



โครงการ
การเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

ชื่อโครงการ แบบจำลองการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยยางธรรมชาติผสมโพแทสเซียมคาร์บอเนต
CO₂ adsorption modeling by natural rubber with potassium carbonate

ชื่อนิสิต	นางสาวณัฐภัทร วรินทร์รา	เลขประจำตัว	6032917523
	นายพรสันธ์ ชุ่นฮ้อย	เลขประจำตัว	6032942123

ภาควิชา เคมีเทคนิค

ปีการศึกษา 2563

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

ชื่อโครงการ	แบบจำลองการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยยางธรรมชาติผสมโพแทสเซียมคาร์บอเนต			
ชื่อนิติผู้ทำโครงการ	น.ส.ณัฐภัทร	วรินทรา	เลขประจำตัว	6032917523
	นาย พรสันต์	ชุ่นฮ้อ	เลขประจำตัว	6032942123
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ			
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รศ.ดร.เบญจพล เถลิงสินสุวรรณ			

ภาควิชา เคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2563

งานวิจัยนี้ศึกษาการพัฒนาวัสดุดูดซับจากยางธรรมชาติร่วมกับการเติมโพแทสเซียมคาร์บอเนต (K_2CO_3) และสร้างแบบจำลองการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ วิเคราะห์ผลเชิงสถิติเพื่อศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าการเติม K_2CO_3 ที่ความเข้มข้น 0, 5, 10 และ 15 ส่วนในร้อยส่วนของยาง (Part by weight per hundred part of rubber) ให้ค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิห้อง ($30^\circ C$) เท่ากับ 5.30, 2.43, 2.91 และ 3.19 มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมตัวดูดซับ ตามลำดับ และแบบจำลองการเสื่อมสภาพมีความเหมาะสมที่สุดในการอธิบายจลศาสตร์ของตัวดูดซับที่มีความเข้มข้น K_2CO_3 0, 5, 10 และ 15 ส่วนในร้อยส่วนของยาง โดยวัสดุดูดซับจากยางธรรมชาติผสมร่วมกับ K_2CO_3 มีอัตราการเสื่อมสภาพมากกว่าและอัตราการดูดซับน้อยกว่าวัสดุดูดซับจากยางธรรมชาติ การศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าการดูดซับของวัสดุดูดซับที่เติม K_2CO_3 15 phr เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ค่าการดูดซับจะลดลงตามลำดับดังนี้ 3.19 ($30^\circ C$), 2.57 ($60^\circ C$) และ 2.07 ($100^\circ C$) มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์/กรัมตัวดูดซับ จากนั้นศึกษาการสร้างแบบจำลองการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวแปร 4 ตัว คืออุณหภูมิของการดูดซับ ปริมาณน้ำที่ใส่ อัตราการไหลของแก๊สและอุณหภูมิของแก๊ส พบว่าปริมาณน้ำที่ใส่และอัตราการไหลของแก๊สมีค่าเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของวัสดุดูดซับเพิ่มมากขึ้น แต่อุณหภูมิในการดูดซับและอุณหภูมิของแก๊สมีค่าเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง ซึ่งจากความสัมพันธ์นี้สามารถอธิบายค่าการดูดซับของวัสดุดูดซับได้ด้วยสมการถดถอยเชิงเส้นตรง

ภาควิชาเคมีเทคนิค
สาขาวิชา เคมีวิศวกรรม

ลายมือชื่อนิติ

ลายมือชื่อนิติ

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

ณัฐภัทร วรินทรา

พรสันต์ ชุ่นฮ้อ

ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ

เบญจพล เถลิงสินสุวรรณ

Abstract

Project name Natural rubber with potassium carbonate carbon dioxide adsorption model

Student name Ms. Natthapat Warintra ID 6032917523
Mr. Pornsun Soonhoa ID 6032942123

