

การแยกน้ำมันออกจากน้ำโดยใช้ฟองน้ำพอลิยูรีเทน
ที่ผ่านการปรับคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด

นายสรศักดิ์ มาดี

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

การแยกน้ำมันออกจากน้ำโดยใช้ฟองน้ำพอลิยูรีเทน
ที่ผ่านการปรับคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด

นายสรศักดิ์ มาตี

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

SEPARATION OF OIL FROM WATER
USING SUPERHYDROPHOBIC POLYURETHANE SPONGE

SORASAK MADEE

A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF BACHELOR
IN CHEMICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2017

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง การแยกน้ำมันออกจากน้ำโดยใช้ฟองน้ำพอลิยูรีเทน ที่ผ่านการปรับคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยั่งยืน

โดย นายสรศักดิ์ มาดี รหัสนักศึกษา 57011317

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. อภินันท์ นัมคณิสสรณ์

ปริญญาานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญาานิพนธ์นี้ ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญาานิพนธ์


.....ประธานกรรมการ
(ผศ.ดร. อภินันท์ นัมคณิสสรณ์)


.....กรรมการ
(ผศ.ดร. ชีรพร สุธีวงศ์)


.....กรรมการ
(ผศ.ดร. วรณวิไล ไกรพิเชษฐ์ เอวานส์)

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง	การแยกน้ำมันออกจากน้ำด้วยฟองน้ำพอลิยูรีเทนที่ผ่านการปรับคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด
โดย	นายสรศักดิ์ มาดี
รหัสประจำตัว	57011317
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา	2560
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.อภิรักษ์ นัมคณิสสรณ์

บทคัดย่อ

การประยุกต์ใช้หลักการของคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างสูงในกระบวนการแยก เช่น การแยกน้ำมันออกจากน้ำ หรือพื้นผิวที่สามารถทำความสะอาดตัวเองได้นั้นได้รับความสนใจอย่างมากในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา แต่อย่างไรก็ตามพื้นผิวที่มีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างสูงนี้ยังยากที่จะนำมาประยุกต์ใช้งานจริงเนื่องจากยังมีข้อบกพร่องอยู่ เช่น ความแข็งแรงเชิงกลต่ำ และกระบวนการเตรียมที่ยุ้งยาก ซับซ้อน โครงการนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาแนวทางที่จะพัฒนากระบวนการแยกน้ำมันออกจากน้ำโดยการใช้ฟองน้ำพอลิยูรีเทนที่ทำการปรับสภาพด้วยสารเคลือบที่เตรียมจากกรดไขมันและคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำ ฟองน้ำที่ผ่านการปรับปรุงแล้วจะถูกอธิบายลักษณะพื้นผิวด้วยลักษณะสัณฐานวิทยาของพื้นผิวและค่ามุมสัมผัสน้ำของหยดน้ำบนพื้นผิวฟองน้ำ ซึ่งพบว่าการปรับปรุงฟองน้ำนี้มีผลทำให้ค่ามุมสัมผัสมีค่าเพิ่มมากขึ้นจากฟองน้ำปกติที่มีมุมสัมผัสที่ประมาณ 90 องศา ให้มากขึ้นถึงกว่า 150 องศา ประสิทธิภาพในการใช้งานของฟองน้ำแสดงให้เห็นจากการทดสอบการดูดซับและการทดสอบความทนทานของสารเคลือบตามมาตรฐาน ASTM F726-99 ความสามารถในการดูดซับน้ำมันจะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ฟองน้ำที่มีปริมาตรรูพรุนมากและทำการปรับปรุงด้วยสารเคลือบที่ใช้กรดไขมันโมเลกุลใหญ่ขึ้น และแม้จำนวนรอบการใช้งานเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับยังมีค่ามากกว่า 80% หลังผ่านการใช้งานไปแล้ว 5 รอบ การทดสอบการยึดติดของสารเคลือบพบว่ามี การยึดติดที่ดีแม้จะอยู่ในสภาวะพลวัต

Report Title	Separation of Oil from Water Using Superhydrophobic Polyurethane Sponge
By	Mr. Sorasak Madee
Student ID	57011317
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Chemical Engineering
Year	2017
Advisor	Asst.Prof.Dr. Apinan Namkanisorn

ABSTRACT

Application of superhydrophobicity principles to separation processes such as oil – water separation and self-cleaning surfaces receives so much attention in recent years. However, practical uses of most current superhydrophobic surfaces are still limited due to some shortcomings such as weak mechanical strength and complexity of the preparation process. The present study focuses on developing a method for oil-water separation by using polyurethane sponge which has been treated with fatty acid modified copper hydroxide powder to improve its hydrophobic properties. The treated sponge was characterized for its surface morphology and the contact angles of water droplet on the sponge surface were measured. It was found that modification of the sponge resulted in an increase of contact angles of the sponge with a contact angle of 90 degrees to greater than 150 degrees. The performance of the sponge is shown by the adsorption Test and the durability Test of the coatings in accordance with ASTM F726-99. Absorption of the oil is enhanced by the use of a highly porous sponge and further improved by using a fatty acid with a larger molecular weight. After 5 cycle of adsorption the adsorption capacity is still more than 80%. The adhesion Test of the coating shows good adhesion even in dynamic conditions.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. อภินันท์ นัมคณิสสรณ์ ที่ให้ความช่วยเหลือ ความเอาใจใส่ ให้คำชี้แนะ คำปรึกษาในงานวิจัย และตรวจแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ อีกทั้งยังจัดหาเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดี อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งแก่ข้าพเจ้า ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. อธิพร สุธีวงศ์ และ ผศ.ดร. วรณวิไล ไกรเพ็ชร์ เอวานส์ กรรมการสอบหัวข้อ และโครงร่างวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะจนทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. ประกอบ กิจไชยา ที่มีความกรุณาเอื้อเฟื้อสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณอาจารย์ประจำ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี อาจารย์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ได้ให้วิชาความรู้ในทุกรายวิชาที่ศึกษาแก่ผู้ทำโครงการวิจัย ทำให้ผู้ทำโครงการวิจัยมีความรู้ความสามารถในการแก้ปัญหาและนำมาประยุกต์ใช้กับการทำโครงการวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณ มารดา และครอบครัวที่เคารพ ที่เป็นผู้ให้กำลังใจและคอยสนับสนุนผู้จัดทำมาโดยตลอด

คุณค่า และประโยชน์อันพึงมาจากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้ทำโครงการวิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน หากมีข้อผิดพลาดประการใดในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้ทำโครงการวิจัยขอน้อมรับและขออภัยไว้ ณ ที่นี้

สรศักดิ์ มาดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	i
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ii
กิตติกรรมประกาศ.....	iii
สารบัญ.....	iv
สารบัญตาราง.....	vii
สารบัญรูป.....	viii
บทที่ 1 บทนำ	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.1 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.2 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 พอลิยูรีเทน.....	3
2.1.1 ประเภทของพอลิยูรีเทน.....	3
2.1.2 การสังเคราะห์พอลิยูรีเทน	7
2.1.3 การวัดรูปทรงของฟองน้ำพอลิยูรีเทน	8
2.2 พื้นผิวไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด	9
2.2.1 ปรากฏการณ์การเปียก (Wetting phenomena).....	9
2.2.2 การประยุกต์ใช้งาน	13

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.3 สารเคลือบ Superhydrophobic Coating.....	13
2.3.1 กรดไขมัน (Fatty Acid).....	13
2.3.2 การสังเคราะห์สารเคลือบ Superhydrophobic Coating.....	15
2.4 กลไกการเคลือบผิวพองน้ำของสารเคลือบ	15
2.5 การทดสอบประสิทธิภาพพองน้ำ.....	16
2.5.1 คำนิยาม.....	16
2.5.2 การทดสอบการสลายตัว (Dynamic Degradation Test).....	16
2.5.3 การทดสอบการดูดซับน้ำมัน (Adsorption Test).....	16
2.5.4 การทดสอบการนำกลับมาใช้ใหม่ (Reuse Test).....	16
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	17
บทที่ 3 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีการดำเนินงาน.....	19
3.1 ขั้นตอนการศึกษา.....	19
3.2 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	19
3.2.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	19
3.2.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	19
3.3 ขั้นตอนการทดลอง.....	20
3.3.1 การวิเคราะห์พองน้ำก่อนปรับสภาพ.....	20
3.3.2 การเตรียมสาร Cu(OH) ₂	20
3.3.3 การเตรียมสาร Superhydrophobic Coating.....	21
3.3.4 การปรับปรุงผิวของพองน้ำด้วย Superhydrophobic Coating	21
3.3.5 การวิเคราะห์พองน้ำที่ผ่านการปรับสภาพแล้ว.....	21
3.3.6 การทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับน้ำมันด้วยพองน้ำที่ผ่านการปรับสภาพแล้ว	22

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล	23
4.1 โครงสร้างและการอธิบายลักษณะ	23
4.1.1 ลักษณะพื้นผิวของฟองน้ำ	23
4.1.2 Water Contact Angle.....	24
4.2 Porosity	25
4.3 Adsorption Capacity	25
4.3.1 Short Test.....	26
4.3.2 Long Test.....	28
4.4 Mechanical Stability	28
4.4.1 Dynamic Degradation Test.....	29
4.4.2 Reuse Test	30
 บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	 31
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	31
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	31
 เอกสารอ้างอิง	 31
 ภาคผนวก.....	 31
ภาคผนวก ก ข้อมูลผลการทดลอง.....	36
ภาคผนวก ข การคำนวณที่เกี่ยวข้องในการทดลอง	42

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 1 ตัวอย่างกรดไขมันอิ่มตัว	14
ตารางที่ 2 Lubricant Adsorption Capacity - Short Test	38
ตารางที่ 3 Gasoline Adsorption Capacity - Short Test	39
ตารางที่ 4 Gasoline Adsorption Capacity - Short Test	40
ตารางที่ 5 Lubricant Adsorption Capacity - Long Test.....	41

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 1 โครงสร้างแบบ Crosslinked ของพอลิยูรีเทนแบบยืดหยุ่น	4
รูปที่ 2 ลักษณะภายนอกของฟองน้ำพอลิยูรีเทน	4
รูปที่ 3 โครงสร้างแบบ Crosslinked ของพอลิยูรีเทนแบบแข็ง	5
รูปที่ 4 ลักษณะภายนอกของโฟมแข็งพอลิยูรีเทน.....	5
รูปที่ 5 โครงสร้างแบบ Crosslinked ของยางพอลิยูรีเทน	6
รูปที่ 6 ลักษณะภายนอกของยาง PU	6
รูปที่ 7 แสดงระดับการเปื่อยของของเหลวบนพื้นผิวของแข็งเรียงลำดับจากน้อยไปมาก A ถึง S	9
รูปที่ 8 ระดับการเปื่อยของของเหลวบนพื้นผิวของแข็ง	10
รูปที่ 9 ลักษณะของหยดของเหลวบนพื้นผิวของแข็งตามแบบจำลองต่างๆ	11
รูปที่ 10 สูตรโครงสร้างของกรดลอริก (C ₁₂).....	14
รูปที่ 11 การเกิดปฏิกิริยา Dehydration ของกรดลอริกกับคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์.....	15
รูปที่ 12 ลักษณะพื้นผิวของฟองน้ำโดยใช้ SEM.....	23
รูปที่ 13 ลักษณะหยดน้ำบนพื้นผิวของฟองน้ำปริมาตรรูพรุนน้อยที่ไม่ผ่าน (ก) และผ่านการเคลือบ (ข) และฟองน้ำปริมาตรรูพรุนมากที่ไม่ผ่าน (ค) และผ่านการเคลือบ (ง).....	24
รูปที่ 14 ความสามารถในการดูดซับน้ำมันหล่อลื่นของฟองน้ำชนิดต่างๆ ในการทดสอบ Short Test .26	
รูปที่ 15 ความสามารถในการดูดซับแก๊สโซลีน (น้ำมันเบนซิน) ของฟองน้ำชนิดต่างๆในการทดสอบ Short Test.....	27
รูปที่ 16 ความสามารถในการดูดซับคลอโรฟอร์มของฟองน้ำชนิดต่างๆ ในการทดสอบ Short Test...27	
รูปที่ 17 ความสามารถในการดูดซับคลอโรฟอร์มของฟองน้ำชนิดต่างๆ ในการทดสอบ Long Test....28	
รูปที่ 18 แสดงร้อยละของวัสดุที่จมน้ำเมื่อทำการทดสอบ Dynamic degradation Test	29
รูปที่ 19 แสดงร้อยละของน้ำมันหล่อลื่นที่แยกได้จากฟองน้ำในการทดสอบการใช้ซ้ำ	30
รูปที่ 20 สารสังเคราะห์ FAMC	36
รูปที่ 21 ลักษณะของฟองน้ำที่ Coated แล้ว	36
รูปที่ 22 การทดสอบ Dynamic Degradation	36

รูปที่ 23 การทดสอบ Adsorption Capacity	37
รูปที่ 24 การทดสอบมุมสัมผัส.....	37

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการผลิตน้ำมันนอกชายฝั่งและการคมนาคมทางน้ำ มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นผลให้ความเสี่ยงในการเกิดอุบัติเหตุที่ไม่คาดคิดขึ้นได้ นั่นคืออุบัติเหตุน้ำมันรั่วไหลในทะเล ในการกำจัดน้ำมันที่รั่วไหลนั้น จะมีวิธีการต่างๆกันออกไปตามสถานการณ์ หนึ่งในนั้นจะเป็นการใช้วัสดุดูดซับ^[7] โดยอาศัยการดูดซับน้ำและน้ำมันที่แตกต่างกันของวัสดุ ดังนั้นจึงสามารถประยุกต์ใช้คุณสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด (Superhydrophobic) เพื่อการดูดซับน้ำมันได้ เนื่องจากวัสดุที่มีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำมากจะทำให้ไม่สามารถซึมผ่านวัสดุนั้นได้ ในขณะที่น้ำมันสามารถซึมผ่านได้

