้วยกำลังขยายต่างๆ ที่

ต้องการ



รูปที่ 3.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

3.5.1.2 ทดสอบลักษณะพื้นฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบทรานสมิสชัน (Transmission electron microscope, TEM)

1) การเตรียมตัวอย่าง

- เตรียมตัวอย่างน้ำนาโนเซลลูโลสจากเส้นใยุ่น

## 2) วิธีการทดสอบ

- นำผงตัวอย่างมาทำให้กระจายตัวในของเหลวตัวกลาง ของเหลวที่นิยม คือ น้ำปราศจากไอออน (DI water) และ แอลกอฮอล์
- นำไปเขย่าด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง (Sonication) ประมาณ 15 นาที ระยะเวลา และระดับความแรงขึ้นกับ สมบัติของผงตัวอย่าง
- หยดตัวอย่างที่อนุภาคกระจายตัวดีแล้วลงบนแผ่นรองรับตัวอย่าง (grid) และปล่อยให้แห้ง จากนั้นจึงนำไป วิเคราะห์ด้วยเครื่อง TEM



รูปที่ 3.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบทรานสมิส (TEM)

### 3.5.2 การทดสอบสมบัติทางเคมี

#### 3.5.2.1 ทดสอบสมบัติทางเคมีผิวด้วยเครื่องวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน (Fourier transform infrared spectroscopy, FT-IR)

##### 1) วัสดุที่ใช้

- เครื่อง Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR)
- ที่คีบ
- ชิ้นงานทดสอบ

##### 2) วิธีการทดสอบ

- เปิด Stabilizer แล้วเปิดสวิตช์ที่ตัวเครื่อง FTIR (ด้านหลังเครื่อง) และเปิดคอมพิวเตอร์ จากนั้นเข้าโปรแกรม
- เมื่อเข้าหน้าโปรแกรมแล้ว กด Scan background (แสกนเพียงครั้งเดียว)
- ใช้ Kimwipes (กระดาษสำหรับเช็ดทำความสะอาด) เช็ดทำความสะอาดอุปกรณ์ และแท่นวางชิ้นงาน ก่อนใช้
- ตัดตัวอย่างให้มีขนาดใหญ่กว่าหัวกดชิ้นงานเล็กน้อย และคีบไปวางบนแท่นวางชิ้นงาน
- ตั้งชื่อชิ้นงานที่นำไปทดสอบในโปรแกรม ตั้ง Start  $4000\text{ cm}^{-1}$ , end  $650\text{ cm}^{-1}$  และ ตั้ง Accumulations 16 scans
- จากนั้นกด scan และหมุนแรงกด โดยดูจากกราฟที่ปรากฏ ถ้ามีพีคขึ้นชัดเจนแล้ว ไม่ต้องหมุนแรงกดเพิ่ม (ถ้าหากกราฟมีฝั่งใดสูง ปรับที่ Process เลือกที่ Baseline กราฟจะปรับระดับลง)
- รอจนกระทั่งเครื่อง Scan เสร็จครบ 100% จะได้ Spectrum บน Background จากนั้นนำไปวิเคราะห์ผล



รูปที่ 3.7 เครื่องวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน (FT-IR)

3.5.2.2 ทดสอบสมบัติทางเคมีการวิเคราะห์หมู่โครงสร้างด้วย เครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโคปี (Nuclear magnetic resonance spectroscopy, NMR)



รูปที่ 3.8 เครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโคปี (NMR)

### 3.5.3 การทดสอบสมบัติทางกล

#### 3.5.3.1 ทดสอบสมบัติทางกลการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (Compression)

การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 395 เป็นการวัดความสามารถในการยืดหยุ่นของวัสดุโดยการอัดตัวอย่างและนำไปอบที่อุณหภูมิที่กำหนด เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในความยืดหยุ่นของวัสดุ ขั้นตอนการทดสอบประกอบด้วย การตัดชิ้นงานเป็นรูปวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 29 มิลลิเมตร สูง 19 มิลลิเมตร และวางชิ้นตัวอย่างในแผ่นเหล็กอัด จากนั้นกดให้ยุบตัว 50% จากความสูงเดิม และทิ้งไว้ประมาณ 15 นาที ต่อมาคือการนำตัวอย่างไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 22 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำออกจากตู้อบและวางไว้ประมาณ 30 นาที เพื่อให้ตัวอย่างเย็นลง และทำการวัดความสูงของชิ้นตัวอย่าง เพื่อใช้ในการคำนวณผลลัพธ์ ดังสมการที่ (3.1)



รูปที่ 3.9 เครื่อง compression

$$\text{Compression set \%} = \left( \frac{t_0 - t}{t_0} \right) \times 100 \quad (3.1)$$

$t$  = ความหนาหลังการทดสอบ (มิลลิเมตร)

$t_0$  = ความหนาเดิม (มิลลิเมตร)

### 3.5.3.2 ทดสอบความหนาแน่น (Density)

การทดสอบดัดแปลงจากมาตรฐาน ASTM D 3574-95 โดยตัดชิ้นยางโพนที่  
ใช้ในการทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมนำชิ้นงานมาชั่งน้ำหนักคำนวณหาความหนาแน่นของตัวชิ้นตัวอย่างโดย  
ใช้สูตรดังสมการที่ (3.2)

$$D = \frac{M}{V} \quad (3.2)$$

$D$  = ความหนาแน่นของชิ้นงานทดสอบ (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)

$M$  = น้ำหนักชิ้นทดสอบ (กรัม)

$V$  = ปริมาตรชิ้นทดสอบ (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

### 3.5.4 การทดสอบความสามารถในการดูดซับ

#### 3.5.4.1 ทดสอบความสามารถในการดูดซับน้ำมัน (Oil absorbent)

##### 1) วัสดุที่ใช้

- น้ำมันพืช น้ำมันเครื่อง
- จานเพาะเชื้อ
- ที่คืบ
- ชิ้นงานทดสอบ

##### 2) วิธีการทดสอบ

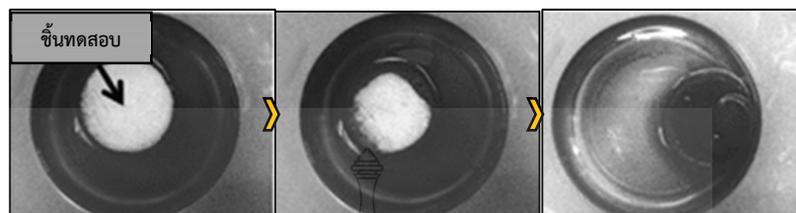
- ตัดชิ้นทดสอบ ให้มีขนาด 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร
- จากนั้นนำชิ้นทดสอบไปใส่ในจานเพาะเชื้อ (Petri dish) ที่เตรียมเท

น้ำมันไว้ จับเวลา 15 30 60 120 180 และ 1440 นาที ตามลำดับเป็นเวลาในการทดสอบ เมื่อครบเวลา  
นำชิ้นงานขึ้นจากจานเพาะเชื้อเช็ดน้ำมันที่ไม่ได้อยู่ในยางโพนออกพอประมาณ จากนั้นชั่งน้ำหนักและ  
คำนวณค่าการดูดซับ (Oil sorption capacity) ในสมการที่ (3.3)

$$\text{Oil sorption capacity (g/g)} = \frac{M_s - M}{M_i} \quad (3.3)$$

โดยที่ *Ms* คือ น้ำหนักหลังการดูดซับ (น้ำหนักโฟมและน้ำมัน ในหน่วยกรัม)

*Mi* คือ น้ำหนักก่อนการดูดซับ (น้ำหนักโฟม ในหน่วยกรัม)



รูปที่ 3.10 วิธีการทดสอบความสามารถในการดูดซับน้ำมัน



## บทที่ 4

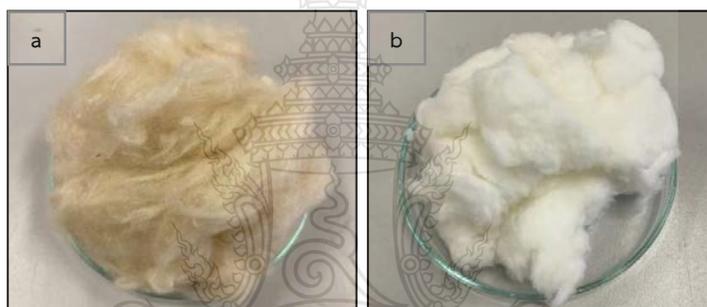
### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

#### 4.1 สมบัติของเส้นใย

##### 4.1.1 สมบัติทางกายภาพ

##### 4.1.1.1 ผลการเตรียมเส้นใย

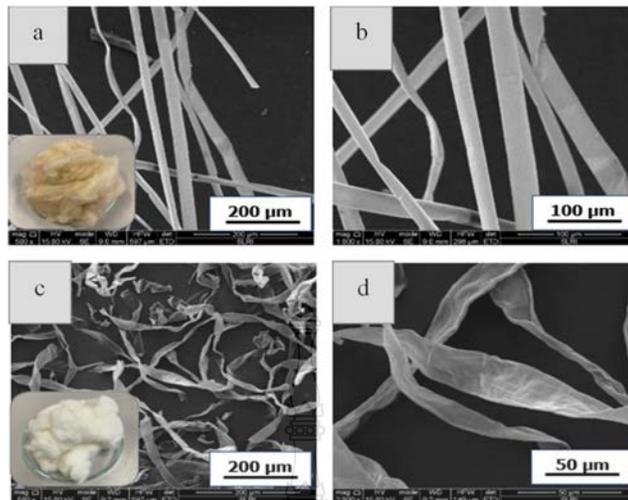
ทำการปรับปรุงเส้นใยนุ่นโดยใช้วิธีการทางเคมี คือการปรับปรุงผิวด้วย NaOH และ  $H_2O_2$  จากรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าเส้นใยที่ผ่านการทำความสะอาด (b) เป็นเส้นใยที่พร้อมใช้งาน และสามารถนำไปลดขนาดเส้นใยให้มีขนาดที่เล็กลงตามความต้องการได้



รูปที่ 4.1 ภาพของ (a) เส้นใยนุ่นดิบ, (b) เส้นใยนุ่นที่ทำความสะอาดด้วยวิธีทางเคมี

##### 4.1.1.2 ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยนุ่น

ทำการศึกษาโดยการนำเส้นใยนุ่นที่ไม่ผ่านการปรับปรุงเทียบกับที่มีการปรับปรุงด้วย NaOH และเส้นใยที่ไม่ผ่านการฟอกขาวด้วย  $H_2O_2$  ด้วยเครื่อง Scanning electron microscope (SEM) พบว่าการทำความสะอาดเส้นใยด้วยวิธีทางเคมีทำให้เส้นใยมีความบริสุทธิ์มากขึ้น [37] การสกัดเซลลูโลสบริสุทธิ์ต้องใช้วิธีการเตรียมพื้นผิวทางเคมี ซึ่งรวมถึงการใช้อัลคาไลน์และการฟอกขาว เพื่อล้างออกสารสกัดและสารตกค้างที่อาจติดอยู่บนพื้นผิวของเซลลูโลส จากการทดลองพบว่าการเตรียมพื้นผิวโดยใช้อัลคาไลน์จะช่วยกำจัดเฮมิเซลลูโลส ในขณะที่การฟอกขาวจะช่วยกำจัดลิกนิน การศึกษาเกี่ยวกับองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยทำให้เราเข้าใจถึงวิธีการเตรียมพื้นผิวที่เหมาะสมสำหรับการสกัดเซลลูโลสบริสุทธิ์ได้ดียิ่งขึ้น และช่วยให้เราปรับปรุงกระบวนการให้ได้ผลลัพธ์ที่ต้องการได้อย่างเหมาะสม [44] รูปที่ (4.2c, 4.2d) เป็นการลดขนาดเส้นใยนุ่นโดยการปั่นทำให้พื้นผิวสัมผัสของเส้นใยมากขึ้นและได้เส้นใยมีขนาดไมโครเซลลูโลส