Advisor Assoc. Prof. Dr. Sirilux Poompradub

Co-advisor Assoc. Prof. Dr. Benjapon Chalermsoisuwon

Chemtech, Faculty of Science, Chulalongkorn University, 2021

This research studied the development of natural rubber absorbent material with addition of potassium carbonate (K_2CO_3) and a carbon dioxide adsorption model. Statistical analysis of the variables affecting carbon dioxide adsorption was found that the addition of K_2CO_3 at concentrations of 0, 5, 10 and 15 parts per hundred part of rubber (phr) gave the adsorption values at room temperature ($30\text{ }^\circ\text{C}$) as follows: 5.30, 2.43, 2.91 and 3.19 mg carbon dioxide per gram adsorbent material, respectively. The degradation model was most appropriate to describe the sorbent kinetics for natural rubber sorbent mixed with K_2CO_3 (0, 5, 10 and 15 phr). Natural rubber sorbent mixed with K_2CO_3 had a higher deterioration rate and lower adsorption rate than natural rubber sorbent. The effect of temperature on the adsorption value of the adsorbent with K_2CO_3 15 phr found that at elevated temperatures the adsorption values were reduced respectively as follows: 3.19 ($30\text{ }^\circ\text{C}$), 2.57 ($60\text{ }^\circ\text{C}$) and 2.07 ($100\text{ }^\circ\text{C}$) mg carbon dioxide per gram adsorbent material. The carbon dioxide adsorption model was then studied by four variables: the adsorption temperature, amount of water, gas flow rate and gas temperature. It was found that the increase of water amount and gas flow rate resulted in the increased carbon dioxide adsorption value. But the increased adsorption temperature and gas temperature provided the reduced carbon dioxide absorption. This relationship can be explained by the linear regression equation.

Department of Chemical Technology

Major: Chemical Engineering

Student's Signature

Student's Signature

Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

Natthapat Warintha.

Pornsun Soonhoa

Sirilux P.

Benjapon Chalermsoisuwon

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจากรองศาสตราจารย์ ดร.ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ และรองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการทั้งสองท่าน ที่ได้สละเวลาอันมีค่าแก่คณะผู้วิจัย คอยให้คำแนะนำ ปรึกษา ตลอดจนปรับปรุง แก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่อย่างดียิ่ง คณะผู้วิจัยตระหนักถึงความตั้งใจจริงและความทุ่มเทของอาจารย์ จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ทุกท่านของภาควิชาเคมีเทคนิค และคณะวิทยาศาสตร์ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านเครื่องมือและดูแลอำนวยความสะดวกในการปฏิบัติงานในงานวิจัยนี้ ขอขอบคุณนางสาวณัฏฐ์จิรา จารี ที่ช่วยให้คำปรึกษาในการแก้ไขปัญหาและตอบข้อสงสัยระหว่างการทำงานวิจัย รวมไปถึงการให้คำแนะนำที่ดีเสมอมา ขอขอบคุณเงินทุนสนับสนุนการวิจัยจากภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ประจำปีการศึกษา 2563 นอกจากนี้ขอขอบพระคุณบิดามารดาและครอบครัว ที่เปิดโอกาสให้ได้รับการศึกษาเล่าเรียน ตลอดจนคอยช่วยเหลือและให้กำลังใจคณะผู้วิจัยเสมอมา

คณะผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า งานวิจัยฉบับนี้จะมีประโยชน์ไม่มากนักน้อยแก่ผู้ที่สนใจศึกษา คณะผู้วิจัยขอมอบส่วนดีทั้งหมดที่มีให้แก่เหล่าคณาจารย์ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา จนทำให้ผลงานวิจัยฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ เป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจศึกษา สำหรับข้อบกพร่องต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นนั้นคณะผู้วิจัยยินดีรับฟังคำแนะนำจากทุกท่าน เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนางานวิจัยต่อไป

คณะผู้วิจัย

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ	ก
Abstract	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูปภาพ	ฉ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญกราฟ	ฌ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจ	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย	2
1.3 วิธีการดำเนินงาน	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 คาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide)	4
2.2 ยางธรรมชาติ (Natural rubber)	5
2.3. การออกสูตรยาง	6
2.4 ปฏิกิริยาวัลคาไนซ์	8
2.5 กระบวนการดูดซับ (Adsorption process)	8
2.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ	10
2.7 โพแทสเซียมคาร์บอเนต (Potassium carbonate, K_2CO_3)	11

2.8 จลนศาสตร์ของการดูดซับ	12
2.9 การจำลองกระบวนการทางเคมี	16
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	17
บทที่ 3 เครื่องมือและวิธีการดำเนินงาน	19
3.1 สารเคมีและวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	19
3.2 การดำเนินงานวิจัย	21
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	27
4.1 ลักษณะทางกายภาพของยางธรรมชาติผสมโพลีเอทิลีนคาร์บอนเนต	27
4.2 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับด้วยเทคนิค FTIR	28
4.3 ความสามารถในการดูดซับของวัสดุดูดซับจากยางธรรมชาติ	29
4.4 การศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับของวัสดุดูดซับจากยางธรรมชาติผสมโพลีเอทิลีนคาร์บอนเนต	32
4.5 ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง	35
4.6 ศึกษาแบบจำลองการดูดซับของวัสดุดูดซับจากยางธรรมชาติผสมโพลีเอทิลีนคาร์บอนเนต	36
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	43
5.1 สรุปผลการทดลอง	43
5.2 ข้อเสนอแนะ	44
เอกสารอ้างอิง	45
ภาคผนวก ก	50
ภาคผนวก ข	53
ภาคผนวก ค	56
ภาคผนวก ง	62