แต่ถึงแม้พื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดจะมีข้อดีดังที่ได้กล่าวข้างต้น แต่ก็ยังมีจุดอ่อนในด้านการเตรียมมีความยุ่งยากซับซ้อน และความแข็งแรงเชิงกลต่ำ ดังนั้นในปัจจุบันการศึกษาเกี่ยวกับพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำจึงเน้นไปในด้านการหาวิธีการที่ให้ผลที่ดี ง่ายต่อการเตรียม ใช้ต้นทุนในการผลิตต่ำ และมีความคงทนสูง

กรดไขมันเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบพื้นฐานของไขมันทุกชนิด มีหางเป็นโซ่แบบอะลิฟาติก (Aliphatic) ยาว จุดหลอมเหลวขึ้นกับจำนวนคาร์บอนและจำนวนพันธะคู่ และมีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำ จึงสามารถใช้ประโยชน์จากคุณสมบัตินี้ในการสังเคราะห์สารที่มีความไม่ชอบน้ำได้ โดยทำให้เกิดปฏิกิริยากับดีไฮเดรชันกับคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์ เพื่อการสังเคราะห์สารเคลือบที่มีความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด^{[8],[20]}

1.1 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1.2.1 เพื่อสังเคราะห์สารเคลือบที่ไม่ชอบน้ำอย่างยั่งยืน
- 1.2.2 เพื่อสร้างความไม่ชอบน้ำอย่างยั่งยืนให้กับพองน้ำ
- 1.2.3 เพื่อประยุกต์ใช้พองน้ำที่ปรับปรุงคุณสมบัติแล้ว ในการแยกน้ำมันออกจากน้ำ

1.2 ขอบเขตของการศึกษา

- 1.3.1 ศึกษาคุณสมบัติของพองน้ำที่เลือกใช้
- 1.3.2 ศึกษาวิธีการสร้างสารที่มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำอย่างยั่งยืนและการปรับสภาพพองน้ำ
- 1.3.3 ศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำมันของพองน้ำที่ผ่านการแปรสภาพแล้ว

1.3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์สารที่มีความไม่ชอบน้ำอย่างยั่งยืน
- 1.4.2 จัดเตรียมอุปกรณ์ และออกแบบการทดลอง
- 1.4.3 ศึกษาคุณสมบัติความเป็นรูพรุนของพองน้ำ
- 1.4.4 เตรียมสารคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์จากสารคอปเปอร์ซัลเฟต
- 1.4.5 เตรียมสารที่ไม่ชอบน้ำอย่างยั่งยืน จากคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์และกรดไขมัน
- 1.4.6 ทำการทดลองเพื่อปรับสภาพพองน้ำ
- 1.4.7 ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของพองน้ำที่ปรับสภาพแล้ว
- 1.4.8 ทดลองดูดซับน้ำมันและทดสอบประสิทธิภาพของพองน้ำที่ปรับสภาพแล้ว

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ได้แนวทางในการสร้างสารที่มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำอย่างยั่งยืน
- 1.5.2 ได้แนวทางในการปรับสภาพความไม่ชอบน้ำอย่างยั่งยืนให้กับพองน้ำ
- 1.5.3 สามารถนำความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบกระบวนการแยกน้ำมันออกจากน้ำ เพื่อประยุกต์ใช้ต่อไปได้ เช่น การกำจัดคราบน้ำมันในสภาพแวดล้อมจำเพาะ หรือการผลิต ตัวดูดซับคราบน้ำมันหรือสารเคมีจากเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พอลิยูรีเทน^{[16][17]}

พอลิยูรีเทน (PUs) เป็นพอลิเมอร์อเนกประสงค์ในการสังเคราะห์ และการประยุกต์ใช้ คุณสมบัติที่เหนือกว่าทำให้เหมาะสำหรับการใช้งานที่หลากหลาย มีคุณสมบัติทางกลที่ดี ความต้านทานต่อสารเคมี และความยืดหยุ่นสูง ฟังก์ชันปฏิกิริยาที่อยู่ในห่วงโซ่หลักของพอลิยูรีเทนจะช่วยเพิ่มความเข้ากันได้กับพอลิเมอร์ส่วนใหญ่ และเหมาะสำหรับการสร้างโครงสร้างเครือข่าย พอลิยูรีเทนมีความแตกต่างจากพอลิเมอร์ทั่วไปเนื่องจากไม่มียูรีเทนโมโนเมอร์ การเชื่อมโยงทางเคมีที่มีอยู่ในพอลิเมอร์จะแสดงเป็นหมู่ฟังก์ชันไอโซไซยาเนต (-NHCOO-) ผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้ายจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับวัตถุดิบตั้งต้น ลักษณะ คุณสมบัติและการใช้งาน พอลิยูรีเทนมีการสังเคราะห์ครั้งแรกในปี 1937 โดยนักเคมีชาวเยอรมัน Prof. Otto Bayer ผ่านปฏิกิริยา polyaddition กลายเป็นพลาสติกที่มีความต้องการมากที่สุดในโลก การสังเคราะห์พอลิยูรีเทนเป็นเรื่องง่ายในพื้นฐาน แต่ความจริงแล้วเป็นเรื่องที่ซับซ้อนในทางปฏิบัติ ด้วยความหลากหลายของสารตั้งต้น สารเติมแต่ง และตัวเร่งปฏิกิริยา ทั้งหมดล้วนมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา

พอลิยูรีเทนถูกสังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาการเติมของแอลกอฮอล์และไอโซไซยาเนต ไดไอโซไซยาเนตจะทำปฏิกิริยากับไดออลหรือพอลิออล ซึ่งเป็นส่วนที่มีความเป็นแอลกอฮอล์ เนื่องจากส่วนประกอบทั้งสองชนิดนี้มีความหลากหลายมาก จึงสามารถสังเคราะห์พอลิยูรีเทนที่มีคุณสมบัติหลากหลายได้ เช่น สามารถสังเคราะห์ให้มีความอ่อนนุ่มในกรณีของการผลิตโฟม หรือทำให้มีความแข็งในกรณีของการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ พอลิยูรีเทนมีอยู่ในรูปแบบต่างๆในชีวิตของเราตั้งแต่เสื้อผ้า รองเท้า เติงนอน ไปจนถึงวัสดุคุมหลังคาบ้าน

2.1.1 ประเภทของพอลิยูรีเทน

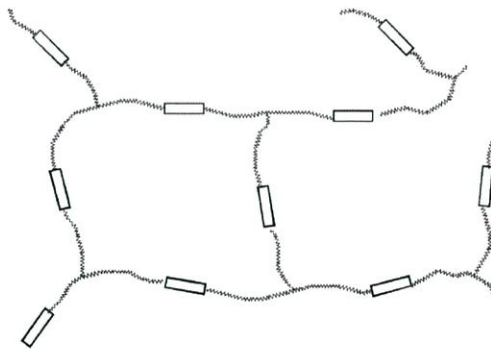
โดยปกติ พอลิยูรีเทนจะแบ่งโครงสร้างออกเป็นส่วนที่แข็งและส่วนที่อ่อน ส่วนที่แข็งมาจากไอโซไซยาเนตและส่วนที่อ่อนนุ่มมาจากไดออลเกิดขึ้นตามปกติ ความยาวและมวลโมเลกุลของมอนอเมอร์มีอิทธิพลโดยตรงต่อลักษณะของพอลิยูรีเทนที่เกิดขึ้น มอนอเมอร์ที่มีมวลโมเลกุลต่ำจะมีความเข้มข้น

ของยูรีเทนมาก จะทำให้แข็งและกระด้าง ในทางกลับกัน มอนอเมอร์ที่โมเลกุลยาวและมวลโมเลกุลมาก เมื่อรวมกันเป็นพอลิยูรีเทนจะให้ส่วนที่มีความอ่อนนุ่มมาก เมื่อความเข้มข้นของส่วนที่อ่อนนุ่มเพิ่มขึ้น วัสดุที่เกิดจะมีความยืดหยุ่น ปัจจัยหลักที่กำหนดลักษณะของผลิตภัณฑ์ คืออัตราส่วนของหมู่ไอโซไซยาเนตกับหมู่ไฮดรอกซิล สารยับยั้งปฏิกิริยาข้างเคียง และตัวเร่งปฏิกิริยาที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ในการสังเคราะห์พอลิยูรีเทน

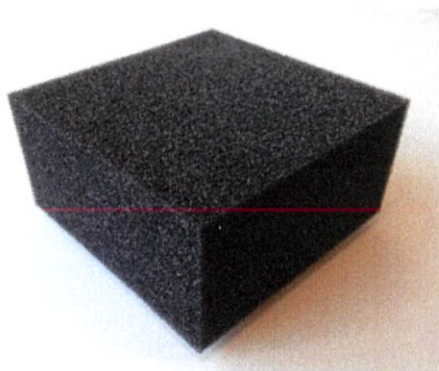
เกณฑ์ในการแบ่งพอลิยูรีเทนออกเป็นประเภทต่าง ๆ นั้น จะขึ้นอยู่กับวิธีการสังเคราะห์และการนำไปประยุกต์ใช้งาน โดยแบ่งได้ดังนี้

- โฟมยืดหยุ่นความหนาแน่นต่ำ

โฟมยืดหยุ่นความหนาแน่นต่ำใช้สำหรับเฟอร์นิเจอร์ ที่นั่งรถบรรทุกและเบาะรองนั่ง คุณสมบัติที่จำเป็นสำหรับการใช้งานในอุตสาหกรรมดังกล่าว คือ ต้องมีความยืดหยุ่น มีความแข็งแรงทางกลและความทนทานสูง



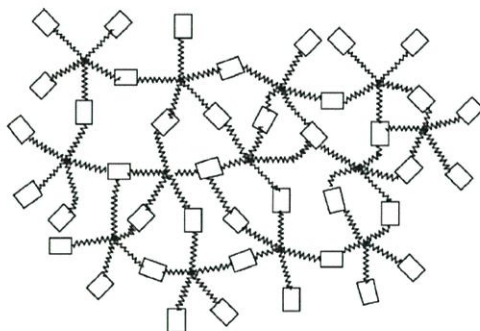
รูปที่ 1 โครงสร้างแบบ Crosslinked ของพอลิยูรีเทนแบบยืดหยุ่น



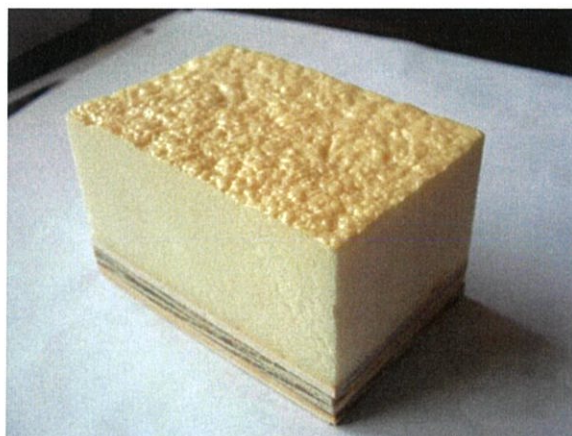
รูปที่ 2 ลักษณะภายนอกของฟองน้ำพอลิยูรีเทน

• โฟมแข็งความหนาแน่นต่ำ

โฟมแข็งความหนาแน่นต่ำมีความแข็งแรงทางกลสูง การนำความร้อนต่ำ การดูดซึมความชื้นต่ำ และความหนาแน่นต่ำ ใช้เป็นวัสดุหลักในการผลิตฉนวนความร้อนในตู้เย็นและฉนวนอาคาร



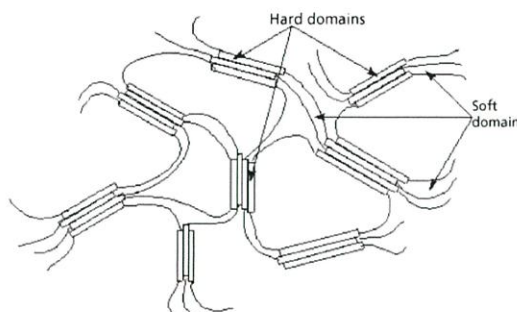
รูปที่ 3 โครงสร้างแบบ Crosslinked ของพอลิยูรีเทนแบบแข็ง



รูปที่ 4 ลักษณะภายนอกของโฟมแข็งพอลิยูรีเทน

• ยางพอลิยูรีเทน

อีกประเภทหนึ่งคือยางพอลิยูรีเทน มีต้นทุนต่ำ ความต้านทานต่อแรงอัดสูง และง่ายต่อการสังเคราะห์ ยางพอลิยูรีเทนเป็นสารทดแทนสำหรับพลาสติกและยาง มีความทนทานต่อการสึกหรอ ทนต่อสารละลายและสารเคมี ทนต่อแรงกระแทกได้ดี และมีความชื้นต่ำ สมบัติทางกลที่เหนือกว่าเหล่านี้ทำให้เหมาะสำหรับการผลิตวัสดุบรรจุภัณฑ์ในอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพและอุตสาหกรรมการพิมพ์ และยังสามารถใช้ในล้อ ลูกกลิ้ง รอก ไซค์อ็อปและ Bushings หรือใช้เพื่อการผลิตพื้นรองเท้าในอุตสาหกรรมรองเท้า