รูปที่ 4.2 ผลการทดสอบลักษณะสัณฐานวิทยาของ (a,b) KF, (c,d) MCC ถูกสังเกตโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

4.1.1.3 การทดสอบนาโนเซลลูโลสหลังจากผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิสผ่านแสงโพลาซ์

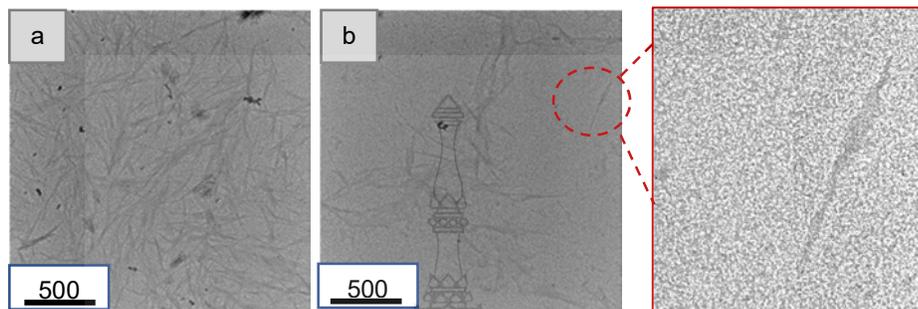
ตารางที่ 4.1 ไฮโดรไลซิส และสังเคราะห์ KF-CNC

KF-CNC (Deep yellow, translucent solution Yield = 72%)		
normal light	polarized light	CNC gel

หลังจากกระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยกรด ผลลัพธ์ของผลผลิตของ KF-CNC คือ 72% ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างสูงในการสังเคราะห์เซลลูโลสนาโนคริสตัลจากเส้นใยุ่น [37] สารแขวนลอยที่เป็นน้ำของ KF-CNC มีความคงตัวหลังจาก 96 ชั่วโมง ซึ่งระบุคุณภาพของเซลลูโลสในสารแขวนลอยที่เป็นน้ำ KF-

CNC ตารางที่ 4.1 แสดงสารแขวนลอยที่เป็นน้ำภายใต้สภาวะไฮโดรไลซิส ภายใต้แสงปกติและภายใต้แสงโพลาไรซ์แบบส่องผ่าน [45]

#### 4.1.1.4 ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของนาโนเซลลูโลส



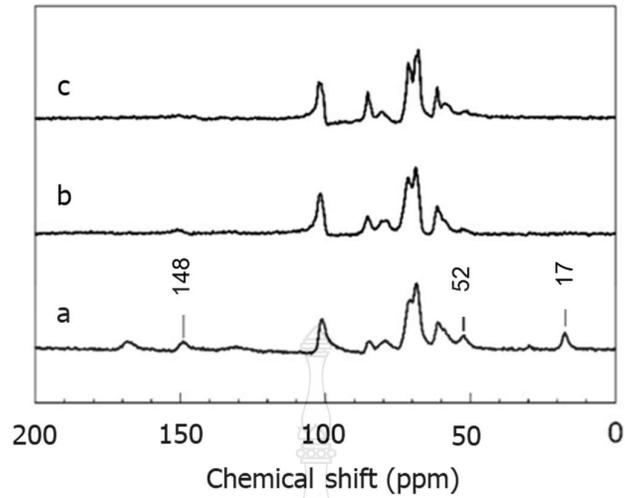
รูปที่ 4.3 สัณฐานวิทยาของ KF-CNC (a,b) ถูกสังเกตโดยใช้เครื่อง TEM รูปที่ 4.3a และ 4.3b แสดงให้เห็นภาพจาก TEM ของ KF-CNC ผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิส

จากการศึกษาสัณฐานวิทยาของ KF-CNC จากเครื่อง TEM ทำให้เห็นเส้นใยนุ่มที่ผ่านการไฮโดรไลซิส ขนาดของเส้นใยนุ่มมีขนาดระดับนาโนเมตร [37] ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการไฮโดรไลซิสสามารถลดขนาดเส้นใยได้ถึงระดับนาโนเมตร จากรูปที่ 4.3 ยังแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวกันอย่างอิสระของเซลลูโลสนาโนคริสตัล [45]

#### 4.1.2 สมบัติทางเคมี

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของนาโนเซลลูโลสโดยใช้เทคนิคโปรตอนนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโคป (NMR)

จากรูปที่ 4.4 NMR จะเห็นได้ว่า หลังการปรับปรุงเส้นใยด้วยวิธีทางเคมี (b,c) มีคลื่นที่หายไปคือ 17, 52, 148 ppm พบว่าคลื่นที่หายไปเป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างวงแหวนอะโรมาติกและกลุ่มเมทอกซิลของลิกนินถูกกำจัดอย่างสมบูรณ์รวมถึงเฮมิเซลลูโลส [45] ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในส่วนของการปรับปรุงเส้นใยด้วยวิธีทางเคมีทำให้เส้นใยมีความบริสุทธิ์มากขึ้น



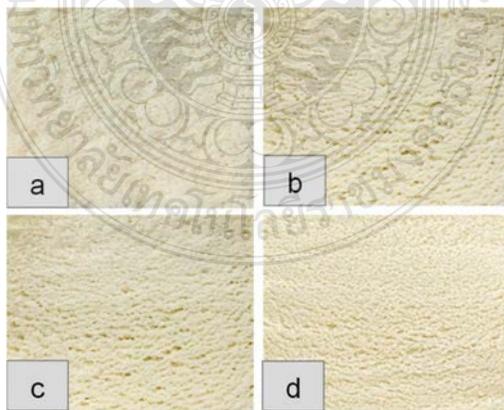
รูปที่ 4.4 ผลของสเปกตรัม NMR ของ (a) เส้นใยุ่นดิบ, (b) เส้นใยุ่นที่ทำความสะอาดด้วยวิธีทางเคมี, (c) เส้นใยที่ผ่านการไฮโดรไลซิสด้วยกรด

## 4.2 สมบัติของยางโฟมเซลลูโลส

### 4.2.1 สมบัติทางกายภาพ

#### 4.2.1.1 ผลการเตรียมยางโฟมเซลลูโลส

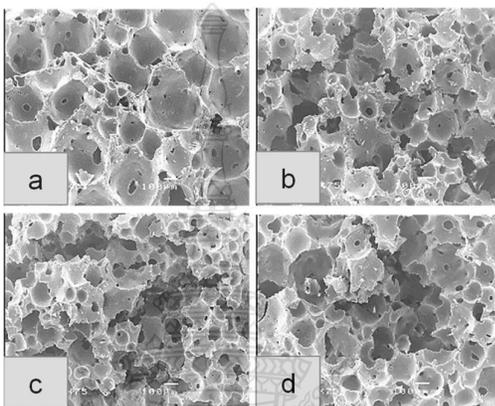
ทำการเตรียมยางโฟมเซลลูโลสโดยที่เติมไมโครเซลลูโลสและนาโนเซลลูโลส ในปริมาณ 0, 1, 2.5 และ 5 phr ตามลำดับลงในยางโฟมและสังเกตความแตกต่าง



รูปที่ 4.5 โครงสร้างเซลล์ของยางโฟมธรรมชาติและยางโฟมเซลลูโลส (a) RF, (b) CRF-1phr, (c) CRF-2.5phr, (d) CRF-5phr

ยางโฟมเซลลูโลสขึ้นรูปโดยใช้ส่วนผสมน้ำยางธรรมชาติกับ KF-CNC ที่ปริมาณแตกต่างกัน (0 phr, 1 phr, 2.5 phr และ 5 phr) จากรูปที่ 4.5 จะแสดงโครงสร้างเซลล์ของ RF,CRF ที่มีรูพรุนจำนวนมากและขนาดแตกต่างกัน [38] ซึ่งหลังจากเพิ่ม KF-CNC แล้ว จะแสดงในรูปที่ 4.5b-4.5d

4.2.1.2 ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของยางโฟมธรรมชาติและยางโฟมเซลลูโลส ด้วยเครื่อง scanning electron microscope (SEM)

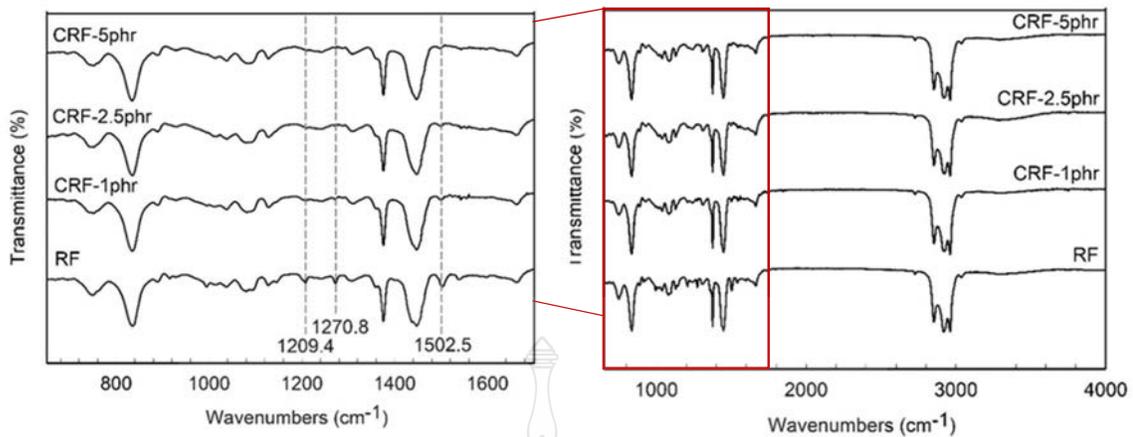


รูปที่ 4.6 ผลของ SEM ที่กำลังขยาย 75x ของ RF และ CRF (a) RF, (b) CRF-1phr, (c) CRF-2.5phr, (d) CRF-5phr

จากผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 4.6 แสดงโครงสร้างของ RF และ CRF ที่ปริมาณ KF-CNC ที่ 1, 2.5 และ 5 phr ตามลำดับ รูปที่ 4.6a แสดงขนาดรูพรุนโดยเฉลี่ยของ RF คือ  $400\ \mu\text{m}$  ซึ่งใหญ่กว่า KF-CNC (รูปที่ 4.6b-4.6d) จะแสดงขนาดรูพรุนเฉลี่ยคือ  $200\ \mu\text{m}$  โครงสร้างเซลล์ของ RF และ CRF เป็นเซลล์เปิด นั่นเป็นคุณสมบัติที่ดีในการดูดซับน้ำมัน เมื่อ KF-CNC และ RF ผสมกัน KF-CNC จะกระจายตัวไปทั่วยางโฟม ทำให้ตำแหน่งของ KF-CNC กระจายอย่างอิสระ การกระจายของ KF-CNC นี้ทำให้ยากในการสร้างฟองอากาศขนาดใหญ่ ซึ่งส่งผลให้มีความเป็นรูของโฟมเล็กลง [46]

#### 4.2.2 สมบัติทางเคมี

ผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันเคมีด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared (FTIR)



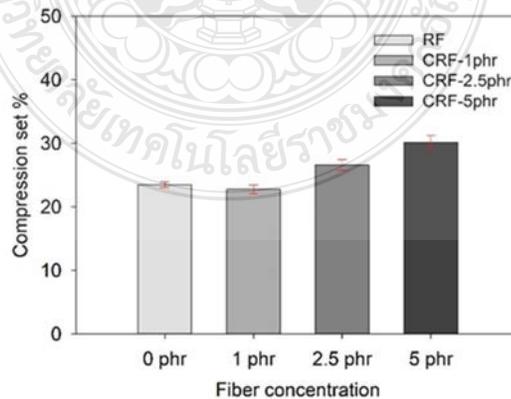
รูปที่ 4.7 ผลของสเปกตรัม FTIR ของ RF และ CRF