สารบัญรูปภาพ

รูป	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของคาร์บอนไดออกไซด์	4
รูปที่ 2.2 น้ำยางธรรมชาติ	5
รูปที่ 2.3 การวัลคาไนซ์	8
รูปที่ 2.4 โครงสร้างและลักษณะทางกายภาพของโพแทสเซียมคาร์บอเนต	11
รูปที่ 3.1 วัสดุดูดซับจากยางธรรมชาติผสมโพแทสเซียมคาร์บอเนต และนำไปตัดเป็นวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.5 เซนติเมตร	22
รูปที่ 3.2 แผนภาพระบบดูดซับของเครื่อง CO ₂ Analyzer	23
รูปที่ 3.3 แบบจำลองการดักคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยวัสดุดูดซับจากยางธรรมชาติผสมโพแทสเซียมคาร์บอเนต	25
รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายตัดขวาง (Cross section) จากกล้องถ่ายภาพ Ipad Gen 6 ของวัสดุดูดซับจากยางธรรมชาติและยางธรรมชาติผสมโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ปริมาณต่างๆ	27
รูปที่ 4.2 FTIR สเปกตรัมของวัสดุดูดซับจากยางธรรมชาติผสมโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ปริมาณต่าง ๆ	28
รูปที่ 4.3 การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น	31
รูปที่ ค.1 แบบจำลองการดักคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยวัสดุดูดซับจากยางธรรมชาติผสมโพแทสเซียมคาร์บอเนต	56
รูปที่ ค.2 ข้อมูลสาย Solid	56
รูปที่ ค.3 ข้อมูลสาย Flue gas	57
รูปที่ ค.4 ข้อมูลหอดูดซับ	57

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 1.1 องค์ประกอบของน้ำยางธรรมชาติ	5
ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบระหว่างการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี	9
ตารางที่ 2.3 ข้อดีข้อเสียของโพลีเอทิลีนคาร์บอนเนต	12
ตารางที่ 3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย	19
ตารางที่ 3.2 สารตั้งต้นและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	20
ตารางที่ 3.3 เครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้ในงานวิจัย	20
ตารางที่ 3.4 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมยางธรรมชาติและยางธรรมชาติผสมโพลีเอทิลีนคาร์บอนเนต	21
ตารางที่ 3.5 ภาวะในการสร้างแบบจำลองการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์	26
ตารางที่ 3.6 ตัวแปรต่าง ๆ ที่ต้องการศึกษาในการสร้างแบบจำลองการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์	26
ตารางที่ 4.1 ค่าคงที่ปฏิกิริยาของแบบจำลองจลนศาสตร์รูปแบบต่าง ๆ ของวัสดุดูดซับ	32
ตารางที่ 4.2 ค่าคงที่ปฏิกิริยาของแบบจำลองการเสื่อมสภาพของ NR-15K ที่อุณหภูมิต่าง ๆ	34
ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบผลจากการทำแบบจำลองกับผลการทดลอง	36
ตารางที่ 4.4 ตาราง ANOVA ของตัวแปรทั้งหมดที่ทำการสร้างแบบจำลอง	37
ตารางที่ 4.5 ความคลาดเคลื่อนของค่าสัมประสิทธิ์สำหรับแสดงสมการถดถอยแบบเส้นตรง	41
ตาราง ก.1 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมยางธรรมชาติและยางธรรมชาติผสมโพลีเอทิลีนคาร์บอนเนต	50
ตารางที่ ก.2 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์	52
ตารางที่ ข.1 ข้อมูลที่ใช้ในการหาแบบจำลองจลนศาสตร์ในรูปแบบต่างๆ	53
ตารางที่ ข.2 ข้อมูลที่ได้จากการทดลองและคำนวณตามแบบจำลองจลนศาสตร์ต่างๆ	53

ตารางที่ ข.3 ค่า k_0 และ k_d ที่จากแบบจำลองการเสื่อมสภาพ	54
ตารางที่ ค.1 ค่าความสามารถในการดูดซับของวัสดุดูดซับจากยางธรรมชาติ ผสมโพแทสเซียมคาร์บอเนต 15 phr ของตัวแปรที่ศึกษา	58