รูปที่ 5 โครงสร้างแบบ Crosslinked ของยางพอลิยูรีเทน



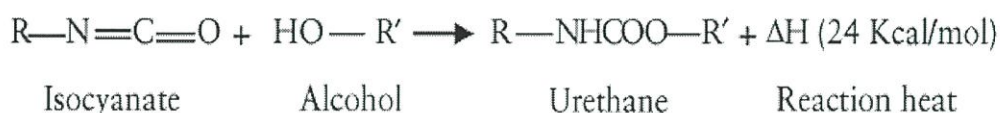
รูปที่ 6 ลักษณะภายนอกของยาง PU

● เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน

ประเภทที่สำคัญมากของพอลิยูรีเทนคือเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน วัสดุชนิดนี้แตกต่างกันไป ในคุณสมบัติของวัสดุเริ่มต้น เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนสามารถสังเคราะห์เพื่อให้ได้คุณสมบัติตามที่ต้องการ คล้ายคลึงกับพลาสติก ยืดหยุ่นได้ดี มีความความโปร่งใส เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPUs) เป็นพอลิยูรีเทนที่มีการสลับบล็อกหนักและอ่อน ความยาวของบล็อกอ่อนและแข็งสามารถควบคุมได้ในระหว่างการสังเคราะห์ มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในอุปกรณ์ทางการแพทย์ ล้อเลื่อน อุปกรณ์ไฟฟ้า กีฬา และอุตสาหกรรมรองเท้า คุณสมบัติของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน คือ มีความแข็งแรงสูง ทนต่อสารเคมีและตัวทำละลาย และมีความต้านทานต่อน้ำมันและไขมัน

2.1.2 การสังเคราะห์พอลิยูรีเทน

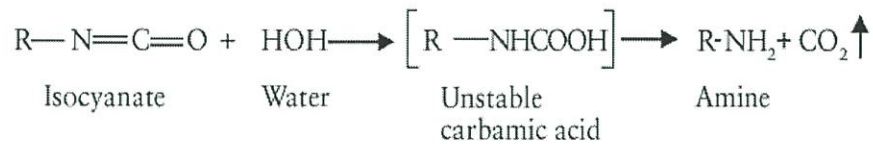
พอลิยูรีเทน เป็นพอลิเมอร์ที่มีการเกิดปฏิกิริยาค่ายกับอีพอกซีและพอลิเอสเทอร์ ได้จากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างไดออลและไดไอโซไซยาเนต ไดออลจะมีหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล 2 หมู่ และไดไอโซไซยาเนตมีหมู่ฟังก์ชันไอโซไซยาเนตเป็นจุดสิ้นสุด พอลิยูรีเทนสามารถสังเคราะห์ได้ในขั้นตอนเดียว (The One Short Method) โดยการผสมส่วนประกอบโดยตรง หรือสังเคราะห์วิธีการพรีพอลิเมอร์ (Prepolymer Method) วิธีพรีพอลิเมอร์จะเป็นปฏิกิริยาการเติมของไดออลและไอโซไซยาเนตเพื่อสร้างพอลิยูรีเทนพรีพอลิเมอร์ด้วยหมู่ฟังก์ชันไอโอไซยาเนตเป็นจุดสิ้นสุด พรีพอลิเมอร์นี้จะถูกขยายออกไปพร้อมกับยีสายโซ่เพื่อสร้างพอลิยูรีเทน ไอโอไซยาเนตที่มีการใช้มากที่สุดในการสังเคราะห์พอลิยูรีเทนคือ ไดฟีนิลมีเทนไดไอโซไซยาเนต (MDI) หรือโทลูอินไดไอโซไซยาเนต (TDI) เฮกซะเมทิลีนไดไอโซไซยาเนต (HDI) หรือไอโซฟอโรนไดไอโซไซยาเนต (IPDI) ไอโซไซยาเนตแบบอะโรมาติกจะเกิดปฏิกิริยาได้มากกว่าแบบอะลิฟาติก พอลิออลที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิยูรีเทนสามารถเกิดเป็น พอลิอีเทอร์พอลิออลและพอลิเอสเทอร์พอลิออล พอลิอีเทอร์พอลิออล คือเอทิลีนไกลคอล โพรพิลีนไกลคอล พอลิเอทิลีนโพรพิลีนออกไซด์ และพอลิเอสเทอร์พอลิออลเป็นผลิตภัณฑ์ Condensed ของกรดอะดิปิกหรือกรดทาลิกกับ 1,4 - บิวเทนไดออล หรือ 1,6 - เฮกเซนไดออล การก่อตัวนี้เกี่ยวข้องกับการจัดเรียงใหม่ของไฮโดรเจนจากแอลกอฮอล์ไปยังไนโตรเจนของไอโซไซยาเนต และพันธะระหว่างออกซิเจนกับคาร์บอน ปฏิกิริยาอย่างง่ายระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลกับหมู่ไอโซไซยาเนตแสดงได้ดังนี้



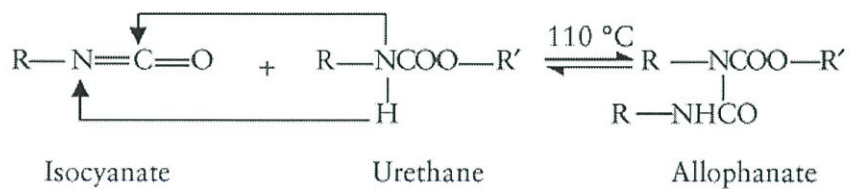
ในการสังเคราะห์พอลิยูรีเทน ไอโซไซยาเนตอาจเกิดปฏิกิริยากับสารอื่น เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงเป็นสารเคมีได้หลายชนิด เช่น ยูเรีย อัลโลฟาเนต กรดยูริก เป็นต้น

ตัวอย่างการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียง

- การเกิดปฏิกิริยาระหว่างไอโซไซยาเนตกับน้ำ



- การเกิดปฏิกิริยาระหว่างไอโซไวยาเนตกับยูรีเทน



2.1.3 การวัดรูพรุนของฟองน้ำพอลิยูรีเทน^[1]

Porosity หรือ Void Fraction หมายถึง ช่องว่างในวัสดุ สัดส่วนของปริมาตรของช่องว่างนี้ ต่อ ปริมาตรทั้งหมดของวัสดุจะมีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 หรือ 0 ถึง 100% การทดสอบมีจุดประสงค์เพื่อ ทดสอบปริมาตรช่องว่างที่สามารถเข้าถึงได้

การทดสอบสามารถทำได้หลายวิธี เช่น

- วิธีการทางตรง คือ การหาปริมาตรรวมของตัวอย่าง และหาปริมาตรเฉพาะโครงสร้างของวัสดุ ตามสมการที่ (1)

$$\text{ปริมาตรรูพรุน} = \text{ปริมาตรรวม} - \text{ปริมาตรของเนื้อวัสดุ}$$

(1)

- วิธีการระเหย คือ เทียบความแตกต่างของน้ำหนักวัสดุที่อิมตัวกับวัสดุแห้ง เพื่อคำนวณหาปริมาณ ของของเหลวซึ่งเทียบได้กับปริมาณของรูปพรุน ตามสมการที่ (2)

$$\text{ปริมาตรรูปพรุน} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างอิมตัว} - \text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง}}{\text{ความหนาแน่นของของเหลว}} \quad (2)$$

- วิธีการอิมตัว คือ ใช้การวัดปริมาณของของเหลว ก่อนและหลังจากการแช่วัสดุที่มีรูปพรุน ตามสมการที่ (3)

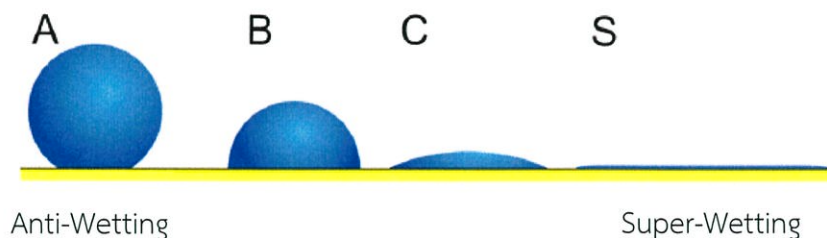
$$\text{ปริมาตรรูปพรุน} = \text{ปริมาตรรวมของของเหลว} - \text{ปริมาตรที่เหลือหลังแช่} \quad (3)$$

2.2 พื้นผิวไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด^[21]

2.2.1 ปรากฏการณ์การเปียก (Wetting Phenomena)^{[4],[5]}

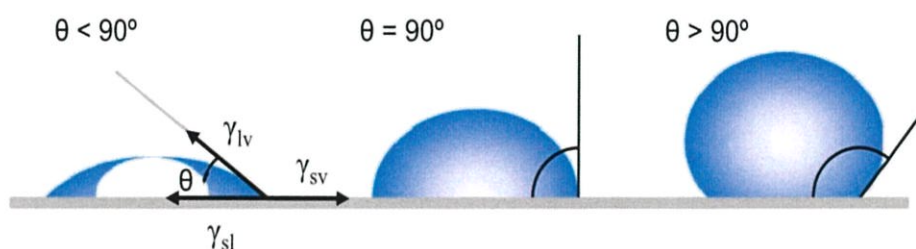
2.2.1.1 Wettability

การเปียกของพื้นผิววัสดุของแข็งด้วยของเหลวเป็นส่วนสำคัญของวิทยาศาสตร์วัสดุและเคมีพื้นผิว และเป็นการทำให้เห็นการใช้งานจริงในชีวิตประจำวันและอุตสาหกรรม เมื่อหยดวางบนพื้นผิวใดพื้นผิวหนึ่ง จะเกิดความเป็นไปได้ 2 กรณีคือ หยดน้ำจะเป็นทรงกลม เรียกว่า Anti-Wetting หรืออีกกรณีหยดน้ำเปียกบนพื้นผิวอย่างสมบูรณ์ เรียกว่า Super-Wetting



รูปที่ 7 แสดงระดับการเปียกของของเหลวบนพื้นผิวของแข็ง เรียงลำดับจากน้อยไปมาก A ถึง S

ในการศึกษาเกี่ยวกับการเปียก มักจะใช้ค่ามุมสัมผัสเป็นหนึ่งในข้อมูลสำคัญที่แสดงค่าการเปียกเมื่อของเหลวสัมผัสที่พื้นผิวของของแข็ง พิจารณาหยดของของเหลวบนพื้นผิวในแนวนอนดังรูปที่ 8 มุมสัมผัสถูกกำหนดจากจุดตัดของส่วนที่สัมผัสกันระหว่างของแข็งและของเหลว ซึ่งจากรูป แสดงให้เห็นว่าเมื่อการกระจายของของเหลวบนพื้นผิวมาก มุมสัมผัสจะมีค่าน้อย แต่ถ้าหากพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของแข็งและของเหลวมีค่าน้อย มุมสัมผัสจะมีค่ามาก



รูปที่ 8 ระดับการเปียกของของเหลวบนพื้นผิวของแข็ง

พิจารณาหยดของเหลวที่วางไว้บนพื้นผิวในแนวนอน มุมการสัมผัสถูกกำหนดเป็นมุมที่เกิดจากจุดตัดของส่วนติดต่อของของแข็งของเหลวและของแข็ง รูปที่ 8 แสดงให้เห็นว่ามุมสัมผัสขนาดเล็กเกิดขึ้นเมื่อมีการกระจายของของเหลวบนพื้นผิวขณะที่มุมสัมผัสขนาดใหญ่เกิดขึ้นเมื่อมีพื้นที่สัมผัสต่ำระหว่างของแข็งและของเหลว

2.2.1.2 ความต้องการในการสร้างพื้นผิวไม่ชอบน้ำอย่างยั่งยืน

ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปียกของพื้นผิวที่สำคัญมีอยู่ 3 ประการ คือ พลังงานอิสระพื้นผิว ความขรุขระของพื้นผิว และความเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งสองปัจจัยแรกเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยั่งยืน การลดพลังงานพื้นผิวจะสามารถทำให้มุมสัมผัสน้ำสูงสุดของพื้นผิวเรียบอยู่ที่ประมาณ 120 องศา และโครงสร้างพื้นผิวที่มีความขรุขระสามารถดักจับอากาศปริมาณมากเพื่อรักษาเสถียรภาพของสภาวะ Cassie-Baxter

- **พลังงานพื้นผิว**

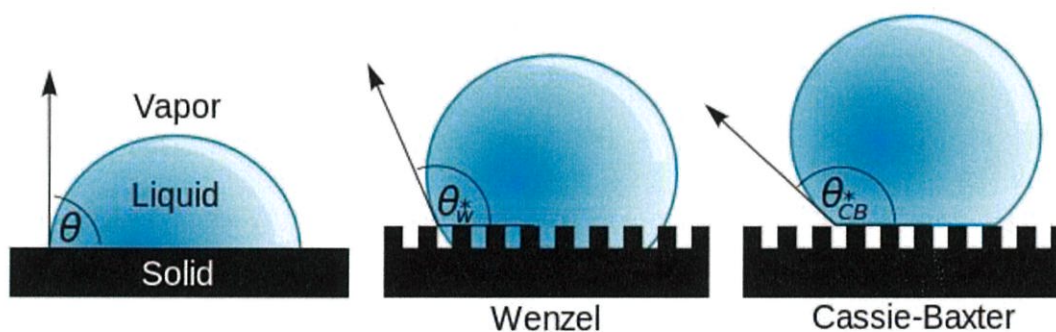
การลดลงของพลังงานผิวเป็นเรื่องธรรมดาที่จะทำให้พื้นผิวมีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยั่งยืน ซึ่งจะทำให้การลดได้โดยสารลดแรงตึงผิว สารเหล่านี้มีหลากหลายประเภทและการใช้งาน ส่วน

ใหญ่ที่เป็นที่นิยมคือสารกลุ่มซิลเลน (Silane) โดยเฉพาะฟลูออโรแอลคิลซิลเลน แต่เนื่องจากค่าใช้จ่ายและความเสี่ยงสูงที่จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จึงไม่เหมาะสมในการใช้งานเท่าที่ควร

- **ลักษณะขรุขระของพื้นผิว**

พื้นผิวขรุขระสามารถสร้างคุณสมบัติไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดให้กับพื้นผิวได้ เนื่องจากอากาศจะแฝงอยู่ในส่วนต่างๆของพื้นผิวดังกล่าว เมื่อหยดน้ำถูกหยดลงบนพื้นผิวจึงไม่สัมผัสกับพื้นผิวทั้งหมด และเนื่องจากพลังงานพื้นผิวดำ การที่มีอากาศน้ำจึงไม่ซึมเข้าไป ทำให้พื้นที่ผิวลดลงซึ่งส่งผลให้เกิดแรงเสียดทานลดลง เป็นผลให้หยดน้ำลื่นบนพื้นผิวได้ง่าย วิธีการสร้างความขรุขระ มักจะใช้อนุภาคนาโนเป็นองค์ประกอบหลัก