ค่าจุดสูงสุดที่ 1209, 1270 และ 1502  $\text{cm}^{-1}$  ของ RF ที่แสดงในกราฟ FTIR พบว่าจุดสูงสุดดังกล่าวที่ปรากฏใน RF ลดลงเมื่อมีการเพิ่มปริมาณ KF-CNC มากขึ้นใน CRF อาจเป็นไปได้ว่าที่จุดพิกัดหายไปอย่างมีนัยสำคัญนั้น เป็นผลมาจากการเติม KF-CNC ลงใน RF

#### 4.2.3 สมบัติทางกล

##### 4.2.3.1 ผลการทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (Compression)

ตามมาตรฐาน ASTM D 395 ขั้นตอนการทดสอบเริ่มต้นด้วยการตัดชิ้นงานให้เป็นรูวงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 29 มิลลิเมตร และสูง 19 มิลลิเมตร จากนั้นจะวางชิ้นตัวอย่างลงบนแผ่นเหล็กอัดและกดให้ยุบตัวลงไปให้มีการยุบตัวถึงระดับ 50% อบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 22 ชั่วโมง พอหลังจากนั้นนำชิ้นตัวอย่างออกจากตู้อบและวางไว้เพื่อให้เย็นลงเป็นเวลา 30 นาที โดยที่หลังจากนั้นจะทำการวัดความสูงของชิ้นตัวอย่าง

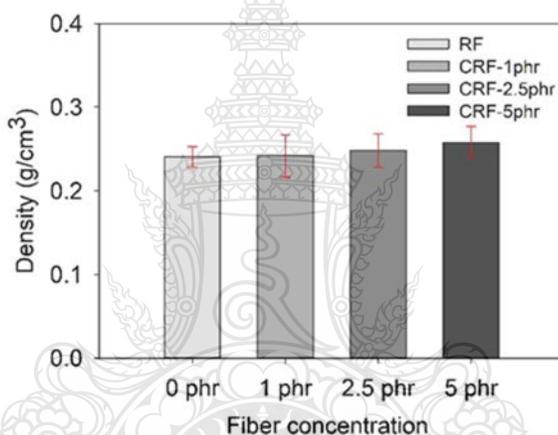


รูปที่ 4.8 เปอร์เซนต์ Compression set ของ RF และ CRF

จากผลการทดสอบ %Compression set พบว่ารูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่า %Compression set ของ CRF ลดลง เมื่อความเข้มข้นของ KF-CNC ซึ่งปริมาณ 1 phr ดีกว่า 2.5 และ 5 phr เพราะ 1 phr มีความนุ่มและคืนตัวได้ดี แต่ 2.5phr และ 5phr มีความแข็งกว่า [38] ซึ่งอาจส่งผลให้ประสิทธิภาพการกักเก็บน้ำมันไม่ดี อย่างไรก็ตาม ผลลัพธ์ที่ได้ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากขนาดของเซลลูโลสในระดับนาโนมีขนาดเล็กมาก [37] เป็นไปได้ว่าเซลลูโลสที่มีขนาดเล็กอาจจะส่งผลต่อเซลล์ฟองใน RF ไม่ชัดเจนเท่ากับเซลลูโลสที่มีขนาดใหญ่กว่า

#### 4.2.3.2 ผลการทดสอบความหนาแน่น (Density)

การทดสอบดัดแปลงจากมาตรฐาน ASTM D 3574-95 โดยตัดชิ้นยางโฟมที่ใช้ในการทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยม นำชิ้นงานมาชั่งน้ำหนักคำนวณหาความหนาแน่นของตัวชิ้นตัวอย่าง



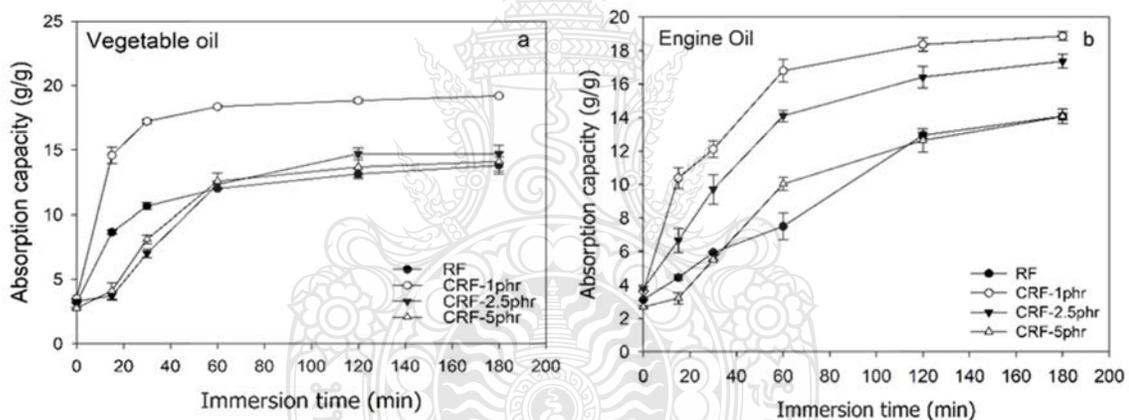
รูปที่ 4.9 ความหนาแน่นของ RF และ CRF

จากผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 4.9 แสดงการเปรียบเทียบความหนาแน่นระหว่าง RF และ CRF ความหนาแน่นของ RF (ไม่เติม KF-CNC) ลดลงอย่างเห็นได้ชัดเนื่องจากมีรูพรุนที่ใหญ่กว่า ในทางกลับกัน ความหนาแน่นของ CRF แสดงความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณของ KF-CNC ที่เติมลงไป เนื่องจากการเพิ่มปริมาณของ KF-CNC จึงมีส่วนทำให้น้ำหนักโดยรวมของ CRF ส่งผลให้มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ปรากฏการณ์นี้เกิดจากการเติม KF-CNC ซึ่งมีองค์ประกอบที่หนาแน่นกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ RF

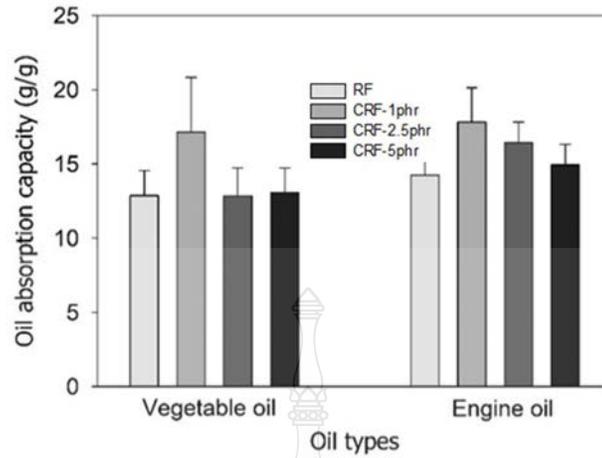
#### 4.2.4 ความสามารถในการดูดซับ

4.2.4.1 ผลการทดสอบความสามารถในการดูดซับน้ำมัน (Oil absorption capacity)

จากผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 4.10 แสดงการดูดซึมน้ำมันของน้ำมันทั้งสองชนิด จะเห็นได้ว่า CRF-1phr (6.8-11.1 g/g) มีการดูดซึมน้ำมันสูงกว่าใน 15 นาทีแรก เมื่อเทียบกับ ตัวอื่นๆ แต่อย่างไรก็ตาม CRF ยังดูดซึมน้ำมันมากกว่า RF ตั้งแต่ช่วงเวลา 60 นาทีขึ้นไป รูปที่ 4.11 CRF-1phr (17.1-17.8 g/g) ดูดซึมน้ำมันทั้งสองได้มากที่สุด อาจเป็นเพราะ KF-CNC ทำให้วัสดุมีรูพรุนเพียงพอที่จะดูดซึมน้ำมันและกักเก็บน้ำมันได้ดี ซึ่งการใช้อนุภาคเป็นสารเติมแต่ง เช่น อนุภาคนาโน โดยทั่วไปจะจำกัดอยู่ที่โพลีเมอร์ เนื่องจากโพลีเมอร์อยู่ในสถานะของแข็งในระหว่างกระบวนการดูดซับ สารเติมแต่ง (ในขนาดอนุภาคที่แตกต่างกัน) และรูพรุนในโพลีเมอร์ที่มีขนาดต่างกันจึงมีบทบาทสำคัญในการกำหนดความสามารถในการดูดซับของโพลีเมอร์ เป็นที่ยอมรับกันอย่างกว้างขวางว่าอนุภาคนาโนและรูพรุนขนาดเล็ก เช่น บริเวณที่เล็กกว่า มีพื้นที่ผิวและขอบเขตที่มีการเคลื่อนไหวสูงมากกว่า ขนาดอนุภาคโพลีเมอร์และรูพรุนที่เล็กกว่ามากช่วยในการทำปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลของไอออนและกลุ่มตัวดูดซับ เพื่อปรับปรุงความสามารถในการดูดซึมน้ำมันและตัวทำละลาย [47]



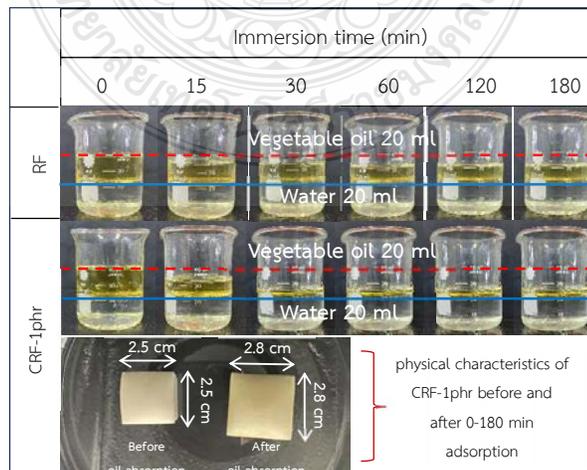
รูปที่ 4.10 ความสามารถในการดูดซับของ RF และ CRF จากกราฟ (a) น้ำมันพืช และ (b) น้ำมันเครื่อง



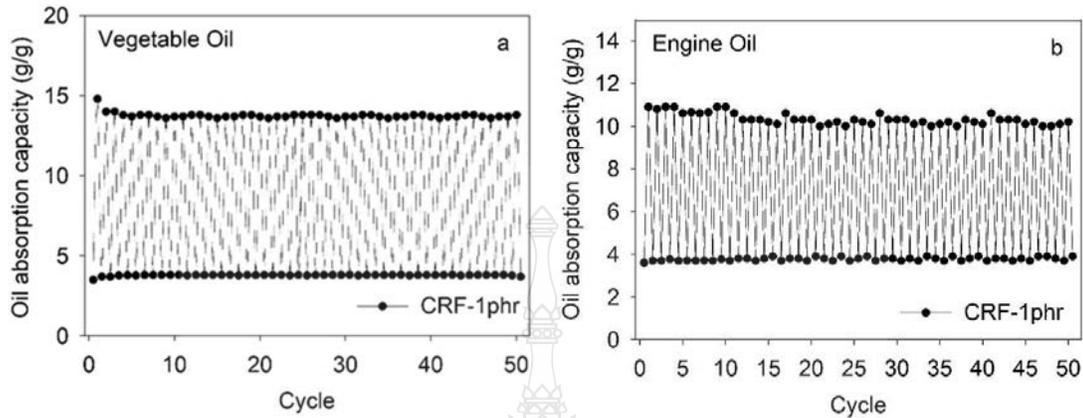
รูปที่ 4.11 ความสามารถในการดูดซับน้ำมันของ RF และ CRF จากกราฟแสดงน้ำมันพืชและน้ำมันเครื่อง

จากผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่า การดูดซับของ RF และ CRF-1phr ดูดซับน้ำมันในช่วงเวลา 15, 30, 60, 120 และ 180 นาที ตัวดูดซับ CRF-1phr ดูดซับน้ำมันได้มากกว่า RF นอกจากนี้ตารางยังแสดงให้เห็นว่า RF และ CRF ไม่ดูดซับน้ำ แต่เลือกที่จะดูดซับน้ำมันก่อนอาจเป็นเพราะยางโพลีมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำจึงดูดซับน้ำมันที่ลอยอยู่บนผิวน้ำก่อน

