



รายงานโครงการวิจัย

วัสดุดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากคอมพอสิตยางธรรมชาติดัดแปร
(CO₂ adsorption material from modified natural rubber composites)

โดย

นางสาวปญญิตา	ชัยศรี	รหัสนิสิต	5832941023
นางสาวพิมพ์ิกา	รัตนอารมณ์	รหัสนิสิต	5832952923

อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ

โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ ปีการศึกษา 2561

ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของโครงการทางวิชาการที่ส่งผ่านทางคณะที่สังกัด

The abstract and full text of senior projects in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)

are the senior project authors' files submitted through the faculty.

CHULALONGKORN UNIVERSITY

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีโดยได้รับความช่วยเหลือจากรองศาสตราจารย์ ดร.ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ในด้านการให้คำแนะนำแนวทาง คำปรึกษา และข้อคิดเห็นต่าง ๆ ด้วยดีตลอด ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ทุกท่านของภาควิชา เคมีเทคนิค และคณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้ความช่วยเหลือในด้าน เครื่องมือและดูแลอำนวยความสะดวกในการปฏิบัติงานในงานวิจัยนี้ ขอขอบพระคุณ นางสาวกฤตยา พันพลุ และ นางสาวอังคณา พงศ์พิไลพฤติ ที่ช่วยให้คำปรึกษาในการแก้ไขปัญหาและตอบข้อสงสัยระหว่างการทำงานวิจัย รวมถึงการให้คำแนะนำที่ดีเสมอมา ขอขอบคุณเงินทุนสนับสนุนการวิจัยจากภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ประจำปีการศึกษา 2561 นอกจากนี้ ขอขอบคุณเพื่อน ๆ ทุกคนที่เป็นกำลังใจและให้ความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์เรื่องนี้

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดามารดาและครอบครัว ซึ่งเปิดโอกาสให้ได้รับการศึกษาเล่าเรียน ตลอดจนคอย ช่วยเหลือและให้กำลังใจผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

บทคัดย่อ

ชื่อโครงการ วัสดุดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากคอมพอสิตยางธรรมชาติดัดแปร

ชื่อนิติผู้ทำโครงการ นางสาวปญญา ชัยศรี 5832941023
นางสาวพิมพ์ภา รัตนอารมณ์ 5832952923

อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ

ภาควิชา เคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2561

บทคัดย่อ

แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ถือเป็นแก๊สเรือนกระจกที่สำคัญซึ่งมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล การปลดปล่อยจากโรงงานอุตสาหกรรม และจากกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ เพื่อลดปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ งานวิจัยนี้ได้พัฒนาวัสดุดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากน้ำยางธรรมชาติดัดแปรด้วยไดแอลลิเลมิน (Diallylamine) โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติดัดแปรถูกวิเคราะห์โดยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ จากนั้นน้ำยางธรรมชาติดัดแปรไปขึ้นรูปให้เป็นโฟมยาง เพื่อปรับปรุงความจุการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของยางธรรมชาติดัดแปร ซิลิกา (Silica) ถูกเติมลงในยางธรรมชาติดัดแปรเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ สำหรับการดัดแปรพื้นที่ผิวของอนุภาคซิลิกา ทำโดยการเติมตัวประสานประเภทไซเลน (Silane coupling agent) เพื่อให้การกระจายตัวของอนุภาคซิลิกาในยางธรรมชาติดัดแปรดีขึ้น รวมถึงเติมเตตระเอทิลีนเพนตามีน (Tetraethylenepentamine) เพื่อเพิ่มความจุการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยหมู่เอมีน ความจุการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของโฟมยางถูกทดสอบภายใต้ความดันบรรยากาศ ยางธรรมชาติดัดแปรที่ผสมซิลิกาอิมมัลชันด้วยเตตระเอทิลีนเพนตามีน มีค่าความจุสูงสุด 3.59 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส

คำสำคัญ: ยางธรรมชาติดัดแปร, การดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์, ซิลิกา, ตัวประสานประเภทไซเลน

ภาควิชา เคมีเทคนิค

ลายมือชื่อนิติ

พิมพ์ภา รัตนอารมณ์
ปญญา ชัยศรี

สาขาวิชา เคมีวิศวกรรม

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก



ABSTRACT

Title CO₂ adsorption material from modified natural rubber composites

Student name Miss Punyisa Chaisri 5832941023

Miss Pimpika Rattana-arporn 5832952923

Advisor Assoc. Prof. Dr. Sirilux Poompradub

**Department of Chemical Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University,
Academic Year 2018**

ABSTRACT

Carbon dioxide (CO₂) is one of the greenhouse gas that increases continuously from burning fossil fuels, production process in industrial plant and human activities. To reduce carbon dioxide in atmosphere, this research therefore was developed a carbon dioxide adsorption material from natural rubber (NR) latex modified by a diallylamine. Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy spectra could identify the chemical structure of modified natural rubber (MNR). Then, the modified natural rubber was formed into a rubber foam. To improve the carbon dioxide adsorption capacity of MNR, the silica particles were added in MNR vulcanizate to increase the surface area in carbon dioxide capture. For the surface modification of silica particles, silane coupling agent was added to improve the dispersion of the silica particles in MNR and tetraethylenepentamine also added to improve the carbon dioxide adsorption capacity by amine group. The carbon dioxide adsorption capacity of rubber foam was tested under atmospheric pressure. The modified natural rubber with silica impregnated with tetraethylenepentamine has a maximum capacity of 3.59 mg/g at 35 degree Celsius.

Keywords: Modified natural rubber, Carbon dioxide adsorption, Silica, Silane coupling agent

Department of Chemical Technology

Student's signature

พิมพ์วิภา รัตนอารณ์
พิมพ์วิภา รัตนอารณ์

Major: Chemical Engineering

Advisor's signature

Sirilux P.

สารบัญ

กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อ.....	ข
ABSTRACT.....	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 วิธีการดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂)	4
2.2 การดูดซับ (Adsorption).....	5
2.3 ซิลิกา (Silica).....	6
2.4 สารประกอบเอมีน (Amine compound)	9
2.5 สารคู่ควบประเภทไซเลน (Silane coupling agent)	12
2.6 การดัดแปรพื้นผิวของซิลิกาด้วยหมู่เอมีน (Modification of silica).....	13
2.7 ยางธรรมชาติ (Natural rubber).....	14
2.8 กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง	16
2.9 ปฏิกิริยาวัลคาไนเซชัน (Vulcanization).....	18
2.10 การดัดแปรยางธรรมชาติและ การประยุกต์ใช้	19

2.11	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	21
บทที่ 3	เครื่องมือและวิธีการดำเนินงาน	23
3.1	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	23
3.2	สารตั้งต้นและสารเคมี	24
3.3	เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	25
3.4	การดำเนินงานวิจัย.....	26
บทที่ 4	ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	30
4.1	ลักษณะทางกายภาพของยางธรรมชาติดัดแปร.....	30
4.2	การพิสูจน์เอกลักษณ์ของยางธรรมชาติดัดแปรด้วยเทคนิค FT-IR	30
4.3	การพิสูจน์เอกลักษณ์ของซิลิกาดัดแปรด้วยเทคนิค FT-IR.....	32
4.4	สมบัติการคงรูปของวัสดุดูดซับ	34
4.5	การดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์.....	36
บทที่ 5	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	39
5.1	สรุปผลการทดลอง.....	39
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	39
	เอกสารอ้างอิง.....	40
	ภาคผนวก ก.....	43
	ภาคผนวก ข.....	45
	ภาคผนวก ค	48
	ภาคผนวก ง.....	50

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างของสารคู่ควบประเภทไฮเลนและการนำไปใช้งานกับพลาสติกชนิดต่างๆ.....	12
ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของยางธรรมชาติ.....	15
ตารางที่ 3.1 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	23
ตารางที่ 3.2 สารตั้งต้นและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	24
ตารางที่ 3.3 ภาวะการทดลองที่ใช้ในการเตรียมยางธรรมชาติดัดแปร.....	27
ตารางที่ 3.4 สูตรการเตรียมขึ้นรูปยางธรรมชาติดัดแปร.....	28
ตารางที่ 4.1 สมบัติการคงรูปของวัสดุดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์.....	35
ตารางที่ ค.1 ค่าความจุในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของยางธรรมชาติ (NR).....	48
ตารางที่ ค.2 ค่าความจุในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของยางธรรมชาติดัดแปร (MNR).....	48
ตารางที่ ค.3 ค่าความจุในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของยางธรรมชาติดัดแปรผสมซิลิกา (MNR-Si).....	48
ตารางที่ ค.4 ค่าความจุในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของยางธรรมชาติดัดแปรผสมซิลิกากราฟต์ด้วยอะมิโนโพรพิลไตรเมทอกซีไฮเลน (MNR-Si-A).....	49
ตารางที่ ค.5 ค่าความจุในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของยางธรรมชาติดัดแปรผสมซิลิกาอิมมัลชันด้วยเตตระเอทิลีนเพนตามีน (MNR-Si-T).....	49

สารบัญรูป

รูปที่ 2.1 โครงสร้างของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	4
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของซิลิกา (Silicon dioxide: SiO ₂).....	8
รูปที่ 2.3 การเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส	8
รูปที่ 2.4 การเกิดปฏิกิริยาควบแน่น.....	9
รูปที่ 2.5 ประเภทของสารประกอบเอมีน.....	9
รูปที่ 2.6 มุมระหว่างพันธะของสารประกอบเอมีน	10
รูปที่ 2.7 การเกิดพันธะไฮโดรเจนของหมู่เอมีน.....	10
รูปที่ 2.8 ปฏิกิริยาของสารประกอบเอมีนชนิดปฐมภูมิและทุติยภูมิ	11
รูปที่ 2.9 ปฏิกิริยาของสารประกอบเอมีนชนิดตติยภูมิ	12
รูปที่ 2.10 ลักษณะพื้นผิวของซิลิกาที่ดัดแปรด้วยหมู่เอมีน.....	13
รูปที่ 2.11 การดัดแปรพื้นผิวของซิลิกาด้วยการกราฟต์ทางเคมี.....	14
รูปที่ 2.12 การดัดแปรพื้นผิวของซิลิกาด้วยการควบแน่นร่วม.....	14
รูปที่ 2.13 แบบจำลองอนุภาคเม็ดยางธรรมชาติ	15
รูปที่ 2.14 โครงสร้างเคมี ซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน	16
รูปที่ 2.15 การดัดแปรยางธรรมชาติด้วยวิธีต่างๆ.....	19
รูปที่ 2.16 การสร้างพันธะระหว่างยางธรรมชาติกับเอมีน.....	21
รูปที่ 3.1 ชุดเครื่องปฏิกรณ์แบบแก้วสามคอ.....	25
รูปที่ 3.2 แผนภาพระบบการดูดซับ.....	29
รูปที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของยางธรรมชาติดัดแปรแห้ง.....	30
รูปที่ 4.2 FTIR ของ NR Diallylamine และ MNR.....	31
รูปที่ 4.3 FTIR ของ TEPA SiO ₂ และ SiO ₂ -TEPA	32
รูปที่ 4.4 FTIR ของ SiO ₂ APTMS และ SiO ₂ -APTMS.....	34
รูปที่ 4.5 กราฟการคงรูป (cure curve) ของวัสดุดูดซับชนิดต่างๆ ที่อุณหภูมิ 145 องศาเซลเซียส.....	35
รูปที่ 4.6 Breakthrough curve ของวัสดุดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ยางธรรมชาติ (NR) ยางธรรมชาติดัดแปร (MNR) และยางธรรมชาติดัดแปรที่เพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับด้วยการใช้ซิลิกา (MNR-Si, MNR-Si-A, MNR-Si-T) ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สผสม 0.05 ลิตร/นาที ความเข้มข้นเริ่มต้นของ CO ₂ ร้อยละ 12 โดยปริมาตร	37
รูปที่ 4.7 แผนภาพแสดงความจุในการดูดซับและจำนวนครั้งในการนำกลับมาใช้ใหม่.....	38
รูปที่ ก.1 FTIR ของ (a) NR (b) Diallylamine และ (c) MNR.....	43

รูปที่ ก.2 FTIR ของ (a) SiO ₂ (b) Si-T และ (c) Si-A.....	44
รูปที่ ข.1 Breakthrough curve ของวัสดุ NR ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สผสม 0.5 ลิตร/นาที ความเข้มข้นเริ่มต้นของ CO ₂ ร้อยละ 12 โดยปริมาตร.....	45
รูปที่ ข.2 Breakthrough curve ของวัสดุ MNR ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สผสม 0.5 ลิตร/นาที ความเข้มข้นเริ่มต้นของ CO ₂ ร้อยละ 12 โดยปริมาตร.....	45
รูปที่ ข.3 Breakthrough curve ของวัสดุ MNR-Si ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สผสม 0.5 ลิตร/นาที ความเข้มข้นเริ่มต้นของ CO ₂ ร้อยละ 12 โดยปริมาตร.....	46
รูปที่ ข.4 Breakthrough curve ของวัสดุ MNR-Si-A ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สผสม 0.5 ลิตร/นาที ความเข้มข้นเริ่มต้นของ CO ₂ ร้อยละ 12 โดยปริมาตร.....	46
รูปที่ ข.5 Breakthrough curve ของวัสดุ MNR-Si-T ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สผสม 0.5 ลิตร/นาที ความเข้มข้นเริ่มต้นของ CO ₂ ร้อยละ 12 โดยปริมาตร.....	47

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจ

ปัจจุบันโลกกำลังถูกปกคลุมด้วยแก๊สเรือนกระจก (Greenhouse gases) ที่มากเกินไปจนส่งผลต่อธรรมชาติ ซึ่งแก๊สเรือนกระจกที่ประกอบด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) แก๊สมีเทน (CH_4) แก๊สคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (CFC) แก๊สไนตรัสออกไซด์ (N_2O) และ แก๊สโอโซน (O_3) นี้จะเก็บกักความร้อนไม่ให้สะท้อนออกนอกผิวโลก ทำให้อุณหภูมิพื้นผิวโลกเพิ่มสูงขึ้น ก่อให้เกิดปัญหาภาวะโลกร้อน [1] โดยเฉพาะแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ถือเป็นแก๊สเรือนกระจกที่สำคัญ เนื่องจากเป็นแก๊สที่ถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศในปริมาณมากและมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในทุกปี จากการเผาไหม้ในรูปแบบต่าง ๆ เช่น การเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล การปลดปล่อยจากโรงงานอุตสาหกรรม การเผาป่าเพื่อใช้พื้นที่สำหรับอยู่อาศัยและการทำปศุสัตว์ รวมถึงจากการทำกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ เป็นต้น ดังนั้น ในการแก้ไขปัญหาการเพิ่มขึ้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นหนึ่งในสาเหตุที่ก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน ได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพมาช่วยลดการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศ เช่น การดักจับและการจัดเก็บคาร์บอน (Carbon capture and storage: CCS) การใช้จุลินทรีย์สังเคราะห์แสงในการดูดซับและเปลี่ยนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ให้กลายเป็นสารชีวมวล การดูดซับในตัวทำละลายของเหลว เป็นต้น [2] อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีดังกล่าวมีต้นทุนและค่าใช้จ่ายที่สูง รวมถึงมีกระบวนการที่ซับซ้อนจึงเป็นเหตุให้มีการพัฒนาเกี่ยวกับวัสดุดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีรูพรุนขนาดเล็ก สามารถกักเก็บแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ไว้ภายในได้ โดยปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับที่ต้องคำนึงถึงคือ ปริมาตรรูพรุน การกระจายขนาดของรูพรุน และพื้นที่ผิววัสดุที่มีรูพรุนและเหมาะแก่การดูดซับมีหลากหลายชนิด ได้แก่ ตัวดูดซับแบบสารเคมี เช่น แคลเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมคาร์บอเนต และตัวดูดซับทางกายภาพ เช่น ซีโอไลต์ ถ่านกัมมันต์ เป็นต้น [3]

งานวิจัยนี้มีแนวคิดที่จะพัฒนาวัสดุดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากวัสดุธรรมชาติที่สามารถหาได้ง่ายและมีต้นทุนไม่สูงมากนัก ดังนั้น ยางธรรมชาติจึงเป็นทางเลือกที่ดีที่จะนำมาพัฒนาและดัดแปรให้มีสมบัติเหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัสดุดูดซับ ในการดัดแปรยาง ผู้วิจัยเลือกใช้ไดแอลิลเอมีนในการดัดแปร เนื่องจากสารประกอบเอมีนมีประสิทธิภาพในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูง นอกจากนี้ ยังทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับด้วยการใช้ซิลิกา ทำให้มีพื้นที่ผิวในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากขึ้น อีกทั้งยังศึกษาผลของการใช้เตตระเอทิลีนเพนตามีน (Tetraethylenepentamine: TEPA) และสารคู่ควบไซเลน (Silane coupling agent)

3-อะมิโนโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน (3-Aminopropyl trimethoxysilane: APTMS) ซึ่งช่วยให้ซิลิกากระจายตัวในคอมพอสิตของยางธรรมชาติดัดแปรได้ดียิ่งขึ้นอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาความจุในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของยางธรรมชาติดัดแปร
- 1.2.2 ศึกษาผลของสารคู่ควบไซเลนและเตตระเอทิลีนเพนตามีนต่อความจุในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- 1.3.1 เตรียมยางธรรมชาติดัดแปรด้วยไดอัลลิลเอมีน (Diallylamine)
- 1.3.2 เตรียมคอมพอสิตของยางธรรมชาติดัดแปรด้วยการผสมกับซิลิกาพร้อมกับสารคู่ควบไซเลนและซิลิกาที่อิมมัตว์ด้วยเตตระเอทิลีนเพนตามีน
- 1.3.3 ศึกษาสมบัติการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของยางธรรมชาติดัดแปรและคอมพอสิตยางธรรมชาติดัดแปร

1.4 วิธีการดำเนินงาน

- 1.4.1 สืบค้นข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.4.2 เตรียมยางธรรมชาติดัดแปรด้วยไดอัลลิลเอมีนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส กวนผสมเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง
- 1.4.3 พิสูจน์เอกลักษณ์ของยางธรรมชาติดัดแปร ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี
- 1.4.4 สังเคราะห์ซิลิกาพร้อมกับสารคู่ควบไซเลนและซิลิกาที่อิมมัตว์ด้วยเตตระเอทิลีนเพนตามีน
- 1.4.5 เตรียมคอมพอสิตของยางธรรมชาติดัดแปรด้วยการผสมกับซิลิกาพร้อมกับสารคู่ควบไซเลนและซิลิกาที่อิมมัตว์ด้วยเตตระเอทิลีนเพนตามีน
- 1.4.6 ขึ้นรูปวัสดุดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้เครื่องกดอัดระบบไฮดรอลิก และนำไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 145 องศาเซลเซียส
- 1.4.7 ศึกษาและเปรียบเทียบผลการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของยางธรรมชาติก่อนและหลังการดัดแปร และคอมพอสิตยางธรรมชาติ โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ที่ประกอบเข้ากับอุปกรณ์ทดสอบการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ภายใต้ความดันบรรยากาศ
- 1.4.8 วิเคราะห์ผลการทดลอง
- 1.4.9 สรุปผลการทดลองและจัดทำเล่มรายงาน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 สามารถผลิตวัสดุดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากคอมพอสิตยางธรรมชาติดัดแปรได้

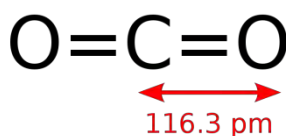
- 1.5.2 มีทักษะและความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับยางธรรมชาติและการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์
- 1.5.3 มีทักษะในการหาสาเหตุและแก้ไข้ปัญหาที่เกิดขึ้น รวมถึงสามารถวิเคราะห์ข้อมูลและอภิปรายผลที่ได้จากการทดลองได้อย่างเป็นเหตุเป็นผล
- 1.5.4 มีทักษะในการใช้เครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) [4,5]

แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแก๊สไม่มีสี อยู่ในชั้นบรรยากาศมีสัดส่วนประมาณ 0.03% โครงสร้างโมเลกุลประกอบด้วยคาร์บอน 1 อะตอม และออกซิเจน 2 อะตอม แสดงดังรูปที่ 2.1 แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศเกิดจากธรรมชาติและมีมนุษย์ เช่น การเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบอย่างสมบูรณ์ โรงงานอุตสาหกรรม การตัดไม้ทำลายป่า เป็นต้น การตัดไม้ทำลายป่าเป็นสาเหตุที่มีการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศได้รวดเร็วมากที่สุด เพราะต้นไม้มีคุณสมบัติในการตรึงแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ไว้ก่อนปล่อยขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศ ดังนั้นเมื่อพื้นที่ป่าไม้ลดลง แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จึงลอยขึ้นไปสะสมบนชั้นบรรยากาศมากขึ้น ทำให้พลังงานความร้อนมีการสะสมอยู่บนพื้นผิวโลกและในชั้นบรรยากาศ



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ [4]

แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นแก๊สเรือนกระจกที่มีความสำคัญต่อการเพิ่มขึ้นของภาวะโลกร้อน เนื่องจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นหนึ่งในผลิตภัณฑ์พลอยได้ของกระบวนการเผาไหม้ทุกชนิด โดยปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลมีมากถึงร้อยละ 87 ของแก๊สเรือนกระจกทั้งหมด ซึ่งมีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องร้อยละ 27 ตั้งแต่ยุคปฏิวัติอุตสาหกรรม ส่งผลให้อุณหภูมิของโลกสูงขึ้น 1-3 องศาเซลเซียส ถึงแม้ว่าในปัจจุบันแหล่งโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ หันมาใช้เชื้อเพลิงสะอาด อาทิ แก๊สธรรมชาติทดแทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล แต่ก็ยังไม่ใช่วิธีทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับการลดปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งการใช้แก๊สธรรมชาติช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ ลดปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และปฏิกิริยาไฮโดรคาร์บอนอื่น ๆ เท่านั้น ในปัจจุบันการลดปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิดมักทำให้อุตสาหกรรมที่มีกำลังการผลิตขนาดใหญ่ อาทิ โรงผลิตไฟฟ้า โรงงานปูนซีเมนต์ เป็นต้น แต่อุตสาหกรรมขนาดกลางไปจนถึงอุตสาหกรรมขนาดเล็กมักไม่นิยมทำกัน เนื่องจากติดปัญหาด้านการลงทุนระบบลดปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งไม่คุ้มค่าต่อการลงทุน