2.2.1.3 แบบจำลองการเปียก (Wetting Model)



รูปที่ 9 ลักษณะของหยดของเหลวบนพื้นผิวของแข็งตามแบบจำลองต่างๆ

- **Young's Model**

สำหรับหยดของเหลวบนพื้นผิวเรียบ ในแบบจำลองนี้ การเปียกจะถูกกำหนดโดยพลังงานอิสระของพื้นผิวของแข็ง จะได้ตาม Young's equation ในสมการที่ (4)

$$\cos\theta = \frac{\gamma_{sv} - \gamma_{sl}}{\gamma_{lv}} \quad (4)$$

เมื่อ γ คือ แรงตึงผิว

θ คือ มุมสัมผัสที่วัดได้จากการหยดของเหลวบนของแข็ง

จากสมการจะเห็นได้ว่า แรงตึงผิวเป็นสัดส่วนกับมุมสัมผัส กล่าวได้ว่ามุมของ Young สร้างโดยคำนึงถึงสมดุลทางอุณหพลศาสตร์ของพลังงานพื้นผิวอิสระที่ผิวหน้าของของแข็ง-ของเหลว-แก๊ส แต่เนื่องจากพื้นที่ผิวที่เกิดขึ้นจริงนั้น มีสภาพพื้นผิวที่แตกต่างกัน มีความขรุขระของพื้นผิว ซึ่งเป็นปัจจัย

สำคัญในการวัดการเปียก ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงไม่สามารถอธิบายตามสมการของ Young ได้อย่างสมบูรณ์

- *Wenzel's Model*

แบบจำลองที่คำนึงถึงผลของความขรุขระและพลังพื้นผิวอิสระสัมพันธ์กับมุมสัมผัส เป็นไปตามสมการ (5)

$$r(\gamma_{sv} - \gamma_{sl}) = \gamma_{lv} \cos \theta_W^* \quad (5)$$

เมื่อ θ_W^* คือ มุมสัมผัสของ Wenzel ที่มีผลจากความขรุขระของพื้นผิว

และ r คือ ค่าความขรุขระของพื้นผิว จะได้สมการของ Wenzel ตามสมการ (6)

$$\cos \theta_W^* = r \cos \theta \quad (6)$$

สมการของ Wenzel อธิบายพื้นผิวขรุขระที่ปรับเปลี่ยนความสามารถในการยึดเกาะและป้องกันการยึดติดได้ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะพื้นผิว ดังนั้นเมื่อมุมสัมผัสของผิวเรียบมากกว่า 90 องศา ความขรุขระจะเพิ่มมุมสัมผัส และถ้าหากมุมสัมผัสน้อยกว่า 90 องศา การเพิ่มความขรุขระของพื้นผิวจะลดมุมสัมผัสลง แบบจำลองของ Wenzel อธิบายได้แค่พื้นผิวที่เป็นเนื้อเดียวกัน ไม่สามารถอธิบายพื้นผิวที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันได้

- *Cassie - Baxter's Model*

แบบจำลองสำหรับพื้นผิวที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ประกอบด้วย 2 ส่วน ตามสมการ (7)

$$\cos \theta = f_1 \cos \theta_1 + f_2 \cos \theta_2 \quad (7)$$

เมื่อ θ คือ มุมสัมผัสของแบบจำลอง Cassie - Baxter ในแบบจำลองนี้สมมติให้มีอากาศอยู่ในช่องว่างของพื้นผิวใต้ของเหลว จะพิจารณาได้ว่าพื้นผิวของวัสดุไม่สัมผัสกับของเหลวและไม่เปียก ถ้ามีแค่อากาศที่อยู่ระหว่างของแข็งและของเหลว มุม θ_2 จะเป็น 180 องศา สามารถเขียนได้ดังสมการ (8)

$$\cos \theta_{CB} = f_s (\cos \theta_s + 1) - 1 \quad (8)$$

2.2.2 การประยุกต์ใช้งาน

การใช้งานพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดนี้ มีการประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายวิธีการเตรียมก็แตกต่างกันออกไปกับวัตถุประสงค์ที่จะใช้งาน

- Increase of corrosion resistance
- Anti-fogging surfaces
- Anti-bacterial surfaces
- Anti-icing surfaces
- Oil and water separation
- Self – cleaning surfaces
- Drag reduction
- Sensors
- Optical devices
- Membrane distillation and water desalination

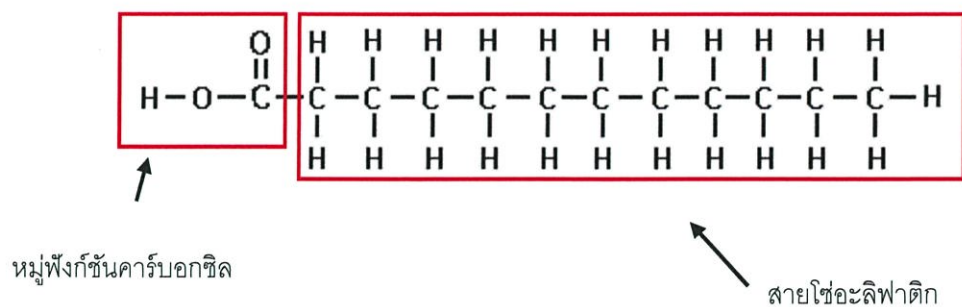
2.3 สารเคลือบ Superhydrophobic Coating

2.3.1 กรดไขมัน^[22]

กรดไขมันเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบพื้นฐานของไขมันทุกชนิด ลักษณะเป็นกรดคาร์บอนิก มีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล มีหางของเป็นโซ่แบบอะลิฟาติก (Aliphatic) ยาว จำนวนคาร์บอนอย่างน้อย 8 อะตอม ไม่แตกกิ่ง ถ้าหากพันธะระหว่างคาร์บอนอาจเป็นพันธะเดี่ยวทั้งหมด จะเรียกว่ากรดไขมันอิ่มตัว ซึ่งถ้ามีความอิ่มตัวมาก จะมีลักษณะเป็นไขมัน เช่น กรดลอริก (C_{12}) กรดไมริสติก (C_{14}) กรดปาล์มิติก (C_{16}) กรดสเตียริก (C_{18}) เป็นต้น หรือถ้าหากมีพันธะคู่ในโมเลกุล จะเรียกว่ากรดไขมันไม่อิ่มตัว กรดไขมันมีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำ จุดหลอมเหลวของกรดไขมันขึ้นกับจำนวนคาร์บอนและจำนวนพันธะคู่

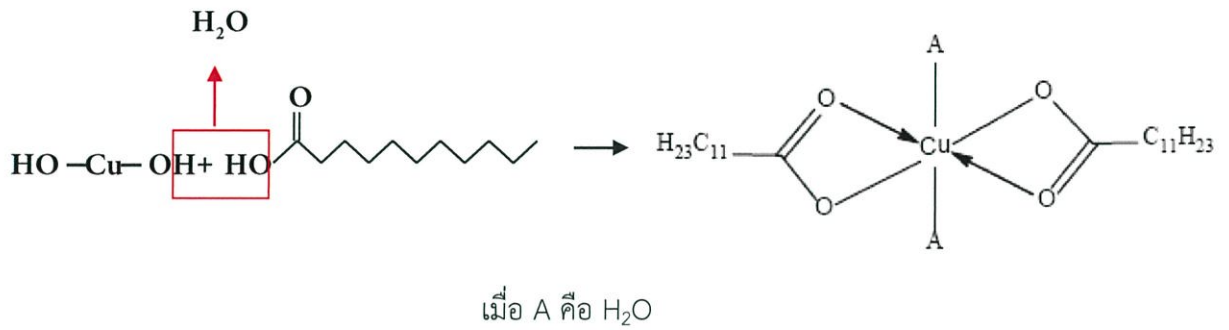
ตารางที่ 1 ตัวอย่างกรดไขมันอิ่มตัว

ชื่อทั่วไป	โครงสร้างทางเคมี	จำนวนอะตอมคาร์บอน
Caprylic acid	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_6\text{COOH}$	8
Capric acid	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_8\text{COOH}$	10
Lauric acid	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{COOH}$	12
Myristic acid	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{12}\text{COOH}$	14
Palmitic acid	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{COOH}$	16
Stearic acid	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$	18
Arachidic acid	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{18}\text{COOH}$	20
Behenic acid	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{20}\text{COOH}$	22
Lignoceric acid	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{22}\text{COOH}$	24
Ceotic acid	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{24}\text{COOH}$	26

รูปที่ 10 สูตรโครงสร้างของกรดลอริก (C_{12})

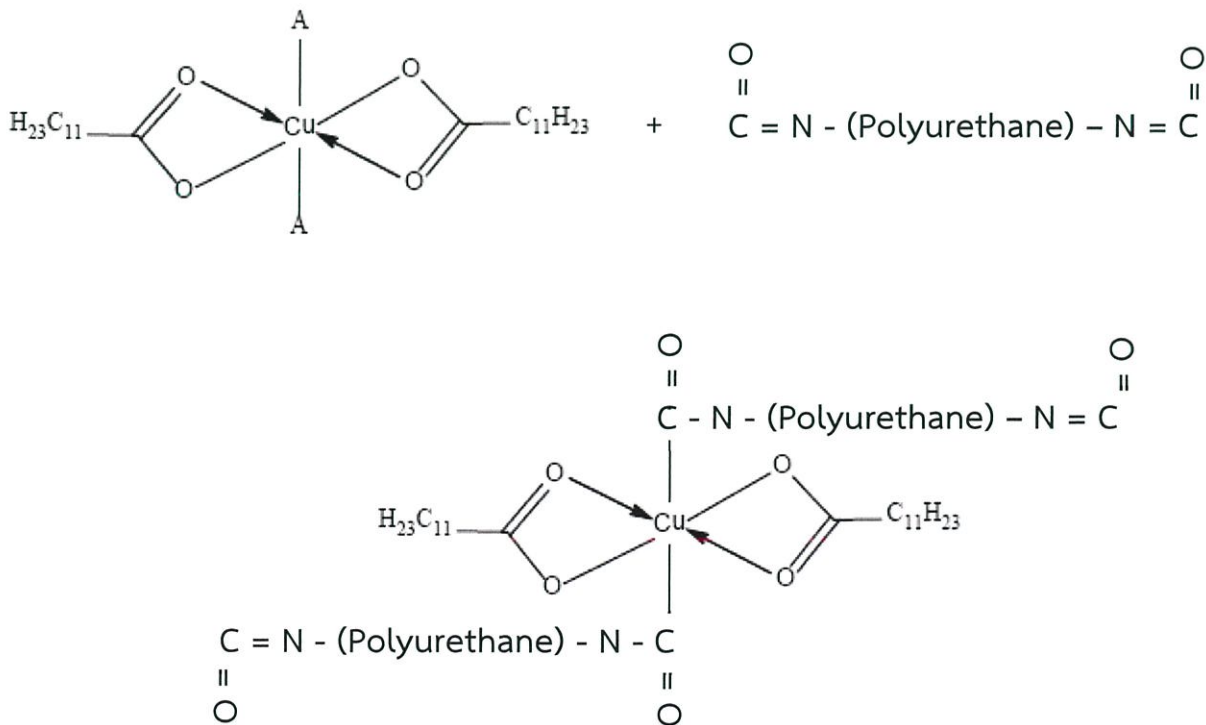
2.3.2 การสังเคราะห์สารเคลือบ Superhydrophobic Coating^{[8],[20]}

การสังเคราะห์สารเคลือบ สามารถเตรียมได้จากปฏิกิริยาการกำจัดน้ำ (Dehydration) ของกรดไขมันและคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์ เริ่มจากไอออนไฮโดรเจนจากคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์จะรวมตัวกับไอออนไฮดรอกไซด์ที่มาจากกรดไขมันเกิดเป็นน้ำ ส่วนที่เหลือของคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์ออกซิเจนจะเกิดพันธะกับอะตอมของคาร์บอนในหมู่คาร์บอกซิล เกิดเป็นสารประกอบของคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์และกรดไขมัน



รูปที่ 11 การเกิดปฏิกิริยา Dehydration ของกรดลอริกกับคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์

2.4 กลไกการเคลือบผิวพองน้ำของสารเคลือบ^{[9],[19]}



2.5 การทดสอบประสิทธิภาพฟองน้ำ

เป็นการทดสอบวัสดุดูดซับตามมาตรฐาน ASTM F726-99^[23] โดยใช้ในการทดสอบปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวข้อง จะมีการตรวจวัดความสามารถในการดูดซับน้ำมัน การลอยตัว การทดสอบสอบการนำกลับมาใช้ใหม่

2.5.1 คำนิยาม

- Adsorbed - วัสดุไม่ละลายน้ำที่เคลือบด้วยของเหลวบนผิว รวมทั้งรูพรุนโดยของแข็งต้องไม่บวมเกินกว่า 50% ในของเหลวที่มากเกินไป
- Reuse - การสกัดของเหลวออกจากวัสดุดูดซับโดยเทคนิคดูดซับผ่านม้วน หรือการบีบอัดอื่นๆ ที่ทำให้สามารถใช้ตัวดูดซับได้อีกครั้ง

2.5.2 การทดสอบการสลายตัว (Dynamic Degradation Test)

การทดสอบนี้เป็นขั้นตอนที่ออกแบบมาเพื่อจำลองความคงทนของการยึดติดของสารเคลือบภายใต้สภาวะพลวัตโดยใช้เครื่อง Shaker เพื่อตรวจวัดวัสดุส่วนที่จมน้ำ ซึ่งต้องไม่เกิน 10% ของปริมาตรวัสดุ ทดสอบการซับน้ำและคำนวณ Water Pick-Up Ratio

2.5.3 การทดสอบการดูดซับน้ำมัน (Adsorption Test)