ตารางที่ 4.2 ความสามารถในการดูดซับของ RF และ CRF-1phr ในน้ำ ตารางแสดงน้ำมันพืชและคุณลักษณะทางกายภาพของ CRF-1phr ก่อนและหลังการดูดซับ 0-180 นาที



#### 4.2.4.2 การนำมาใช้ซ้ำ (Reusability)



รูปที่ 4.12 การนำ CRF มาใช้ซ้ำ จากกราฟ (ก) น้ำมันพืช และ (ข) น้ำมันเครื่อง

จากผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 4.12 พบว่า ตัวดูดซับ CRF-1phr ซึ่งเป็นผลจากการดูดซับน้ำมันได้ดีที่สุด โดยได้รับเลือกเพื่อทดสอบการนำวัสดุกลับมาใช้ใหม่ได้ เนื่องจากดูดซับน้ำมันทั้งสองประเภทได้ดีที่สุด [48] CRF-1phr สามารถใช้ได้มากกว่า 50 ครั้ง ดูดซับน้ำมันได้ถึง 337.8 (น้ำมันเครื่อง) และ 553.4 (น้ำมันพืช) กรัม/กรัม โดยไม่สูญเสียคุณภาพใดๆ อย่างเห็นได้ชัดเมื่อเวลาผ่านไป

ความแตกต่างในการดูดซับน้ำมันทั้งสองประเภทระหว่าง RF และ CRF อธิบายได้ว่าความหนืดของน้ำมันเครื่องที่อุณหภูมิเดียวกันนั้นต่ำกว่าน้ำมันพืชซึ่งเอื้อต่อการซึมผ่านของน้ำมันเข้าไปในโครงสร้างที่มีรูพรุนของ RF และ CRF อย่างไรก็ตาม ความหนืดต่ำของน้ำมันเครื่องทำให้เกิดผลเสียต่อการเกาะติดกับโครงสร้างของ RF และ CRF ส่งผลให้ปริมาณน้ำมันที่คงอยู่ใน RF และ CRF ลดลง [49]

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย การอภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

การปรับปรุงเส้นใยุ่นโดยใช้วิธีการทางเคมีเป็นวิธีที่สามารถปรับปรุงผิวให้เป็นเส้นใยที่พร้อมใช้งานและลดขนาดเส้นใยให้มีขนาดที่เล็กลงตามความต้องการได้ โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เมื่อทำการทดสอบด้วย (13C-NMR) พบว่าหลังการปรับปรุงเส้นใยด้วยวิธีทางเคมี มีคลื่นที่หายไปที่ 17, 52, และ 148 ppm ซึ่งเป็นส่วนของโครงสร้างวงแหวนอะโรมาติกและกลุ่มเมทอกซิลของลิกนินถูกกำจัดอย่างสมบูรณ์รวมถึงเฮมิเซลลูโลส ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงเส้นใยด้วยวิธีทางเคมีทำให้เส้นใยมีความบริสุทธิ์มากขึ้น จากการทดสอบทางสัณฐานวิทยา พบว่าเส้นใยุ่นมีขนาดนาโนเมตร บ่งบอกว่าการไฮโดรไลซิสสามารถลดขนาดเส้นใยอยู่ในระดับนาโนเมตรได้ ผลผลิตขั้นสุดท้ายของ KF-CNC โดยการหมุนเหวี่ยงที่ 9,000 rpm ที่ 25 °C เป็นเวลา 10 นาที จะได้อนุภาคนาโนที่เป็นสารแขวนลอยในน้ำ และได้ KF-CNC gel เข้มข้น โดยการหมุนเหวี่ยงที่อุณหภูมิ 10°C เป็นเวลา 60 นาที ผลผลิตของ KF-CNC (%yield) คือ 72%

ผลการศึกษาการขึ้นรูป RF และ CRF ขึ้นรูปโดยใช้ส่วนผสมน้ำยางธรรมชาติกับ KF-CNC ที่ปริมาณแตกต่างกัน (0 phr, 1 phr, 2.5 phr และ 5 phr) จากผลทางสัณฐานวิทยาของ RF และ CRF จากกราฟ SEM 75x พบว่าโครงสร้างเซลล์โฟมมีลักษณะเป็นเซลล์เปิด เมื่อเติม KF-CNC ลงใน RF ผสมกัน KF-CNC จะกระจายไปทั่วทั้งโฟม โดยที่ตำแหน่งของ KF-CNC จะกระจายอย่างอิสระ การแพร่กระจายของ KF-CNC ทำให้ยากต่อการสร้างฟองอากาศขนาดใหญ่ ส่งผลให้โฟมมีรูพรุนเล็ก และปริมาณรูพรุนมากขึ้นด้วย [50] ค่าจุดสูงสุดที่ 1209, 1270 และ 1502  $\text{cm}^{-1}$  ของ RF พบว่าจุดสูงสุดดังกล่าวที่ปรากฏใน RF ลดลงเมื่อมีการเพิ่มปริมาณ KF-CNC มากขึ้นใน CRF อาจเป็นไปได้ว่าที่จุดพิคหายไปอย่างมีนัยสำคัญนั้น เป็นผลมาจากการเติม KF-CNC ลงใน RF ซึ่งจากผลจะแสดงการมีอยู่ของ KF-CNC ที่เติมลงไป RF ปริมาณ KF-CNC ผลจากการทดสอบความหนาแน่นพบว่า เมื่อปริมาณของ KF-CNC เพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของ CRF จะเพิ่มขึ้น ส่วน %compression set ของ CRF จะลดลงเมื่อความเข้มข้นของ KF-CNC เพิ่มขึ้น ในการทดสอบการดูดซับน้ำมันทั้งสองชนิด พบว่าที่ CRF-1phr จะดูดซับน้ำมันได้มาก (17.1-17.8 g/g) และเร็วขึ้นใน 15 นาทีแรก และยังสามารถใช้ซ้ำได้อีกด้วย ซึ่งนำมาใช้ใหม่ได้มากกว่า 50 ครั้ง ปริมาณดูดซับน้ำมันอยู่ระหว่าง 337.76 ถึง 553.33 กรัม/กรัม และไม่ดูดซับน้ำ แต่เลือกที่จะดูดซับน้ำมันก่อน ความแตกต่างของวัสดุดูดซับน้ำมันระหว่าง RF และ CRF ทั้งสองประเภทจากการลดลงของ %compression แสดงให้เห็นว่า 1 phr นั้นนุ่มและคืนตัวได้ดีกว่า แต่ 2.5 phr และ 5 phr นั้นมีความแข็งขึ้น ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพการกักเก็บน้ำมันได้ไม่ดี

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ศึกษาผลกระทบของรูพรุน การควบคุมรูพรุนทั้งปริมาณและขนาด เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาต่อยอดต่อไป

5.2.2 ศึกษาและวิเคราะห์ขั้นตอนการดูดน้ำมันและการเข้าไปของน้ำมันในตัวอย่างโฟม

5.2.3 ศึกษาการทดสอบ contact angle ของตัว CNC และตัวอย่างโฟม จะช่วยให้เรารู้กลไกของวัสดุ และสามารถนำมาต่อยอดได้

5.2.4 ศึกษาการจัดการวัสดุ (waste) เพื่อเป็นประโยชน์ในด้านสิ่งแวดล้อมอย่างครบวงจร



## บรรณานุกรม

- [1] Kengkhetkit, N. and Amornsakchai. T. (2012). "Utilisation of pineapple leaf waste for plastic reinforcement: 1. A novel extraction method for short pineapple leaf fiber." *Industrial Crops and Products*. 40 : 55-61.
- [2] Bennett, H. (1973). *The Chemical Formulary Volume 17*. New York: Chemical Publishing Co. p.36.
- [3] ผศ.ดร.ภขมา จารุกำจร. (2555). การเตรียมคอมโพสิตจากยางธรรมชาติและเส้นใยป่านครนารายณ์. นครราชสีมา : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- [4] บทนำ. (ออนไลน์). ม.ป.ป. เข้าถึงได้จาก : [https://archive.lib.cmu.ac.th/full/T/2547/ichem1047nk\\_ch1.pdf](https://archive.lib.cmu.ac.th/full/T/2547/ichem1047nk_ch1.pdf). (12 กันยายน 2565).
- [5] วิภัทรพร ครุทสุธา, อติทัศน์ เอี่ยมรักษา และ ศุภนิดา ธีรชัยเกื้อกุล. (2561). การพัฒนาบรรจุภัณฑ์เพื่อสิ่งแวดล้อมจากวัสดุคอมโพสิตเส้นใยผักตบชวา แกลบ และใยมะพร้าวสำหรับรักษาอุณหภูมิจาก (ออนไลน์). เข้าถึงได้จาก : [https://repository.rmutp.ac.th/bitstream/handle/123456789/3470/SCI\\_63\\_08.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.rmutp.ac.th/bitstream/handle/123456789/3470/SCI_63_08.pdf?sequence=1&isAllowed=y). (12 กันยายน 2565).
- [6] จิตต์ลัดดา ศักดาภิพาณิชย์. (2553). สมบัติของยางธรรมชาติ. *เทคโนโลยียางธรรมชาติ : ความรู้ใหม่เกี่ยวกับยางธรรมชาติ จากโครงสร้างโมเลกุลถึงการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม*, กรุงเทพฯ : เทคโนโลยีโนบิซ คอมมิวนิเคชันส์, หน้า 39-41.
- [7] โฟมยางพารา. (ออนไลน์). เข้าถึงได้จาก : <https://www.sanook.com/women/66793/>. (12 กันยายน 2565).
- [8] ศิริชัย พัฒนวานิชชัย. ผลิตภัณฑ์โฟมยาง. (ออนไลน์). เข้าถึงจาก : <chromeextension://efaidnbmninnbpcajpcgclclefindmkaj/http://www.mahidolrubber.org/files/technicalsheet/foam.pdf>. (12 กันยายน 2565).
- [9] ดรรชนี พันธวรการ. เอกสารประกอบการสอนเทคโนโลยีสิ่งทอ (Textile technology). (ออนไลน์). เข้าถึงได้จาก : <http://www.inc.science.cmu.ac.th/thai/upload/article/file/12-11-05-37a74.pdf>. (12 กันยายน 2565).
- [10] บุรินทร์ พุทธิโชติ. การผลิตเส้นใยสมรรถนะสูง (High performance fibers) เพื่อการปฏิรูปอุตสาหกรรมสิ่งทอและเครื่องนุ่งห่ม. (ออนไลน์). เข้าถึงได้จาก : [http://www.oie.go.th/sites/default/files/attachments/article/high\\_performance\\_fibers.pdf](http://www.oie.go.th/sites/default/files/attachments/article/high_performance_fibers.pdf). (12 กันยายน 2565).