2.2 การดูดซับ (Adsorption) [6]

การดูดซับเป็นวิธีการที่ใช้แยกองค์ประกอบที่ต้องการออกจากของเหลวหรือแก๊ส และเป็นกระบวนการที่สะสมความเข้มข้นของอนุภาคที่ผิวหน้าหรือระหว่างผิวของสารสองสถานะ ไม่ว่าจะเป็น แก๊สกับของเหลว แก๊สกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุลที่ถูกดูดซับ เรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนพื้นผิวที่เป็นที่เกาะจับสารถูกดูดซับ เรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) โดยสามารถแบ่งสารดูดซับเป็น 2 ชนิด ตามลักษณะของผิว คือ ชนิดที่มีผิวได้แก่ ซีโอไลต์ (Zeolites), อะลูมินา (Porous alumina), ซิลิกา เจล (Silica gel) เป็นต้น และชนิดไม่มีผิว ได้แก่ ถ่านกัมมันต์, ตัวดูดซับพอลิเมอร์ (Polymer adsorbent) เป็นต้น

กระบวนการดูดซับสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) และการดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

2.2.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physisorption)

การดูดซับทางกายภาพ คือ การดูดหรือดึงสารถูกดูดซับไว้บนผิวของตัวดูดซับด้วยแรงกายภาพชนิดใดชนิดหนึ่งหรือหลายชนิดร่วมกัน แรงกายภาพของการดูดซับประเภทนี้ ได้แก่

- แรงดูดดูระหว่างขั้วของสารถูกดูดซับกับขั้วบนผิวตัวดูดซับ (Electrostatic force) เช่น การดูดซับความชื้นด้วยผลึกดูดความชื้น ซึ่งเป็นแรงดึงดูดระหว่างขั้วบวกของโมเลกุลไอน้ำกับขั้วลบบนผิวผลึกดูดความชื้น หรือแรงดึงดูดระหว่างขั้วลบของโมเลกุลไอน้ำกับขั้วบวกบนผิวผลึกดูดความชื้น เป็นต้น
- แรงดึงดูดระหว่างประจุของสารถูกดูดซับชนิดไอออนกับประจุบนผิวตัวดูดซับ (Ion Exchange) เช่น การดูดซับไอออนแคลเซียมและไอออนแมกนีเซียม ในน้ำกระด้างด้วยการแลกเปลี่ยนไอออนบนผิวตัวดูดซับชนิดพอลิเมอร์ เป็นต้น
- แรงดึงดูดมวลระหว่างโมเลกุลสารถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ (Vander waals' force) เช่น การดูดซับกลิ่นซึ่งมักเป็นไอระเหยของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดต่างๆ ด้วยถ่านดูดซับ หรือการดูดซับไอสารประกอบไฮโดรคาร์บอนด้วยถ่านดูดซับ เป็นต้น

ลักษณะสำคัญของการดูดซับประเภทนี้ คือ การดูดซับเกิดขึ้นได้ดี ณ อุณหภูมิปกติ หรือ ณ อุณหภูมิบรรยากาศทั่วไป และเกิดได้ดีมากยิ่งขึ้น ณ อุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิบรรยากาศ เช่น การดูดซับกลิ่นอับต่าง ๆ ในตู้เย็นและในห้องโดยสารปรับอากาศ เป็นต้น สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งบนผิวของตัวดูดซับโดยตรง และเกิดขึ้นบนชั้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับที่เหมาะสมบนผิวของตัวดูดซับแล้ว โดยไม่จำกัดจำนวนโมเลกุลของสารถูกดูดซับที่ซ้อนทับกัน จึงมักเรียกการดูดซับที่ซ้อนทับกันว่า “การดูดซับหลายชั้น (Multilayer adsorption)”

2.2.2 การดูดซับทางเคมี (Chemisorption)

การดูดซับทางเคมีเกิดขึ้นเมื่อตัวถูกดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี จากตัวถูกดูดซับเดิม คือ มีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมและกลุ่มอะตอมเดิม แล้วมีการจัดเรียงอะตอม ขึ้นใหม่โดยมีพันธะเคมีที่แข็งแรง มักเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตของสารที่ถูกดูดซับ มีพลังงานกระตุ้น เข้ามาเกี่ยวข้อง ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงการกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับทำได้ยากและการดูดซับเป็นแบบขั้นเดียว

2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

1. พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุนของสารดูดซับ พื้นที่ผิวเป็นสมบัติอย่างหนึ่งที่มีผลต่อความสามารถของตัวดูดซับในการดูดซับ เมื่อพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตาม พื้นที่ผิวของตัวดูดซับเพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอที่จะบ่งบอกได้ถึงความสามารถในการดูดซับ โครงสร้างของรูพรุนก็มีส่วนช่วยให้พื้นที่ผิวมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น ถ้าตัวดูดซับไม่มีรูพรุน พื้นที่ผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของตัวดูดซับมีขนาดลดลง ซึ่งทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น แต่ถ้าตัวดูดซับมีรูพรุนมากๆ พื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับอยู่ในรูพรุน ขนาดของตัวดูดซับจะไม่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ
2. ความสามารถในการละลายของสารดูดซับ แนวนอนของการดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับจะลดลงเมื่อโมเลกุลตัวถูกดูดซับละลายน้ำได้ดี เนื่องจากก่อนที่จะเกิดกระบวนการดูดซับจะต้องมีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับโมเลกุลของน้ำ เพื่อให้โมเลกุลของตัวถูกดูดซับหลุดออกจากน้ำไปเกาะบนพื้นผิวของตัวดูดซับ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับขนาดใหญ่มีความสามารถในการละลายน้ำลดลง จึงมีแนวนอนที่จะถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับมากขึ้น
3. ความเป็นกรด-เบส ประสิทธิภาพของการดูดซับขึ้นอยู่กับความเป็นขั้วของพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ เมื่อสารละลายมีสภาพความเป็นกรดต่ำส่งผลให้เกิดไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) บนพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ทำให้กระบวนการดูดซับไอออนลบเพิ่มขึ้น และเมื่อสารละลายมีความเป็นกรด - เบส เพิ่มขึ้นมีผลให้ OH^- บนพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มขึ้น และสามารถดูดซับไอออนบวกได้มากขึ้น
4. อุณหภูมิ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ทำให้การแพร่ผ่านของสารถูกดูดซับลงไปยังรูพรุนของตัวดูดซับเร็วขึ้น แต่จะส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของที่ถูกดูดซับกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับลดลง

2.3 ซิลิกา (Silica) [8]

ซิลิกาเป็นสารดูดซับที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในงานด้านการวิเคราะห์ เนื่องจากซิลิกาเป็นวัสดุที่มีความเสถียรสูง ทนต่อแรงกระทำทางกายภาพและทางเคมี ไม่บวมน้ำจึงสามารถใช้กับสารตัวอย่างที่มีน้ำเป็นตัวทำละลายได้ดี ซิลิกาประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญ 2 หมู่ ได้แก่ พันธะซิลอกเซน (Siloxane bond, Si-O-Si) และ

หมู่ไฮดรอกซิล (Silanol group, Si-OH) ซึ่งเป็นหมู่ที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยามากกว่าพันธะไฮดรอกเซน เนื่องจากมีสมบัติเป็นกรดอ่อนๆ โดยหมู่ไฮดรอกซิลแบ่งเป็น 3 แบบ ได้แก่ free silanol, germinal silanol และ vicinal silanol

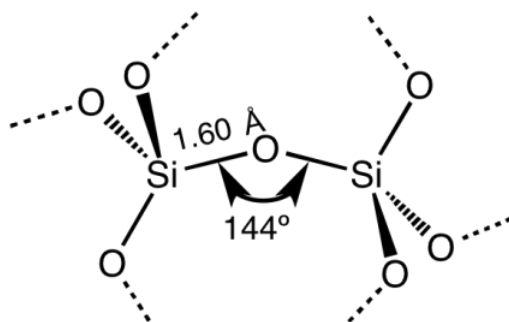
2.3.1 ประเภทของซิลิกา

ซิลิกาสามารถแบ่งออกเป็นประเภทต่างๆ ได้โดยขึ้นกับเกณฑ์ที่ใช้ เช่น

1. แบ่งตามขนาดรูพรุน (Pore size)
 - ไมโครพอร์รัสซิลิกา (Microporous silica) คือ ซิลิกาที่มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนน้อยกว่า 2 nm
 - เมโซพอร์รัสซิลิกา (Mesoporous silica) คือ ซิลิกาที่มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนอยู่ระหว่าง 2nm ถึง 50 nm
 - แมคโครพอร์รัสซิลิกา (Macroporous silica) คือ ซิลิกาที่มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนมากกว่า 50 nm
2. แบ่งตามลักษณะโครงสร้างของซิลิกา
 - ผลึกซิลิกา (Crystalline silica) คือ ซิลิกาที่มีการจัดเรียงโครงสร้างอย่างเป็นระเบียบ
 - ซิลิกาอสัณฐาน (Amorphous silica) คือ ซิลิกาที่มีการจัดเรียงโครงสร้างอย่างไม่เป็นระเบียบ

2.3.2 โครงสร้างและพันธะทางเคมี [9]

ซิลิกาเป็นสารประกอบที่ประกอบด้วยธาตุ 2 ธาตุ คือ ซิลิกอน (Si) และออกซิเจน (O) ลักษณะที่พบอาจอยู่ในรูปซิลิเกต ซึ่งโครงสร้างพื้นฐานของตัวซิลิกาและซิลิเกตมีการจัดเรียงตัวในรูปแบบเตตระฮีดรอล (Tetrahedral) โดยมีซิลิกอนเป็นอะตอมกลางและล้อมด้วยอะตอมของออกซิเจน 4 อะตอม เป็นซิลิเกต (SiO_4) ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งมีอะตอมของออกซิเจนเป็นตัวเชื่อมต่อกับตัวซิลิกอนที่อยู่ในซิลิเกตที่อยู่ใกล้เคียงกัน โดยทางโครงสร้างซิลิกาอาจมีลักษณะเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติแบบไม่รู้จบ (Infinity tree dimensional network) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงรูปของซิลิกาเกิดขึ้นได้ช้ามาก เนื่องจากการจัดเรียงตัวของซิลิเกตซึ่งเป็นรูปแบบเตตระฮีดรอล แต่เกิดขึ้นได้เร็วมากเมื่อหลอมรวมกับอัลคาไล (Alkali) วานาเดต (Vanadate) คลอไรด์ (Chloride) หรือบอเรต (Borate) การเปลี่ยนแปลงรูปแบบของซิลิกาไม่ทำให้สมบัติทางกายภาพของซิลิกาเปลี่ยนแปลงไปมากนัก



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของซิลิกา (Silicon dioxide: SiO₂) [9]

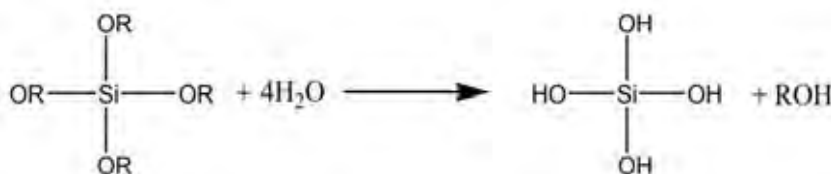
2.3.3 สมบัติทางเคมีของซิลิกา

ซิลิกามีสมบัติทางเคมีที่ค่อนข้างเสถียรที่อุณหภูมิปกติ และไม่ทำปฏิกิริยาต่อสารเคมีหลายชนิด เนื่องจากซิลิกาสามารถเปลี่ยนรูปแบบได้ แต่ที่อุณหภูมิสูงความว่องไวในปฏิกิริยาของซิลิกาขึ้นอยู่กับรูปแบบของซิลิกา โดยซิลิกาชนิดอสัณฐานว่องไวมากกว่าผลึกซิลิกา เนื่องจากซิลิกาอสัณฐานมีพื้นที่ผิวมาก ซึ่งโดยปกติแล้วสารละลายกรดไม่มีผลต่อซิลิกา ยกเว้นกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) ซึ่งทำปฏิกิริยากับซิลิกาแล้วเปลี่ยนเป็น H₂SiF₆

2.3.4 การสังเคราะห์ซิลิกา

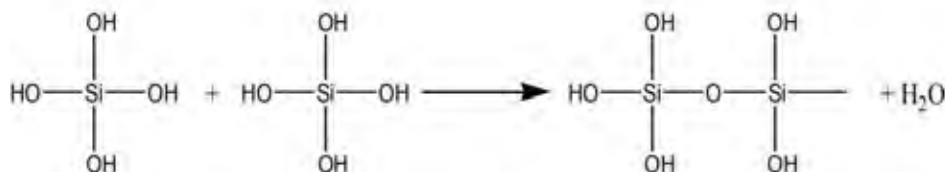
การสังเคราะห์ซิลิกาสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การสังเคราะห์ซิลิกาในทางอุตสาหกรรม ทำโดยนำทรายมาหลอมรวมกับโซเดียมคาร์บอเนต เพื่อให้เกิดเป็นโซเดียมซิลิเกตซึ่งละลายน้ำได้ หลังจากนั้น จึงทำสารละลายดังกล่าวให้เป็นกรดด้วยกรดซัลฟูริกเพื่อให้ได้ผงซิลิกา หรือการสังเคราะห์ซิลิกาจากกรดซิลิซิก (Silicic acid) โดยผ่านกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน นอกจากนี้ ซิลิกายังสามารถเตรียมผ่านกระบวนการโซล-เจล ซึ่งใช้ภาวะในการสังเคราะห์ไม่รุนแรง การควบคุมปัจจัยต่างๆ เพื่อให้ได้ซิลิกาที่มีสมบัติตามต้องการจึงทำได้ง่าย การสังเคราะห์ซิลิกาด้วยวิธีนี้มักใช้ซิลิกอนอัลคอกไซด์เป็นสารตั้งต้น เช่น เตตระเมทอกซีไซเลน (Tetramethoxysilane: TMOS) และ เตตระเอทอกซีไซเลน (Tetraethoxysilane: TEOS) ใช้แอลกอฮอล์เป็นตัวทำละลาย โดยตัวที่นิยมใช้ ได้แก่ เมทานอลและเอทานอล และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งอาจเป็นกรดหรือเบส มีปฏิกิริยาเคมีที่เกี่ยวข้องดังนี้

1. ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างน้ำกับซิลิกอนอัลคอกไซด์เพื่อให้ได้หมู่ซิลานอลและมีแอลกอฮอล์เป็นผลิตภัณฑ์ร่วม แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส [8]

2. ปฏิกิริยาควบแน่น (Condensation reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นต่อเนื่องกันที่จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส โดยที่หมู่ซิลานอลจะทำปฏิกิริยากับซิลิกอนอัลคอกไซด์หรือทำปฏิกิริยากันเองทำให้ได้พันธะซิลอกเซนเกิดขึ้น แสดงดังรูป 2.4

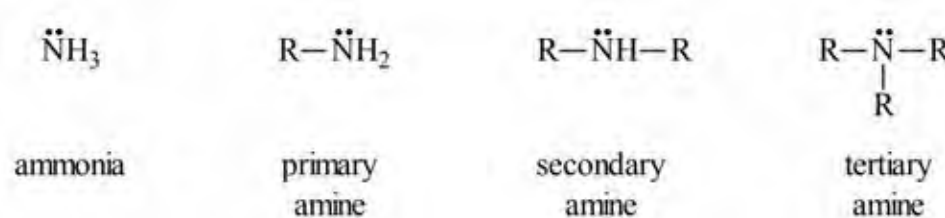


รูปที่ 2.4 การเกิดปฏิกิริยาควบแน่น [8]

การสังเคราะห์ซิลิกาตามปฏิกิริยาข้างต้นมักได้ไมโครพอร์ซิลิกาที่มีการจัดเรียงโครงสร้างอย่างไม่เป็นระเบียบ ต่อมาในปี ค.ศ.1992 Beck และคณะ ได้ค้นพบวิธีการสังเคราะห์เมโซพอร์ซิลิกาที่มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ โดยใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดแคตไอออนที่มีหมู่ quaternary ammonium ทำหน้าที่เป็นสารต้นแบบ (template) โดยเมโซพอร์ซิลิกาที่เตรียมได้นั้นมีโครงสร้างเป็นแถวเรียงกันเป็นรูปหกเหลี่ยม (hexagonal array) โดยสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เช่น เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา หรือสารดูดซับ

2.4 สารประกอบเอมีน (Amine compound) [10]

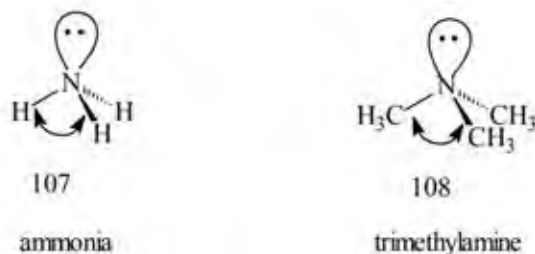
เอมีนเป็นอนุพันธ์อินทรีย์ (Organic derivatives) ของแอมโมเนีย (NH_3) โดยมีหมู่ alkyl หรือ aryl เข้ามาแทนที่ไฮโดรเจน เอมีนสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทตามจำนวนหมู่แทนที่ที่มาต่อกับอะตอมไนโตรเจน ได้แก่ primary amine, secondary amine และ tertiary amine แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ประเภทของสารประกอบเอมีน [10]

2.4.1 โครงสร้างของเอมีน (Structure of amines)

อะตอมไนโตรเจนในเอมีนส่วนใหญ่จะคล้ายกับแอมโมเนีย กล่าวคือ มี hybridization เป็นแบบ sp^3 หมู่ alkyl ทั้ง 3 หมู่จะอยู่ที่มุมของรูป tetrahedron ส่วน sp^3 orbital ที่มีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว (Unshared electron pair) จะชี้ไปยังมุมที่เหลือ ดังนั้น geometry ของเอมีนจึงเป็น trigonal pyramidal แสดงดังรูปที่ 2.6

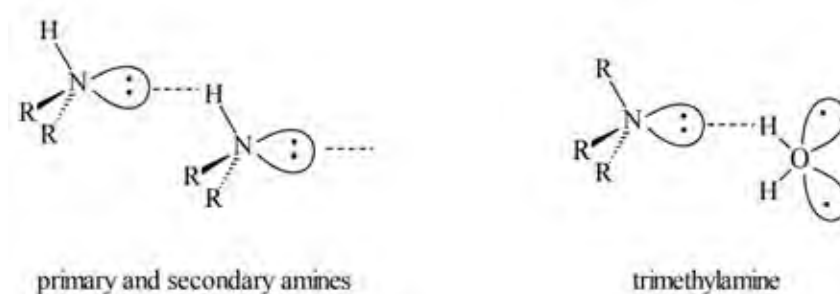


รูปที่ 2.6 มุมระหว่างพันธะของสารประกอบเอมีน [10]

มุมระหว่างพันธะ C-N-C ของเอมีนจะเท่ากับ 108° ซึ่งใกล้เคียงกับมุมของพันธะของ tetrahedral ทั้งนี้ เนื่องจาก sp^3 orbital ที่มีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวจะถูกดึงเข้ามาใกล้กับไนโตรเจนมาก ทำให้พันธะอื่นให้หุบเข้าหากัน แสดงดังรูป 2.7

2.4.2 สมบัติทางกายภาพของเอมีน (Physical properties)

เอมีนเป็นเบสอ่อน ซึ่งมีจุดเดือดสูงกว่าสารประกอบอัลเคน แต่ต่ำกว่าแอลกอฮอล์ (Alcohol) ที่มีมวลโมเลกุลใกล้เคียงกัน ทั้งนี้ เพราะมีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี (Electronegativity) ต่ำกว่าออกซิเจน ดังนั้นพันธะ N-H จึงมีขั้วน้อยกว่าพันธะ O-H ทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) ที่แข็งแรงน้อยกว่า โมเลกุลของ primary และ secondary amines สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลได้ (Intermolecular hydrogen bond) และยังสามารถเกิดกับน้ำได้อีกด้วย สำหรับ tertiary amine จะไม่สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลได้ แสดงดังรูป 2.7 นอกจากเกิดกับน้ำ ทำให้เอมีนชนิดตติยภูมิ มีจุดเดือดต่ำกว่า เอมีนชนิดปฐมภูมิและเอมีนชนิดทุติยภูมิ ที่มีมวลโมเลกุลใกล้เคียงกัน



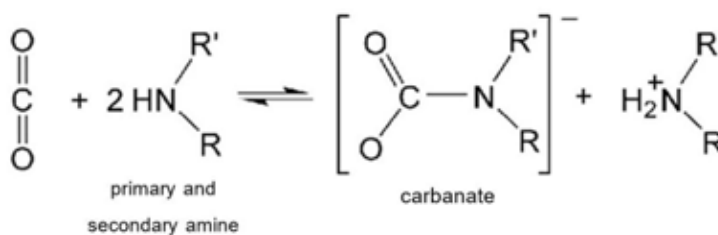
รูปที่ 2.7 การเกิดพันธะไฮโดรเจนของหมู่เอมีน [10]