สารบัญกราฟ

กราฟ	หน้า
กราฟที่ 4.1 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยของวัสดุดูดซับจาก ยางธรรมชาติผสมโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ปริมาณต่าง ๆ	29
กราฟที่ 4.2 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยของ NR-15K ที่อุณหภูมิต่าง ๆ	30
กราฟที่ 4.3 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยของ NR-15K กรณีที่มีน้ำและไม่มีน้ำ	31
กราฟที่ 4.4 ผลของอุณหภูมิต่อค่าคงที่อัตราการดูดซับเริ่มต้นและค่าคงที่การเสื่อมสภาพ	35
กราฟที่ 4.5 ผลของอุณหภูมิต่อความสามารถในการดูดซับ	38
กราฟที่ 4.6 ผลของปริมาณน้ำต่อความสามารถในการดูดซับ	39
กราฟที่ 4.7 ผลของอัตราการไหลของแก๊สต่อความสามารถในการดูดซับ	40
กราฟที่ 4.8 ผลของอุณหภูมิต่อความสามารถในการดูดซับ	40
กราฟที่ ข.1 ผลของอุณหภูมิต่อค่าคงที่อัตราการดูดซับเริ่มต้นและค่าคงที่การเสื่อมสภาพ	55
กราฟที่ ง.1 Carbon dioxide breakthrough curve เฉลี่ยของ NR 30 °C	62
กราฟที่ ง.2 Carbon dioxide breakthrough curve เฉลี่ยของ NR-5K 30 °C	62
กราฟที่ ง.3 Carbon dioxide breakthrough curve เฉลี่ยของ NR-10K 30°C	63
กราฟที่ ง.4 Carbon dioxide breakthrough curve เฉลี่ยของ NR-15K 30°C	63
กราฟที่ ง.5 Carbon dioxide breakthrough curve เฉลี่ยของ NR-15K 60 °C	64
กราฟที่ ง.6 Carbon dioxide breakthrough curve เฉลี่ยของ NR-15K 100 °C	64
กราฟที่ ง.7 Carbon dioxide breakthrough curve เฉลี่ยของ NR-15K 30 °C กรณีที่มีน้ำ	65
กราฟที่ ง.8 Carbon dioxide breakthrough curve เฉลี่ยของ NR-15K 60 °C กรณีที่มีน้ำ	65

กราฟที่ ง.9 Carbon dioxide breakthrough curve เฉลี่ยของ NR-15K 100 °C กรณีที่มีน้ำ	66
กราฟที่ ง.10 แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมของ NR 30°C	66
กราฟที่ ง.11 แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียมของ NR 30 °C	67
กราฟที่ ง.12 แบบจำลองการเสื่อมสภาพของ NR 30 °C	67
กราฟที่ ง.13 แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมของ NR-5K 30 °C	67
กราฟที่ ง.14 แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียมของ NR-5K 30 °C	68
กราฟที่ ง.15 แบบจำลองการเสื่อมสภาพของ NR-5K 30 °C	68
กราฟที่ ง.16 แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมของ NR-10K 30 °C	68
กราฟที่ ง.17 แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียมของ NR-10K 30 °C	69
กราฟที่ ง.18 แบบจำลองการเสื่อมสภาพของ NR-10K 30 °C	69
กราฟที่ ง.19 แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมของ NR-15K 30 °C	69
กราฟที่ ง.20 แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียมของ NR-15K 30 °C	70
กราฟที่ ง.21 แบบจำลองการเสื่อมสภาพของ NR-15K 30 °C	70
กราฟที่ ง.22 แบบจำลองการเสื่อมสภาพของ NR-15K 60 °C	70
กราฟที่ ง.23 แบบจำลองการเสื่อมสภาพของ NR-15K 100 °C	71
กราฟที่ ง.24 แบบจำลองการเสื่อมสภาพของ NR-15K 30 °C กรณีที่มีน้ำ	71
กราฟที่ ง.25 แบบจำลองการเสื่อมสภาพของ NR-15K 60 °C กรณีที่มีน้ำ	71
กราฟที่ ง.26 แบบจำลองการเสื่อมสภาพของ NR-15K 100 °C กรณีที่มีน้ำ	72