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [11] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. เส้นใย (Fibers). (ออนไลน์). เข้าถึงได้จาก : [http://www2.mtec.or.th/th/research/textile/textile\\_sci.html](http://www2.mtec.or.th/th/research/textile/textile_sci.html). (12 กันยายน 2565).
- [12] สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชนฯ. พืชเส้นใย. (ออนไลน์). เข้าถึงได้จาก : <https://www.saranukromthai.or.th/sub/book/book.php?book=17&chap=8&page=t17-8-infodetail04.html>. (12 กันยายน 2565).
- [13] Angkana saenkhati. (2562). โยมนุ่นคืออะไร. (ออนไลน์). เข้าถึงจาก : <https://goterrestrial.com/2019/11/14/>. (12 กันยายน 2565).
- [14] สุวิทย์ วงศ์จุฑาราวาณิชย์. “นุ่น” วัสดุธรรมชาติ และเส้นทางคืนชีพสู่ตลาดร่วมสมัย. (ออนไลน์). เข้าถึงได้จาก : <https://www.creativethailand.org/new/article/people/13597/th>. (12 กันยายน 2565).
- [15] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์. Microcrystalline cellulose. (ออนไลน์). เข้าถึงได้จาก : <https://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1501/microcrystalline-cellulose>. (12 กันยายน 2565).
- [16] ลักษณะทั่วไปของนาโนเซลลูโลส. (ออนไลน์). เข้าถึงได้จาก : <http://www.thaitextile.org/index.php/blog/2016/05/eco.plant1>. (12 กันยายน 2565).
- [17] Mariam B. Sticklen. (2008). Plant genetic engineering for biofuel production: towards affordable cellulosic ethanol. (ออนไลน์). เข้าถึงจาก : [www.nature.com/nrg/journal/v9/n6/full/nrg2336.html](http://www.nature.com/nrg/journal/v9/n6/full/nrg2336.html). (12 กันยายน 2565).
- [18] Mikaela Börjesson and Gunnar Westman. (2015). Crystalline Nanocellulose Preparation, Modification, and Properties. (ออนไลน์). เข้าถึงได้จาก : <https://www.intechopen.com/books/cellulose-fundamental-aspects-and-currenttrends/crystalline-nanocellulose-preparation-modification-and-properties>. (12 กันยายน 2565).
- [19] Ashok K.B., Suresh P.D., Prashant G.P. and Nadanathangam V., (2015). “Energy Efficient Manufacturing of Nanocellulose by Chemo- and Bio-Mechanical Processes: A Review”, World Journal of Nano Science and Engineering, 5, p 204-212.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [20] Rahimi Kord Sofla M., Brown R.J., Tsuzuki T. and Rainey T.J., (2016). “A comparison of cellulose nanocrystals and cellulose nanofibres extracted from bagasse using acid and ball milling methods”, *Advances in Natural Sciences: Nano science and Nanotechnology*, Volume 7 (3).
- [21] การแบ่งประเภทของนาโนเซลลูโลส. (ออนไลน์). เข้าถึงได้จาก : <http://www.tut.fi/en/about-tut/news-and-events/X157407C4>. (12 กันยายน 2565).
- [22] Shashi D.B. (2011). “Biodegradable polymer: the promises and the problems”, *Science and Culture*, Vol 77 (11–12), November – December, p 466-470.
- [23] Kristiina O., Yvonne A., Aji P.M., Gilberto S., Qi Z., Svetlana B., Supachok T., Xiaojian Z. and Saleh H., (2016). “Review of the recent developments in cellulose nanocomposite processing”, *Composites: Part A*, 83, p 2-18.
- [24] กระบวนการดูดซับ (Adsorption Process). (ออนไลน์). เข้าถึงได้จาก : <https://pradthana.wordpress.com/2008/04/13/adsorption-process/>. (12 กันยายน 2565).
- [25] วิวรรณ ขจรเกียรติกุล. (2539). การใช้ถังกรองดูดซับในการบำบัดสีจากน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม สิ่งทอในการบำบัดขั้นสุดท้าย. *วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชา เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี*. 31-37.
- [26] ศิริรัตน์ศรีเกษเพชร. (2543). การดูดซับสารละลายโลหะหนักด้วยดินเหนียวและดินเหนียวปรับปรุง. *วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี*. 26-40.
- [27] John C. Crittenden and et al., (2005). *Water Treatment : Principles and Design* (2nd ed) New Jersey John Wiley & Sons, Inc.
- [28] Tarimala, S., N. Kothari, N. Abidi, E. Hequet, J. Fralick and L. L. Dai. (2006). New approach to antibacterial treatment of cotton fabric with silver nanoparticle-doped silica using sol-gel process. *Applied Polymer Science*. 101(5): 2938-2943.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

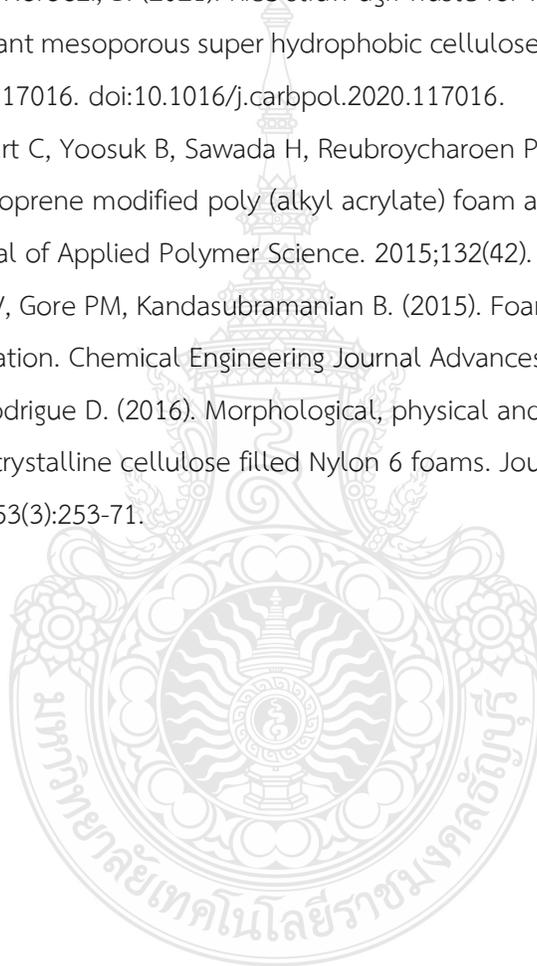
- [29] อรทัย วิเศษรัตน์, รินรดี งามสมบัติ, ปานใจ สื่อประเสริฐสิทธิ์ และ จิตติมา ประสาระเอ. (2555). การดูดซับน้ำมัน โดยใช้ชานอ้อยและชานอ้อยปรับสภาพ. *J Sci Technol MSU*. 31(4): 354-362.
- [30] พงษ์ธิพันธ์ ผึ้งผาย, อำนวย วัฒนกรสิริ และ นภาพร แข่งขัน. (2561). การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับคราบน้ำมัน โดยใช้วัสดุที่มีรูพรุนนาโนเทคโนโลยีธรรมชาติ. *วารสารวิทยาศาสตร์คชศาสตร์*. 40(1): 38-49.
- [31] ภิเชก รุ่งโรจน์ชัยพร. (2554). วัสดุรูพรุนคืออะไร. *Journal of Science Ladkrabang*, 20(1), 60-69.
- [32] Takahashi, M., & Fuji, M. (2002). Synthesis and fabrication of inorganic porous materials: from nanometer to millimeter sizes. *KONA Powder and Particle Journal*, 20, 84-97.
- [33] ภัทรวดี คล้ายคลึง. (2564). การพัฒนาขี้พาราเป็นวัสดุดูดซับน้ำมันด้วยการดัดแปลงพื้นผิวแบบเข้มนาโนของซิงค์ออกไซด์. (รายงานวิจัย). คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [34] Siripak Songsaeng, Patchanita Thamyongkit, Sirilux Poompradub. (2019). Natural rubber /reduced-graphene oxide composite materials: Morphological and oil adsorption properties for treatment of oil spills. *Journal of Advanced Research* 20 79-89.
- [35] A.M. Lazim, D.L. Musbah, C.C. Chin, I. Abdullah, M.H.A. Mustapa, A. Azfaralariff, (2018). Oil removal from water surface using reusable and absorptive foams via simple fabrication of liquid natural rubber (LNR), *Polymer Testing*.
- [36] Li Zou, Ajit Dattatray Phule, Yan Sun, Tong Yu Zhu, Shibao Wen, Zhen Xiu Zhang. (2020). Superhydrophobic and superoleophilic polyethylene aerogel coated natural rubber latex foam for oil-water separation application. *Polymer Testing* 85.
- [37] Dewi Sartika, Khaswar Syamsu, Endang Warsiki, Farah Fahma, and I. Wayan Arnata, (2021). Nanocrystalline Cellulose from Kapok Fiber (*Ceiba pentandra*) and its Reinforcement Effect on Alginate Hydrogel Bead, *Advancedsciencenews*, pp. 1-12.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [38] กนกวรรณ ยันตะบุศย์ และ พันธกานต์ แก้วอาษา. (2563). สมบัติทางกายภาพของยางโฟมธรรมชาติ เสริมแรงด้วยเส้นใยตาล: ผลของการทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายต่าง และปริมาณ เส้นใย. (ออนไลน์). เข้าถึงได้จาก : <https://li01.tci-thaijo.org>. (12 กันยายน 2565).
- [39] Pungpai, P., Watankornsiri A. and Kangkun N. (2018). Comparison of Absorptive Efficiency of Oil Spill Dispersants Using Naturally Nano-technologically Porous Materials. Koch Cha Sarn Journal of Science / Vol.40 No.1 January-June.
- [40] Ueakarn Danchaiprasert, Peeranart Kiddee, Wikanda Thongnueankaeng and Chamada Chaijaroen. (2018). Efficiency of hanguana malayana (jack) merr. For oil adsorption. PSRU Journal of Science and Technology 3(2): 35-45.
- [41] Zhang, H., Zhao, T., Chen, Y., Hu, X., Xu, Y., Xu, G., . . . Shen, H. (2022). A sustainable nanocellulose-based superabsorbent from kapok fiber with advanced oil absorption and recyclability. Carbohydr Polym, 278, 118948. doi:10.1016/j.carbpol.2021.118948.
- [42] Jintao Wang, Yian Zheng, Aiqin Wang, (2012). Effect of kapok fiber treated with various solvents on oil absorbency. Industrial Crops and Products 40 178–184.
- [43] Sirilak Phomrak และคณะ. Natural Rubber Latex Foam Reinforced with Microand Nanofibrillated Cellulose via Dunlop Method. (ออนไลน์). เข้าถึงได้จาก : [www.mdpi.com/journal/polymers/doi:10.3390/polym12091959](http://www.mdpi.com/journal/polymers/doi:10.3390/polym12091959). (12 กันยายน 2565).
- [44] ยุพาพร รักสกุลพิวัฒน์. (2563). ยางธรรมชาติดัดแปรเสริมแรงด้วยนาโนเซลลูโลสจากกากมันสำปะหลัง. (รายงานวิจัย). คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- [45] Pantamanatsopa, P., Ariyawiriyanan, W., Sungsanit, K., & Ekgasit, S. (2023). Physicochemical Characterization of Acid-Treated Nanocrystal Cellulose and Amorphous Cellulose from Bamboo Sawdust. Journal of Natural Fibers, 20(2). doi:10.1080/15440478.2023.2286323.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [46] Yousefian, H., & Rodrigue, D. (2016). Morphological, physical and mechanical properties of nanocrystalline cellulose filled Nylon 6 foams. *Journal of cellular plastics*, 53(3), 253-271. doi:10.1177/0021955x16651241.
- [47] Dilamian, M., & Noroozi, B. (2021). Rice straw agri-waste for water pollutant adsorption: Relevant mesoporous super hydrophobic cellulose aerogel. *Carbohydr Polym*, 251, 117016. doi:10.1016/j.carbpol.2020.117016.
- [48] Ratcha A, Samart C, Yoosuk B, Sawada H, Reubroycharoen P, Kongparakul S. (2015). Polyisoprene modified poly (alkyl acrylate) foam as oil sorbent material. *Journal of Applied Polymer Science*. 2015;132(42).
- [49] Udayakumar KV, Gore PM, Kandasubramanian B. (2015). Foamed materials for oil-water separation. *Chemical Engineering Journal Advances*. 2021;5.
- [50] Yousefian H, Rodrigue D. (2016). Morphological, physical and mechanical properties of nanocrystalline cellulose filled Nylon 6 foams. *Journal of Cellular Plastics*. 2016;53(3):253-71.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก  
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่





## Cellulose rubber foam composite use as oil absorbent

Poptorn Klaykhem<sup>1</sup>, Pruttipong Pantamanatsopa<sup>1,2</sup> and Warunee Ariyawiriyanan<sup>1,3\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Materials and Metallurgical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathum Thani 12110, THAILAND

<sup>2</sup>Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Songkhla 90000, THAILAND

<sup>3</sup>Systems Research and Innovation Development Research Unit, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathum Thani 12110, THAILAND

\*Corresponding author: warunee.a@en.rmutt.ac.th

### ABSTRACT

The focus of this study was to explore the fabrication of cellulose rubber foam (CRF) using kapok fibers (KF) as an oil absorbent material. Chemical methods such as sodium hydroxide surface treatment, hydrogen peroxide treatment, and acid hydrolysis were employed to prepare cellulose nanocrystals (CNC). The results of the nuclear magnetic resonance (NMR) spectroscopy test indicated that the chemical modification of kapok fiber resulted in the removal of lignin and hemicellulose by a disappearing peak at 17, 52, and 148 ppm, respectively. Hydrolysis process of the kapok fiber resulted in nanometer-sized cellulose, with a yield of 72% as revealed by transmission electron microscopy (TEM). The amount of cellulose nanocrystals from kapok fiber (KF-CNC) used in the study varied from 0 to 5 phr during the formation of the cellulose rubber foam, and it was found that the foam density increased as the number of cellulose nanocrystals from kapok fiber increased. Additionally, the percentage of collapse from the compressive strength of cellulose rubber foam decreased as the amount of cellulose nanocrystals from kapok fiber increased. Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) confirmed the incorporation of cellulose nanocrystals from kapok fiber into the rubber foam (RF) as the amount of cellulose nanocrystals from kapok fiber increased. The oil absorbent of cellulose rubber foam composite with 1 phr cellulose nanocrystals from kapok fiber show highest absorption capacity was 17.8 g/g. The cellulose rubber foam composite absorbs oil before absorbing water when water and oil are combined. Moreover, the cellulose rubber foam could be reused more than 50 times.