2.4.3 ปฏิกริยาการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเอมีน [11]

แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีปริมาณความเข้มข้นที่อยู่ในระดับต่ำอาจกำจัดออกด้วยการดูดซับ (Adsorption) ระบบดูดซับด้วยตัวดูดซับที่เคลือบด้วยสารเคมีบางชนิด เช่น เอมีน (Amine) หรือสารเคมีที่มีความเป็นกรด หรือต่างอย่างใดอย่างหนึ่ง เพื่อให้ความสามารถในการดูดซับมีประสิทธิภาพสูงขึ้นเป็นหลายเท่าตัวของตัวดูดซับธรรมดา โดยทั่วไปนิยมใช้เอมีนในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่ง ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเอมีน สามารถแบ่งออกเป็น 2 กรณี ได้แก่ กรณีที่ไม่มีน้ำเข้าทำปฏิกิริยา และกรณีที่น้ำเข้าทำปฏิกิริยา

1. กรณีที่ไม่มีน้ำเข้าทำปฏิกิริยา (In absence of water)

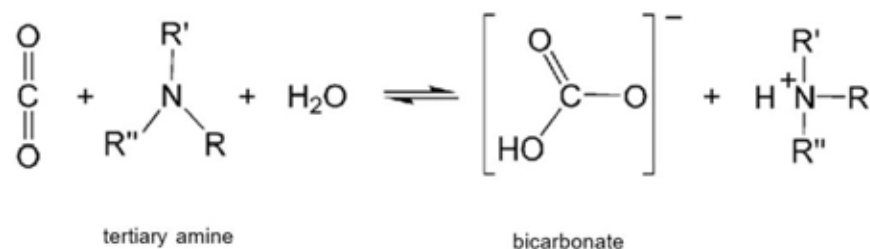
เอมีน 1 โมเลกุลเข้าทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์โดยให้อิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวของไนโตรเจนกับคาร์บอนไดออกไซด์กลายเป็น สวิทเทอร์ไอออน (Zwitterion) จากนั้นเอมีนอีก 1 โมเลกุลทำการดึงโปรตอนจากสวิทเทอร์ไอออนเกิดเป็นเกลือของแอมโมเนียมและคาร์บาเมท (Carbamate) โดย ปฏิกริยานี้เกิดขึ้นกับเมีนปฐมภูมิหรือทุติยภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ปฏิกริยาของสารประกอบเอมีนชนิดปฐมภูมิและทุติยภูมิ [11]

2. กรณีที่มีน้ำเข้าทำปฏิกิริยา (In presence of water)

สำหรับเอมีนตติยภูมิ มักจะเกิดปฏิกิริยาประเภทนี้ กล่าวคือ ไนโตรเจนบนเอมีนในอิเล็กตรอนกับน้ำได้ควอเตอร์นารีแคทไอออนและไฮดรอกไซด์ไอออน จากนั้นไฮดรอกไซด์ไอออนจะเข้าทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์กลายเป็นไบคาร์บอเนตไอออน จากนั้นทั้งสองตัวจับกันด้วยแรงระหว่างไอออนดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ปฏิกิริยาของสารประกอบเอมีนชนิดตติยภูมิ [11]

2.5 สารคู่ควบประเภทไซเลน (Silane coupling agent) [12]

สารประสานจะทำหน้าที่ในการทำให้สารเสริมแรง (filler) กระจายตัวและยึดเกาะกับพอลิเมอร์ได้ดี และสารประสานอาจจะทำหน้าที่ในการเป็นตัวประสานหรือเป็นตัวกลางเชื่อมระหว่างพอลิเมอร์กับตัวเสริมแรง โดยการมีพันธะที่แข็งแรงระหว่างสองเฟสจะทำให้มีการยึดเกาะระหว่างเฟสดีขึ้น

โดยทั่วไปไซเลนจะเป็นซิลิกอนที่มีลักษณะโครงสร้างเหมือนอัลเคน ประกอบด้วยสายโซ่อะตอมของซิลิกอนที่ยึดเกาะด้วยพันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) กับอะตอมของไฮโดรเจน ไซเลนจะมีความเสถียรน้อยกว่าสารประกอบของคาร์บอนที่มีโครงสร้างแบบเดียวกัน เนื่องจากพันธะ Si-Si bond มีความแข็งแรงค่อนข้างต่ำกว่า C-C bond ออกซิเจนจะทำให้เกิดการสลายตัวของไซเลนได้ง่าย เพราะ Si-O bond เป็นพันธะที่ค่อนข้างแข็งแรง

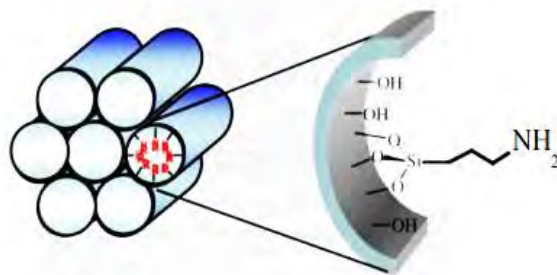
ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างของสารคู่ควบประเภทไซเลนและการนำไปใช้งานกับพลาสติกชนิดต่างๆ [12]

สารคู่ควบประเภทไซเลน	ชนิดของพลาสติกที่นำมาใช้
Vinyl-triethoxy silane	Unsaturated Polyesters, Polyolefins, PVC, PS,
Vinyl-tris (2-methoxy) silane	ABS, SAN and PMMA
3-Metha acryloxypropyl trimethoxy silane	Epoxy, Phenolic and Malamine Resins, PA, PHR,
3-propyltriethoxysilane	PP, PE, PMMA and PC
3-Glycidoxypropyltrimethoxysilane	Epoxy, Phenolic and Malamine Resins, Unsaturated Polyesters, PUR, PC, PS, ABS, SAN, PA, PP, PE and Polysulfides

ปัจจุบันการศึกษาการสังเคราะห์ซิลิกาและเมโซพอร์ซิลิกาตัดแปรด้วยหมู่ฟังก์ชันเอมีน และนำวัสดุที่สังเคราะห์ได้ไปประยุกต์ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และตัวดูดซับอย่างแพร่หลาย โดยการตัดแปรพื้นผิวของซิลิกาหรือเมโซพอร์ซิลิกาให้หมู่ฟังก์ชันเอมีนอินทรีย์ สามารถเตรียมได้ด้วยวิธีการติดต่อเชิงเคมี โดยใช้สารอะมิโนไซเลน (Aminosilane) เช่น 3-อะมิโนโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน เตตระเอทิลีนเพนตามีน เป็นต้น

2.6 การตัดแปรพื้นผิวของซิลิกาด้วยหมู่เอมีน (Modification of silica)

การตัดแปรพื้นผิวซิลิกาด้วยหมู่เอมีน แสดงดังรูปที่ 2.10 ยังคงได้รับการศึกษาอย่างต่อเนื่อง เพราะซิลิกาที่ฟังก์ชันด้วยหมู่เอมีนอินทรีย์มีประสิทธิภาพสูงในการนำไปประยุกต์ในงานด้านการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยง่าย แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ หรือโลหะหนัก เป็นต้น ในปัจจุบันยังมีขีดจำกัดในการตัดแปรพื้นผิวของซิลิกาด้วยหมู่เอมีนที่มีขนาดใหญ่และปริมาณที่สูง การตัดแปรพื้นผิวส่งผลให้ความเป็นระเบียบของโครงสร้างและสมบัติความพรุนลดลง เนื่องจากการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่เอมีนกับหมู่ไฮดรอกซิล ซึ่งหมู่เอมีนอาจก่อให้เกิดอันตรกิริยาที่แข็งแกร่งกับหมู่ไฮดรอกซิลภายในรูพรุน จึงส่งผลให้โครงสร้างของรูพรุนเกิดการยุบตัว

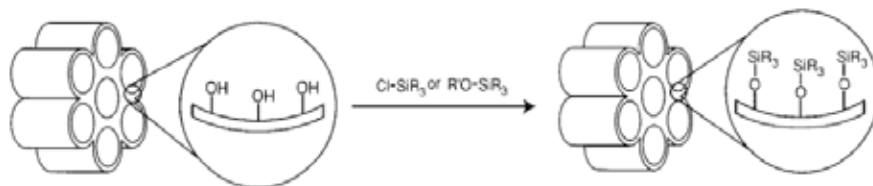


รูปที่ 2.10 ลักษณะพื้นผิวของซิลิกาที่ตัดแปรด้วยหมู่เอมีน [12]

2.6.1 การตัดแปรซิลิกาด้วยหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ (Modification of silica)

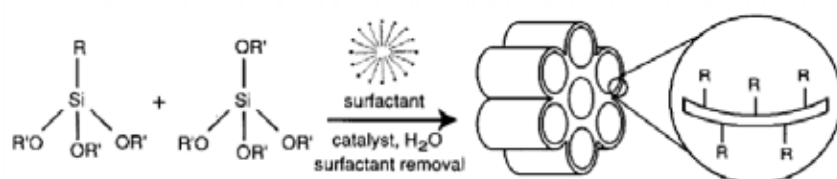
ซิลิกามีพื้นที่ผิวสูงและพื้นที่ผิวถูกปกคลุมไปด้วยหมู่ไฮดรอกซิลจึงสามารถตัดแปรหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวรูพรุนของซิลิกาให้เหมาะสมต่อการใช้งาน นอกจากนี้การตัดแปรพื้นผิวของซิลิกาด้วยหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ส่งผลให้สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุเปลี่ยนไป โดยการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์สามารถทำได้ 2 วิธี ได้แก่

1. วิธีทางอ้อม (Indirect method) หรือการกราฟต์ทางเคมี (Chemical grafting) แสดงดังรูปที่ 2.11 เป็นการนำซิลิกาที่สังเคราะห์ได้ไปทำปฏิกิริยาซิลิเลชัน (Silylation) กับไตรแอลคอกซีไซเลน (Trialkoxysilanes) หรือคลอโรไซเลน (Chlorosilanes)



รูปที่ 2.11 การดัดแปรพื้นผิวของซิลิกาด้วยการกราฟต์ทางเคมี [12]

2. วิธีทางตรง (Direct method) หรือการควบแน่นร่วม แสดงดังรูปที่ 2.12 เป็นการผสมซิลเลนที่มีหมู่ฟังก์ชันที่ต้องการพร้อมกับสารตั้งต้นซิลิกาหลักในขั้นตอนเดียวเพื่อให้เกิดการสังเคราะห์ซิลิกาและดัดแปรพื้นผิวพร้อมกัน



รูปที่ 2.12 การดัดแปรพื้นผิวของซิลิกาด้วยการควบแน่นร่วม [12]

จากการเปรียบเทียบงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การเพิ่มหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ด้วยการกราฟต์ทางเคมี จะให้ซิลิกาที่โครงสร้างเป็นระเบียบมากกว่า และสามารถปรับปริมาณหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวได้ง่าย แต่มีจุดด้อยคือการกระจายของหมู่ฟังก์ชันภายในรูพรุนของซิลิกาไม่สม่ำเสมอ กล่าวคือหมู่ฟังก์ชันส่วนใหญ่ถูกติดบริเวณปากรูพรุน ทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะลดลง และเกิดอันตรกิริยาระหว่างหมู่ฟังก์ชันที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ที่อยู่ใกล้กัน

2.6.2 การอิมเพรเกนชันด้วยหมู่เอมีน (Impregnation)

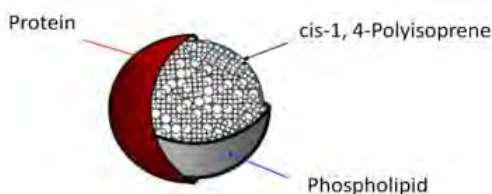
การทำซิลิกาให้อิมตัวด้วยหมู่เอมีนเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมาก เนื่องจากให้ร้อยละการกระจายสูง ประหยัด และไม่ซับซ้อน โดยในขั้นตอนการทำให้อิมตัวซิลิกาจะถูกแช่ลงในสารละลายอิมแพรกแนนต์ โดยสารละลายอิมแพรกแนนต์จะไหลเข้าไปในรูพรุนด้วยแรงแคปิลลารี (Capillary action) และการแพร่ (Diffusion) จากนั้นจึงทำให้แห้งด้วยการให้ความร้อน

2.7 ยางธรรมชาติ (Natural rubber) [13]

แหล่งผลิตยางธรรมชาติที่ใหญ่ที่สุดในโลกคือ แถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้คิดเป็นร้อยละ 90 ของแหล่งผลิตทั้งหมด ส่วนที่เหลือมาจากแอฟริกากลาง ซึ่งพันธุ์ยางที่ปลูกในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ คือ พันธุ์ฮีเวียบราซิลเลียนซิส (Hevea brasiliensis) น้ำยางที่กรี๊ดได้จากต้นจะเรียกว่าน้ำยางสด (Field latex)

2.7.1 น้ำยางธรรมชาติ [14]

น้ำยางที่ได้จากต้นยางมีลักษณะเป็นอนุภาคเล็ก ๆ กระจายอยู่ในน้ำ มีลักษณะเป็นของเหลวสีขาว มีสภาพเป็นคอลลอยด์ มีปริมาณของแข็งประมาณ ร้อยละ 27-48 ส่วนประกอบในน้ำยางสดแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นเนื้อยางร้อยละ 35 ส่วนที่ไม่ใช่เนื้อยางร้อยละ 65



รูปที่ 2.13 แบบจำลองอนุภาคเม็ดยางธรรมชาติ [14]

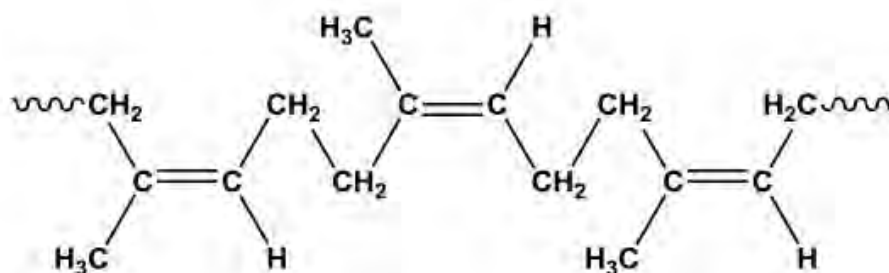
องค์ประกอบของยางธรรมชาติแสดงดังในตาราง 2.2 และแบบจำลององค์ประกอบของอนุภาคเม็ดยางแสดงดังรูป 2.13

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของยางธรรมชาติ [14]

องค์ประกอบ	ปริมาณ (%)
ของแข็ง	22-48
เนื้อยาง	20-45
โปรตีน	1.5
เรซิน	2.0
คาร์โบไฮเดรต	1.0
สารอนินทรีย์	0.5
น้ำ	45-60

2.7.2 โครงสร้างของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลประกอบด้วย *ซิส*-1,4-พอลิไอโซพรีน (cis-1,4-Polyisoprene) มากกว่า 99.99% มีหน่วยไอโซพรีน (Isoprene unit) ประมาณ 3,000-5,000 หน่วยต่อโมเลกุล มีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลกว้าง ทำให้มีความสามารถในการแปรรูปได้ดี แสดงโครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติ แสดงดังรูป 2.14



รูปที่ 2.14 โครงสร้างเคมี ซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน [14]

2.7.3 สมบัติของยางธรรมชาติ

1. ยางธรรมชาติมีสมบัติยืดหยุ่นในด้านความต้านทานต่อแรงดึง แม้ไม่ได้เติมสารเสริมแรงและมีความยืดหยุ่นสูง จึงเหมาะที่จะใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์บางชนิด เช่น ถูมือยาง ยางรัดของ เป็นต้น
2. ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงพลวัต (Dynamic properties) ที่ดี มีความยืดหยุ่น (Elasticity) สูง ในขณะที่มีความร้อนภายในที่เกิดขณะใช้งานต่ำ และมีสมบัติการการเหนียวติดกันที่ดี
3. ยางธรรมชาติมีความต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear resistance) สูง ทั้งที่อุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิสูง
4. ความสามารถในการแปรรูป ยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยสูงทำให้แปรรูปได้ยาก จึงต้องทำการบดก่อนการแปรรูปทุกครั้ง
5. พฤติกรรมในตัวทำละลาย ยางธรรมชาติสามารถเกิดการบวมพองและในบางกรณีสามารถละลายในตัวทำละลายอินทรีย์บางชนิดได้สารละลายที่มีความหนืดสูง ยางธรรมชาติที่เกิดการเชื่อมโยงแล้วจะบวมพองในตัวทำละลายได้น้อย ขึ้นอยู่กับชนิดตัวทำละลายและระดับการเชื่อมโยง

2.8 กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง [15]

2.8.1 การออกสูตรยาง

การออกสูตรยางเป็นสิ่งสำคัญมากต่อคุณภาพและต้นทุนของผลิตภัณฑ์ที่ได้ การออกสูตรยางจำเป็นต้องมีความรู้เกี่ยวกับสมบัติของยาง หน้าที่และความจำเป็นของการใช้สารเคมีผสมยาง รวมทั้งต้องพิจารณาถึงราคาสารเคมีที่จะใช้ว่าเหมาะสมหรือคุ้มค่ากับการผลิตผลิตภัณฑ์นั้น ๆ เพราะต้นทุนการผลิตเป็นสิ่งสำคัญที่ต้อง

คำนึงถึงเป็นสิ่งแรกสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไปในการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง พื้นฐานของส่วนผสมของสูตรประกอบด้วยสารกลุ่มต่าง ๆ ดังนี้

1. ยาง (Rubber)

การออกสูตรยางจะต้องรู้สมบัติของยางแต่ละชนิดเป็นอย่างดี กล่าวคือ ต้องทราบถึงข้อดีและข้อเสียของยางที่นำมาใช้ เช่น ยางธรรมชาติมีข้อดี คือ มีความแข็งแรงของเนื้อยางล้วน (pure gum) ดีมาก กล่าวคือไม่ต้องเติมสารเสริมแรงก็สามารถให้ความแข็งแรงได้ดี

2. สารทำให้ยางคงรูป (Vulcanizing agent or curing agent)

สารกลุ่มนี้จะทำให้โมเลกุลของยางเกิดการเปลี่ยนแปลง ทำให้ยางอยู่ในสถานะที่ยึดหยุ่นได้สูง สารทำให้ยางคงรูปแบ่งเป็น 2 ระบบ ได้แก่ ระบบที่ใช้กำมะถัน (Sulfur) นิยมใช้ยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ ส่วนใหญ่ที่มีพันธะคู่ในโมเลกุล และระบบที่ใช้เปอร์ออกไซด์ (Peroxide) ซึ่งนิยมใช้ในยางที่มีปริมาณพันธะคู่ในโมเลกุลต่ำ

- ระบบยางคงรูปโดยกำมะถัน (Sulfur vulcanization system)

เป็นระบบที่เหมาะสมสำหรับการทำให้ยางที่มีปริมาณพันธะคู่ในโมเลกุลสูง เช่น ยางธรรมชาติหรือยางSBR เพราะพันธะคู่ คือ บริเวณที่เกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันด้วยกำมะถัน การทำให้ยางคงรูปด้วยกำมะถันจะทำให้ได้ยางที่มีสมบัติเชิงกลดี แต่มีความทนต่อความร้อนต่ำ ระบบนี้ประกอบด้วย กำมะถัน ซึ่งเป็นสารคงรูป โดยมี สารเร่งให้ยางคงรูป (Accelerator) เช่น 2-เมอร์แคปโทเบนโซไทอาโซล (2-Mercaptobenzothiazole: MBT) และ ไซโคลเฮกซิลเบนโซไทอาโซล-2-ซัลฟีนามิด (n-Cyclohexylbenzothiazole-2-sulfenamide: CBS) เป็นต้น และ สารกระตุ้นสารเร่ง (Activator) ได้แก่ สารพวกสังกะสีออกไซด์ (ZnO) สารอินทรีย์พวกกรดสเตียริก (Steric acid) เป็นต้น

- ระบบเปอร์ออกไซด์ (Peroxide system)

ระบบนี้สามารถใช้ในการทำให้ยางเกือบทุกชนิดคงรูปโดยเฉพาะยางสังเคราะห์ที่ไม่มีหรือมีปริมาณพันธะคู่ในโมเลกุลต่ำ ยางที่คงรูปด้วยระบบนี้จะมีสมบัติเชิงกลที่ไม่ดีนัก ต้นทุนสูงกว่าระบบการคงรูปด้วยกำมะถัน และยางคงรูปที่ได้มักมีกลิ่นของ อะซิโตนอน (Acetophenone) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากปฏิกิริยาวัลคาไนเซชัน

3. สารป้องกันยางเสื่อมสภาพ (Antidegradants)

เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลของยางทั่วไป โดยเฉพาะยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่จะมีพันธะคู่อยู่ค่อนข้างมาก ยางจึงเสื่อมสภาพได้ง่ายเมื่อต้องสัมผัสกับ โอโซน แสงแดด ออกซิเจน ดังนั้นการเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพจึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อยืดอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ ตัวอย่างของสารในกลุ่มป้องกันยางเสื่อมสภาพ ได้แก่ IPPD (N-Isopropyl-N'-phenyl-p-phenylene diamine)

4. สารตัวเติม (Filler)

สารตัวเติมเป็นสารที่ใช้ผสมกับยางเพื่อช่วยเสริมแรง (Reinforcement) ให้ผลิตภัณฑ์ยางหรือช่วยลดต้นทุนการผลิต สารตัวเติมที่ช่วยเสริมแรงจะเรียกว่า สารเสริมแรง (Reinforcing filler) ซึ่งจะเป็นสารที่มีขนาดอนุภาคที่เล็กมาก มีพื้นที่ผิวสูง ได้แก่ ผงเขม่าดำ (Carbon black) เกรดต่างๆ ผงเขม่าขาวหรือซิลิกา เป็นต้น ส่วนสารตัวเติมที่ไม่ช่วยเสริมแรง (Inert filler or non-reinforcing filler) แต่นิยมใช้เพื่อลดต้นทุนการผลิต ได้แก่ ดินขาว (Clay) แป้ง แคลเซียมคาร์บอเนต เป็นต้น