การทดสอบนี้จะทำให้ข้อมูลความจุสูงสุดที่เป็นไปได้และเวลาที่เหมาะสำหรับการอิมมัตววัตถุประสงค์ของการทดสอบนี้คือการกำหนดความสามารถในการดูดซับที่เหมาะสม การทดสอบจะใช้ความหนาของชั้นน้ำมันที่ใกล้เคียงหรือมากกว่าตัวดูดซับ โดยการทดสอบจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วงเวลา

- Short Test - ใช้เวลาทดสอบ 15 นาที
- Long Test - ใช้เวลาทดสอบ 24 ชั่วโมง

2.5.4 การทดสอบการนำกลับมาใช้ซ้ำ

การทดสอบนี้เพื่อทำการหาขอบเขตของตัวดูดซับสามารถอิมมัตวแล้วนำกลับมาใช้ซ้ำ โดยสิ่งที่ทำการวัดคือจำนวนรอบที่สามารถใช้ซ้ำได้โดยไม่เกิดการฉีกขาดหรือการเสื่อมสภาพอื่นๆ อีกปัจจัยได้แก่ อัตราการลดความสามารถในการดูดซับและร้อยละของน้ำมันที่สามารถกำจัดออกจากตัววัสดุดูดซับได้

ในการทดสอบการนำกลับมาใช้ใหม่ของวัสดุดูดซับที่ใช้กับตัวทำละลาย จะถือว่าเป็นกรณีพิเศษและไม่ครอบคลุมในการทดสอบน้ำ

● Compression Extraction

วิธีนี้เป็นวิธีหนึ่งในการกำจัดน้ำมันออกจากวัสดุดูดซับโดยการใช้แรงอัดกับวัสดุดูดซับที่อัดตัว การใช้แรงอัดจะกำหนดความดันในการอัดอยู่ที่ 70 กิโลปาสคาล การทดสอบทำได้โดยวัดน้ำหนักของวัสดุดูดซับก่อนทำการดูดซับและหลังทำการอัดเพื่อกำจัดน้ำมันออกไปแล้ว ทดสอบจำนวน 5 รอบ และทำการคำนวณ Oil Absorbency , Absorbency Ratio และร้อยละของน้ำมันที่ถูกกำจัดออก

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Wanshun Deng และคณะ^[8] ทำการเคลือบผิวตาข่ายทองแดงด้วย Superhydrophobic LAMC เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการแยกน้ำมันออกจากน้ำ และศึกษาสมบัติการทำความสะอาดด้วยตัวเอง (Self-Cleaning) ของตาข่ายทองแดงที่ผ่านการเคลือบแล้ว พบว่าการเตรียมสาร Superhydrophobic LAMC นั้นไม่ซับซ้อน สารเคมีราคาไม่สูงและหาซื้อได้ง่าย และในการทดสอบความสามารถในการแยกน้ำมัน สารเคมีและตัวทำละลายหลายๆชนิดได้ เช่น ไดคลอโรมีเทน ปีโตรเลียมอีเทอร์ และไซโคลเฮกเซน พบว่าประสิทธิภาพในการแยกมีมากกว่า 99% การทดสอบความสามารถคุณสมบัติการทำความสะอาดด้วยตัวเอง โดยการใช้เพียงแค่น้ำในการล้างคราบโคลน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพื้นผิวนี้นี้สามารถทำความสะอาดได้อย่างง่ายดาย

Zahra Rahmani และคณะ^[9] สร้างวัสดุดูดซับครบน้ำมันโดยใช้ฟองน้ำพอลิยูรีเทน ที่มีความพรุน และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการแยกน้ำมันออกจากน้ำระหว่างสารที่สังเคราะห์ขึ้นมา 2 ชนิด คือ Nanoporous Grapheme (NPG) กับ Graphene Oxide (GO) ตัวฟองน้ำพอลิยูรีเทน นั้นสามารถดูดซับของเหลวได้ในระดับหนึ่งเนื่องจากมีความเป็นรูพรุนอยู่แล้ว เมื่อผ่านการปรับสภาพด้วย NPG และ GO จะทำให้เพิ่มสมบัติ ความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด โดยสังเกตได้จากมุมสัมผัสน้ำที่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ทำให้มีประสิทธิภาพในการแยกน้ำและน้ำมันเพิ่มขึ้น

Lei Niu และคณะ^[13] ศึกษาประสิทธิภาพการแยกน้ำมันออกจากน้ำด้วยการใช้ตาข่ายทองเหลืองและสร้างความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด ด้วยการใช้ Cu_2O Superhydrophobic โดยกระบวนการสเปรย์ ในงานวิจัยนี้จะแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการสร้างความขรุขระให้กับพื้นผิว

ของวัสดุเพื่อเพิ่มคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด โดยใช้วิธีการสเปรย์เฉพาะ Cu_2O โดยไม่ใช้สารที่ลดพลังงานพื้นผิว ซึ่งทดสอบมุมสัมผัสและมุมเลื่อนบ่งชี้ว่ามีความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด

Deli Zang และคณะ^[12] ศึกษาการสร้างคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดให้กับผ้าไฟเบอร์กลาส โดยใช้สารประกอบ Octadecyltrichlorosilane เพื่อลดพลังงานพื้นผิวและมีการใช้อนุภาคนาโนซิลิกาเพื่อเพิ่มความขรุขระของพื้นผิว ซึ่งมีการเปรียบเทียบตัวอย่างระหว่างการใช้เฉพาะสารประกอบไฮโดรเจนหรือการใช้อนุภาคนาโนซิลิกาเพียงอย่างเดียว และการใช้ร่วมกัน เพื่อให้เห็นถึงความแตกต่างได้อย่างชัดเจน ปรากฏว่าการใช้งานร่วมกันเกิดความไม่ชอบน้ำสูงที่สุด โดยดูจากมุมสัมผัสและมุมเลื่อน และสิ่งที่น่าสนใจอีกประการในงานวิจัยนี้ คือวัสดุที่นำมาใช้นั้นคือผ้าไฟเบอร์กลาส ซึ่งมีคุณสมบัติทนต่อทั้งทางกลและทางเคมี ซึ่งโดดเด่นในการใช้งานในสภาวะที่กัดดันกว่าปกติได้ โดยดูจากผลการทดลองที่มีจำนวนรอบในการใช้งานค่อนข้างมาก และมีการทดสอบการใช้งานในสภาวะที่ค่า pH ต่ำที่สุดไปจนถึงสูงที่สุด ผลคือยังสามารถใช้งานได้ดียู่

บทที่ 3

ขั้นตอนการศึกษาและวิธีการดำเนินงาน

การทดลองสามารถแบ่งได้หลักๆเป็น 2 ขั้นตอน ขั้นแรกคือการสังเคราะห์สารที่ใช้ในการทดลอง ขั้นต่อมาคือการปรับคุณสมบัติและทดสอบประสิทธิภาพในการดูดซับของฟองน้ำ

3.1 ขั้นตอนการศึกษา

- 3.1.1 รวบรวม และศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้อง
- 3.1.2 ออกแบบอุปกรณ์ และวิธีการทดลอง
- 3.1.3 ทำการทดลอง
- 3.1.4 สรุป วิเคราะห์ และจัดทำรายงานผลการทดลอง

3.2 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 1) คอปเปอร์ซัลเฟต
- 2) แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์
- 3) โซเดียมไฮดรอกไซด์
- 4) กรดลอริก
- 5) กรดไมริสติก
- 6) กรดปาล์มเมติก
- 7) น้ำกลั่น
- 8) เอทานอล
- 9) น้ำมันเบนซิน (Gasoline)
- 10) น้ำมันหล่อลื่น (Lubricant)
- 11) คลอโรฟอร์ม (Chloroform)

3.2.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- 1) ฟองน้ำพอลิยูรีเทน
- 2) ปีกเกอร์
- 3) แท่งแก้วคนสาร
- 4) เครื่องชั่งสาร
- 5) ขวดน้ำกลั่น
- 6) กรวยกรอง
- 7) กระดาษกรอง
- 8) ขวดลดความดัน
- 9) ปัมสุญญากาศ
- 10) เครื่อง Magnetic Stirrer
- 11) ตู้อบ
- 12) เครื่อง Shaker
- 13) เครื่องอัด Hydraulic

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

3.3.1 การวิเคราะห์ฟองน้ำก่อนการปรับสภาพ

- 1) วัดปริมาตรรูพรุนของฟองน้ำด้วยวิธีการตามหัวข้อที่ 2.2.3

3.3.2 การเตรียมสาร $\text{Cu}(\text{OH})_2$

- 1) ละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 50 กรัม ในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร แล้วกวนให้เข้ากันด้วย Magnetic Stirrer
- 2) ค่อยๆเติมแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 30 % จำนวน 50 มิลลิลิตร ลงไป แล้วกวนผสมต่อ
- 3) เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.002 โมลลาร์ ลงไป แล้วกวนต่อ

- 4) ทิ้งให้ตกตะกอน
- 5) กรองตะกอน และอบให้แห้ง

3.3.3 การเตรียมสาร Superhydrophobic coating

- 1) ละลายผงกรดทาลอริก 0.2 กรัม ใน Ethanol 50 มิลลิลิตร
- 2) เติมคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์ 0.6 กรัม ลงไป
- 3) ปลอ่ยให้ทำปฏิกิริยาในเครื่อง Sonicator เป็นเวลา 3 นาที
- 4) ปลอ่ยไว้ 5 ชั่วโมง หลังจากนั้นกรองสารที่ตกตะกอนออกและอบที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
- 5) ใช้งานในการปรับสภาพพองน้ำด้วยการละลายสารที่มีความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด 0.5 กรัม ใน เอทานอล 50 มิลลิลิตร
- 6) ทำซ้ำโดยเปลี่ยนชนิดกรดไขมันเป็นไมริสติก และปาล์มมิติกตามลำดับ

3.3.4 การปรับปรุงพื้นผิวของพองน้ำด้วย Superhydrophobic coating

- 1) เตรียมพองน้ำก่อนทำการปรับปรุงโดยการล้างด้วยน้ำ และเอทานอล 3 รอบ
- 2) อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
- 3) แช่พองน้ำในสารละลาย Superhydrophobic FAMC ที่เตรียมไว้แล้ว
- 4) อบให้แห้งอีกครั้งที่อุณหภูมิ 50°C

3.3.5 การวิเคราะห์พองน้ำที่ผ่านการปรับสภาพแล้ว

- 1) ทดสอบหาปริมาตรรูพรุนของพองน้ำที่ถูกปรับสภาพแล้ว
- 2) ตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของพองน้ำด้วยเครื่อง SEM
- 3) หาค่ามุมสัมผัส

3.3.6 การทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับน้ำมันด้วยฟองน้ำที่ปรับสภาพแล้ว

1) ทดสอบความสามารถในการดูดซับน้ำมันของฟองน้ำที่ยังไม่ผ่านการปรับสภาพ และฟองน้ำที่ปรับสภาพแล้ว โดยวิธี Short Test ใช้เวลา 15 นาที และ Long Test ใช้เวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำผลการทดสอบของฟองน้ำแต่ละชนิดมาเปรียบเทียบกัน

2) ทดสอบการยืดยิดของสารเคลือบบนพื้นผิวฟองน้ำ ด้วยวิธี Dynamic degradation Test ลอยฟองน้ำในน้ำในภาชนะ โดยใช้เครื่อง Shaker ที่ความถี่ 150 ต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที หลังจากนั้นวัดปริมาณของวัสดุที่จมลงในน้ำ โดยจะต้องมีค่าไม่เกิด 10 %

3) ทดสอบการใช้งานของฟองน้ำ ด้วยการศึกษาผลของจำนวนรอบการใช้งานที่มากขึ้น โดยการแยกน้ำมันออกจากฟองน้ำด้วยวิธีการ Compression Extraction โดยใช้เครื่องอัดไฮดรอลิก ที่ความดัน 70 kPa แล้วคำนวณเป็นร้อยละของน้ำมันที่แยกออกมาได้ต่อการใช้งานซ้ำ 1 รอบ

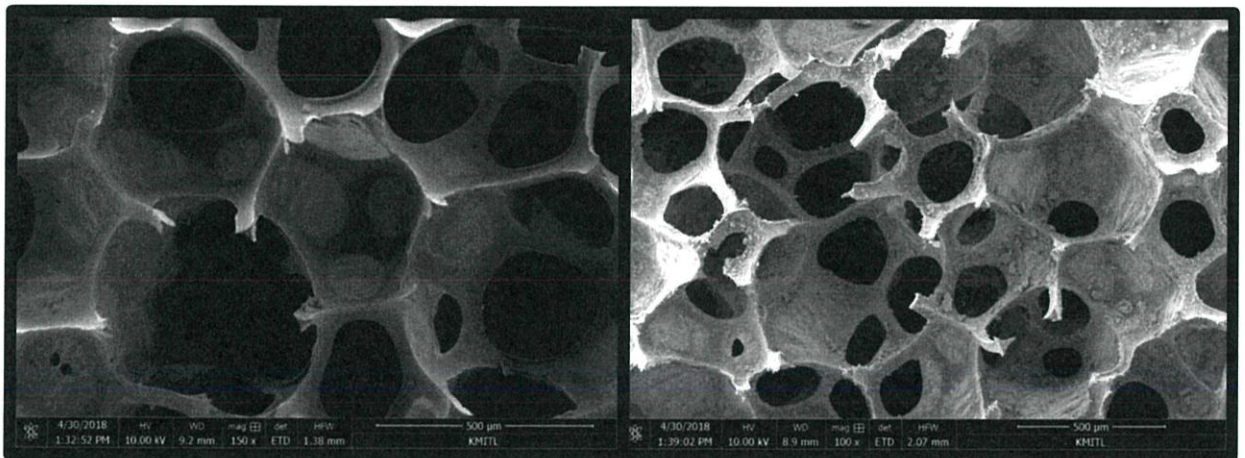
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

ในบทนี้จะอธิบายถึงงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาและทดลองตามขั้นตอนที่ได้กล่าวไว้ใน บทที่ 3 ซึ่งแสดงผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลองได้ดังนี้