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจ

ปัจจุบันโลกกำลังประสบกับปัญหาแก๊สเรือนกระจกที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก แก๊สเรือนกระจกประกอบด้วยแก๊สหลายชนิด เช่นคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) มีเทน (CH_4) ไนตรัสออกไซด์ (N_2O) คลอโรฟลูโอโรคาร์บอน (CFC_3) หรือโอโซน (O_3) เป็นต้น ซึ่งเกิดจากกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ ได้แก่ การใช้ไฟฟ้า การใช้น้ำมัน เชื้อเพลิงในการขนส่ง และภาคอุตสาหกรรม [1] การเพิ่มขึ้นของคาร์บอนไดออกไซด์ส่งผลกระทบต่อการดำรงชีวิตอยู่ของมนุษย์ สัตว์หรือพืชอย่างมาก อีกทั้งส่งผลกระทบต่อตรงต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศ ทำให้มีอุณหภูมิเฉลี่ยของโลกเพิ่มสูงขึ้นซึ่งเรียกว่า “ภาวะโลกร้อน” [2] ประเทศต่าง ๆ ทั่วโลกตระหนักถึงปัญหานี้จึงได้ร่วมมือกันเพื่อหาแนวทางป้องกันและแก้ไข โดยมีการร่างอนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (United Nations Framework Convention on Climate Change: UNFCCC) [3] เพื่อใช้ในการควบคุมความเข้มข้นของแก๊สเรือนกระจก ประเทศไทยเป็นหนึ่งในประเทศที่เข้าร่วมอนุสัญญา ฯ นี้ และได้มีการบังคับใช้พระราชกฤษฎีกาจัดตั้งองค์การบริหารจัดการแก๊สเรือนกระจก (องค์การมหาชน) พ.ศ. 2550 [4] โดยข้อมูลจากสำนักงานนโยบายและแผนพลังงานในปี พ.ศ. 2562 [2] พบว่าประเทศไทยมีอัตราการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มสูงขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 3.0 ต่อปี

ดังนั้นการแก้ไขปัญหาดังกล่าวสามารถทำได้โดยใช้กระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านตัวดูดซับวัสดุดูดซับประเภทของแข็งถือเป็นวิธีหนึ่งในการลดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ การใช้ตัวดูดซับของแข็งมีข้อดีคือ เกิดการดูดซับทางกายภาพ ส่งผลให้เกิดค่าความร้อนของการดูดซับน้อย อุณหภูมิที่เกิดการดูดซับต่ำ สามารถเกิดการดูดซับแก๊สบนของแข็งได้เกือบทุกชนิดและสามารถเกิดการผันกลับของปฏิกิริยาได้ [5] ตัวดูดซับใช้ปริมาณน้อยและสามารถนำไปประยุกต์ต่อกับเครื่องมือตรวจวัดชนิดอื่นได้ [6] แต่อย่างไรก็ตามวัสดุดูดซับที่เป็นของแข็ง เช่น ถ่านกัมมันต์ [7, 8] ซีโอไลต์ [9, 10] โพลีเอทิลีนคาร์บอเนต [11, 12] มีลักษณะเป็นผงไม่สามารถนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์แผ่นหรือฟิล์มได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้มีการนำยางธรรมชาติมาใช้เป็นตัวกลางในการผลิตวัสดุดูดซับที่สามารถขึ้นรูปได้ง่าย [13] และเพิ่มประสิทธิภาพของการดูดซับโดยการเติมโพลีเอทิลีนคาร์บอเนต ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้จากงานวิจัยนี้มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ตลอดจนเป็นวัสดุที่หาง่าย ราคาถูก และมีสมบัติในการนำไปเป็นตัวดูดซับ นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้ศึกษาแบบจำลองจลศาสตร์การดูดซับ

คาร์บอนไดออกไซด์ [12] ของผลิตภัณฑ์นี้ และศึกษาการเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างยางธรรมชาติและยางธรรมชาติผสมโพแทสเซียมคาร์บอเนตอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1. เตรียมวัสดุดูดซับจากยางธรรมชาติผสมโพแทสเซียมคาร์บอเนตและศึกษาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์
2. ศึกษาจลศาสตร์การดูดซับของยางธรรมชาติผสมโพแทสเซียมคาร์บอเนต

1.3 วิธีการดำเนินงาน

1. สืบค้นข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. เตรียมอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง
3. เตรียมวัสดุดูดซับจากน้ำยางธรรมชาติผสมโพแทสเซียมคาร์บอเนตและนำไปขึ้นรูปโดยเทลงภาดพิมพ์แก้วและอบในตู้อบสารที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
4. พิสูจน์เอกลักษณ์ของวัสดุดูดซับด้วยเทคนิคต่าง ๆ ดังนี้
 - 4.1 หมู่ฟังก์ชันในวัสดุดูดซับด้วยอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier Transform Infrared Spectrometer: FT-IR)
 - 4.2 ลักษณะสัญญาณวิทยาด้วยกล้องถ่ายภาพ Ipad gen6
5. ศึกษาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของยางธรรมชาติผสมโพแทสเซียมคาร์บอเนตในเครื่องปฏิกรณ์ภายใต้อุณหภูมิห้อง ความดันบรรยากาศ ที่อุณหภูมิ 30, 60, 100 องศาเซลเซียส ตามลำดับ
6. พล็อตกราฟระหว่างโมลของคาร์บอนไดออกไซด์กับเวลา เพื่อหาแบบจำลองจลศาสตร์การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์
7. ศึกษาการจำลองกระบวนการเคมีผ่านโปรแกรม Aspen plus ที่ภาวะต่าง ๆ
8. วิเคราะห์ผล สรุปผลการทดลองและจัดทำเล่มรายงาน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