5. สารช่วยในกระบวนการผลิต (Processing aids)

สารกลุ่มนี้ทำหน้าที่เฉพาะตัวต่างๆ กัน เช่น สารที่ช่วยให้ยางนึ่งระหว่างการผสม ได้แก่ พวกน้ำมัน (Oils) และสารเคมีย่อยยาง (Peptizer) เช่น pepton22 สารบางตัวช่วยควบคุมไม่ให้ยางมีความยืดหยุ่นมากเกินไปเพราะจะทำให้สารเคมีที่เป็นผงเข้าเนื้อได้อย่างยากในระหว่างการบดผสม เพราะยางจะพันลูกกลิ้งยาก สารพวกนี้ได้แก่ factice เป็นต้น

6. สารกลุ่มอื่นๆ (Miscellaneous ingredients)

สารกลุ่มนี้โดยทั่วไปไม่จำเป็นต้องใช้ออกสูตรยาง แต่ในบางกรณีต้องการให้ยางมีสมบัติพิเศษบางประการจำเป็นต้องมีการเติมสารเคมีบางตัวเข้าช่วย

- **สารหน่วง (Retarder)** จะใช้เมื่อต้องการชะลอไม่ให้ยางที่กำลังบดผสมคงรูปเสียก่อน (Scorch) หรือที่เรียกว่า ยางตาย ตัวอย่างของสารหน่วง ได้แก่ กรดเบนโซอิก (Benzoic acid) หรือ กรดซาลิไซลิก (Salicylic acid) เป็นต้น
- **สารทำให้เกิดฟอง (Blowing agent)** ใช้สำหรับการทำยางให้ฟูในการทำยางพองน้ำ ตัวอย่างของสารกลุ่มนี้ ได้แก่ โซเดียมไบคาร์บอเนต (Sodium bicarbonate) หรือ ไดไนโตรเพนตะเมทิลีนเพนตามีน (Dinitropentamethylene tetramine: DNT) เป็นต้น
- **สารทำให้เกิดสี (Pigments)** อาจเป็นสีอินทรีย์ เช่น แคดเมียมซัลไฟด์ (Cadmium sulfide), โครเมียมออกไซด์ (Chromium oxide) และ ไททาเนียมออกไซด์ (Titanium oxide) เป็นต้น

2.9 ปฏิกริยารวัลคาไนเซชัน (Vulcanization) [16]

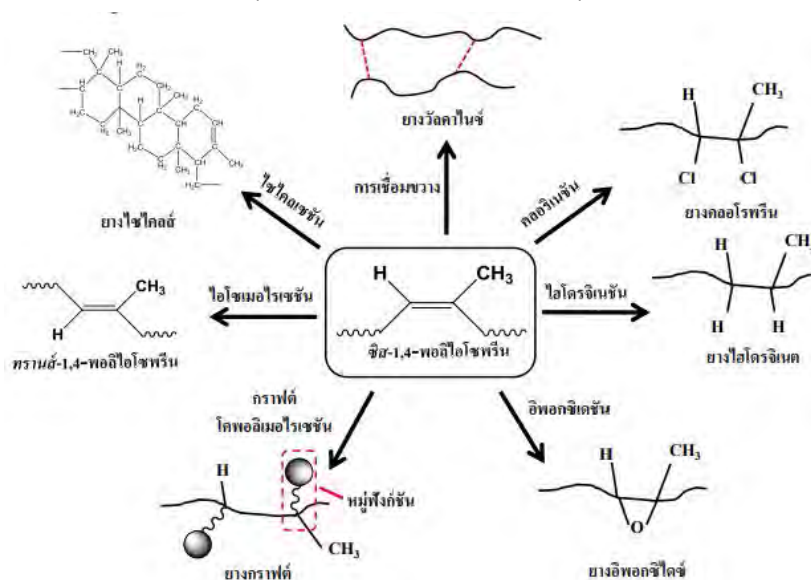
ระบบการวัลคาไนเซชันด้วยกำมะถันเป็นระบบที่นิยมใช้ในยางจำพวกมีหมู่ไดอีน เช่น ยางธรรมชาติ ยางสไตรีนบิวตาไดอีน (Styrene butadiene rubber: SBR) โดยปกติซัลเฟอร์ (S_8) ประกอบด้วยวงแหวนแปดเหลี่ยม มีสถานะเป็นผลึก ซัลเฟอร์เสถียรได้โดยการให้ความร้อน ซึ่งการเปิดวงแหวนจะต้องใช้พลังงานในการกระตุ้นประมาณ 270 กิโลจูลต่อโมล บริเวณที่วงแหวนแตกออกจะมีฟรีเรดิคัลเกิดขึ้น ซึ่งจะเกิดการเชื่อมโยง

กับยางบริเวณจุดนี้ การใช้ซัลเฟอร์จะต้องใช้เวลาและความร้อนที่สูงมาก ทั้งนี้ยังใช้ปริมาณซัลเฟอร์ในกระบวนการวัลคาไนเซชัน

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้จะอยู่ในกลุ่มซัลฟิनाไมด์ (Sulphenamides) และปฏิกิริยาการแตกวงของซัลเฟอร์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นตัวช่วย ซึ่งจะทำให้ซัลเฟอร์แตกวงออกเป็นส่วนเล็กๆ ทำให้ปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันเกิดได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

2.10 การตัดแปรงธรรมชาติและการประยุกต์ใช้ [17]

สมบัติโดยทั่วไปของยางธรรมชาติจะมีความยืดหยุ่นได้ดี แต่เมื่อได้รับความร้อนจากภายนอกจะทำให้ยางมีความอ่อนตัว ถ้าได้รับความร้อนสูงเกินไปจะมีลักษณะเหนียวและเสื่อมสภาพ แต่เมื่อเผชิญกับอุณหภูมิต่ำจะแข็งและเปราะ แตกหักง่าย ยางธรรมชาติมีอุณหภูมิคล้ายแก้ว (T_g) ประมาณ -60 องศาเซลเซียส และเกิดการเรียงตัวเป็นผลึกได้ง่ายในภาวะที่ถูกดึง รวมทั้งไม่คงทนต่อสารเคมีหรือตัวทำละลายอินทรีย์ ดังนั้นการปรับปรุงหรือพัฒนาคุณสมบัติยางธรรมชาติให้ดีขึ้นจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากโครงสร้างยางธรรมชาติมีความไม่อิ่มตัวสูงจึงทำให้สายโซ่ยางธรรมชาติเกิดปฏิกิริยาเคมีที่บริเวณพันธะคู่ของคาร์บอนได้ง่าย การเกิดปฏิกิริยาเคมีที่บริเวณพันธะคู่ของคาร์บอนสามารถเกิดได้ภายในโครงสร้างของยางธรรมชาติโดยเป็นการเชื่อมขวางกันภายในโมเลกุลหรือการเติมหมู่ฟังก์ชันที่เหมาะสมไปทำปฏิกิริยาที่บริเวณพันธะคู่ของคาร์บอน ทำให้เกิดเป็นพันธะเคมีขึ้นใหม่ที่มีลักษณะร่วมกันระหว่างยางธรรมชาติและหมู่ฟังก์ชันที่ได้เติมเข้าไป รูปที่ 2.15 แสดงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของยางธรรมชาติด้วยวิธีต่างๆ เช่น การเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ คลอรีเนชัน (Chlorination) ไฮโดรจิเนชัน (Hydrogenation) อีพอกซิเดชัน (Epoxidation) กราฟต์ (Graft polymerization) เป็นต้น



รูปที่ 2.15 การตัดแปรงธรรมชาติด้วยวิธีต่างๆ [17]

2.10.1 การเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์

การเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์เป็นการปรับปรุงสมบัติของยางธรรมชาติโดยอาศัยหลักการเติมสารเคมีเพื่อทำให้เกิดการเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุล เกิดเป็นโครงสร้างตาข่ายแบบร่างแห (Crosslinked network) การเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่ที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้โครงสร้างของยางธรรมชาติมีความแข็งแรงขึ้น ยางที่ผ่านการเชื่อมขวางเรียกว่า ยางคงรูป ระบบที่นิยมใช้ในการเชื่อมขวางคือ ระบบวัลคาไนเซชัน

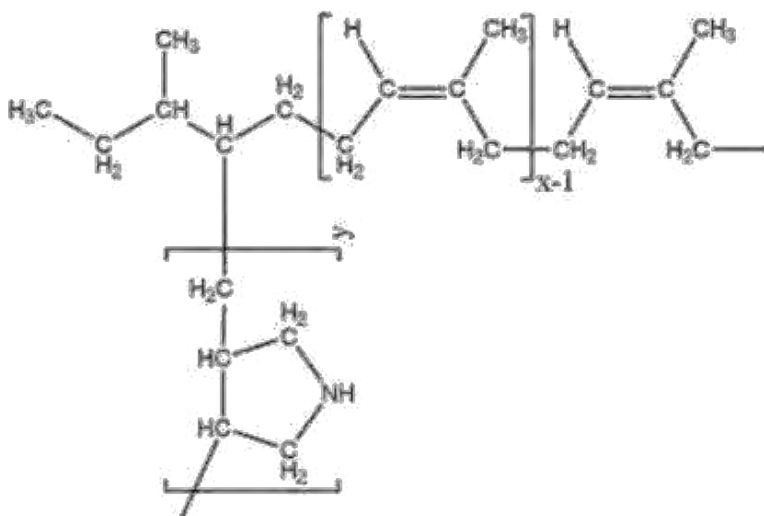
2.10.2 การกราฟต์พอลิเมอร์บนสายโซ่ยางธรรมชาติ

กราฟต์โคพอลิเมอร์ไอโซพรีน เป็นกระบวนการดัดแปรโครงสร้างภายในสายโซ่ยางธรรมชาติ โดยการนำยางธรรมชาติมาทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์หรือพอลิเมอร์เพื่อปรับปรุงสมบัติของยางธรรมชาติให้เหมาะสมต่อการใช้งานรูปแบบต่างๆ วัสดุที่ใช้จะมีสมบัติร่วมระหว่างยางธรรมชาติและพอลิเมอร์ที่นำมากราฟต์ ปัจจัยที่มีผลสำคัญต่อการกราฟต์ ได้แก่ ปริมาณยางธรรมชาติ ตัวริเริ่ม มอนอเมอร์หรือพอลิเมอร์ และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา เป็นต้น

ยางธรรมชาติสามารถนำหมู่ฟังก์ชันที่หลากหลายมากราฟต์บนสายโซ่ โดยมีการประยุกต์ใช้ที่แตกต่างกันตามลักษณะเฉพาะของหมู่ฟังก์ชันที่ได้เติมลงไป สำหรับกระบวนการเตรียมยางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟต์สามารถเตรียมได้ทั้งในระบบอิมัลชันและระบบสารละลาย โดยแต่ละระบบจะใช้ตัวริเริ่มแตกต่างกัน สำหรับการกราฟต์ในระบบสารละลายต้องใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ปริมาณมากเพื่อละลายยางธรรมชาติ สารละลายที่ใช้ส่วนใหญ่ ได้แก่ โทลูอีน และ เบนซีน ซึ่งมีราคาแพง เป็นอันตรายต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม ดังนั้นการเตรียมยางธรรมชาติจึงนิยมใช้ระบบอิมัลชันมากกว่า เนื่องจากน้ำยางธรรมชาติมีตัวทำละลายที่เป็นน้ำ ซึ่งเป็นระบบที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่า

หมู่ฟังก์ชันที่นำมากราฟต์สามารถเป็นได้ทั้งหมู่ฟังก์ชันแบบไม่มีขั้ว (Hydrophobic) เช่น สไตรีน และหมู่ฟังก์ชันแบบมีขั้ว (Hydrophilic) เช่น อะคริเลต (Acrylate), อะคริโลไนไตรล์ (Acrylonitrile) และสารประกอบเอมีน (Amine compounds) เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้ยางธรรมชาติถูกกราฟต์ด้วยเอมีน โดยมีโครงสร้างของยางเป็นสายโซ่หลัก (Backbone chain) และโครงสร้างของเอมีนเป็นสายโซ่ที่มาต่อกับยางธรรมชาติ แสดงดังรูปที่ 2.16 เนื่องจากเอมีนเป็นหมู่ฟังก์ชันที่มีสมบัติเป็นเบสสามารถดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีสมบัติเป็นกรดได้ดี



รูปที่ 2.16 การสร้างพันธะระหว่างยางธรรมชาติกับเอมีน [17]

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Zhang และคณะ [18] ศึกษาการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยทำการเตรียมตัวดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และจากเมโซพอร์ซิลิกาโมเลกุลาร์ซีฟชนิด SBA-15 มากราฟต์ด้วย 3-อะมิโนโพรพิลเมทอกซีไซเลน และอิมมัตว (impregnation) ในสารละลายเตตระเอทิลีนเพนตามีน เพื่อปรับปรุงสมบัติการดูดซับและการคายซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จากผลการทดลองพบว่าตัวดูดซับที่กราฟต์ด้วย APTMS และทำให้อิมมัตวที่สารละลาย TEPA ที่ความเข้มข้น 70 เปอร์เซ็นต์โดยมวล (SBA-15(p)-AP-70T) มีปริมาณไนโตรเจนมากที่สุด 15.81 มิลลิโมลต่อกรัม และความจุในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของ SBA-15(p)-AP-70T เท่ากับ 5.69 มิลลิโมลต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊สเข้าเครื่องปฏิกรณ์เท่ากับ 60 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อทำการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ไป 15 รอบ พบว่าในรอบสุดท้ายสามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ 5.2 มิลลิโมลต่อกรัม ซึ่งลดลงจากการดูดซับครั้งแรกเพียง 6.1 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่า SBA-15(p)-AP-70T สามารถใช้เป็นตัวดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Zhao และคณะ [19] ศึกษาความจุในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับซิลิกาชนิดที่มีรูพรุนแบบลำดับชั้น (Hierarchical porous silica: HPS) ดัดแปรด้วยเตตระเอทิลีนเพนตามีน จากผลการทดสอบประสิทธิภาพในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของ HPS ดัดแปร ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งภายใต้ภาวะที่ต่างกััน พบว่า HPS สามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูงสุด 5.01 มิลลิโมลต่อกรัม เมื่อเติม TEPA ที่ความเข้มข้นร้อยละ 60 โดยมวล แสดงให้เห็นสมบัติที่ดีขึ้นของตัวดูดซับเมื่อทำการเติม TEPA และความจุในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงขึ้นกว่าตัวดูดซับแบบเมโซพอร์ซิลิกาชนิดอื่น เมื่อทำการทดลองดูดซับซ้ำเป็นจำนวน 10 ครั้ง ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดูดซับได้ลดลงจาก 5.01 มิลลิโมลต่อกรัม เป็น 4.7 มิลลิโมลต่อ

กรัม ลดลงเพียงร้อยละ 6.1 สำหรับการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์บน HPS ที่ดัดแปรด้วย TEPA ภายใต้ภาวะที่แตกต่างกัน สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองการเสื่อมสภาพ เมื่อพิจารณาถึงความจุในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงขึ้นและความสามารถในการนำกลับมาใช้ใหม่ แสดงให้เห็นว่า HPS ที่ดัดแปรด้วยเอมีนนั้นมีศักยภาพในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้เป็นอย่างดี

Sohail และคณะ [20] ศึกษาการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของ Si-MCM-41 ที่ดัดแปรด้วยเตตระเอทิลีนเพนตามีนในปริมาณที่แตกต่างกัน ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์โดยน้ำหนัก (Gravimetric analysis) พบว่าการดัดแปร Si-MCM-41 ด้วยเตตระเอทิลีนเพนตามีน ช่วยเพิ่มปริมาณการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และสามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีเมื่อเพิ่มปริมาณเตตระเอทิลีนเพนตามีน ซึ่งปริมาณเตตระเอทิลีนเพนตามีนที่ 50% โดยน้ำหนัก ให้ค่าการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดที่ 54.65 มิลลิกรัมต่อกรัมของตัวดูดซับที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส การเพิ่มอุณหภูมิมีแนวโน้มที่จะเพิ่มความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของ Si-MCM-41 ที่ดัดแปรด้วยเตตระเอทิลีนเพนตามีน 50% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ค่าการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดที่ 70.41 มิลลิกรัมต่อกรัมตัวดูดซับ

Delaney และคณะ [21] ศึกษาการสังเคราะห์ HMS (Hexagonal mesoporous silica) ด้วยวิธีโซล-เจล โดยใช้ TEOS เป็นซิลิกาตั้งต้น และโดเดซิลเอมีน (Dodecylamine; DDA) เป็นสารกำหนดโครงสร้าง จากนั้นดัดแปรพื้นผิวของ HMS ให้มีหมู่ฟังก์ชันเอมีนอินทรีย์ด้วยวิธีการกราฟต์ โดยใช้อะมิโนไซเลน 3 ชนิด ได้แก่ 3-อะมิโนโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน (3-Aminopropyltrimethoxysilane; APTMS) 3-(2-อะมิโนเอทิลอะมิโน)โพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน (3-(2-Aminoethylamino)propyltrimethoxysilane; AEA) และ 3-[2-(2-อะมิโนเอทิลอะมิโน)เอทิลอะมิโน]โพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน (3-[2-(2-Aminoethylamino)ethylamino]propyltrimethoxysilane; AEEA) จากการทดลองพบว่า รูพรุนของ HMS ที่ผ่านการดัดแปรพื้นผิวด้วยอะมิโนไซเลนชนิดต่างๆ มีขนาดใกล้เคียงกัน (ประมาณ 20 อังสตรอม) แต่พื้นผิวจำเพาะมีแนวโน้มลดลงเมื่อหมู่เอมีนอินทรีย์มีขนาดโมเลกุลใหญ่ขึ้น ดังนั้น HMS ที่ดัดแปรพื้นผิวด้วย APTMS จึงมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุด 1268 ตารางเมตรต่อกรัม

Bois และคณะ [22] ศึกษาการสังเคราะห์ HMS ดัดแปรด้วยหมู่เอมีน โดยใช้ TEOS เป็นซิลิกาตั้งต้น DDA เป็นสารกำหนดโครงสร้าง และ APTMS เป็นไซเลนตั้งต้น สัดส่วนขององค์ประกอบในการสังเคราะห์เป็นดังนี้ อัตราส่วนโดยโมลของ TEOS:APTMS เท่ากับ 0.85:0.15 และอัตราส่วนโดยโมลของ TEOS:เอทานอล เท่ากับ 0.85:0.15 จากการทดลองพบว่า การดัดแปรพื้นผิวส่งผลให้โครงสร้างของวัสดุที่ได้มีความเป็นระเบียบและสมบัติความพรุนลดลง เนื่องจากเกิดพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรงระหว่างหมู่เอมีนกับหมู่ไซลานอลภายในรูพรุน จึงทำให้โครงสร้างรูพรุนเกิดการยุบตัว

บทที่ 3

เครื่องมือและวิธีการดำเนินงาน

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

เครื่องมือที่ใช้ในการตัดแปรรยางธรรมชาติ ขึ้นรูปยาง สังกะหราะห์และตัดแปรรซิลิกา แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

เครื่องมือ	รุ่น/ยี่ห้อ
เครื่องปฏิกรณ์แบบแก้วสามคอ 500 มิลลิลิตร	-
เครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill)	ยี่ห้อ Labtech engineering รุ่น LRW150 ประเทศเกาหลี
เครื่องกดอัดระบบไฮดรอลิก (Hydraulic Press)	ยี่ห้อ Labtech engineering รุ่น LP20 ประเทศเกาหลี
ตู้อบ (Oven)	ยี่ห้อ WTB Binder รุ่น FD115 ประเทศสหรัฐอเมริกา
ตู้อบแบบสุญญากาศ (Vacuum oven)	ยี่ห้อ MMM Medcenter รุ่น Vacucell 55 ประเทศเยอรมัน
เครื่องชั่งสาร	ยี่ห้อ Mettler Toled รุ่น PL1502s ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
เตาให้ความร้อน	-
คอนเดนเซอร์	-
เทอร์โมมิเตอร์	-
บีกเกอร์ 25, 50, 250 มิลลิลิตร	-
หลอดหยด	-
อลูมิเนียมฟอยล์	-
แท่งแก้วคนสาร	-
กระบอกตวง 10, 50, 100 มิลลิลิตร	-
ขวดน้ำกลั่น	-
ขาตั้ง	-
ถุงพลาสติกมีซิปล	-

3.2 สารตั้งต้นและสารเคมี

สารเคมีที่ใช้ในการดัดแปรยางธรรมชาติ ขึ้นรูปยาง สังกะหรณ์และดัดแปรซิลิกา แสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สารตั้งต้นและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