4.1 โครงสร้างและการอธิบายลักษณะ

4.1.1 ลักษณะพื้นผิวของฟองน้ำ



ก) ฟองน้ำที่ไม่ผ่านการเคลือบผิว

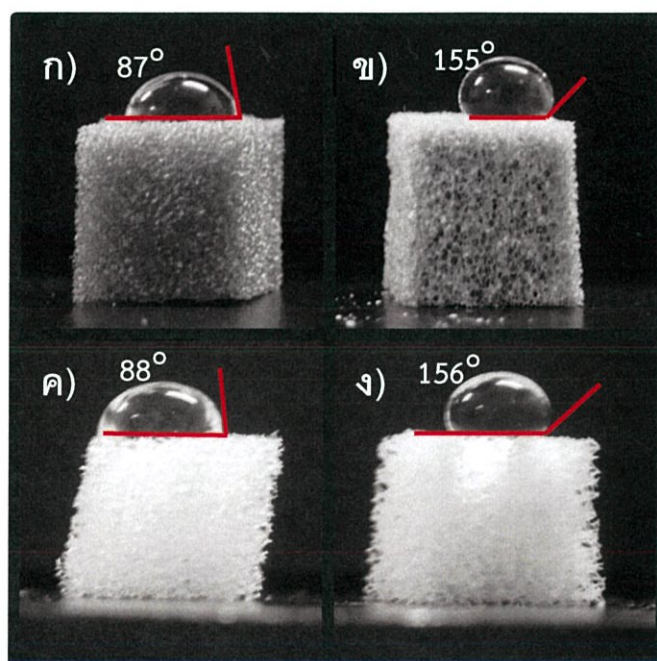
ข) ผ่านการเคลือบด้วยสารสังเคราะห์ขึ้น

รูปที่ 12 ลักษณะพื้นผิวของฟองน้ำโดยใช้ SEM

จากภาพที่ 11 แสดงให้เห็นความเป็นรูพรุนของฟองน้ำ และส่วนที่เป็นรอยตัดในกระบวนการตัดฟองน้ำให้ได้ขนาดที่ต้องการ นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นความแตกต่างของพื้นผิวของฟองน้ำที่ผ่าน (รูปที่ 11 ข) และไม่ผ่าน (รูปที่ 11 ก) การเคลือบสาร Superhydrophobic Coating จะเห็นได้ว่าพื้นผิวของฟองน้ำที่ผ่านการเคลือบผิวนั้น มีความขรุขระเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด จึงได้ข้อสรุปว่า เกิดการเคลือบของสารที่สังเคราะห์ขึ้นบนผิวของฟองน้ำจริง และสารเคลือบผิวนี้ทำให้เกิดความขรุขระขึ้นบนผิวของฟองน้ำ ซึ่งจากข้างต้น ความขรุขระส่งผลให้พื้นผิวเกิดความไม่ชอบน้ำมากยิ่งขึ้น ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าพื้นผิวของฟองน้ำมีความไม่ชอบน้ำมากยิ่งขึ้น

4.1.2 Water Contact Angle

มุมสัมผัสน้ำบนพื้นผิวสามารถบ่งบอกถึงความไม่ชอบน้ำของพื้นผิวนั้นๆได้ ซึ่งจะแบ่งระดับความไม่ชอบน้ำจากองศาของมุมสัมผัส โดยพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำจะต้องมีมุมสัมผัสมากกว่า 90 องศา และพื้นผิวไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดจะต้องมีมุมสัมผัสมากกว่า 150 องศา



รูปที่ 13 ลักษณะหยดน้ำบนพื้นผิวของฟองน้ำปริมาตรรูพรุนน้อยที่ไม่ผ่าน (ก) และผ่านการเคลือบ (ข) และฟองน้ำปริมาตรรูพรุนมากที่ไม่ผ่าน (ค) และผ่านการเคลือบ (ง)

จากรูปที่ 12 เป็นรูปหยดน้ำบนผิวฟองน้ำชนิดต่างๆ จะเห็นได้ว่าเมื่อฟองน้ำผ่านการเคลือบด้วยสารเคลือบที่สังเคราะห์ขึ้นจะเพิ่มระดับความไม่ชอบน้ำให้กับพื้นผิวของฟองน้ำขึ้นเป็นอย่างมากซึ่งสังเกตได้จากระดับมุมสัมผัสที่มากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด จากฟองน้ำที่ไม่ผ่านการเคลือบในรูปที่ 12 (ก) และ (ค) จากมุมสัมผัสที่ 88 และ 86 องศาตามลำดับ เพิ่มขึ้นได้ถึงมากกว่า 155 องศา ในรูปที่ 12 (ข) และ (ง) ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าสารเคลือบสามารถเพิ่มคุณสมบัติไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดให้กับพื้นผิวของฟองน้ำได้ ในขณะที่เมื่อพิจารณาความพรุนของฟองน้ำ จะสังเกตได้ว่าไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่ามุมสัมผัส

4.2 Porosity

จากการทดลองวัดปริมาตรรูพรุนของฟองน้ำโดยวิธีอิมมัตว์ด้วยน้ำ และวิธีการคำนวณตามสมการที่ (2)

$$\text{ปริมาตรรูพรุน} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างอิมมัตว์} - \text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง}}{\text{ความหนาแน่นของของเหลว}}$$

ฟองน้ำชนิดแรก

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรรูพรุน} &= \frac{0.905 - 0.052}{1} = 0.853 \text{ cm}^3 \\ &= \frac{0.905}{0.052} = 16.404 \text{ cm}^3/\text{g} \end{aligned}$$

$$\text{Porosity} = \frac{0.853}{1} \times 100\% = 85.3 \%$$

ฟองน้ำชนิดที่สอง

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรรูพรุน} &= \frac{0.977 - 0.013}{1} = 0.964 \text{ cm}^3 \\ &= \frac{0.964}{0.013} = 74.154 \text{ cm}^3/\text{g} \end{aligned}$$

$$\text{Porosity} = \frac{0.964}{1} \times 100\% = 96.4\%$$

ฟองน้ำชนิดที่สอง มีความพรุนมากกว่าฟองน้ำชนิดแรก

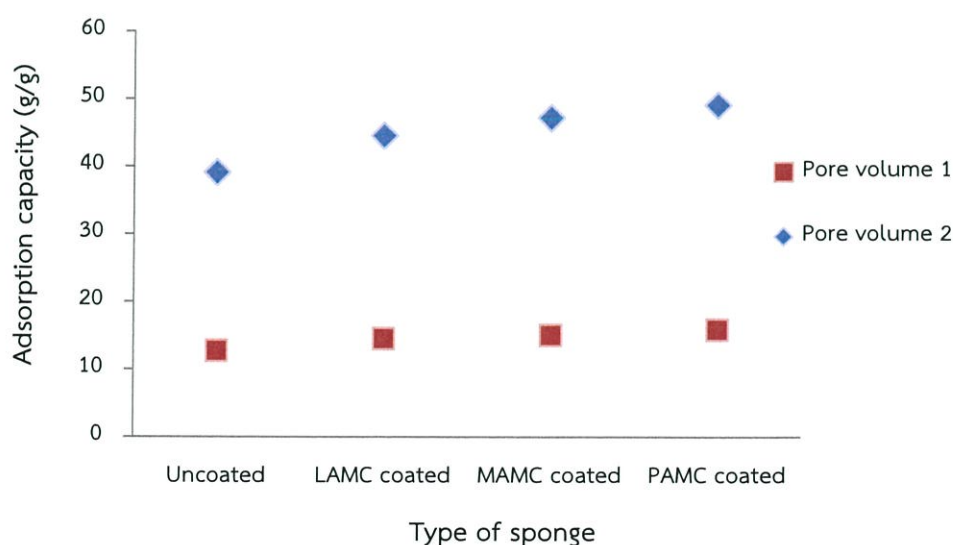
4.3 Adsorption Capacity

การทดสอบความสามารถในการดูดซับน้ำมันของฟองน้ำจะทำการวัดผลออกมาเป็นปริมาณของน้ำมันเป็นกรัมต่อ 1 กรัมของตัวฟองน้ำ ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภทขึ้นอยู่กับเวลาที่ใช้ในการทดสอบ

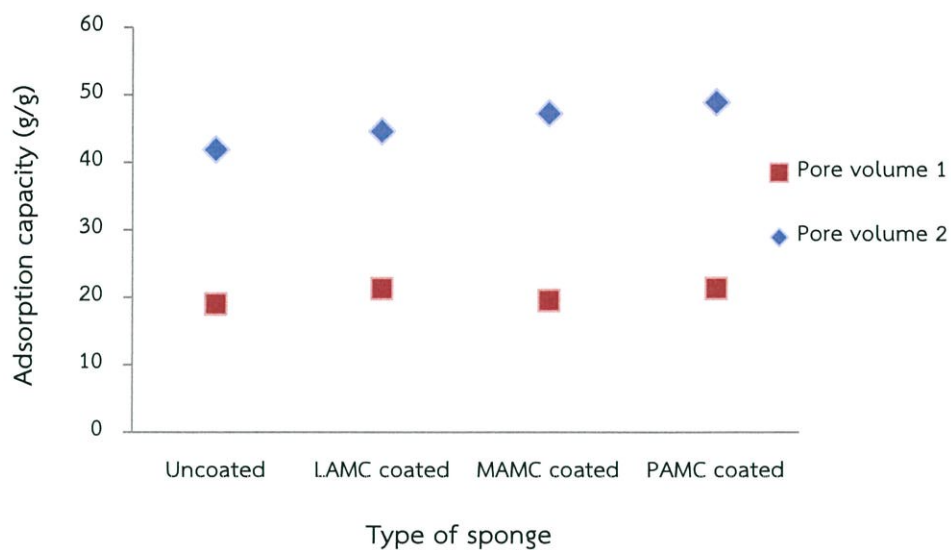
4.3.1 Short Test

จากรูปที่ 13 เป็นการทดสอบความสามารถในการดูดซับน้ำมันหล่อลื่นของฟองน้ำที่ผ่านการเคลือบด้วยสารที่สังเคราะห์ขึ้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าลักษณะรูพรุนของฟองน้ำมีผลต่อการดูดซับน้ำมัน โดยที่ จะเห็นได้ว่าการเคลือบผิวฟองน้ำ ส่งผลให้ฟองน้ำมีความสามารถในการดูดซับน้ำมันเพิ่มขึ้น แต่ฟองน้ำ ที่มีปริมาตรรูพรุนน้อยกว่า (Pore volume 1) จะมีความสามารถในการดูดซับน้ำมันน้อยกว่า ถึงแม้ จะผ่านการเคลือบเพื่อเพิ่มความไม่ชอบน้ำแล้วก็ตาม ความสามารถในการดูดซับน้ำมันก็ไม่ได้มากขึ้น อย่างชัดเจน จากรูปยังพบอีกว่า การใช้สารเคลือบที่แตกต่างกันจะให้ผลของการดูดซับที่แตกต่างกัน ซึ่ง สมมติฐานว่าอาจเป็นผลจากการเพิ่มขึ้นของจำนวนอะตอมของคาร์บอน ทำให้ส่วนที่ไม่มีขั้วของสาร เคลือบเพิ่มมากขึ้น

ซึ่งการทดสอบความสามารถในการดูดซับของฟองน้ำกับแก๊สโซลีนและคลอโรฟอร์มในรูปที่ 14 และ 15 ก็ให้ผลในแนวโน้มเดียวกันกับการดูดซับน้ำมันหล่อลื่น แต่จากการทดลองจะพบว่าทั้งแก๊สโซลีน และคลอโรฟอร์มเกิดการระเหยได้ที่อุณหภูมิห้อง ทำให้การทดสอบโดยการชั่งน้ำหนักของฟองน้ำที่ อิ่มตัวนั้นจะต้องทำการวัดโดยอ้างอิงเวลาที่เท่ากัน ดังนั้นหากทำการทดลองอย่างไม่รอบคอบ ผลลัพธ์จะ เกิดความคลาดเคลื่อนได้

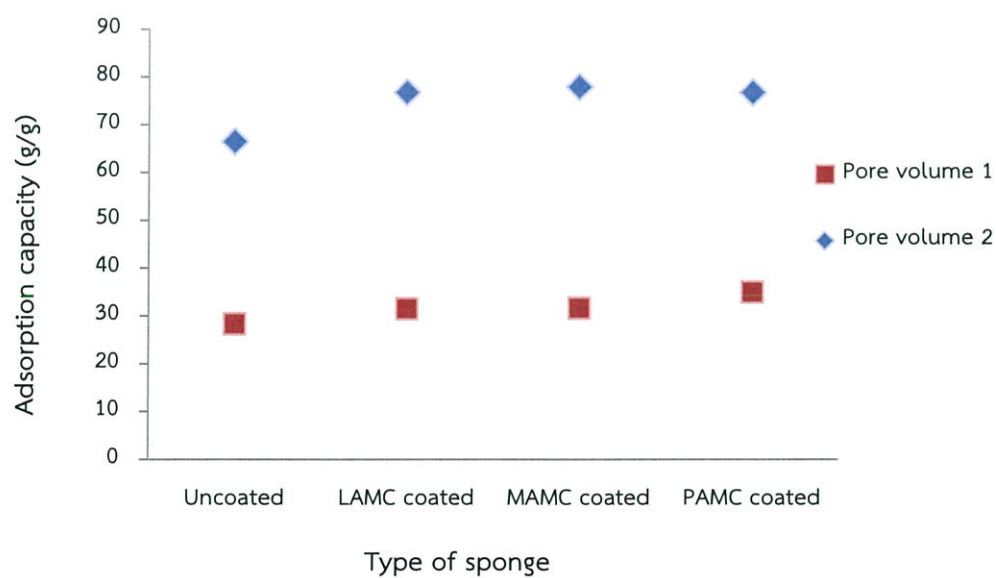


รูปที่ 14 ความสามารถในการดูดซับน้ำมันหล่อลื่นของฟองน้ำชนิดต่างๆ ในการทดสอบ Short Test