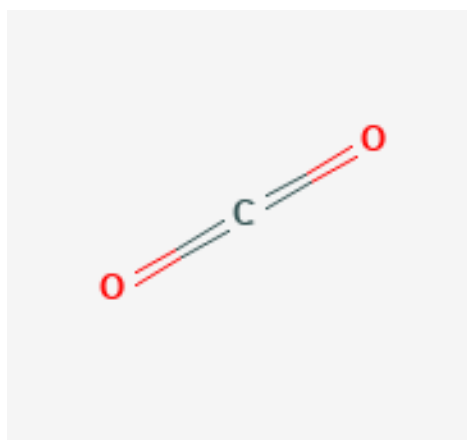
1. มีทักษะ ความรู้ ความเข้าใจเกี่ยวกับการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้วัสดุดูดซับยางธรรมชาติผสม โพลีเอทิลีนคาร์บอนเนต
2. มีความเข้าใจเกี่ยวแบบจำลองจลศาสตร์การดูดซับ
3. ได้ศึกษาการจำลองกระบวนการเคมีผ่านการใช้โปรแกรม Aspen plus

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 คาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide) [14-16]

คาร์บอนไดออกไซด์เป็นแก๊สไม่มีสี ไม่มีกลิ่น เผาไหม้ไม่ได้และมีความเป็นกรดอ่อน โดยแก๊สนี้ประกอบด้วย คาร์บอน 1 อะตอมและออกซิเจน 2 อะตอมซึ่งต่อกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ (รูปที่ 2.1) สามารถละลายในน้ำได้ทำให้เกิดกรดคาร์บอนิก (H_2CO_3) สาเหตุหลักของการปล่อย CO_2 คือ กิจกรรมของมนุษย์ เนื่องจากมีความต้องการพลังงานเพิ่มมากขึ้น การใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลจึงก่อให้เกิดการปล่อยมลพิษอย่างมีนัยสำคัญ อีกทั้งการขนส่งและกิจกรรมอื่น ๆ เช่น ปศุสัตว์หรือการเกษตร การทำอุตสาหกรรมต่างๆ การหายใจของสิ่งมีชีวิต การเกิดไฟฟ้า การเกิดภูเขาไฟระเบิด เป็นต้น โดยแก๊สนี้เป็นหนึ่งในแก๊สเรือนกระจกซึ่งก่อให้เกิดภาวะโลกร้อนในปัจจุบัน



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของคาร์บอนไดออกไซด์ [14]

คาร์บอนไดออกไซด์เป็นแก๊สที่มีบทบาทสำคัญในการเกิดภาวะเรือนกระจก เนื่องจากสามารถดูดซับแสงอินฟราเรดที่มาจากดวงอาทิตย์ ซึ่งผลกระทบนี้เป็นปรากฏการณ์ที่ความร้อนที่ปล่อยออกมาจากดวงอาทิตย์ถูกเก็บรักษาไว้ในบรรยากาศและเป็นผลให้โลกร้อนจัด ความร้อนสูงเกินไปทำให้เกิดผลกระทบต่อสภาพภูมิอากาศโลกและต่อสิ่งมีชีวิตทั่วโลก โดยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอื่น ๆ เช่น การละลายของน้ำแข็งขนาดใหญ่ ทำให้ระดับน้ำทะเลจะเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ปรากฏการณ์การกัดเซาะและความเค็มในพื้นที่ชายฝั่งทะเลจะเพิ่มขึ้น แนวปะการังจำนวนมากสูญเสีชีและตาย สัตว์หรือพืชที่ไม่สามารถปรับตัวได้ จะตายหรือ

สูญพันธุ์ นอกจากนี้เมื่อคาร์บอนไดออกไซด์ถูกดูดซึมในน้ำจะกลายเป็นกรดคาร์บอนิก ส่งผลต่อความเป็นกรดของน้ำ ซึ่งสร้างความเสียหายต่อระบบนิเวศต่าง ๆ เช่น แนวปะการัง