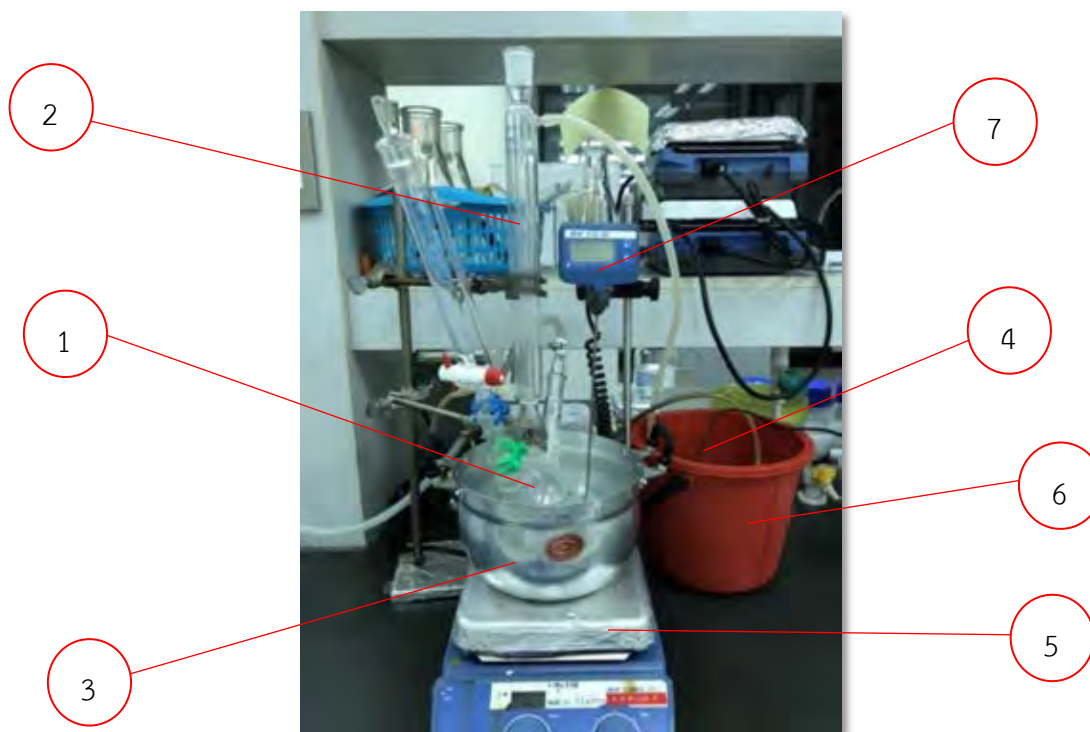
สารเคมี	เกรด/บริษัท
น้ำยางธรรมชาติ (Natural rubber latex)	60 % DRC HAL สถาบันวิจัยยาง (ประเทศไทย)
แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Ammonium hydroxide)	28 % AR บริษัท Qrec chemicals (ประเทศไทย)
ไดแอลลิลเอมีน (Diallylamine)	99 % AR บริษัท Sigma Aldrich (สหรัฐอเมริกา)
เทอร์ท-บิวทิลไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Tert-butyl hydroperoxide)	70 % AR บริษัท Sigma Aldrich (สหรัฐอเมริกา)
ไดไนโตรโซเพนตามีทิลีนเตตระมีน (N, N-Dinitrosopentamethylenetetramine: DNT)	AR บริษัท Shaanxi Pioneer Biotech (ประเทศจีน)
แอซีโตน (Acetone)	AR บริษัท Mermaid (ประเทศไทย)
เตตระเอทิลีนเพนตามีน (Tetraethylene pentamine)	Technical บริษัท Sigma Aldrich (สหรัฐอเมริกา)
กรดสเตียริก (Stearic acid)	Technical บริษัท PAN Innovation (ประเทศไทย)
ไซโคลเฮกซิลเบนโซไทโอะซอลซัลฟีนามิด (N-cyclohexyl-2-benzothiazole sulfenamide: CBS)	Technical บริษัท PAN Innovation (ประเทศไทย)
ซัลเฟอร์ (Sulfur)	Technical บริษัท PAN Innovation (ประเทศไทย)

ตารางที่ 3.2 สารตั้งต้นและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย (ต่อ)

สารเคมี	เกรด/บริษัท
สังกะสีออกไซด์ (Zinc oxide)	Technical บริษัท PAN Innovation (ประเทศไทย)
เตตระเอทิลออร์โทซิลิเกต (Tetraethyl orthosilicate)	99% บริษัท Sigma Aldrich (สหรัฐอเมริกา)
เอทานอล (Ethanol)	99.9% AR บริษัท Qrec chemicals (ประเทศไทย)
อะมิโนโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน (3-Aminopropyl)trimethoxysilane	97% AR บริษัท Sigma Aldrich (สหรัฐอเมริกา)
เมทานอล (Methanol)	AR บริษัท Qrec chemicals (ประเทศไทย)

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยนี้ คือ ชุดเครื่องปฏิกรณ์แบบแก้วสามคอ แสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ชุดเครื่องปฏิกรณ์แบบแก้วสามคอ

ชุดเครื่องปฏิกรณ์แบบแก้วสามคอประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

- 1) ขวดก้นกลมสามคอขนาด 500 มิลลิลิตร สำหรับบรรจุน้ำยางธรรมชาติ
- 2) ระบบการควบแน่น (Condensing system)
- 3) หม้อต้มสำหรับบรรจุน้ำมัน
- 4) ป้อนเข้าขนาดเล็ก
- 5) เตาให้ความร้อน (Hot plate)
- 6) ถังน้ำ
- 7) คู่ควบความร้อน (Thermocouple)

3.4 การดำเนินงานวิจัย

3.4.1 การเตรียมยางธรรมชาติดัดแปร (Preparation of NR modification)

เตรียมสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 26 โดยน้ำหนัก จำนวน 147 มิลลิลิตร น้ำยางธรรมชาติ 100 phr เจือจางด้วยสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ จำนวน 37 มิลลิลิตร และเตรียมสารละลายไดแอลิลเอมีน 4.95 phr ที่ละลายในสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ จำนวน 110 มิลลิลิตร จากนั้น จัดตั้งอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.1 ทำการกวนผสมเป็นเวลา 30 นาทีในเครื่องปฏิกรณ์แบบแก้ว ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ณ อุณหภูมิห้อง เติมสารละลายเทอร์ท-บิวทิลไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา ความเข้มข้น 7.30 โมลาร์ ในสัดส่วน 1.05 phr ที่ละลายในสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์จำนวน 5 มิลลิลิตร กวนผสมต่ออีก 15 นาที เติมสารละลายเตตระเอทิลีนเพนตามีนซึ่งเป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยา ความเข้มข้น 4.74 โมลาร์ 0.43 phr ที่ละลายในสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์จำนวน 5 มิลลิลิตร และเพิ่มอุณหภูมิเป็น 50 องศาเซลเซียส กวนผสมเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำน้ำยางธรรมชาติดัดแปรตกตะกอนด้วยเอซีโตน แล้วนำไปอบในตู้อบแบบสุญญากาศที่ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสจนกระทั่งน้ำหนักคงที่ ในงานวิจัยนี้กำหนดชื่อวัสดุทดสอบแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดย NR คือ ยางธรรมชาติ และ MNR คือ ยางธรรมชาติดัดแปร ปริมาณยางธรรมชาติและสารเคมีที่ใช้ในการดัดแปรยางธรรมชาติ แสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ภาวะการทดลองที่ใช้ในการเตรียมยางธรรมชาติดัดแปร

sample	NR latex (phr ¹)	Diallylamine (phr)	NH ₄ OH (ml)	t-BHT ² (phr)	TEPA ³ (phr)
MNR	100	4.95	147	1.05	0.43

Remark: The experimental condition was carried out for 24 h at 50 °C

¹part by weight per hundred part of rubber

²tert-butyl hydroperoxide

³Tetraethylene pentamine

3.4.2 การสังเคราะห์ซิลิกา

1. ซิลิกาตัดแปรด้วยสารคู่ควบประเภทไซเลน

เตรียมสารละลายเตตระเอทิลอโทซิลิเกตจำนวน 21 มิลลิลิตร แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์จำนวน 7 มิลลิลิตร น้ำปราศจากไอออนจำนวน 49 มิลลิลิตร และเอทานอลจำนวน 287 มิลลิลิตร จากนั้นเติมเตตระเอทิลอโทซิลิเกตและเอทานอลจำนวน 161 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ กวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เติมแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ น้ำปราศจากไอออนและเอทานอลจำนวน 126 มิลลิลิตร ลงในขวดแก้ว กวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้น นำสารละลายในบีกเกอร์ผสมรวมกับสารละลายในขวดแก้ว กวนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ตกตะกอนสารละลายและวัดค่า pH จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสจนกระทั่งน้ำหนักคงที่ กำหนดชื่อวัสดุชุดซัพแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดย NR-Si-A และ MNR-Si-A คือ ยางธรรมชาติและยางธรรมชาติดัดแปรผสมซิลิกาตัดแปรด้วยอะมิโนโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน ตามลำดับ

2. ซิลิกาที่อิมพัด้วยสารละลายเตตระเอทิลีนเพนตามีน

นำเตตระเอทิลีนเพนตามีนจำนวน 0.65 มิลลิลิตร มาผสมกับเมทานอลจำนวน 2.5 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องกวน เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำซิลิกา 1 กรัม มาละลายในเมทานอลจำนวน 2.5 มิลลิลิตร กวนเป็นเวลา 10 นาที แล้วปล่อยให้แห้งเป็นเวลา 15 นาที นำสารละลายเตตระเอทิลีนเพนตามีนมาผสม ทิ้งไว้ 10 นาทีแล้วนำไปกวนเป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นนำไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง กำหนดชื่อวัสดุชุดซัพแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดย NR-Si-T และ MNR-Si-T คือ ยางธรรมชาติและยางธรรมชาติดัดแปรผสมซิลิกาอิมพัด้วยเตตระเอทิลีนเพนตามีน ตามลำดับ

3.4.3 การออกสูตรวัสดุดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากยางธรรมชาติดัดแปร

ตาราง 3.4 แสดงสูตรในการเตรียมวัสดุดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากยางธรรมชาติดัดแปร โดยนำยางธรรมชาติดัดแปรแห้ง 100 กรัม บดในเครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้งเป็นเวลาประมาณ 1 นาที จากนั้นใส่สังกะสีออกไซด์ 4 กรัม กรดสเตียริก 2 กรัม ไซโคลเฮกซิลเบนโซโธอะโซลซัลฟิनाไมด์ 3 กรัม ไดโนโตรโซเพนตะเมทิลีนเตตระมีน 2 กรัม ซิลิกา 10 กรัม และซัลเฟอร์ 3 กรัม ตามลำดับ โดยให้ระยะเวลาในการใส่สารแต่ละชนิดห่างกัน 2 นาที จากนั้น บดผสมยางต่อไปอีก 2 นาที สุดท้ายนำยางคอมพาวนด์ที่ได้ไปขึ้นรูปโดยเครื่องกดอัดระบบไฮดรอลิก ที่ความดัน 127 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 9 นาที เพื่อทำการพรีวัลคาไนเซชัน (Pre-vulcanization) จากนั้นนำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 145 องศาเซลเซียส เพื่อวัลคาไนเซชันยางคอมพาวนด์

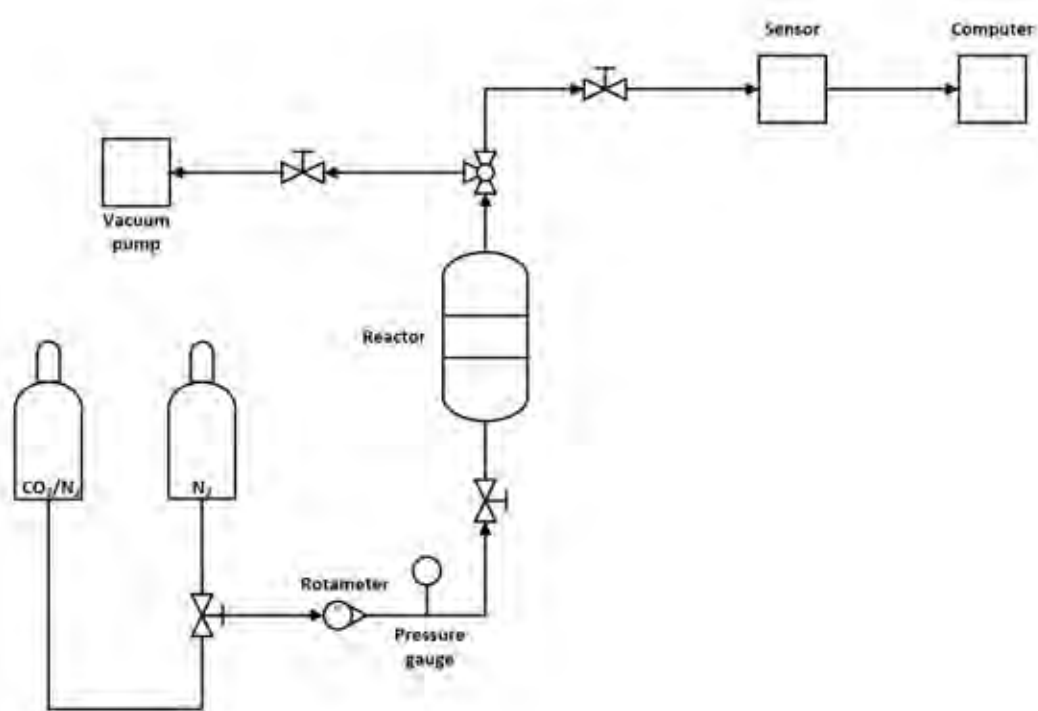
ตารางที่ 3.4 สูตรการเตรียมขึ้นรูปยางธรรมชาติดัดแปร

Composition	Function	Weight (phr)	Time (min)
NR modification	Substrate	100	1
Zinc oxide	Activator	4	2
Stearic acid	Activator	2	2
N-cyclohexyl-2-benzothiazole sulfenamide (CBS)	Accelerator	3	2
N,N-Dinitroso pentamethylene tetramine (DNT)	Blowing agent	2	2
Silica	Surface modification	10	2
Sulfur	Crosslink agent	3	2

3.4.4 การทดสอบหาความจุการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแผ่นยางธรรมชาติดัดแปร

นำวัสดุดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์บรรจุในเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งประกอบเข้ากับอุปกรณ์ทดสอบการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ให้ความร้อนโดยใช้เทปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ภายใต้ภาวะสุญญากาศ เป็นเวลา 20 นาที เพื่อกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในวัสดุดูดซับและดูดอากาศรวมถึงแก๊สต่างๆ ภายในเครื่องปฏิกรณ์ออก จากนั้น ทำการเปิดโปรแกรม CO₂ analyzer ซึ่งเป็นโปรแกรมที่แสดงค่าความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เซ็นเซอร์สามารถตรวจวัดได้ ต่อสายแก๊สไนโตรเจนเข้าเครื่องปฏิกรณ์ โดยกำหนดอัตราไหลเข้า 0.05 ลิตรต่อนาที เพื่อไล่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากระบบจนเหลือแก๊ส

คาร์บอนไดออกไซด์ต่ำกว่าร้อยละ 0.1 โดยปริมาตร จากนั้นต่อสายแก๊สผสม (Mixed gas) ระหว่างแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 12 โดยปริมาตรและแก๊สไนโตรเจนร้อยละ 88 โดยปริมาตร เข้าเครื่องปฏิกรณ์โดยควบคุมการไหลของแก๊สผสมเข้า 0.05 ลิตรต่อนาที หน้าจอกอมพิวเตอร์จะแสดงค่าความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (ร้อยละโดยปริมาตร) ต่อเวลา (วินาที) จนกระทั่งความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นไปถึงระดับสูงสุด นำกราฟและร้อยละความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกที่ได้มาวิเคราะห์หาความจุในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของวัสดุดูดซับดังกล่าวในภาคผนวก



รูปที่ 3.2 แผนภาพระบบการดูดซับ

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ลักษณะทางกายภาพของยางธรรมชาติดัดแปร

น้ำยางธรรมชาติที่ทำปฏิกิริยากับไดแอลลิลเอมีน โดยใช้เทอร์ทิวทิลไฮโดรเปอร์ออกไซด์เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา และเตตระเอทิลีนเพนตามีนเป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยา มีลักษณะเป็นก้อนยางสีเหลืองขุ่น ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ยางธรรมชาติดัดแปรที่ได้จะถูกนำไปผสมกับซิลิกาและซิลิกาดัดแปร จากนั้นนำไปขึ้นรูปเป็นโฟมยาง เพื่อใช้ในการทดสอบการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

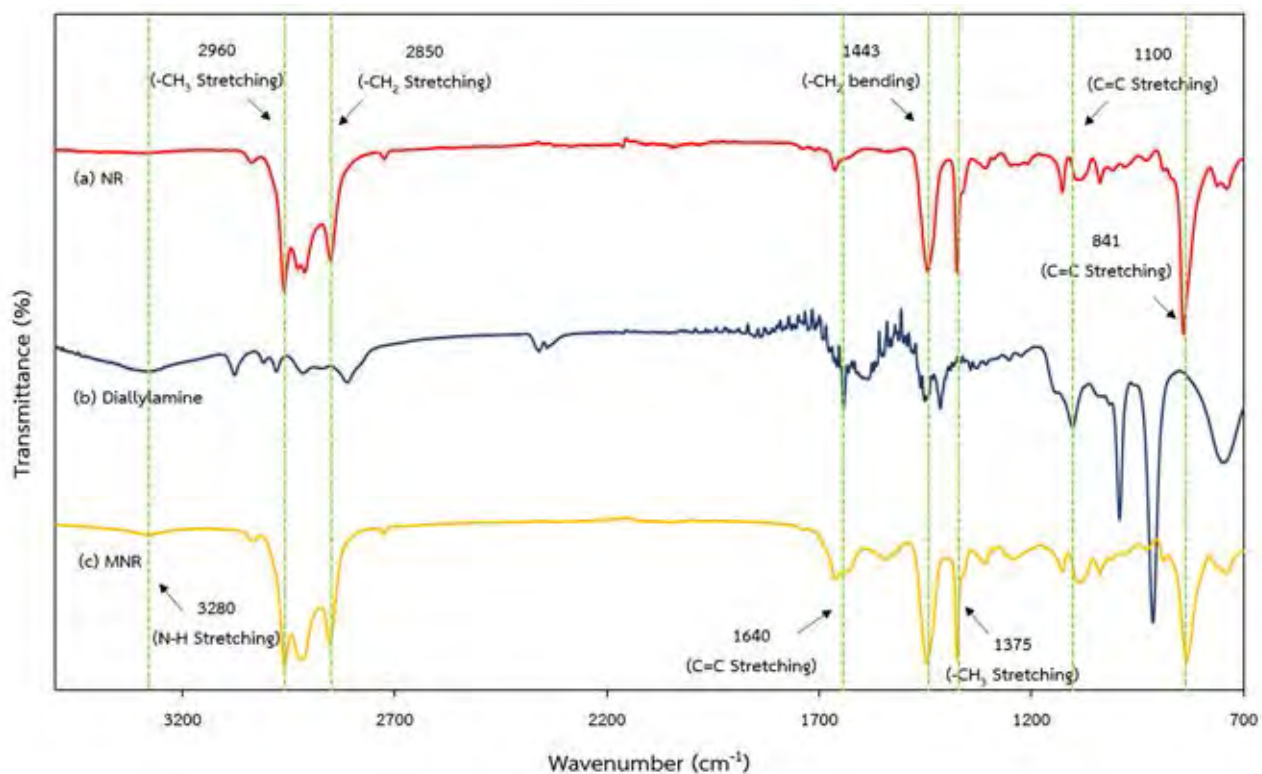


รูปที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของยางธรรมชาติดัดแปรแห้ง

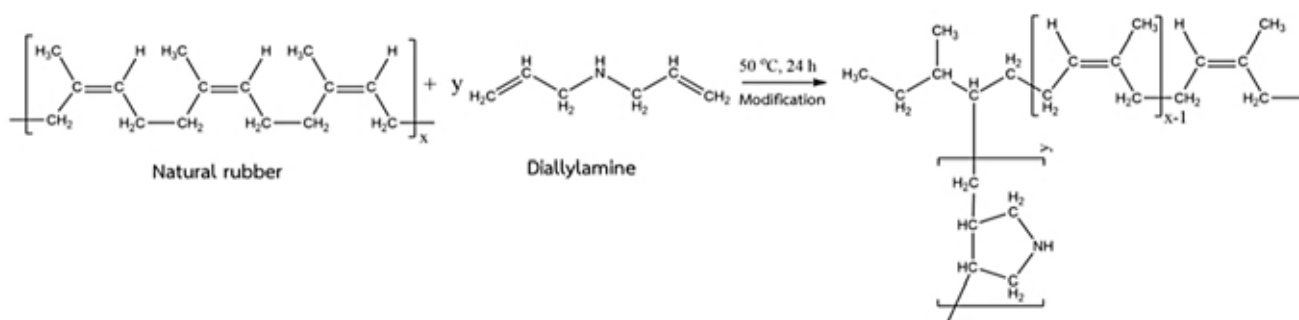
4.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของยางธรรมชาติดัดแปรด้วยเทคนิค FT-IR

รูปที่ 4.2 แสดง FTIR สเปกตรัมของยางธรรมชาติ ไดแอลลิลเอมีน และยางธรรมชาติดัดแปร พบพีกยางธรรมชาติที่เลขคลื่น 2960 และ 1375 เซนติเมตร⁻¹ แสดงการสั่นของพันธะ C-H แบบยืดหดของหมู่แอลเคน (Alkane) ที่เลขคลื่น 2850 เซนติเมตร⁻¹ แสดงการสั่นของพันธะ C-H แบบยืดหดของหมู่แอลคีน (Alkene) ที่เลขคลื่น 1443 เซนติเมตร⁻¹ แสดงการสั่นของพันธะ C-H แบบงอของหมู่แอลคีน และที่เลขคลื่น 841 เซนติเมตร⁻¹ แสดงการสั่นของพันธะ C=C แบบยืดของหมู่แอลคีน ส่วนไดแอลลิลเอมีนพบพีกที่เลขคลื่น 1640 และ 1100 เซนติเมตร⁻¹ แสดงการสั่นของพันธะ C=C แบบยืดของหมู่แอลคีน ที่เลขคลื่น 3280 เซนติเมตร⁻¹ แสดงการสั่นของพันธะ N-H แบบยืดของหมู่เอมีน และที่เลขคลื่น 1443 เซนติเมตร⁻¹ แสดงการสั่นของพันธะ C-H แบบงอของหมู่แอลคีน หลังจากทำการดัดแปรยางธรรมชาติด้วยไดแอลลิลเอมีน ปรากฏพีกของไดแอลลิลเอมีนที่เลขคลื่น 3280 และ 1100 เซนติเมตร⁻¹ จากผล FTIR สเปกตรัมแสดงให้เห็นว่าไดแอลลิลเอมีนสามารถดัดแปรยางธรรมชาติได้