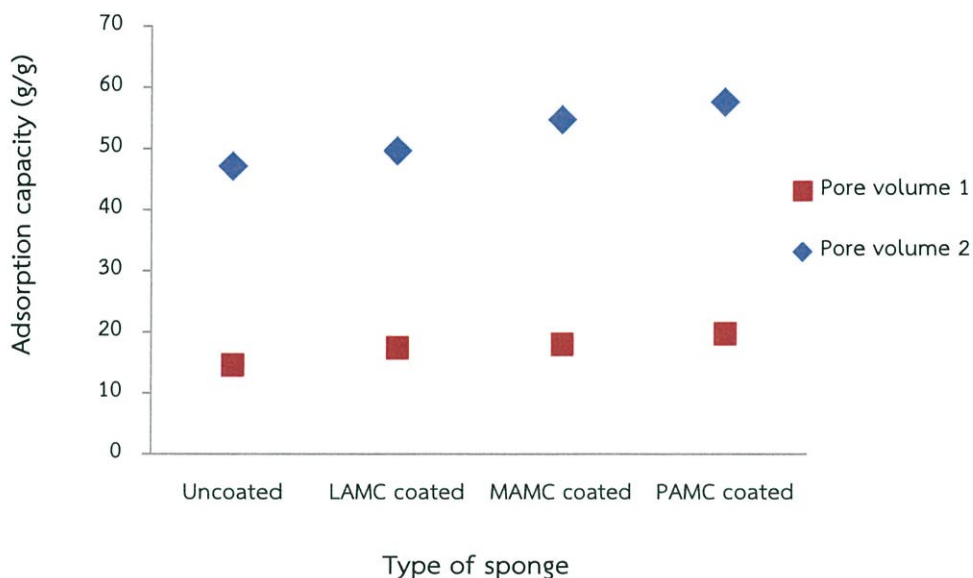
รูปที่ 15 ความสามารถในการดูดซับแก๊สโซลีน (น้ำมันเบนซิน) ของฟองน้ำชนิดต่างๆ ในการทดสอบ

Short Test



รูปที่ 16 ความสามารถในการดูดซับคลอโรฟอร์มของฟองน้ำชนิดต่างๆ ในการทดสอบ Short Test

4.3.2 Long Test



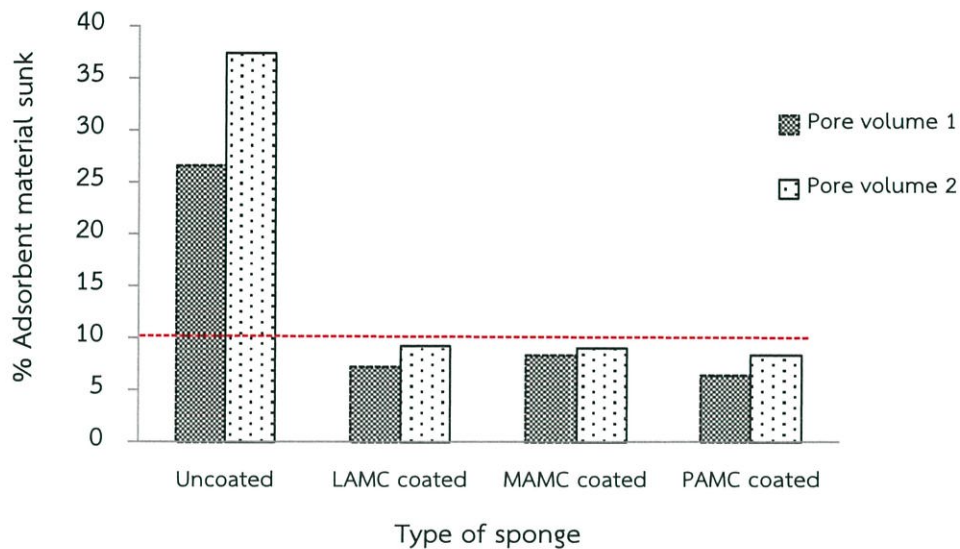
รูปที่ 17 ความสามารถในการดูดซับน้ำมันหล่อลื่นของฟองน้ำชนิดต่างๆ ในการทดสอบ Long Test

จากการทดสอบ Short Test สามารถทำให้เห็นถึงความสามารถในการดูดซับของฟองน้ำในระยะเวลาสั้นๆ ซึ่งมีแนวโน้มเป็นไปตามผลการทดลองข้างต้น แต่สำหรับน้ำมันที่มีความหนืดสูงเช่น น้ำมันหล่อลื่นนั้น ต้องทำการทดสอบ Long Test ซึ่งเป็นการทดสอบการดูดซับของฟองน้ำโดยใช้เวลา 24 ชั่วโมง โดยผลการทดลองแสดงในรูปที่ 16 ซึ่งจะเห็นแนวโน้มเช่นเดียวกันกับการทดสอบ Short Test แต่สิ่งที่แตกต่างออกไปคือปริมาณที่ฟองน้ำสามารถดูดซับน้ำมันไว้ได้จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น

4.4 Mechanical Stability

เป็นการทดสอบความแข็งแรงและทนทานของวัสดุดูดซับ โดยทำการ 2 การทดลอง คือ Dynamic Degradation Test และ ทดสอบการนำกลับมาใช้ใหม่เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำมันที่ดูดซับได้เมื่อใช้ฟองน้ำซ้ำ

4.4.1 Dynamic Degradation Test



รูปที่ 18 แสดงร้อยละของวัสดุที่จมน้ำเมื่อทำการทดสอบ Dynamic Degradation Test

การคำนวณหาร้อยละของวัสดุจากสมการการคำนวณแรงลอยตัว โดยแรงลอยตัวจะมีค่าเท่ากับน้ำหนักของฟองน้ำหลังการทดสอบ เมื่อรู้ความหนาแน่นของน้ำและค่าคงที่แรงโน้มถ่วงโลก จะหาปริมาตรที่วัสดุจมอยู่ได้ เช่น

ฟองน้ำที่ไม่ได้ทำการเคลือบมีน้ำหนัก 0.0126 g และหลังการทดสอบมีน้ำหนักเป็น 0.374 g จะได้ว่า

$$(0.374 \text{ g})(g \text{ m/s}^2) = (1 \text{ g/cm}^3)(V \text{ cm}^3)(g \text{ m/s}^2)$$

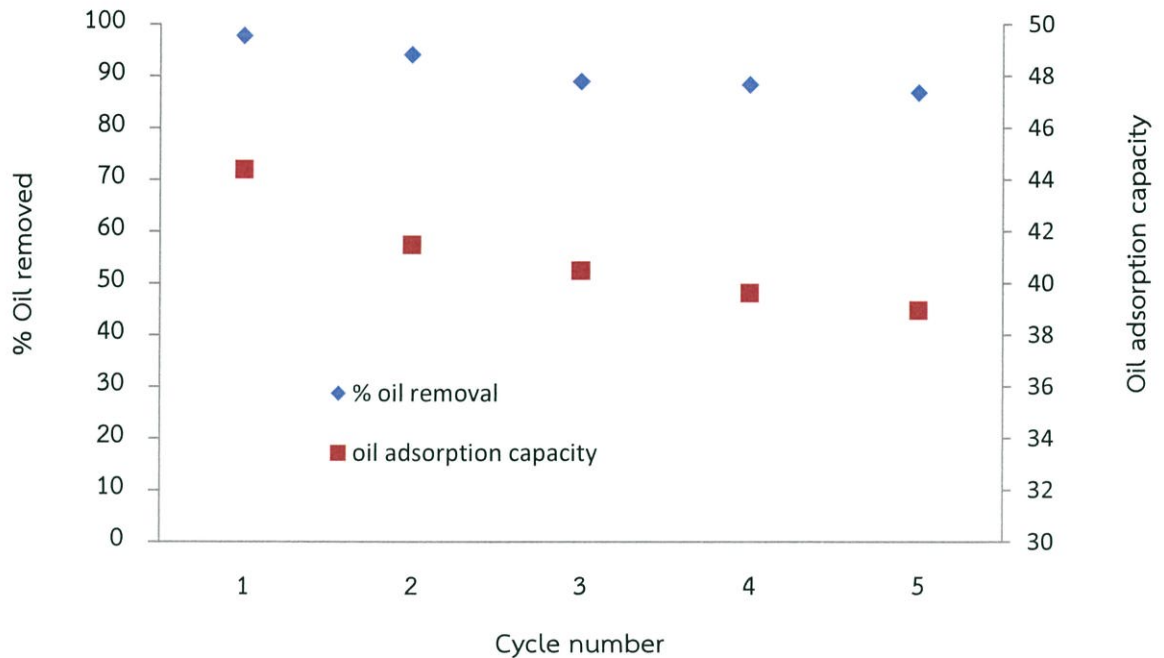
$$V = 0.374 \text{ cm}^3$$

คิดเป็น $\frac{0.374}{1} \times 100\% = 37.4\%$

จากการทดสอบจะได้ผลเป็นไปตามรูปที่ 18 พบว่าฟองน้ำที่ไม่ผ่านการเคลือบนั้น จะเกิดการจมมากกว่าฟองน้ำที่ผ่านการเคลือบ โดยฟองน้ำที่มีปริมาตรรูพรุนมาก (Pore Volume 2) จะเกิดการจมมากกว่าฟองน้ำที่มีปริมาตรรูพรุนน้อย ส่วนผลการทดลองอีกประการคือ ฟองน้ำที่ผ่านการเคลือบผิว จะมีการจมน้อยกว่าฟองน้ำที่ไม่ผ่านการเคลือบเป็นอย่างมาก และผลที่ได้มีค่าไม่เกิน 10% ตาม

มาตรฐาน ASTM ถือว่าฟองน้ำเหล่านี้ผ่านการทดสอบ Dynamic Degradation Test ซึ่งแสดงให้เห็นว่า สารเคลือบผิวมีความสามารถในการยึดเกาะบนผิวฟองน้ำเป็นอย่างดี

4.4.2 Reuse Test



รูปที่ 19 แสดงร้อยละของน้ำมันหล่อลื่นที่แยกได้จากฟองน้ำในการทดสอบการใช้ซ้ำ

จากการทดสอบการใช้ซ้ำของฟองน้ำ จะคำนวณเป็นร้อยละของน้ำมันที่สามารถแยกออกจากฟองน้ำได้ในการใช้ซ้ำแต่ละครั้ง ซึ่งจากการทดสอบใช้ซ้ำ 5 รอบ ปรากฏว่าน้ำมันที่แยกออกจากฟองน้ำได้มีค่ามากที่สุดที่การใช้ซ้ำรอบแรกและลดลงเรื่อยๆ จนถึงในรอบที่ 5 ค่าร้อยละของน้ำมันที่แยกได้ยังมีค่าสูงมากกว่า 80%

จากการทดสอบ Dynamic Degradation Test และการทดสอบการใช้ซ้ำ แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพและความแข็งแรงในการยึดเกาะของสารเคลือบบนผิวฟองน้ำ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า การใช้สารเคลือบผิวที่สร้างจากการทำปฏิกิริยา Dehydration ของคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์กับกรดไขมัน สามารถยึดติดบนพื้นผิว เกิดความขรุขระและสร้างคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดให้กับพื้นผิวของฟองน้ำได้ โดยดูจากมุมสัมผัสน้ำของพื้นผิวที่มากกว่า 150 องศา

เมื่อนำฟองน้ำที่ผ่านการเคลือบผิวเพื่อสร้างความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดมีทำการทดสอบเพื่อหาความสามารถในการดูดซับน้ำมันชนิดต่างๆ จะพบว่าปริมาณของรูพรุนของฟองน้ำมีผลต่อความจุของการดูดซับน้ำมันอย่างมาก ยิ่งฟองน้ำมีปริมาณรูพรุนมาก ความจุของการดูดซับน้ำมันยิ่งมากขึ้น และผลของจำนวนอะตอมคาร์บอนในกรดไขมันที่ใช้อาจส่งผลต่อความไม่มีขั้วของสารเคลือบผิว แต่เนื่องจากกรดไขมันที่เลือกใช้มีจำนวนอะตอมคาร์บอนที่ใกล้เคียงกัน จึงทำให้ไม่สามารถเห็นผลได้อย่างชัดเจน ส่วนการทดสอบ Short และ Long Test แสดงให้เห็นว่าเวลาที่ให้มีผลการดูดซับน้ำมัน ยิ่งเวลาเพิ่มขึ้น ค่าความจุยิ่งมากขึ้น

การทดสอบความแข็งแรงและทนทานของการยึดติดของสารเคลือบ ในการทดสอบ Dynamic Degradation ที่ใช้เครื่องเขย่าเพื่อทำให้เห็นว่าสารเคลือบนี้ยึดเกาะได้ดีบนพื้นผิวของฟองน้ำ ฟองน้ำจึงเกิดการจมน้อยมาก และการทดสอบการใช้ซ้ำพบว่าปริมาณน้ำมันที่แยกออกได้จากฟองน้ำมีค่าสูงแม้จะใช้ซ้ำถึง 5 รอบแล้วก็ตาม

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การทดสอบความไม่เป็นขั้วของสารเคลือบที่เป็นผลมาจากจำนวนอะตอมของคาร์บอนนั้น ควรเลือกใช้กรดไขมันที่มีความแตกต่างของจำนวนอะตอมคาร์บอนมากกว่านี้ เพื่อให้เห็นชัดเจนถึงผลกระทบของตัวแปรในข้อนี้