**Keywords:** Kapok fiber, Rubber foam, Cellulose nanocrystals, Cellulose rubber foam, Oil absorbent

### INTRODUCTION

Nowadays, the problem of natural oil contamination is still a big problem everywhere in the world and humans are involved due to the use of oil in everyday life. The leakage or contamination of oil may affect nature. The water source is the habitat of various living things, including human water resources. Many materials are used to eliminate the problem of oil contamination in water supplies. Most commercial adsorbents used in oil removal are plastic-based materials with a lot of porosity. Commercial materials may increase plastic waste that is difficult to biodegrade. Absorbent materials made from natural materials can help reduce the problem of plastic waste even more. The material that can be developed as an absorbent material is natural rubber. Thailand is the world's number one natural rubber producer but most of them are exported in the form of raw latex. Therefore, the processing of natural rubber into products may

increase the benefits of using more widely available rubber. Rubber foam is a porous, lightweight material that can be used in a wide range of applications such as absorbents, cushioning materials and sound-absorbing materials, etc. [1, 2].

Composite material made from natural fibers has received widespread attention both in plastic molding industry instead of using synthetic fibers. The advantages of natural fibers are that they are cheap and easily found naturally with low toxicity. There are many natural fibers that are plentiful in Thailand such as water hyacinth, bamboo, rice husk, bagasse, etc. [3]. And there is another type that is abundant in Thailand but is still rarely used is kapok fiber. Kapok in the form of stuffed pillows, because it is light and soft, is one of the high cellulose fibers. Kapok fibers have interesting properties for example natural skin coatings. This will prevent water so that the cotton fibers do not get wet but have oil-absorbing

properties which can be applied to many aspects of work such as the environment including various oil stains occurring in daily life, etc. Therefore, it is interesting to bring local resources and develop them into oil-absorbing cellulose rubber foam. Therefore, in this research, we are interested in using natural fibers, kapok fibers which are relatively high cellulose fibers as an oil-absorbing material. In the previous work, the oil absorbency is supplemented by the addition of kapok fibers in larger quantities, resulting in a significant increase in oil absorbency [4]. However, using natural fibers may have a detrimental effect on the properties of the material. Kapok fibers must therefore be cleaned by bleaching them with hydrogen peroxide and sodium hydroxide to remove impurities or unwanted substances such as hemicellulose, lignin, and other impurities. Cellulose is hydrolyzed with acid in sulfuric acid [5] and then mixed with natural rubber foam and cellulose nanocrystals from kapok fibers with different cellulose nanocrystal contents.

## MATERIALS AND METHODS

### Materials

Kapok fiber (KF), HANR 60% DRC (NORAWAT CHEMICAL Part., Ltd.), Chemicals used include sodium hydroxide (NaOH), hydrogen peroxide (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), sulfuric acid 98% (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), potassium hydroxide (KOH), zinc diethyl-dithiocarbamate dispersion (ZDEC), zinc mercaptobenzo-thiazole dispersion, (ZMBT), Wingstay L, Potassium Oleate, Diphenyl guanidine (DPG), Sodium silicofluoride (SFF), Zinc oxide (ZnO)

### KF pretreatment process

The KF was boiled in a 2M NaOH solution at 90 °C for 60 minutes and filtered by a sieve (involved in alkalization at mm openings) and washed with deionized (DI) water to remove NaOH. Then, the kapok alkaline fiber was subsequently bleached using 0.05 M aqueous NaOH buffer and 10% v/v aqueous H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> at 90 °C for 120 minutes with constant mechanical stirring. The bleached KF was then sieved and thoroughly washed with DI water. To further remove the impurities, the second bleaching was carried out under the same conditions and oven-dried at 60 °C for 24 hours. The bleached kapok is labeled KF-B. The alkalization and bleaching were undertaken to remove impurities before proceeding with the hydrolysis.

### Isolation of KF-CNC

CNC was prepared by sulfuric acid hydrolysis [6]. The KF-B was subsequently hydrolyzed by using a diluted H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution (50% v/v) at 600 rpm, 50 °C for 40 minutes. The hydrolysis was stopped by adding 200 mL of water. The resulting suspension was centrifuged five times at 9,000 rpm, 25 °C for 10 minutes to obtain more concentrated cellulose nanocrystal

water and centrifuged at 10 °C for 50 minutes until KF-CNC deposits were obtained.

### Preparation of Rubber Foam (RF) and Cellulose Rubber Foam (CRF)

The preparation of RF and CRF is shown in Table 1. The concentrated natural latex (60% DRC) was stirred for 1 minute to remove ammonia and mixing process for CRF compound preparation is shown in Table 2. Then, pour the latex into the mold and leave the RF set for 10 minutes. The prepared RF was baked at 100 °C for 2 hours, then wash with hot water at 70 °C for 50 minutes and bake again at 80 °C until dry shown in figure 1.

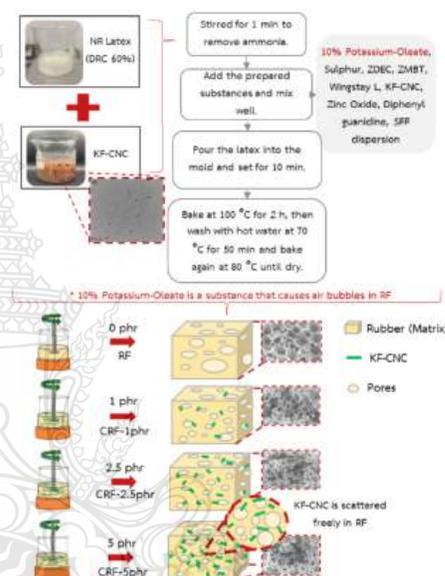


Figure 1 Images of preparation of RF and CRF.

Table 1 Formulations of RF and CRF.

Chemical substances	Weight (phr)
NR latex 60% DRC	100
Potassium-Oleate solution 10%	1.0
Sulphur dispersion 50%	2.5
ZDEC dispersion 50%	1.0
ZMBT dispersion 50%	1.0
Wingstay L dispersion 50%	1.0
ZnO dispersion 50%	5.0
Diphenyl guanidine dispersion 33%	1.0
Sodium silicofluoride dispersion 12.5%	0.5
KF-CNC	0, 1, 2.5, 5

**Table 2** Mixing procedure for CRF compound preparation.

Order	Ingredient	Mixing time (Minutes)
1	Latex (DRC 60%)	1
2	10% Potassium-Oleate, Sulphur, ZDEC, ZMBT, Wingstay L, KF-CNC	3
3	Zinc Oxide, Diphenyl guanidine	1
4	SFF dispersion	1

**Yield of KF-CNC**

The yield of KF-CNC of the dry weight ratio between KF-CNC and KF-B [7] (Equation 1), where  $W_{KF-CNC}$  was the dry weight of KF-CNC and  $W_{KF-B}$  was the dry weight of KF-B. The yield value was obtained from an average of three replications.

$$\text{Yield of KF-CNC (\%)} = \frac{W_{KF-CNC}}{W_{KF-B}} \times 10 \quad (1)$$

**Chemical composition of KF-CNC, RF and CRF**

The chemical composition was analyzed by Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR; Frontier, Perkin Elmer) and nuclear magnetic resonance (NMR) spectroscopy (JEOL; JNM-ECZR 500MHz). Prior to the FTIR and NMR analyses, samples of KF-CNC, RF and CRF were oven-dried at 60 °C for 2 hours, for produce dried film. The dried samples were then scanned using the FTIR spectrometer in attenuated total reflectance mode at 4000 and 600  $\text{cm}^{-1}$  and the NMR spectrometer in  $^{13}\text{C}$  solid state with a chemical shift between 0-200 ppm.

**Morphology of KF, KF-B, KF-CNC, RF and CRF**

The morphology of KF, KF-B, RF and CRF was characterized by a scanning electron microscope (SEM) (JEOL; JSM-5410 LV). SEM was utilized to determine the dimensions and physical appearance of raw KF, KF-B, RF and CRF. Prior to SEM analysis the raw KF, KF-B, RF and CRF were stuck to the stub with carbon tape and then coated with gold. The morphology of KF-CNC was characterized by a transmission electron microscope, TEM (TEM; Thermo Scientific, TALOS F200X). TEM was utilized to determine the dimensions (i.e., diameter and length) and the physical appearance of KF-CNC. Specimen preparation prior to analysis was done by dropping KF-CNC solution on the surface of carbon grid and leaving it to dry at room temperature.

**Compression testing of RF and CRF**

The compression testing was conducted according to ASTM D 395 standard [8]. Prior to test cutting a circular specimen with a diameter of 29 mm, height of 19 mm, placing the specimen in a compressed steel plate, pressing to deflate 50% from its original height and holding for about 15 minutes and bake at

70 °C for 22 hours, remove from the oven. Place the specimen for 30 minutes, then measure the height of the specimen. The calculation formula is as shown in (Equation 2).

$$\text{Compression set \%} = \left( \frac{t_0 - t}{t_0} \right) \times 100 \quad (2)$$

Where  $t_0$  = thickness after test (mm) and  $t$  = original thickness (mm)

**Density of RF and CRF**

The density analysis was performed according to the ASTM D 3574-95 standard [9]. Prior to test cutting a rectangular piece of CRF. Weight and calculate the density of the sample using the formula as in (Equation 3).

$$D = \frac{M}{V} \quad (3)$$

Where  $D$  = density of specimen ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),  $M$  = specimen weight (g) and  $V$  = specimen volume ( $\text{cm}^3$ )

**Ability to oil absorbent of RF and CRF**

The ability to absorb oil for RF and CRF analysis is determined by cutting the test specimen to a size of 2.5x2.5x2.5 cm then dropping the sample into the beaker with the oil at varying time with 15, 30, 60, 120, 180 and 1440 minutes, respectively. Then, take the sample out of the oil beaker. Clean the oil on the surface of the CRF. Then weigh and calculate the adsorption capacity (oil sorption capacity) in (Equation 4) [10].

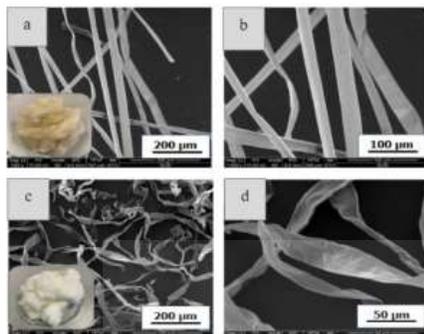
$$\text{Oil sorption capacity (g/g)} = \frac{M_s - M_i}{M_i} \quad (4)$$

Where  $M_s$  = weight after adsorption (weight of RF and CRF and oil in grams) and  $M_i$  = weight before adsorption (RF and CRF weight in grams).