และความเข้มของพีคที่เพิ่มขึ้นนี้ แสดงถึงพันธะของหมู่เอมีนที่เชื่อมโยงในยางธรรมชาติดัดแปรเพิ่มขึ้น โดยโครงสร้างของเอมีนที่มาเชื่อมโยงกับยางธรรมชาติ [23]



รูปที่ 4.2 FTIR ของ NR Diallylamine และ MNR

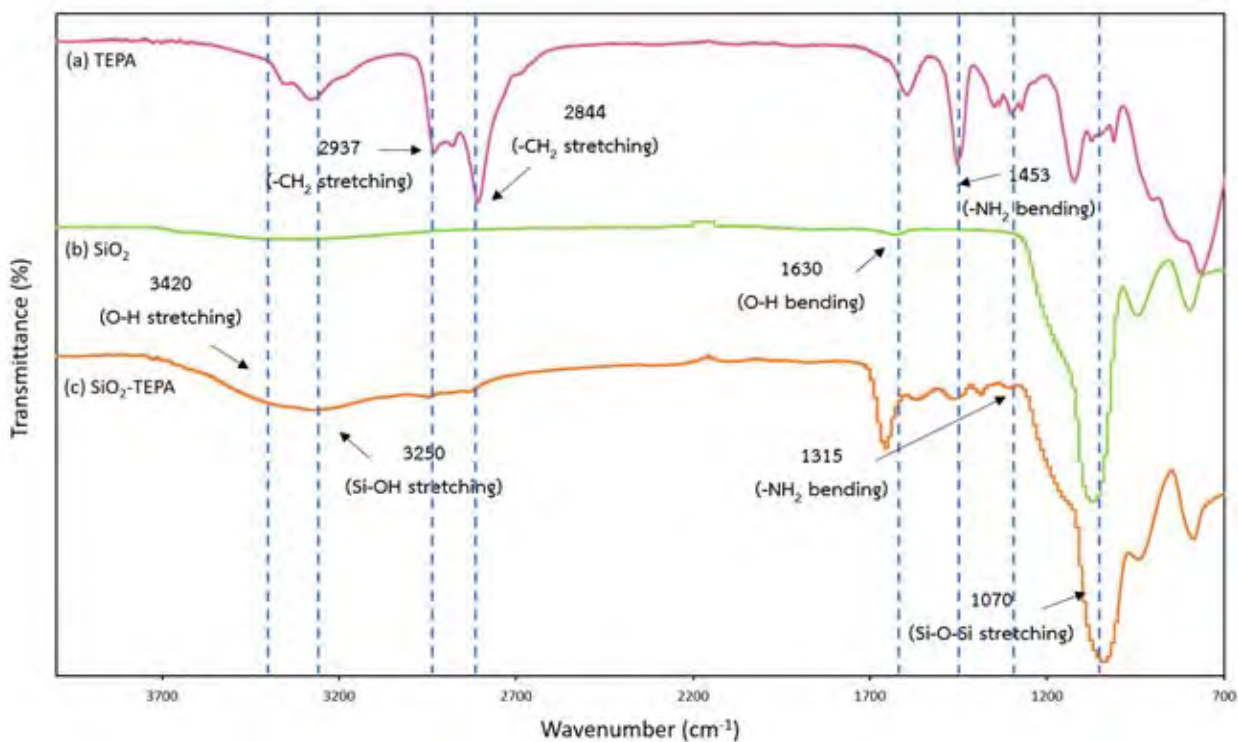


Scheme 4.1 ปฏิกริยาการดัดแปรยางธรรมชาติด้วยไดแอลิลเอมีน [17]

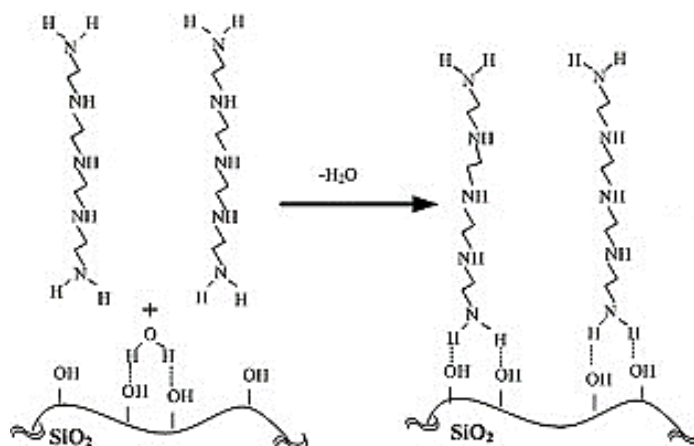
4.3 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของซิลิกาที่ดัดแปรด้วยเทคนิค FT-IR

4.3.1 ซิลิกาอิมมัวด้วยเตตระเอทิลีนเพนตามีน

รูปที่ 4.3 แสดง FTIR สเปกตร้าของซิลิกา เตตระเอทิลีนเพนตามีน และซิลิกาอิมมัวด้วยเตตระเอทิลีนเพนตามีน พบพีกซิลิกาที่เลขคลื่น 3420 cm^{-1} แสดงการสั่นของพันธะ O-H แบบยืดหดของโมเลกุลน้ำ ที่เลขคลื่น 3250 cm^{-1} แสดงการสั่นของพันธะ O-H แบบยืดหดของหมู่ไฮดรอกซิล ที่เลขคลื่น 1630 cm^{-1} แสดงการสั่นของพันธะ O-H แบบงอของโมเลกุลน้ำ และที่เลขคลื่น 1070 cm^{-1} แสดงการสั่นของพันธะ Si-O-Si แบบยืดหด ส่วนเตตระเอทิลีนเพนตามีนพบพีกที่เลขคลื่น 2937 และ 2844 cm^{-1} แสดงการสั่นของพันธะ C-H แบบยืดหดของหมู่แอลคิล และที่เลขคลื่น 1453 และ 1315 cm^{-1} แสดงการสั่นของพันธะ N-H แบบงอของหมู่เอมีน หลังจากทำการดัดแปรซิลิกาด้วยเตตระเอทิลีนเพนตามีน ปรากฏพีกของเตตระเอทิลีนเพนตามีนที่เลขคลื่น 2937 2844 1453 และ 1315 cm^{-1} จากผล FTIR สเปกตร้าแสดงให้เห็นว่าเตตระเอทิลีนเพนตามีนสามารถดัดแปรซิลิกาได้ [24]



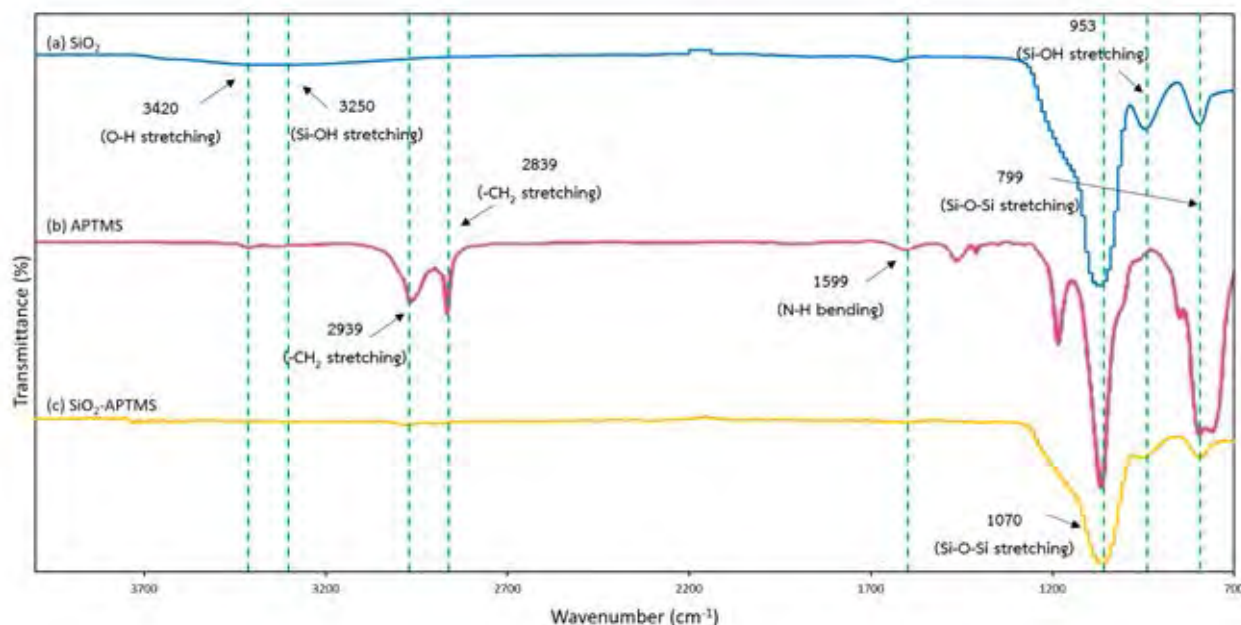
รูปที่ 4.3 FTIR ของ TEPA SiO₂ และ SiO₂-TEPA



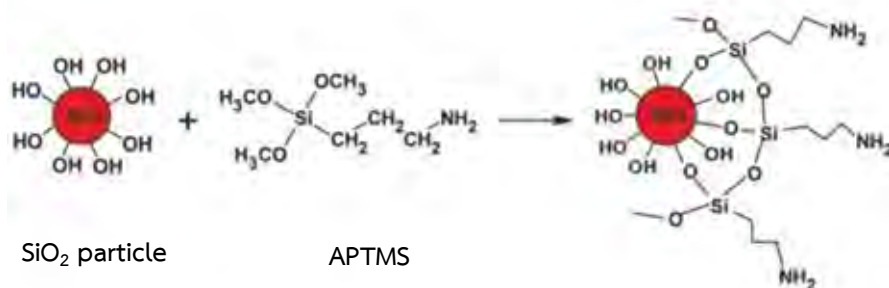
Scheme 4.2 ปฏิกิริยาการดัดแปรซิลิกาด้วยเตตระเอทิลีนเพนตามีน [25]

4.3.2 ซิลิกาตัดแปรด้วยอะมิโนโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน

รูปที่ 4.4 แสดง FTIR สเปกตร้าของซิลิกา อะมิโนโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน และซิลิกาตัดแปรด้วยอะมิโนโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน พบพีกซิลิกาที่เลขคลื่น 3420 เซนติเมตร⁻¹ แสดงการสั่นของพันธะ O-H แบบยืดหดของโมเลกุลน้ำ ที่เลขคลื่น 3250 เซนติเมตร⁻¹ แสดงการสั่นของพันธะ O-H แบบยืดหดของหมู่ไฮดรอกซิล ที่เลขคลื่น 1070 และ 799 เซนติเมตร⁻¹ แสดงการสั่นของพันธะ Si-O-Si แบบยืดหด และที่เลขคลื่น 953 เซนติเมตร⁻¹ แสดงการสั่นของพันธะ Si-OH แบบยืดหด ส่วนอะมิโนโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนพบพีกที่เลขคลื่น 2939 และ 2839 เซนติเมตร⁻¹ แสดงการสั่นของพันธะ C-H แบบยืดหดของหมู่แอลคิล ที่เลขคลื่น 1599 เซนติเมตร⁻¹ แสดงการสั่นของพันธะ N-H แบบงอของหมู่เอมีน และที่เลขคลื่น 1070 เซนติเมตร⁻¹ แสดงการสั่นของพันธะ Si-O-Si แบบยืดหด หลังจากทำการดัดแปรซิลิกาด้วยอะมิโนโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน ปรากฏพีกของอะมิโนโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนที่เลขคลื่น 2939 2839 1599 และ 1070 เซนติเมตร⁻¹ สำหรับพีกที่เลขคลื่น 3420 และ 3250 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งแสดงการสั่นของพันธะ O-H แบบยืดหดของโมเลกุลน้ำและหมู่ไฮดรอกซิลตามลำดับที่หายไปนั้น แสดงให้เห็นว่าหมู่ไฮดรอกซิลบริเวณพื้นผิวของซิลิกาเกิดปฏิกิริยากับอะมิโนโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน นั่นคือ อะมิโนโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนสามารถดัดแปรซิลิกาได้ [26]



รูปที่ 4.4 FTIR ของ SiO₂ APTMS และ SiO₂-APTMS

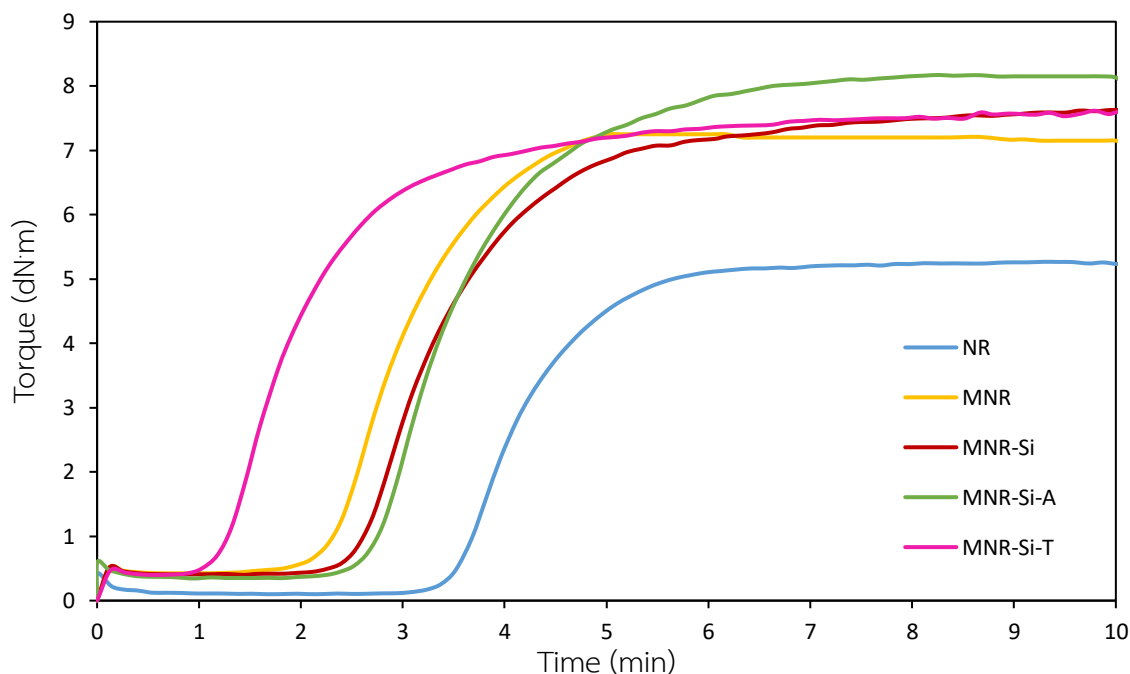


Scheme 4.3 ปฏิกิริยาการดัดแปรซิลิกาด้วยอะมิโนโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน [27]

4.4 สมบัติการคงรูปของวัสดุดูดซับ

จากรูปที่ 4.5 แสดงกราฟการคงรูป (Cure curve) ของวัสดุยางธรรมชาติ (NR) ยางธรรมชาติดัดแปร (MNR) ยางธรรมชาติดัดแปรผสมซิลิกา (MNR-Si) ยางธรรมชาติดัดแปรผสมซิลิกากราฟต์ด้วยอะมิโนโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน (MNR-Si-A) และยางธรรมชาติดัดแปรผสมซิลิกาอิมมัตว์ด้วยเตตระเอทิลีนเพนตามีน (MNR-Si-T) ที่อุณหภูมิ 145 องศาเซลเซียส พบการเปลี่ยนแปลง 3 ช่วง คือ ช่วงที่ 1 delay phase เมื่อเริ่มให้แรงบิด ยางจะเกิดการอ่อนตัวจากการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลตามแนวแรงเป็นผลให้ค่าแรงบิดมีค่าลดลงเล็กน้อย ช่วงที่ 2 curing phase สารเชื่อมโยง สารเร่งปฏิกิริยา และสารกระตุ้น เกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางกับโมเลกุลของยาง โครงสร้างโมเลกุลของยางเปลี่ยนจากสายโซ่ตรงเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ ส่งผลให้แรงบิดมีค่าสูงขึ้น และช่วงที่ 3 overcure phase เมื่อยางได้รับความร้อนเป็นเวลานานจะเกิดการเสื่อมสลายแบบเกิดการขาดของสายโซ่ (Chain

scission) ทำให้แรงบิดมีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบ NR และ MNR พบว่า ระยะเวลาเริ่มเกิดการเชื่อมโยงหรือเวลาสกอร์ช (Scorch time) ของ MNR ลดลง เนื่องจากไดอัลลิลเอมีนและเตตระเอทิลีนเพนตามีนมีสมบัติเป็นเบสซึ่งช่วยเร่งปฏิกิริยาการเกิดวัลคานไนเซชันให้เร็วขึ้น นอกจากนี้ยังส่งผลให้ผลต่างระหว่างแรงบิดสูงสุดกับแรงบิดต่ำสุด (ΔM) มีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบ MNR MNR-Si MNR-Si-A และ MNR-Si-T พบว่า MNR-Si-T มีค่าเวลาสกอร์ชน้อยที่สุด เนื่องจากมีเตตระเอทิลีนเพนตามีนซึ่งมีหมู่เอมีนที่มีสมบัติเป็นเบสเป็นองค์ประกอบถึง 5 หมู่ จึงช่วยเร่งให้เกิดปฏิกิริยาวัลคานไนเซชันได้เร็วขึ้น ดังแสดงในตาราง 4.1



รูปที่ 4.5 กราฟการคงรูป (cure curve) ของวัสดุอุดซัซชนิดต่างๆ ที่อุณหภูมิ 145 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.1 สมบัติการคงรูปของวัสดุอุดซัซแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

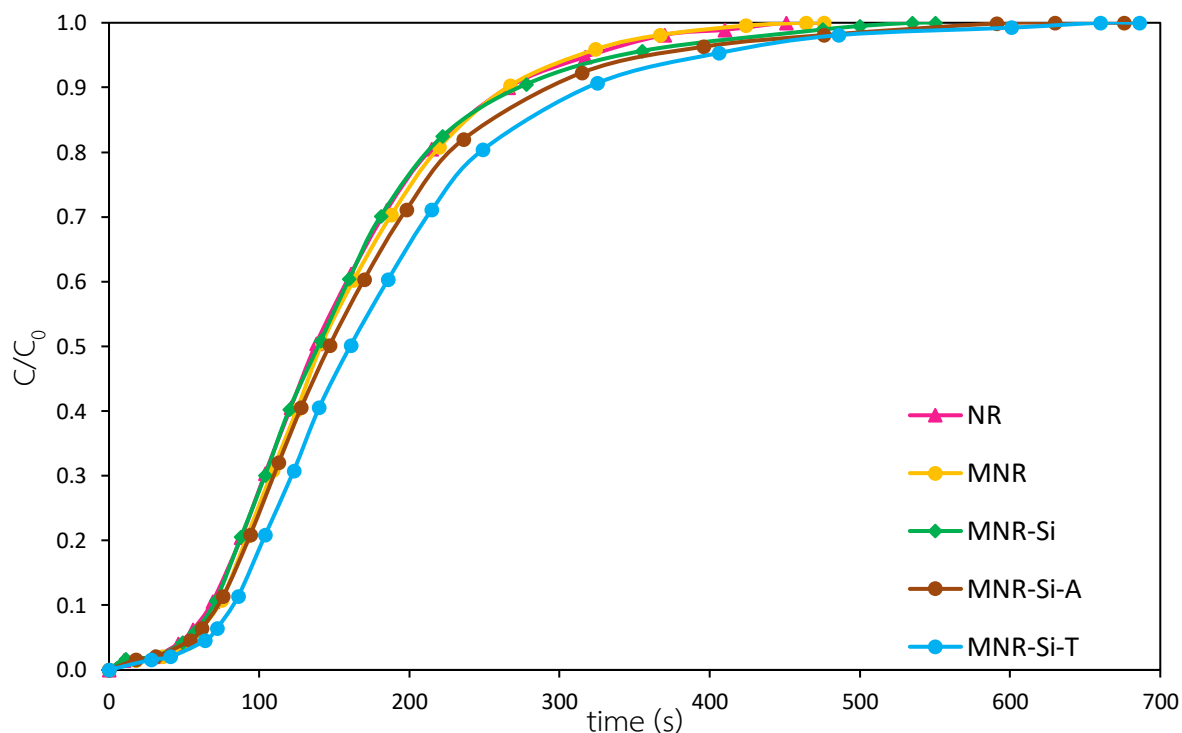
Sample code	Scorch time $t_{s2}(\text{min})$	Max Torque ($\text{dN}\cdot\text{m}$)	Min Torque ($\text{dN}\cdot\text{m}$)	ΔM ($\text{dN}\cdot\text{m}$)	Optimum cure time: $t_{c100}(\text{min})$
NR	3.93	5.31	0.1	5.21	27.81
MNR	2.64	7.35	0.42	6.93	5.46
MNR-Si	2.93	7.7	0.4	7.3	11.36
MNR-Si-A	3.03	8.23	0.35	7.88	9.12
MNR-Si-T	1.55	7.75	0.42	7.33	28.83

4.5 การดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

4.5.1 ลักษณะของวัสดุดูดซับต่อการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