5.2.2 การแยกน้ำมันออกจากน้ำ นอกจากการใช้วัสดุดูดซับแล้ว ยังมีการใช้แผ่นตาข่ายโลหะในลักษณะของเยื่อเลือกผ่าน โดยการเคลือบสารที่สร้างความไม่ชอบน้ำให้กับโลหะนั้นๆ ซึ่งเป็นอีกแนวทางหนึ่งการประยุกต์ใช้สารเคลือบผิวนี้ในการแยกน้ำมันและน้ำ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Wikipedia. 2560. Porosity.[ออนไลน์]. แหล่งที่มา :
<https://en.wikipedia.org/wiki/Porosity>
- [2] Khumsuppacking. 2560. ฟองน้ำวิทยาศาสตร์ (Flexible Polyurethane Foam). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : <http://khumsuppacking.blogspot.com/2016/01/flexible-polyurethane-foam.html>
- [3] Siat. 2560. ฟองน้ำ PU FOAM (POLYURETHANE FOAM). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา :
<http://www.siat.co.th/pro1.html>
- [4] Wikipedia. 2560. ภาวะการเปียก. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา :
<https://th.wikipedia.org/wiki/ภาวะการเปียก>
- [5] Wikipedia. 2560. Contact angle. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา :
https://en.wikipedia.org/wiki/Contact_angle
- [6] กมลทิพย์ วงศ์ศิริพรพันธ์ และ ประไพพรรณ บุญรงค์. (2556). การศึกษาผลของการปรับสภาพพื้นผิวของซิลิกาเจลด้วยสารควบคู่โซเลน ต่อการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลู (ปริญญาโทวิทยาศาสตรสาขาสารเคมี).สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , กรุงเทพมหานคร
- [7] รองศาสตราจารย์ ดร.พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล. (2556). ภาพรวมแนวทางการน้ำมันรั่วไหล (Oil Spill) ลงสู่ทะเล. แหล่งที่มา : <https://www.eng.chula.ac.th/th/>
- [8] Wanshun Deng , Mengying Long , Xinrui Miao , Ni Wen , Wenli Deng. Eco-friendly preparation of robust superhydrophobic Cu(OH)₂ coating for self-cleaning, oil-water separation and oil sorption. *Surface and Coatings Technology*. 325(2017)14-21.
- [9] Zahra Rahmani , Mohhammad Taghi Samadi , Abbass Kazemi , Ali Morad Rashidi , Ali Reza Rahmani , Nanoporous graphene and graphene oxide-coated polyurethane sponge as a highly efficient, superhydrophobic, and reusable oil spill absorbent. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 5(2017)5025-5032. 16

- [10] Jian Li , Mengke Cui , haifeng Tian , Yanxia Wu , Fei Zha , Hua Feng , Xiaohua Tang , Facile fabrication of anti-corrosive superhydrophobic diatomite coatings for removal oil from harsh environments. *Separation and Purification Technology*. 189(2017)335-340
- [11] Jiefeng Gao , Xuewu Huang , Huaiguo Xue , Longcheng Tang , Robert K.Y. Li , Facile preparation of hybrid microspheres for super-hydrophobic coating and oil-water separation. *Chemical Engineering Journal*. 326(2017)443-453
- [12] Deli Zang , Feng Liu , Ming Zhang , Xiaogang Niu , Zhengxin Gao , Chengyu Wang, Superhydrophobic coating on fiberglass cloth for selective removal of oil from water. *Chemical Engineering Journal*. 262(2015)210-216
- [13] Lei Niu , Zhixin Kang , Spray deposition process to fabricate Cu_2O superhydrophobic surfaces on brass mesh for efficient oil-water separation. *Materials Letters*. 210(2017)97-100
- [14] Wikipedia. 2560. Ultrahydrophobicity. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : <https://en.wikipedia.org/wiki/Ultrahydrophobicity>
- [15] ภัทร์ สุขแสน. (2554). **พื้นผิวอัจฉริยะด้วยนาโนเทคโนโลยี Smart Surfaces with Nanotechnology**. ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากรวิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ ศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และวัสดุขั้นสูง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [16] Mihail Ionescu,, *Chemistry and Thecnology of Polyols for Polyurethanes* , Rappa Technology Limited
- [17] Arunima Reghunadhan and Sabu Thomas , *Polyurethanes: Structure, Properties , Synthesis , Characterization , and Applications* , Mahatma Gandhi University, Kottayam, Kerala, India
- [18] Gh. Barati Darband , M. Aliofkhazraei , S. Khorsand , S. Sokhanvar , A. Kaboli , *Science and Engineering of Superhydrophobic Surfaces: Review of Corrosion Resistance, Chemical and Mechanical Stability* , King Saud University
- [19] Guerdouh A and Barkat D, Solvent Effects on the Extraction of Copper(II) with Lauric Acid, *Journal of Thermodynamics & Catalysis*

- [20] Yifan Si, Zhiguang Guo, and Weimin Liu, A Robust Epoxy Resins @ Stearic Acid-Mg(OH)₂ Micro-nanosheet Superhydrophobic Omnipotent Protective Coating for Real Life Applications, *ACS Applied Materials & Interfaces*
- [21] Gh. Barati Darband , M. Aliofkhazraei, S. Khorsand, S. Sokhanvar, A. Kaboli, Science and Engineering of Superhydrophobic Surfaces: Review of Corrosion Resistance, Chemical and Mechanical Stability, Department of Materials Engineering, Tarbiat Modares University, Brunel Centre for Advanced Solidification Technology (BCAST), Brunel University London
- [22] Wikipedia. 2560. **Fatty acid**. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : https://en.wikipedia.org/wiki/Fatty_acid
- [23] INTERIM REPORT EMERGENCIES ENGINEERING TECHNOLOGIES OFFICE, SORBENT TEST PROGRAM, Science Applications International Corporation (SAIC Canada)

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ข้อมูลผลการทดลอง

- การสังเคราะห์สารเคลือบผิว



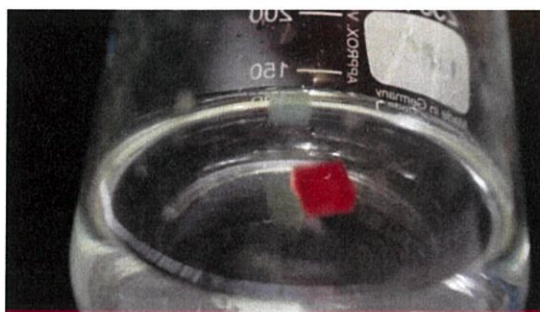
รูปที่ 20 สารสังเคราะห์ FAMC

- การเคลือบผิวฟองน้ำ



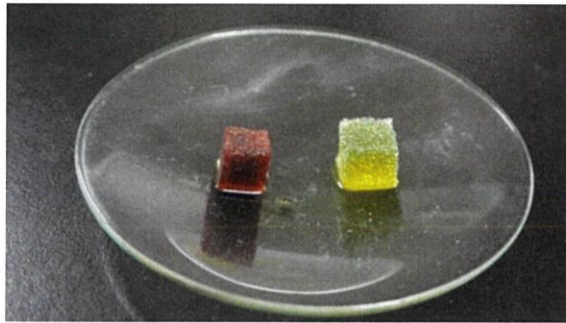
รูปที่ 21 ลักษณะของฟองน้ำที่ Coated แล้ว

- การทดสอบ Dynamic Degradation



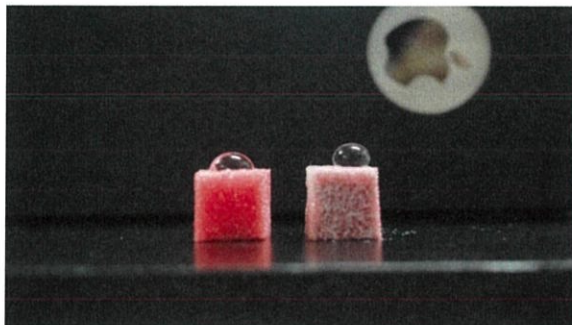
รูปที่ 22 การทดสอบ Dynamic Degradation

- การทดสอบหา Adsorption Capacity



รูปที่ 23 การทดสอบ Adsorption Capacity

- การทดสอบหยดน้ำบนผิวฟองน้ำ



รูปที่ 24 การทดสอบมุมสัมผัส

ตารางที่ 2 Lubricant Adsorption Capacity - Short Test

(ก) LAMC

	pore volume 2			pore volume 1		
g Sponge	0.0399	0.0412	0.0426	0.0134	0.0158	0.0176
g ab Test	0.6097	0.6397	0.6697	0.6557	0.7257	0.7357
g oil	0.5698	0.5985	0.6271	0.6423	0.7099	0.7181
Capacity g/g	14.2807	14.5267	14.7207	47.9328	44.9304	40.8011

(ข) MAMC

	pore volume 2			pore volume 1		
g Sponge	0.041	0.0416	0.0430	0.0193	0.0160	0.0152
g ab Test	0.6697	0.6737	0.6747	0.8567	0.7867	0.7767
g oil	0.6287	0.6321	0.6317	0.8374	0.7707	0.7615
Capacity g/g	15.3342	15.1947	14.6907	43.3886	48.1688	50.0987

(ค) PAMC

	pore volume 2			pore volume 1		
g Sponge	0.0400	0.04170	0.0434	0.0183	0.0162	0.0157
g ab Test	0.6997	0.7037	0.7047	0.8867	0.8167	0.8067
g oil	0.6597	0.6620	0.6613	0.8684	0.8005	0.7910
Capacity g/g	16.4925	15.8753	15.2373	47.4535	49.4136	50.3822

ตารางที่ 3 Gasoline Adsorption Capacity - Short Test

(ก) LAMC

	pore volume 2			pore volume 1		
g Sponge	0.0399	0.0412	0.0426	0.0134	0.0158	0.0176
g ab Test	0.8697	0.9397	0.9497	0.6557	0.7257	0.7357
g oil	0.8298	0.8985	0.9071	0.6423	0.7099	0.7181
Capacity g/g	20.7970	21.8083	21.2934	47.9328	44.9304	40.8011

(ข) MAMC

	pore volume 2			pore volume 1		
g Sponge	0.0410	0.0416	0.0430	0.0193	0.0160	0.0152
g ab Test	0.8597	0.8637	0.8547	0.8567	0.7867	0.7767
g oil	0.8187	0.8221	0.8117	0.8374	0.7707	0.7615
Capacity g/g	19.9683	19.7620	18.8767	43.3886	48.1688	50.0987

(ค) PAMC

	pore volume 2			pore volume 1		
g Sponge	0.02942	0.02942	0.02942	0.01561	0.01561	0.01561
g ab Test	0.6884	0.6126	0.6705	0.8029	0.806	0.7255
g oil	0.65898	0.58318	0.64108	0.78729	0.79039	0.70989
Capacity g/g	22.3991	19.8226	21.7906	50.4350	50.6336	45.4766

ตารางที่ 4 Chloroform Adsorption Capacity - Short Test

(ก) LAMC

	pore volume 2			pore volume 1		
g Sponge	0.0166	0.0140	0.0176	0.0440	0.0430	0.0410
g ab Test	0.4810	0.5297	0.5397	3.2945	3.3312	3.3308
g oil	0.46437	0.5157	0.5221	3.2505	3.2882	3.2898
Capacity g/g	27.9741	36.8357	29.6648	73.8750	76.4698	80.2390

(ข) MAMC

	pore volume 2			pore volume 1		
g Sponge	0.0176	0.0164	0.0178	0.044	0.043	0.041
g ab Test	0.5597	0.5637	0.5647	3.2978	3.4367	3.3701
g oil	0.5421	0.5473	0.5469	3.2538	3.3937	3.3291
Capacity g/g	30.8011	33.3720	30.724720	73.9501	78.9233	81.1976

(ค) PAMC

	pore volume 2			pore volume 1		
g Sponge	0.0166	0.0140	0.0176	0.0440	0.0430	0.0410
g ab Test	0.5697	0.5737	0.5747	3.2945	3.3312	3.3308
g oil	0.5531	0.5597	0.5571	3.2505	3.2882	3.2898
Capacity g/g	33.3193	39.9786	31.6534	73.8750	76.4698	80.2390

ตารางที่ 5 Lubricant Adsorption Capacity - Long Test

(ก) LAMC

	pore volume 2			pore volume 1		
g Sponge	0.043	0.039	0.0452	0.0139	0.0131	0.0142
g ab Test	0.8005	0.7585	0.7819	0.6968	0.6702	0.7187
g oil	0.7575	0.7195	0.7367	0.6829	0.6571	0.7045
Capacity g/g	17.6163	18.4487	16.2987	49.1295	50.1603	49.6127

(ข) MAMC

	pore volume 2			pore volume 1		
g Sponge	0.0413	0.0444	0.0363	0.0140	0.0145	0.0190
g ab Test	0.7996	0.8232	0.6941	0.7885	0.8291	1.0210
g oil	0.7583	0.7788	0.6578	0.7745	0.8146	1.0020
Capacity g/g	18.3608	17.5405	18.1212	55.3214	56.1793	52.7368

(ค) PAMC

	pore volume 2			pore volume 1		
g Sponge	0.0413	0.0444	0.0363	0.014	0.0145	0.019
g ab Test	0.8906	0.9092	0.7351	0.8335	0.8741	1.066
g oil	0.8493	0.8648	0.6988	0.8195	0.8596	1.047
Capacity g/g	20.5642	19.4775	19.2507	58.5357	59.2828	55.1053

ภาคผนวก ข
การคำนวณที่เกี่ยวข้องในการทดลอง

1) Pore Volume

$$\text{Pore Volume} = \frac{\text{น้ำหนักฟองน้ำอิ่มตัว} - \text{น้ำหนักฟองน้ำแห้ง}}{\text{ความหนาแน่นของน้ำ}}$$

2) Adsorption Capacity

$$\text{Adsorption Capacity} = \frac{\text{น้ำหนักฟองน้ำที่ดูดน้ำมันแล้ว} - \text{น้ำหนักฟองน้ำ}}{\text{น้ำหนักฟองน้ำ}}$$

3) Degradation Test

$$\text{แรงลอยตัว} = \text{น้ำหนักฟองน้ำเปียก} = \rho_{\text{ของเหลว}} V_{\text{ส่วนที่จม}} g$$

4) Reuse

$$\% \text{ Oil Removal} = \frac{\text{ปริมาณน้ำมันสุทธิ} - \text{ปริมาณน้ำมันที่แยกได้}}{\text{ปริมาณน้ำมันสุทธิ}}$$