2.2 ยางธรรมชาติ (Natural rubber) [17]

เป็นผลผลิตจากต้นยางพารา มีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวขุ่นเรียกว่าน้ำยางสด (รูปที่ 2.2) โดยจะมีองค์ประกอบเป็นเนื้อยางแห้งอยู่ระหว่าง 25-45 % และองค์ประกอบส่วนอื่น ๆ แสดงในตารางที่ 2.2



รูปที่ 2.6 น้ำยางธรรมชาติ [18]

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบของน้ำยางธรรมชาติ [19]

องค์ประกอบ	ปริมาณ (ร้อยละ)
สารที่เป็นของแข็งทั้งหมด	28 – 48
เนื้อยางแห้ง	25 – 45
สารจำพวกโปรตีน	1 – 1.5
เรซิน	1 – 1.25
ซีไธ	1
น้ำตาล	1
น้ำ	ส่วนที่เหลือ

2.2.1 สมบัติของยางธรรมชาติ

1. มีความยืดหยุ่น (Elasticity) สูง ทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิต่ำ
2. มีความเหนียวติดกัน (Tack) ในสภาพที่ยังไม่คงรูป
3. มีความทนต่อแรงดึง (Tensile strength) สูงมากโดยไม่ต้องเติมสารตัวเติมเสริมแรง
4. มีความทนต่อการฉีกขาด (Tear strength) สูงมากทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูง
5. มีสมบัติเชิงพลวัต (Dynamic properties) ที่ดี มีการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนต่ำระหว่างการใช้งาน

2.3. การออกสูตรยาง [20-21]

การออกสูตรยางเป็นขั้นตอนในการเริ่มต้นที่สำคัญมาก เนื่องจากจะเป็นกำหนดคุณสมบัติของยาง โดยการออกสูตรยางจะต้องอาศัยความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับคุณสมบัติที่เราต้องการใช้งานและการกลไกการทำงานของสารเคมีที่เติมลงไป

2.3.1 สารวัลคาไนซ์ หรือสารทำให้ยางคงรูป (Vulcanizing Agent)

สารกลุ่มนี้ก่อให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยาง (Crosslink) ตรงตำแหน่งที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา ทำให้โมเลกุลยางเกิดเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ มีคุณสมบัติเชิงกลและเชิงพลวัตที่ดี โดยสารกลุ่มนี้จะมีส่วนประกอบของกำมะถัน และเพอร์ออกไซด์

1. กำมะถัน (Sulfur)

เป็นสารที่นิยมใช้ในการวัลคาไนซ์ยางเนื่องจากมีราคาถูก ปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เกิดขึ้นได้ไว ใช้ได้กับยางที่มีพันธะคู่ในโมเลกุลเช่น ยางสไตรีนบิวตาไดอีน (Styrene butadiene rubber: SBR) ยางพอลิไอโซพรีน (Polyisoprene Rubber: IR) ยางบิวตาไดอีน (Butadiene rubber: BR) ยางไนไตรล์ (Nitrile rubber: NBR) เป็นต้น

2. เพอร์ออกไซด์ (Peroxide)

สามารถใช้กับยางทั้งที่มีโมเลกุลเดี่ยวและโมเลกุลคู่แต่มีค่าใช้จ่ายที่สูงกว่าการใช้กำมะถันและมีคุณสมบัติเชิงกลและเชิงพลวัตต่ำกว่ายางที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน เนื่องจากสารตัวนี้มีอันตรายสูงและต้องมีความระมัดระวังในการใช้งานมากจึงไม่นิยมใช้

2.3.2 สารเร่งปฏิกิริยา (Accelerators)

สารประเภทนี้จะช่วยให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาคัลคาไนซ์เร็วขึ้น ทำให้ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาลดลง โดยสารนี้เป็นสารที่สำคัญในการทำคัลคาไนซ์อย่างด้วยกัมมะถัน ตัวอย่างของสารเร่งปฏิกิริยา เช่น เมอร์แคปโต (Mercapto) ไดไทโอคาร์บาเมต (Dithiocarbamate) กัวนิติน (Guanidine) เป็นต้น

2.3.3 สารตัวเติม (Filler)

เป็นสารที่เติมเพิ่มลงไปนยาง โดยจะเป็นการลดต้นทุนการผลิตหรือเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของยาง เช่น ซิลิกาและโพแทสเซียมคาร์บอเนต เป็นต้น

2.3.4. สารป้องกันยางเสื่อมสภาพ (Rubber deterioration protection agent)