**RESULTS AND DISCUSSIONS****KF preparation results**

Figure 2a and 2b are the photographs of KF and KF-B. In figure 2a, the color of RF is light brown. Figure 2b shows the KF-B, the color of KF-B is white. The change in color was confirmed by the removal of wax, lignin, hemicellulose and other impurities following the chemical treatment (alkalinization and bleaching).

**Figure 2** Images of (a) KF, (b) KF-B.



**Figure 3** The morphological test results of (a,b) KF, (c,d) KF-B were observed using a scanning electron microscopy (SEM).

*Morphology results of KF and KF-B*

Figure 3a-3d show the microstructure of KF and KF-B by using SEM. In Figure 3a and 3b, the KF was bundled together and the fibers are thick. Following the alkalization and KF-B. In Figure 3c-3d bleaching future thinned out the fibers, resulting in the microfibrils (KF-B). The smoother and thinner fibers were effective in removing non-cellulosic components and other impurities (i.e., pectin and wax) which serve as the protective layer of KF.

*The yield of KF-CNC*

After acid hydrolysis process. The resulting of yield of KF-CNC was 72%, the aqueous suspension of KF-CNC was stable after hold on after 96 hours. Furthermore, the flow birefringence was carried out under a cross-polarized light setup, that specified the particle of cellulose in the KF-CNC aqueous suspension. Table 3 show the aqueous suspension, given hydrolysis condition, under normal light and under cross-polarized light.

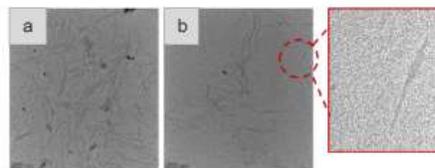
**Table 3** Hydrolysis and KF-CNC synthesis.

KF-CNC		
(Deep yellow, translucent solution Yield = 72%)		
normal light	polarized light	CNC gel

*TEM Morphology KF-CNC*

Figure 4a and 4b show the TEM image of KF-CNC under acid hydrolysis condition. The KF-CNC was of whisker shape as the acid remove the amorphous region of KF-B while retaining the straight crystalline regions. The length and diameter of KF-CNC show in

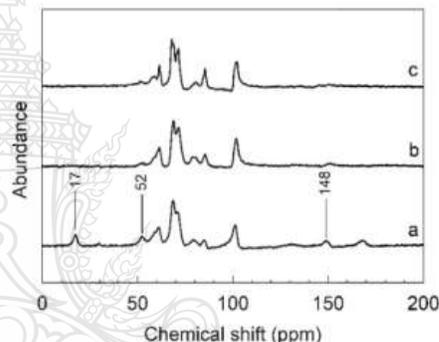
nano scale. The reduce size of KF-CNC effective from amorphous domain was remove after acid hydrolysis.



**Figure 4** Morphology of KF-CNC (a,b) observed using a transmission electron microscope (TEM).

*NMR chemical composition*

Figure 5a-5c present the NMR curves of KF, KF-B, and KF-CNC, respectively. The peak at 17, 52, and 148 were hemicellulose and lignin. However, all peaks with lignin and hemicellulose disappeared after alkalization and bleaching, which meansthe alkalization and bleaching effectively removed hemicellulose and lignin.



**Figure 5** NMR spectrum of (a) KF, (b) KF-B, (c) KF-CNC.

*FTIR chemical composition*

Peaks for RF found in the FTIR microscopy results are 1209, 1270, and 1502  $\text{cm}^{-1}$  (Figure 6). On the other hand, it was observed that the apparent peak gradually faded as more KF-CNC was added to create CRF. It may be possible that a peak point significantly disappeared as a result of KF-CNC filling into RF.

*Morphology of RF and CRF*

CRF was produced by using a natural rubber latex composite with varying KF-CNC (0 phr, 2.5 phr, and 5 phr). Figure 7a-7d shows the cell structures of RF and CRF. Figure 7a shows the cell structure of RF as a big hole and a close cell. Besides, after adding KF-CNC as shown in Figure 7B-7C.

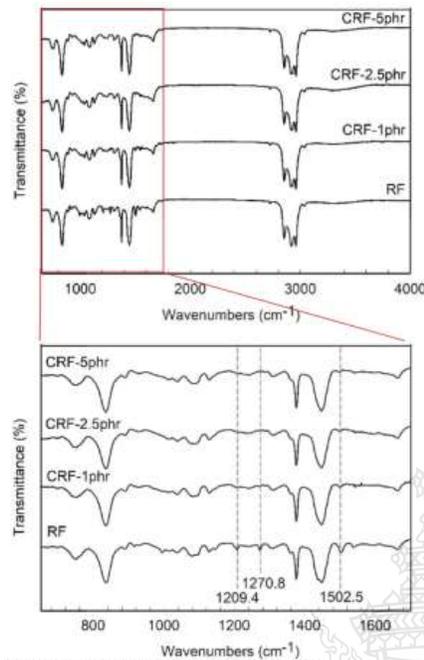


Figure 6 FTIR spectrum of RF and CRF.



Figure 7 Cell structure of RF and CRF (a) RF, (b) CRF-1 phr, (c) CRF-2.5 phr, (d) CRF-5 phr.

Figure 8a-8d shows the properties of RF and CRF at 0, 1, 2.5, and 5 phr respectively. Figure 8a show average hole size of RF is 400  $\mu\text{m}$ , which bigger than KF-CNC (Figure 8b-8Dd) were show average hole size is 200  $\mu\text{m}$ . the cell structure of RF and CRF is open cell. That has good properties for oil absorption.

*Compression test result of RF and CRF*

The percentage of CRF compression decreased. When the concentration of KF-CNC was increased (Figure 9). Compression % it shows that 1 phr is better

than 2.5 and 5 phr because 1 phr is soft, but 2.5 phr and 5 phr are hard, which may result in poor oil retention performance. However, the results are not significantly different since the size of cellulose at the nanoscale appears tiny. It is possible that the smaller cellulose will not affect the bubble cells in the RF as much as the larger cellulose will.

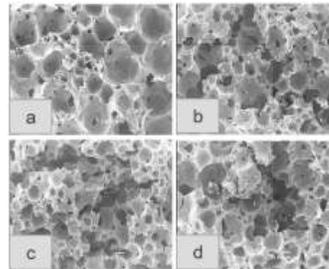


Figure 8 SEM micrographs 75x of RF and CRF composites (a) RF, (b) CRF-1 phr, (c) CRF-2.5 phr, (d) CRF-5 phr.

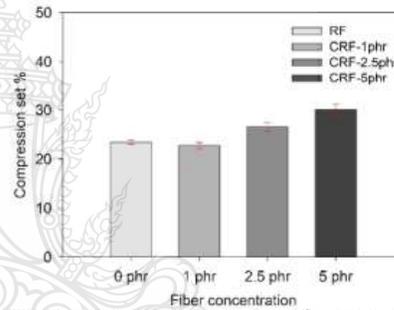


Figure 9 Compression set percent of RF and CRF.

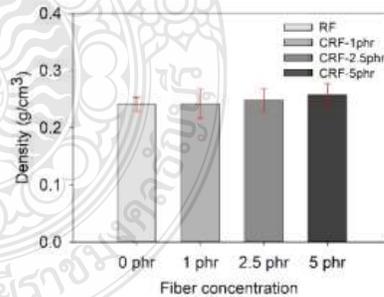


Figure 10 Density of RF and CRF.

*Density test results of RF and CRF*

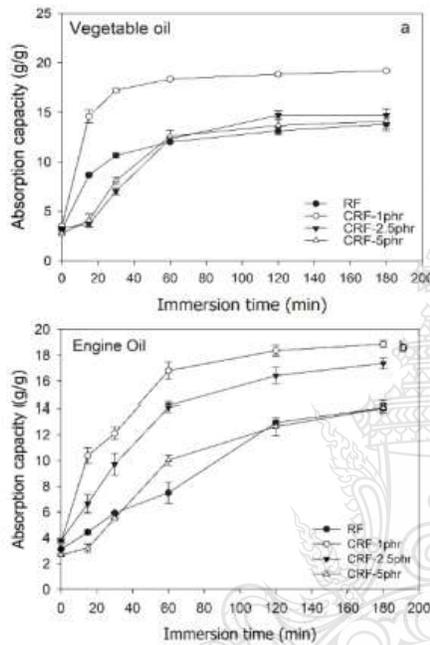
Figure 10 shows the density comparison between RF and CRF. The density of RF (excluding

KF-CNC) is notably lower due to its larger pore sizes. On the other hand, the density of CRF exhibits a direct correlation with the volume of KF-CNC incorporated. As the quantity of KF-CNC is augmented, it contributes to the overall weight of the CRF, consequently leading to an increase in its density. This phenomenon is attributed to the introduction of KF-CNC, which possesses a denser composition compared to CRF.

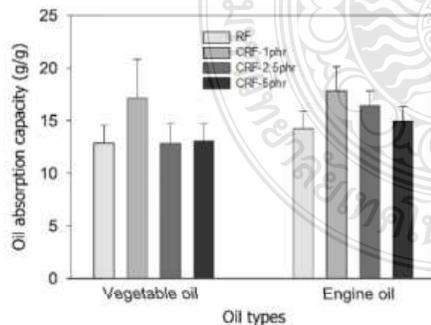
*Oil absorption capacity of RF and CRF*

Figure 11 shows the oil absorption of both oils. It can be seen that CRF-1phr (6.8-11.1 g/g) had higher oil absorption in the first 15 minutes compared to RF (1.3-5.5 g/g), CRF-2.5phr (0.4-2.9 g/g), and CRF-5 phr (0.5-1.3 g/g), but CRF absorbs more oil than RF for 60 minutes or more (Figure 12). CRF-1phr (17.1-17.8 g/g) absorbs the most of both oils. Probably because KF-CNC makes the material porous enough to absorb oil when filled. The use of particles as additives, such as nanoparticles, is generally limited to foams. Because the foams are in a solid state during the oil or solvent absorption and extraction processes, the additive materials (in varying particle sizes) and the different sizes of pores in the foam play an essential role in defining the foam's absorption capacity. It is widely acknowledged that smaller nanoparticles and pores, i.e., smaller regions, have a more highly active surface area and boundaries. The considerably smaller size of the foam particles and pores aids in the molecular interactions of the adsorbate ions and groups for improved oil and solvent absorption ability [11].

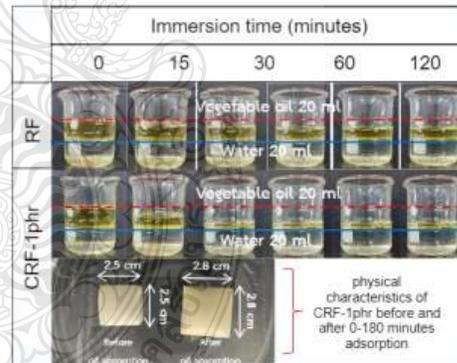
The absorption of RF and CRF (CRF-1phr) in water is shown in Figure 13. RF and CRF-1phr absorbed with time intervals of 15, 30, 60, 120, and 180 minutes. The CRF-1phr were adsorbent absorbs more oil. Furthermore, the chart shows that RF and CRF do not absorb water but instead prefer to absorb oil first.