นำวัสดุดูดซับโพลียาซิโพรพิลีนและโพลียาซิโพรพิลีนดัดแปรมาทดสอบหาความจุในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราการไหลของแก๊สขาเข้า 0.05 ลิตรต่อนาที ความเข้มข้นของแก๊สผสมระหว่างแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไนโตรเจนร้อยละ 12 และ 88 โดยปริมาตรตามลำดับ พบการเปลี่ยนแปลงของ breakthrough curve ดังแสดงในรูปที่ 4.6 โดย breakthrough curve เป็นกราฟที่แสดงอัตราส่วนความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ขาออก (C) ต่อความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (C_0) เครื่องปฏิกรณ์เทียบกับเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป (t) พบการเปลี่ยนแปลง 3 ช่วง คือ ช่วงที่ 1 C/C_0 มีค่าเท่ากับ 0 แสดงถึงวัสดุดูดซับสามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้อย่างสมบูรณ์ จึงไม่มีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ไหลออกมาจากเครื่องปฏิกรณ์ ช่วงที่ 2 C/C_0 มีค่าเพิ่มขึ้น แสดงถึงวัสดุดูดซับมีความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์น้อยลง ทำให้มีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ไหลออกมาจากเครื่องปฏิกรณ์ และช่วงที่ 3 C/C_0 มีค่าเท่ากับ 1 นั่นคือความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกเท่ากับความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า แสดงถึงวัสดุดูดซับไม่สามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ เนื่องจากวัสดุดูดซับไม่เหลือพื้นที่ที่จะดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ไหลผ่านตัวดูดซับไหลออกจากเครื่องปฏิกรณ์ทั้งหมด ซึ่งค่าความจุในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของวัสดุดูดซับสามารถคำนวณได้จากพื้นที่เหนือ breakthrough curve โดยในงานวิจัยนี้ศึกษาลักษณะวัสดุดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากยางธรรมชาติ (NR) และยางธรรมชาติดัดแปร (MNR) ที่เพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับด้วยการใช้ซิลิกาซึ่งดัดแปรพื้นผิวด้วยตัวประสานประเภทไฮดรอกไซด์ ซิลิกาที่มีไฮดรอกซิลไอออน (MNR-Si-A) ซึ่งจะช่วยให้ซิลิกาสามารถกระจายตัวในยางได้ดีขึ้น และเตตระเอทิลีนเพนตามีน (MNR-Si-T) ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มประสิทธิภาพของซิลิกาในการจับกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยหมู่เอมีน เมื่อคำนวณค่าความจุในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากกราฟพบว่า NR และ MNR สามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ 0.91 และ 1.12 มิลลิกรัมต่อกรัมของวัสดุดูดซับ ตามลำดับ โดย MNR มีค่าความจุในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่า NR เนื่องจากมีไดเอทิลเอมีนซึ่งมีหมู่เอมีนที่มีความจำเพาะต่อการจับกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบ และเมื่อเปรียบเทียบระหว่าง MNR กับ MNR ที่ผสมซิลิกา ได้แก่ MNR-Si MNR-Si-A และ MNR-Si-T พบว่า MNR-Si-T ให้ค่าความจุในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด คือ 3.59 มิลลิกรัมต่อกรัมของวัสดุดูดซับ เนื่องจากเป็นยางธรรมชาติดัดแปรผสมซิลิกาที่อิมมัลชันด้วยเตตระเอทิลีนเพนตามีน ซึ่งมีหมู่เอมีนช่วยเพิ่ม

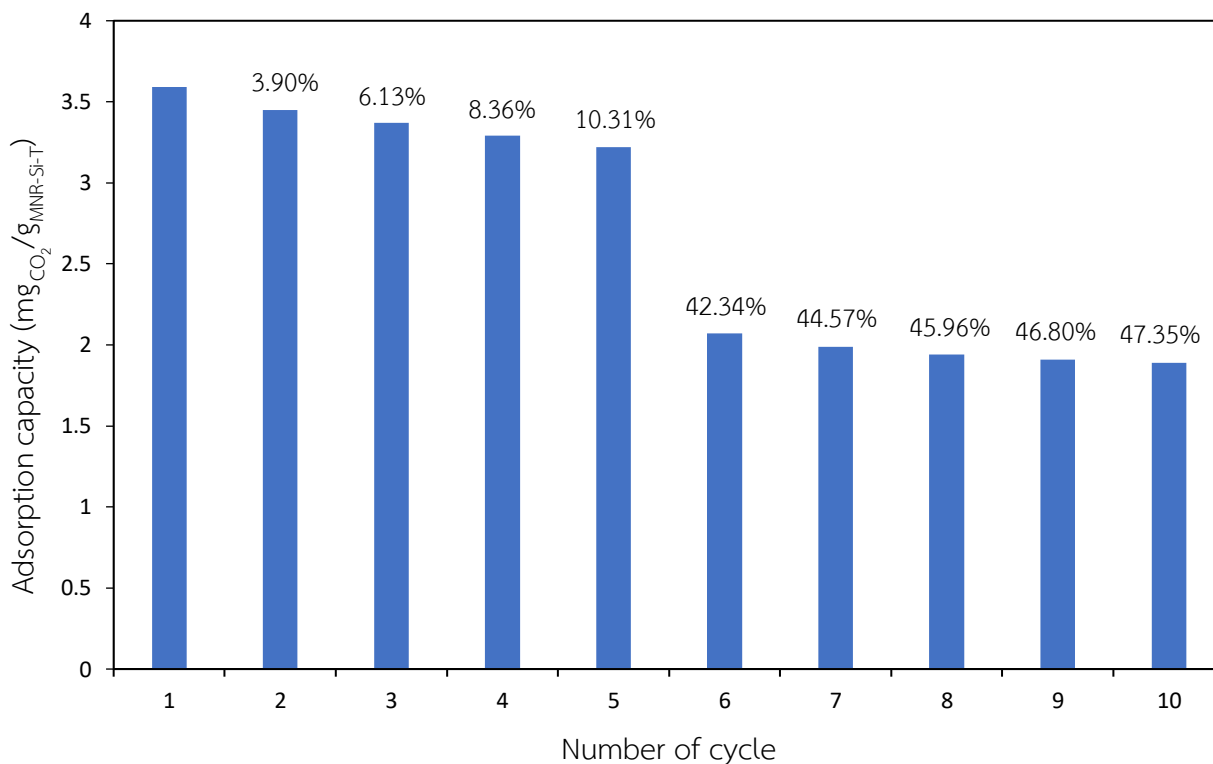
ความจำเพาะต่อการจับกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และเตตระเอทิลีนเพนตามีนนี้มีจำนวนหมู่เอมีนมากกว่าในอะมิโนโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน จึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการจับกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากกว่า นอกจากนี้การดัดแปรซิลิกาด้วยการอิมมัลชันสามารถเกิดได้ง่ายกว่าการกราฟต์ที่ต้องมีการสร้างพันธะระหว่างหมู่ไซลานอลของซิลิกากับตัวประสานประเภทไซเลน ทำให้เตตระเอทิลีนเพนตามีนสามารถดัดแปรซิลิกาได้ดีกว่า โดย MNR-Si-T สามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้อย่างสมบูรณ์ (C/C_0 เท่ากับ 0) เป็นเวลา 45 วินาที จากนั้นความสามารถในการดูดซับลดลงจนกระทั่งถึงที่ (C/C_0 เท่ากับ 1) ที่ 660 วินาที จะเห็นได้ว่าวัสดุดูดซับยางธรรมชาติสามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ โดยผ่านกลไกการดูดซับทางกายภาพระหว่างรูพรุนกับคาร์บอนไดออกไซด์ นอกจากนี้ยังสามารถเกิดการดูดซับทางเคมีกับสารประกอบของไนโตรเจนที่มีอยู่ในสารคงรูปและสารทำให้เกิดฟองที่ผสมในสูตรตอนเตรียมยางคอมพาวด์ แต่การดัดแปรด้วยการเพิ่มหมู่เอมีนที่สามารถเกิดการดูดซับทางเคมีกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ จะช่วยส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของวัสดุดูดซับดียิ่งขึ้น



รูปที่ 4.6 Breakthrough curve ของวัสดุดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ยางธรรมชาติ (NR) ยางธรรมชาติดัดแปร (MNR) และยางธรรมชาติดัดแปรที่เพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับด้วยการใช้ซิลิกา (MNR-Si, MNR-Si-A, MNR-Si-T) ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สผสม 0.05 ลิตร/นาที ความเข้มข้นเริ่มต้นของ CO₂ ร้อยละ 12 โดยปริมาตร

4.5.2 การนำกลับมาใช้ใหม่ของวัสดุดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

วัสดุดูดซับที่ผ่านกระบวนการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ภายใต้ภาวะอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราการไหลแก๊สเข้า 0.05 ลิตรต่อนาที ความเข้มข้นของแก๊สผสมระหว่างแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไนโตรเจนร้อยละ โดยปริมาตร 88 และ 12 ถูกนำมาศึกษาความสามารถในการนำกลับมาใช้ใหม่ โดยให้ความร้อนเพื่อทำการคายซับ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที ภายใต้ภาวะสุญญากาศ เพื่อไล่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ภายในวัสดุดูดซับออก พบว่าวัสดุดูดซับ MNR-Si-T สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ 5 ครั้ง มีค่าความจุลดลงร้อยละ 3.90 6.13 8.36 และ 10.31 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 โดยการนำวัสดุดูดซับกลับมาใช้ใหม่ครั้งที่ 6 พบว่า ค่าความจุในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าลดลงมากเมื่อเปรียบเทียบกับครั้งที่ 5 เนื่องจากภายในวัสดุดูดซับเกิดการดูดซับทางเคมี จึงไม่สามารถใช้ความร้อนไล่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดการดูดซับทางเคมีภายในรูพรุนของยางธรรมชาติได้หมด ประสิทธิภาพในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของวัสดุดูดซับจึงลดลงมาก



รูปที่ 4.7 แผนภาพแสดงความจุในการดูดซับและจำนวนครั้งในการนำกลับมาใช้ใหม่
ของวัสดุดูดซับ MNR-Si-T

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

วัสดุดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากยางธรรมชาติดัดแปรที่เพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับด้วยการใช้ซิลิกาอิมมัตว์ด้วยเตตระเอทิลีนเพนตามีน (MNR-Si-T) สามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูงสุด 3.59 มิลลิกรัมต่อกรัมของวัสดุดูดซับ ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ซึ่งมากกว่าวัสดุดูดซับจากยางธรรมชาติ (NR) ถึง 3.95 เท่า และจากการศึกษาการนำกลับมาใช้ใหม่ พบว่า วัสดุดูดซับจากยางธรรมชาติดัดแปรผสมซิลิกาอิมมัตว์ด้วยเตตระเอทิลีนเพนตามีนสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะลดลงจนกระทั่งคงที่

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเพื่อพัฒนาวัสดุดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากยางธรรมชาติจึงมีข้อเสนอแนะบางประการ ดังนี้

- 5.2.1 ศึกษาปริมาณเตตระเอทิลีนเพนตามีนที่เหมาะสมที่ทำให้ยางธรรมชาติดัดแปรมีความจุในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น
- 5.2.2 ศึกษาผลของซิลิกาที่ดัดแปรด้วยสารคู่ควบไซเลนชนิดอื่นๆ ต่อความจุในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของวัสดุดูดซับ

เอกสารอ้างอิง

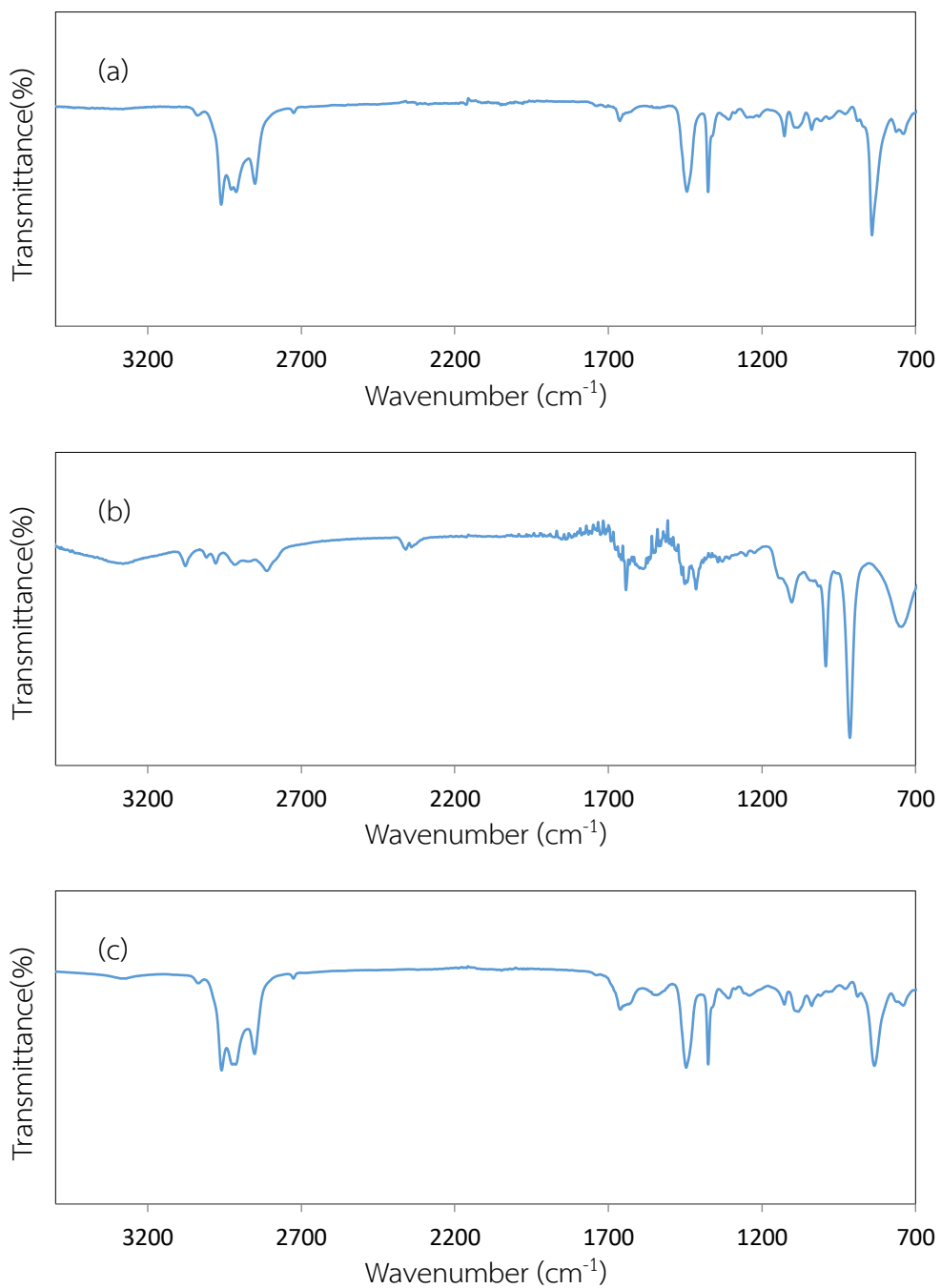
- [1] ภาวะโลกร้อนกับการแก้ปัญหา. บริษัท วิศวกรรมเคมี จำกัด. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.tcesolutions.com/news_detail.php?news_id=17 [2562, มกราคม 19]
- [2] ชิชณพงค์ ประทุม. (2015). ความเป็นไปได้ในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยระบบบำบัดน้ำเสีย แบบชีวภาพจากโรงงานอุตสาหกรรม. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.tci-thaijo.org/index.php/JEM/article/download/32429/35027/> [2562, มกราคม 19]
- [3] วัสดุดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide Scavenger). Packaging Industrial Intelligence Unit. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://packaging.oie.go.th/new/admin_control_new/html-demo/file_technology/9163825470.pdf [2562, มกราคม 19]
- [4] วัสดุอ้างอิงเพื่อการตรวจวัดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ. สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.nimt.or.th> [2562, มีนาคม 13]
- [5] ความเป็นไปได้ในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยระบบบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพจากโรงงานอุตสาหกรรม. คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: [file:///C:/Users/acer/Downloads/32429-Article%20Text-97642-2-10-20151122%20\(1\).pdf/](file:///C:/Users/acer/Downloads/32429-Article%20Text-97642-2-10-20151122%20(1).pdf/) [2562, มีนาคม 13]
- [6] เดชา ฉัตรศิริเวช. กระบวนการดูดซับ. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555.
- [7] การออกแบบการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์. กรมควบคุมมลพิษ. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.pcd.go.th/info_serv/Datasmell/design_adsorption.htm [2562, มีนาคม 13]
- [8] Samart C. and C. Sokman. Synthesis of mesoporous silica for control releasing application. Pure and Applied Chemistry International Conference. 2008.
- [9] จุฬารัตน์ อชาวรรัตน์ถาวร. กระบวนการโซลเจล (Sol-Gel Technology). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.dpim.go.th/ppr/title.phpMtid=00000110628718> [2562, เมษายน 12]
- [10] เอมีน (Amines). (ม.ป.ป). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www2.chemistry.msu.edu/faculty/reusch/amine1.htm> [2562, เมษายน 12]
- [11] พรทิพย์ เมธาคุปต์. การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยใช้เม็ดพูนซิลิกาตัดแปรด้วยเอมีนในคอลัมน์เบตนิ่ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. 2557
- [12] Yanjun X., et al. Silane coupling agents used for natural fiber, A review. Compositers: Part A, 41 (2010): 806-819.

- [13] อธิพิล แจ้งซัด. วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยียาง (Science & Technology of Rubber). กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2551.
- [14] วราภรณ์ ขจรไชยกูล. ยางธรรมชาติ: การผลิตและการใช้งาน. กรุงเทพมหานคร: สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2552.
- [15] พงษ์ธร แซ่อู๋. กระบวนการผลิตยาง. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://mahidolrubber.org/files/process> [2562, เมษายน 13]
- [16] Mark, J”E”, Erman, B. and Erich, F. Science and technology of rubber. 3rd ed. London: Academic Press, 2005.
- [17] สุวดี ก้องพารากุล. เทคโนโลยีการตัดแปรยางธรรมชาติและการประยุกต์ใช้, ว.วิทย์. มข., 41 (2556): 567-581.
- [18] G. Zhang, P. Zhao, L. Hao, Y. Xu, H. Cheng. A novel amine double functionalized adsorbent for carbon dioxide capture using original mesoporous silica molecular sieves as support, Separation and Purification Technology, 209 (2019): 516-527.
- [19] G. Zhang, P. Zhao, Y. Xu. Development of amine-functionalized hierarchically porous silica for CO₂ capture, Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 54 (2017): 59-68.
- [20] A. Sohail, R. Anita, Y. Suzana, F. Muhammad. Adsorption behavior of tetraethylenepentamine-functionalized Si-MCM-41 for CO₂ adsorption, Chemical Engineering Research and Design, 122 (2017): 32-42.
- [21] S.W. Delaney, G.P. Knowles, A.L. Chaffee. Hybrid mesoporous materials for carbon dioxide separation, Fuel Chem Div. Preprints, 47 (2002): 64-65.
- [22] L. Bois, B. Lee, K. We. Functionalized silica for heavy metal ions adsorption. Colloids and Surfaces, Physicochemical and Engineering Aspects, 221 (2003): 221-230.
- [23] R. Sebastien, L. Siriluck, V. Laurent, S. B. Jerome, B. Frederic. Investigating natural rubber composition with Fourier Transform Infrared (FT-IR) spectroscopy: A rapid and non-destructive method to determine both protein and lipid contents simultaneously, Polymer Testing, 43 (2015): 83-93.
- [24] Q. Long, Y. Wang. Sodium Tetraethylenepentamine Heptaacetate as Novel Draw Solute for Forward Osmosis-Synthesis, Application and Recovery, Energies, 8 (2015): 12917-12928.

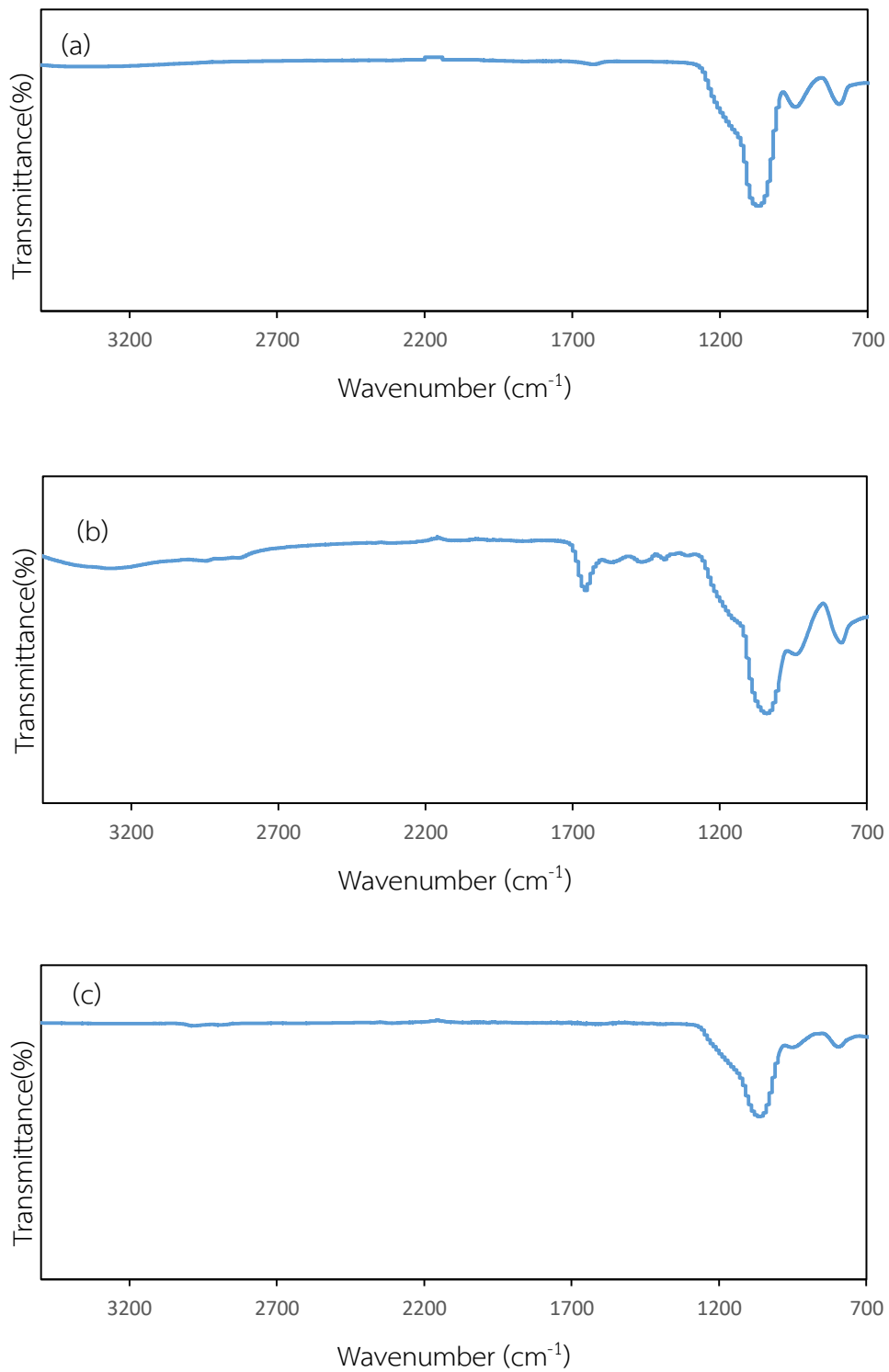
- [25] S.C. Srivatsa, S.C. Chuang. Spectroscopic Investigation into Oxidative Degradation of Silica-Supported Amine Sorbents for CO₂ Capture, *ChemSusChem*, 5 (2012): 1435-1442.
- [26] A. Suddai, P. Nuengmatcha, P. Sricharoen, N. Limchoowong, S. Chanthai. Feasibility of hard acid-base affinity for the pronounced adsorption capacity of manganese (II) using amino-functionalized graphene oxide, *RSC Advances*, 8 (2018): 4162-4171.
- [27] E. Barna, D. Rentsch, B. Bommer, A. Vital, O.V. Trzebiatowski, T. Graule. Surface Modification of Nanoparticles for Scratch Resistant Clear Coatings, *KGK*, (2007): 49-51.

ภาคผนวก ก

กราฟ FTIR ของวัสดุดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์



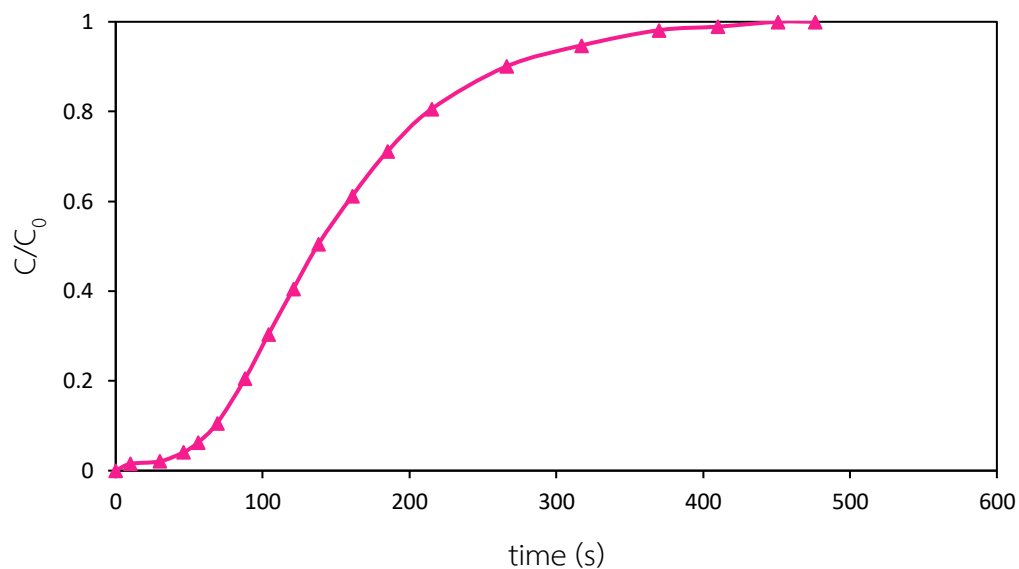
รูปที่ ก.1 FTIR ของ (a) NR (b) Diallylamine และ (c) MNR



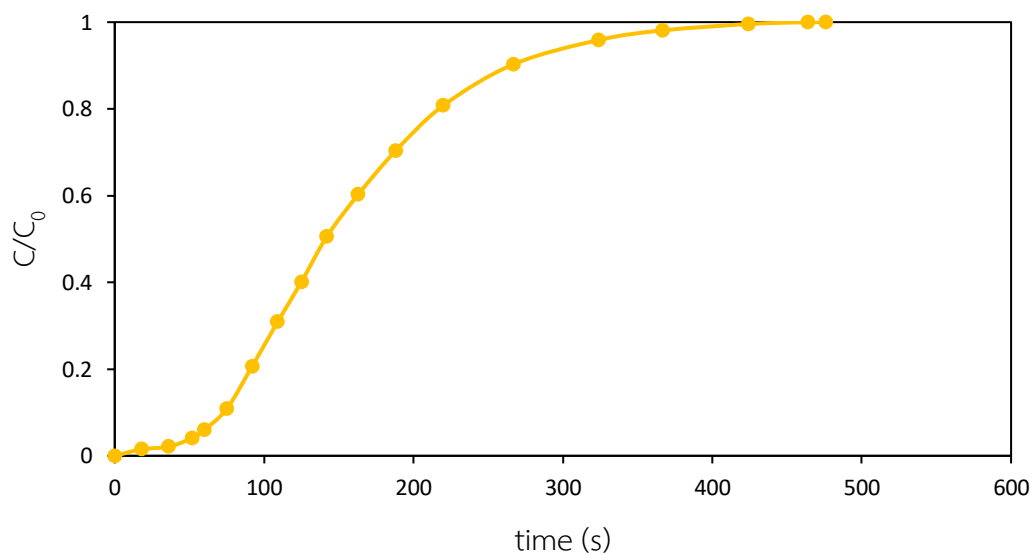
รูปที่ ก.2 FTIR ของ (a) SiO_2 (b) Si-T และ (c) Si-A

ภาคผนวก ข

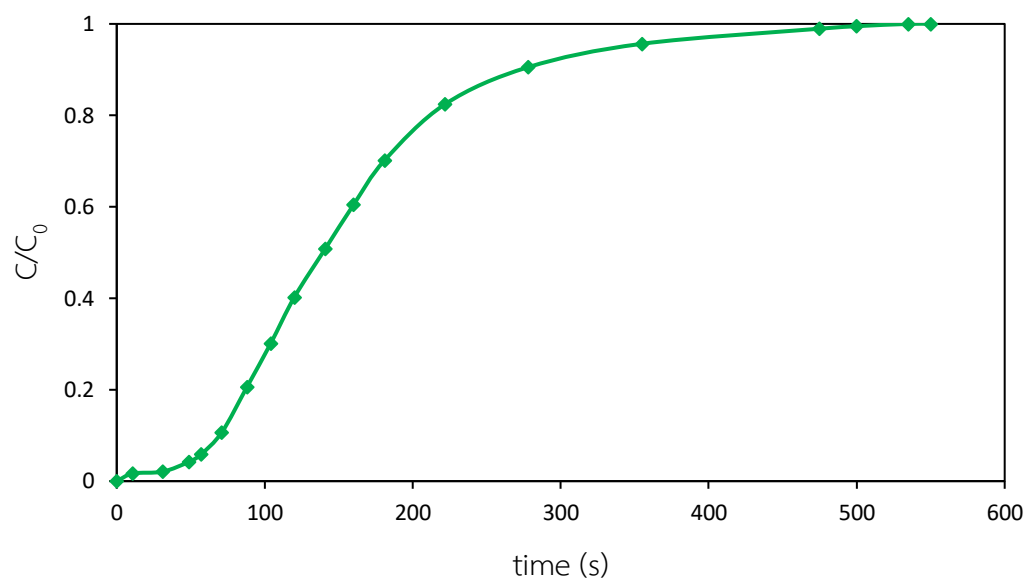
กราฟ Breakthrough curve ของวัสดุดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์



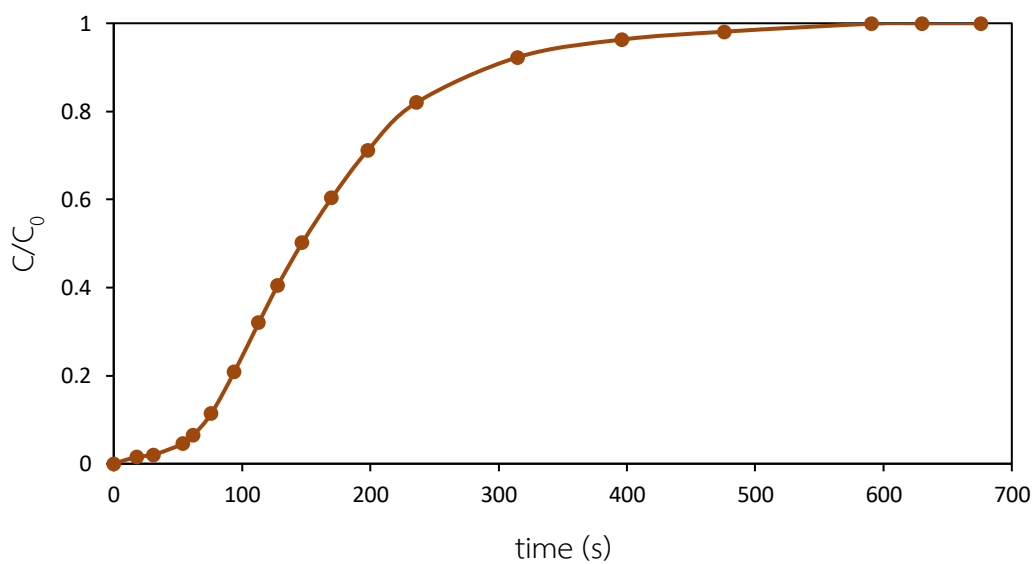
รูปที่ ข.1 Breakthrough curve ของวัสดุ NR ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สผสม 0.5 ลิตร/นาที ความเข้มข้นเริ่มต้นของ CO_2 ร้อยละ 12 โดยปริมาตร



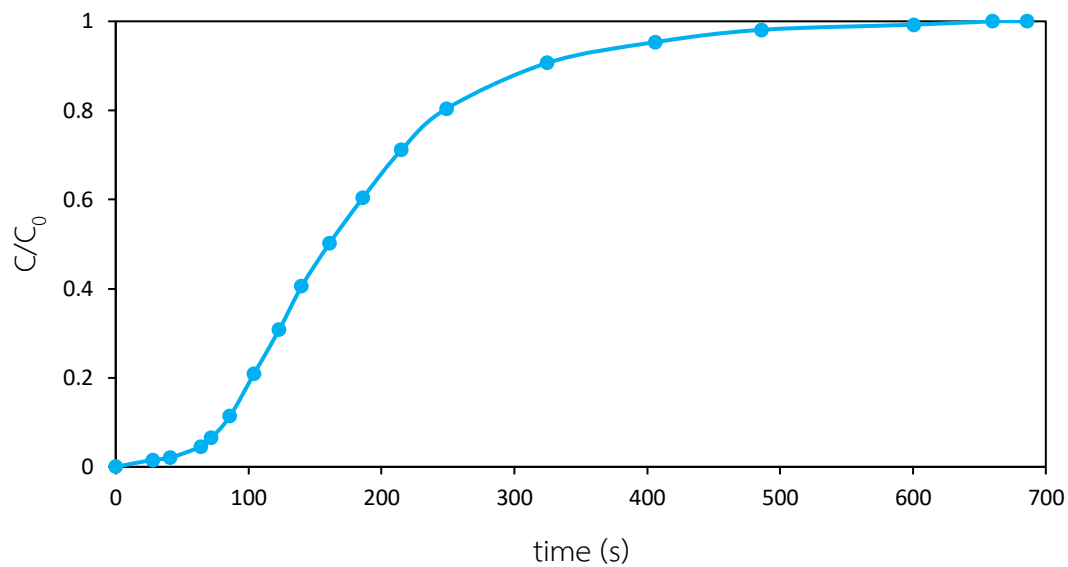
รูปที่ ข.2 Breakthrough curve ของวัสดุ MNR ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สผสม 0.5 ลิตร/นาที ความเข้มข้นเริ่มต้นของ CO_2 ร้อยละ 12 โดยปริมาตร



รูปที่ ข.3 Breakthrough curve ของวัสดุ MNR-Si ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สผสม 0.5 ลิตร/นาที ความเข้มข้นเริ่มต้นของ CO₂ ร้อยละ 12 โดยปริมาตร



รูปที่ ข.4 Breakthrough curve ของวัสดุ MNR-Si-A ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สผสม 0.5 ลิตร/นาที ความเข้มข้นเริ่มต้นของ CO₂ ร้อยละ 12 โดยปริมาตร



รูปที่ ข.5 Breakthrough curve ของวัสดุ MNR-Si-T ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สผสม 0.5 ลิตร/นาที ความเข้มข้นเริ่มต้นของ CO_2 ร้อยละ 12 โดยปริมาตร

ภาคผนวก ค

ค่าความจุในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของวัสดุดูดซับชนิดต่างๆ

ตารางที่ ค.1 ค่าความจุในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของยางธรรมชาติ (NR)

ครั้งที่	ความจุในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (mg/g)		
	วัสดุรวมกับเครื่องปฏิกรณ์	เครื่องปฏิกรณ์	วัสดุ
1	4.54	3.63	0.91
2	4.70	3.55	1.15
3	4.35	3.68	0.67
		เฉลี่ย	0.91

ตารางที่ ค.2 ค่าความจุในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของยางธรรมชาติดัดแปร (MNR)

ครั้งที่	ความจุในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (mg/g)		
	วัสดุรวมกับเครื่องปฏิกรณ์	เครื่องปฏิกรณ์	วัสดุ
1	3.13	1.95	1.18
2	3.20	1.94	1.26
3	2.89	1.97	0.92
		เฉลี่ย	1.12

ตารางที่ ค.3 ค่าความจุในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของยางธรรมชาติดัดแปรผสมซิลิกา (MNR-Si)

ครั้งที่	ความจุในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (mg/g)		
	วัสดุรวมกับเครื่องปฏิกรณ์	เครื่องปฏิกรณ์	วัสดุ
1	3.73	2.40	1.33
2	3.60	2.37	1.23
3	3.82	2.39	1.43
		เฉลี่ย	1.33

ตารางที่ ค.4 ค่าความจุในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของยางธรรมชาติดัดแปรผสมซิลิกากราฟต์ด้วยอะมิโนโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน (MNR-Si-A)

ครั้งที่	ความจุในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (mg/g)		
	วัสดุรวมกับเครื่องปฏิกรณ์	เครื่องปฏิกรณ์	วัสดุ
1	4.32	2.54	1.78
2	4.83	2.79	2.04
3	4.51	2.66	1.85
		เฉลี่ย	1.89

ตารางที่ ค.5 ค่าความจุในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของยางธรรมชาติดัดแปรผสมซิลิกาอิมมัตว์ด้วยเตตระเอทิลีนเพนตามีน (MNR-Si-T)

ครั้งที่	ความจุในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (mg/g)		
	วัสดุรวมกับเครื่องปฏิกรณ์	เครื่องปฏิกรณ์	วัสดุ
1	7.99	4.64	3.35
2	8.65	4.53	4.12
3	8.21	4.91	3.30
		เฉลี่ย	3.59

ภาคผนวก ง

การคำนวณการเตรียมยางธรรมชาติตัดแปร

ตัวอย่าง

MNR-1.05

วิธีคำนวณ

- เตรียมสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH)

ต้องการเตรียมสารละลาย NH_4OH ร้อยละ 0.26 โยน้ำหนัก จำนวน 150 มิลลิลิตร

$$= (0.26 \text{ กรัม}/100 \text{ กรัมสารละลาย}) \times 150 \text{ กรัมสารละลาย}$$

$$= 0.39 \text{ กรัม}$$

จาก NH_4OH solⁿ ร้อยละ 28 โดยน้ำหนัก จะต้องใช้

มีแอมโมเนีย	28 กรัม	ในสารละลาย	100 กรัม
-------------	---------	------------	----------

ถ้าต้องการแอมโมเนีย	0.39 กรัม	จะต้องใช้สารละลาย	1.39 กรัม
---------------------	-----------	-------------------	-----------

- เตรียมยางธรรมชาติ 100 phr

มีเนื้อยางธรรมชาติ	60 กรัม	ในน้ำยางธรรมชาติ	100 กรัม
--------------------	---------	------------------	----------

ต้องการเนื้อยางธรรมชาติ 100 กรัม		ต้องใช้น้ำยางธรรมชาติ	167 กรัม
----------------------------------	--	-----------------------	----------

- เตรียมไดแอลลิลเอมีน 4.95 phr จากสารละลายร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก จะต้องใช้

มีไดแอลลิลเอมีน	99 กรัม	ในสารละลาย	100 กรัม
-----------------	---------	------------	----------

ต้องการไดแอลลิลเอมีน	4.95 กรัม	ต้องใช้สารละลาย	5 กรัม
----------------------	-----------	-----------------	--------

- เตรียมเทอร์ท-บิวทิลไฮโดรเปอร์ออกไซด์ 1.05 phr จากสารละลายร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก จะต้องใช้

มีเทอร์ท-บิวทิลไฮโดรเปอร์ออกไซด์	70 กรัม	ในสารละลาย	100 กรัม
----------------------------------	---------	------------	----------

ต้องการใช้เทอร์ท-บิวทิลไฮโดรเปอร์ออกไซด์	1.05 กรัม	ต้องใช้สารละลาย	1.5 กรัม
--	-----------	-----------------	----------

- เตรียมเตตระเอทิลีนเพนตะมีน 0.43 phr จากสารละลายร้อยละ 85 โดยน้ำหนัก จะต้องใช้

มีเตตระเอทิลีนเพนตะมีน	85 กรัม	ในสารละลาย	100 กรัม
------------------------	---------	------------	----------

ต้องการใช้เตตระเอทิลีนเพนตะมีน	0.43 กรัม	ต้องใช้สารละลาย	0.5 กรัม
--------------------------------	-----------	-----------------	----------

การคำนวณความจุในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

ตัวอย่าง

NR

กำหนดให้

อัตราการไหลของแก๊สขาเข้า	=	0.05	ลิตร/นาที
อุณหภูมิในการดูดซับ (T)	=	34.5	องศาเซลเซียส
ปริมาณตัวดูดซับ	=	6.49	กรัม
ความเข้มข้นเริ่มต้นของ CO ₂	=	16.522	% โดยปริมาตร
ความดัน (P)	=	1	บรรยากาศ
ค่าคงที่ของแก๊ส (R)	=	0.082	(ลิตร.บรรยากาศ)/(โมล.เคลวิน)
น้ำหนักโมเลกุลของ CO ₂	=	44	กรัม/โมล

สมมติฐานในการคำนวณ

1. อุณหภูมิในการดูดซับเท่ากันตลอดความยาวของเครื่องปฏิกรณ์
2. แก๊สประพฤติตัวแบบแก๊สอุดมคติ (Ideal gas)

วิธีคำนวณ

การคำนวณความจุแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของวัสดุดูดซับสามารถคำนวณได้จากพื้นที่เหนือเส้นกราฟตามแสดงในรูปที่ 4.6 โดยทำการแบ่งพื้นที่ออกเป็นส่วนเล็ก ๆ ความกว้าง 1 วินาที

$$\begin{aligned}
 \text{ความเข้มข้นของ CO}_2 \text{ ขาออก} &= 0.306 \% \text{ โดยปริมาตร} \\
 \text{อัตราการไหลของ CO}_2 \text{ ขาออก} &= (0.306 \times 0.05) / 100 \\
 \text{แสดงว่า CO}_2 \text{ ที่ถูกดูดซับ} &= \text{CO}_2 \text{ ขาเข้า} - \text{CO}_2 \text{ ขาออก} \\
 &= (0.05 \times 16.522)/100 - (0.05 \times 0.306)/100 \\
 &= 8.108 \times 10^{-3} \text{ ลิตร/นาที}
 \end{aligned}$$

จากสมการแก๊สอุดมคติ

$$\begin{aligned}
 PV &= nRT \\
 PV &= (m/MW)RT \\
 m &= (PV.MW)/RT
 \end{aligned}$$

โดย m คือ อัตราการไหลเชิงมวลของแก๊ส (กรัม/นาที)

$$\begin{aligned} m &= (1 \times 8.108 \times 10^{-3} \times 44) / (0.082 \times (34.5+273)) \\ &= 0.014 \text{ กรัม/นาที} \\ &= 2.36 \times 10^{-4} \text{ กรัม/วินาที} \end{aligned}$$

แสดงว่าใน 1 วินาที CO_2 ถูกดูดซับ = 2.36×10^{-4} กรัม

จากนั้นทำการคำนวณดังที่แสดงต่อไปจนครบตามเวลา ความจุในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของวัสดุ NR รวมกับเครื่องปฏิกรณ์มีค่า 0.0295 กรัม เมื่อเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์ที่ยังไม่ได้บรรจุวัสดุดูดซับซึ่งมีค่า 0.0236 กรัม จะได้ความจุในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของวัสดุ NR เท่ากับ 5.9 มิลลิกรัม/6.49 กรัมของตัวดูดซับ หรือมีค่า 0.91 มิลลิกรัม/กรัมของตัวดูดซับ