**Figure 11** Absorption capacity of RF and CRF. From the graph (a) vegetable oil and (b) engine oil.



**Figure 12** Oil absorption capacity of RF and CRF. From the graph shows vegetable oil and engine oil.

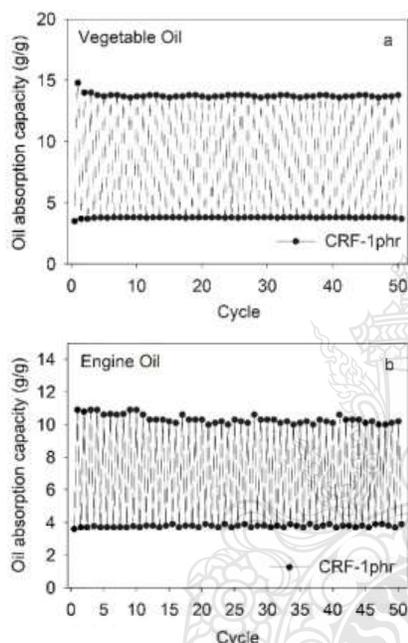


**Figure 13** Absorption capacity of RF and CRF-1phr in water. The table shows the vegetable oil and physical characteristics of CRF-1 phr before and after 0-180 minutes adsorption.

*Reusability of the CRF*

CRF-1phr, the result of oil absorption by CRF, was selected to test the reusability of the material since it absorbs both types of oil the best (Figure 14) [12]. More than 50 times can be used with one CRF-

1phr. Absorbs between 337.8 (Engine oil) and 553.4 (Vegetable oil) g/g without noticeably losing any of its quality over time. The difference in oil absorption between the two types of RF and CRF could be explained that the viscosity of Engine oil at the same temperature was lower than that of vegetable oil which was conducive to oil penetration into the porous skeleton of the RF and CRF. However, the low viscosity of the engine oil produced a negative effect on its adherence to the cellulose skeleton of the RF and CRF, resulting in a reduction in the amount of oil maintained in the RF and CRF [13].



**Figure 14** Reusability of CRF. From the graph (a) vegetable oil and (b) engine oil.

### CONCLUSION

#### *Results from KF and KF-CNC preparation*

Chemical processes can be used to produce KF. Hydrogen peroxide and sodium hydroxide were used as the chemical treatments. According to the results of the morphological tests, chemical cleaning made the fibers purer than those seen with a scanning electron microscope (SEM), and the fact that KF are nanometer-sized indicates that hydrolysis can reduce the fiber size down to the nanometer level observed with a transmission electron microscope (TEM). On the NMR curve, it can be noticed that there are 17, 52, and 148 ppm of missing waves after the line

improvement by chemical technique. This demonstrates that the fiber is purer in terms of fiber enhancement by chemical techniques. The end product of five centrifugations is KF-CNC water, which is produced by spinning at 9,000 rpm for 10 minutes at 25 °C. And a 72% yield of KF-CNC can be obtained by centrifuging it at 10°C for 50 minutes.

#### *Results from RF and CRF preparation*

The properties of RF and CRF at densities of 0, 1, 2.5, and 5 phr appear in the morphological results of RF and CRF from SEM micrographs 75x. It was discovered that the foam cell structure had an open-cell morphology. When KF-CNC and RF are mixed, the KF-CNC is scattered throughout the rubber foam, where the KF-CNC position is scattered freely. The spread of KF-CNC makes it harder to produce large air bubbles, resulting in smaller foam porosity [14].

RF peaks were observed in the FTIR microscopy data at 1209.4, 1270.8, and 1502.5  $\text{cm}^{-1}$ . To produce CRF, however, CNC was added, and it was seen that the apparent peak progressively vanished. The amount of KF-CNC employed in the study was chosen at 0, 1, 2.5, and 5 phr to make CRF. It was discovered that as the amount of KF-CNC grows, the density of CRF increases. Compression % in CRF reduced. When the concentration of KF-CNC was raised. In the oil absorption test for both vegetable oil and engine oil, it was discovered that at 1 phr (CRF-1phr), it absorbs more oil (17.1-17.8 g/g) and faster in the first 15 minutes, and it can also be reused more than 50 times. The adsorbed content ranged from 337.76 to 553.33 g/g and did not absorb water but instead preferred to absorb oil first. The difference in oil absorption between the two types of RF and CRF from the decrease in compression % shows that 1 phr is soft, but 2.5 phr and 5 phr are hard, causing poor oil retention performance.

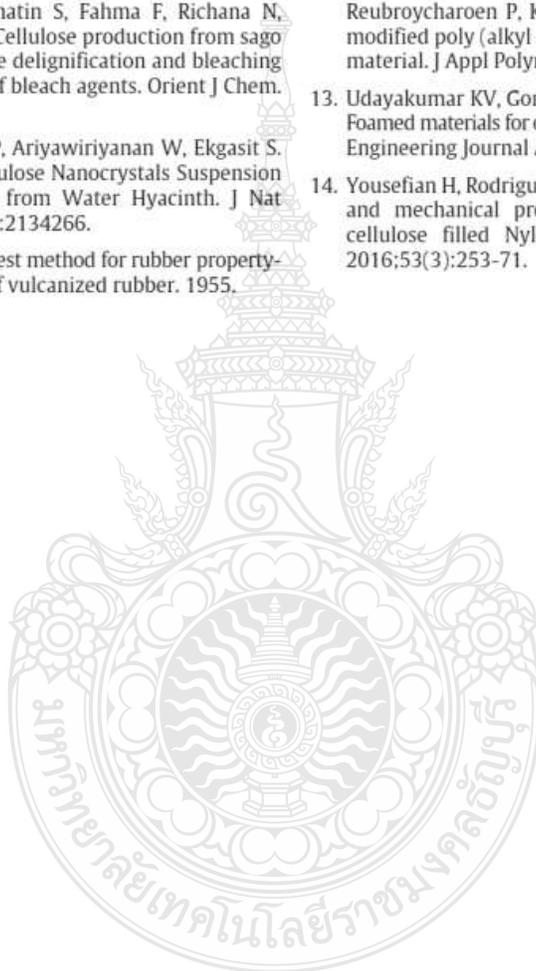
### ACKNOWLEDGEMENT

The research project funded by the fundamental fund (FF) of Rajamangala University of Technology Thanyaburi under the annual research and innovation promotion fund 2022 (FRB65E0708) was created and achieved with the encouragement and assistance of many individuals and associations, to whom the researchers should be grateful on this occasion.

### REFERENCES

1. Phomrak S, Nimpaiboon A, Newby B-mZ, Phisalaphong M. Natural rubber latex foam reinforced with micro- and nanofibrillated cellulose via Dunlop method. *Polymers*. 2020;12(9):1959.
2. Karim AFA, Ismail H, Ariff ZM. Properties and characterization of kenaf-filled natural rubber latex foam. *BioResources*. 2016;11(1):1080-91.
3. Kengkhetkit N, Amornsakchai T. Utilisation of

- pineapple leaf waste for plastic reinforcement: 1. A novel extraction method for short pineapple leaf fiber. *Ind Crop Prod.* 2012;40:55-61.
4. Dong T, Xu G, Wang F. Oil spill cleanup by structured natural sorbents made from cattail fibers. *Ind Crop Prod.* 2015;76:25-33.
  5. Lee BM, Jeun JP, Kang PH, Choi JH, Hong SK. Isolation and characterization of nanocrystalline cellulose from different precursor materials. *Fiber Polym.* 2017;18:272-7.
  6. Arnata IW, Suprihatin S, Fahma F, Richana N, Candra Sunarti T. Cellulose production from sago frond with alkaline delignification and bleaching on various types of bleach agents. *Orient J Chem.* 2019;35(1):8-19.
  7. Pantamanatsopa P, Ariyawiriyanan W, Ekgasit S. Production of Cellulose Nanocrystals Suspension with High Yields from Water Hyacinth. *J Nat Fibers.* 2023;20(1):2134266.
  8. 395 AD. Standard test method for rubber property-compression set of vulcanized rubber. 1955.
  9. Yuan Y, Shutov F. Foam-in-foam polyurethane composite. *J Cell Plast.* 2002;38(6):497-506.
  10. 726-12 Standard Test Method for Sorbent Performance of Adsorbents 2012. ASTM F, editor. ASTM Philadelphia.
  11. Dilamian M, Noroozi B. Rice straw agri-waste for water pollutant adsorption: Relevant mesoporous super hydrophobic cellulose aerogel. *Carbohydr Polym.* 2021;251:117016.
  12. Ratcha A, Samart C, Yoosuk B, Sawada H, Reubroycharoen P, Kongparakul S. Polyisoprene modified poly (alkyl acrylate) foam as oil sorbent material. *J Appl Polym Sci.* 2015;132(42).
  13. Udayakumar KV, Gore PM, Kandasubramanian B. Foamed materials for oil-water separation. *Chemical Engineering Journal Advances.* 2021;5:100076.
  14. Yousefian H, Rodrigue D. Morphological, physical and mechanical properties of nanocrystalline cellulose filled Nylon 6 foams. *J Cell Plast.* 2016;53(3):253-71.








**คณะวิศวกรรมศาสตร์**  
**ขอแสดงความยินดีกับ**  
**นายภร คล้ายเข็ม**  
 นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ

**ได้รับรางวัล**  
**GOLD AWARDS**

จากโครงการประกวดสิ่งประดิษฐ์และนวัตกรรม  
**THAILAND NEW GEN INVENTORS AWARD 2024**  
 (I-NEW GEN AWARDS 2024)  
 ระดับอุดมศึกษา กลุ่มเรื่อง พลังงาน วัสดุ และเคมีชีวภาพ

**เรื่อง "เทคโนโลยีโฟมดูดน้ำมัน"**








**มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลบุรีรัมย์**  
**ขอแสดงความยินดีกับ**  
**นายภร คล้ายเข็ม**  
 คณะวิศวกรรมศาสตร์

**ได้รับรางวัลเหรียญทอง (Gold Awards)**  
**ระดับอุดมศึกษา กลุ่มเรื่อง พลังงาน วัสดุ และเคมีชีวภาพ**  
 จากผลงานเรื่อง เทคโนโลยีโฟมดูดน้ำมัน โดยมี รศ.ดร.วราภรณ์ อริยวีระนันท์  
 นายพุดพิงก์ พันธมนัสโสภาค และ ศ.ดร.สมพงษ์ เอกสิทธิ์ เป็นอาจารย์ที่ปรึกษา  
 ในการเข้าร่วมโครงการประกวดสิ่งประดิษฐ์และนวัตกรรมระดับชาติ Thailand New Gen  
 Innovators Award 2024 (I-New Gen Awards 2024)  
 จัดโดยสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์  
 วิจัยและนวัตกรรม ในงานวันนักประดิษฐ์ 2567  
 ณ ศูนย์นิทรรศการและการประชุมไบเทค บางนา

(รศ.ดร.สมหมาย ศิวสอาด)  
 อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลบุรีรัมย์






**นวัตกรรม "เทคโนโลยีโฟมดูดน้ำมัน"** 



2 นักศึกษาภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ มทร.บุรีรัมย์ คิดค้น  
 ผลิตภัณฑ์จากอาหารและผักผสมชา ดักจับ น้ำมัน

2 นักศึกษาภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ มทร.บุรีรัมย์ คิดค้นนวัตกรรม "เทคโนโลยีโฟมดูด  
 น้ำมัน" เพื่อแก้ไขปัญหาการปนเปื้อนและลดขยะ ขวดพลาสติกไม่ได้มีการหมุนเวียนใช้การ  
 นำกลับมาใช้ซ้ำเหมือน ขวดพลาสติกธรรมดาบ้านเรา และสามารถใช้งานได้ยาวนานถึง 50 ครั้ง  
 ส่วนนวัตกรรมนี้ใช้ต้นแบบเป็นชิ้นงานสำเร็จ ทำขึ้นด้วยวิธีขึ้นรูปจากของเหลือใช้จากการ  
 500 แห่งทั่วไทย (วช.)



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายภพธร คล้ายเข็ม
วัน เดือน ปีเกิด	6 กรกฎาคม 2541
ที่อยู่	133/44 ซอย.สุสาส1 หมู่4 ตำบลรังสิต อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110
การศึกษา	ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเคมีสิ่งแวดล้อมและเส้นใย-พอลิเมอร์และเส้นใย
เบอร์โทรศัพท์	0957398624
อีเมล	poptorn_k@mail.rmutt.ac.th