สารประเภทนี้จะช่วยยืดอายุการใช้งานของยาง โดยทั่วไป สารป้องกันการเสื่อมสภาพที่เปลี่ยนสียางอย่างรุนแรงจะมีประสิทธิภาพในการปกป้องยางสูงกว่าสารป้องกันการเสื่อมสภาพที่ไม่เปลี่ยนสียาง ตัวอย่างที่สำคัญของสารป้องกันการเสื่อมสภาพ ได้แก่ ไอโซโพรพิลฟีนิลฟีนิลลีนไดเอมีน (N-Isopropyl-N'-phenyl-p-phenylenediamine; IPPD) ไดมethylบิวทิลฟีนิลฟีนิลลีนไดเอมีน (N-(1,3-dimethylbutyl)-N'-phenyl-p-phenylenediamine; 6PPD)

2.3.5 สารกลุ่มอื่น ๆ: ไม่จำเป็นต้องใช้ในการออกสูตรยางทุกครั้ง ใช้เฉพาะเมื่อต้องการให้ยางมีลักษณะพิเศษ

1. สารทำให้เกิดฟอง (Blowing Agent)

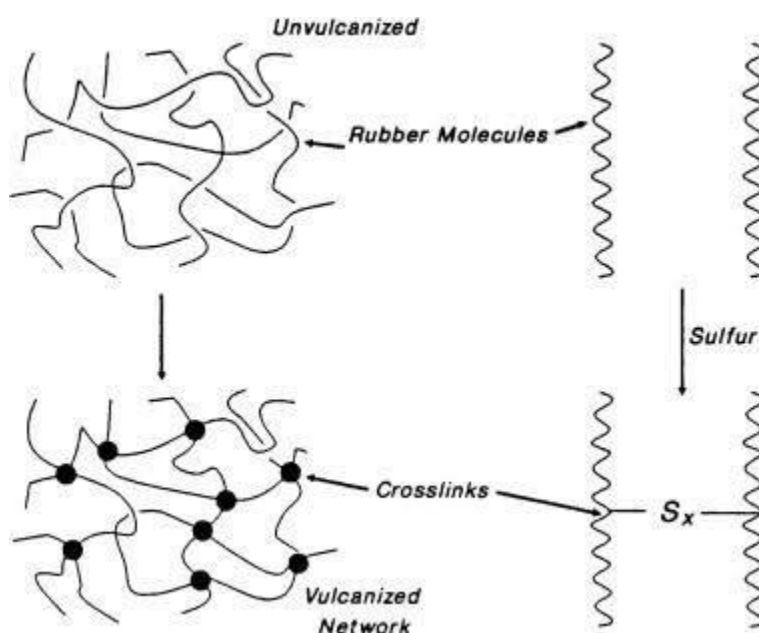
ลักษณะของยางที่ได้จากการเติมสารประเภทนี้ จะทำให้ยางมีฟองอากาศและฟูขึ้นจากการปลดปล่อยก๊าซไนโตรเจนหรือคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาในช่วงก่อนหรือในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาคัลคาไนซ์ เรียกว่าฟองน้ำ (Sponge) โดยตัวอย่างสารประเภทนี้คือ โซเดียมไบคาร์บอเนต (Sodium bicarbonate)

2. สารหน่วงไฟ (Flame retardants)

ลักษณะของยางที่ได้จากการเติมสารประเภทนี้ จะทำให้ยางมีความทนทานต่อการติดไฟมากขึ้น สารเคมีนี้จะสลายตัวให้แก๊ส หรือสารที่ไม่ติดไฟเมื่อได้รับความร้อน ตัวอย่างสารหน่วงการติดไฟ ได้แก่ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Al}(\text{OH})_3$) แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) และแอนติโมนีออกไซด์ (Sb_2O_3)

2.4 ปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ (Vulcanization) [22]

การวัลคาไนซ์เป็นกระบวนการเชื่อมโมเลกุลยางด้วยพันธะโควาเลนต์และเกิดการเชื่อมขวางกัน (Crosslink) ของโมเลกุลยางจะทำปฏิกิริยากับกำมะถัน แสดงในรูปที่ 2.3 ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความยืดหยุ่น ทนทาน



รูปที่ 2.7 การวัลคาไนซ์ [23]

2.5 กระบวนการดูดซับ (Adsorption process) [24-25]

การดูดซับ (Adsorption) เป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับความสามารถของวัสดุหรือของแข็งบางชนิดในการดึงโมเลกุลที่อยู่ในของเหลวหรือแก๊สให้มาเกาะติดบนพื้นผิววัสดุหรือระหว่างผิวหน้า (Interface) โดยโมเลกุลที่ถูกดูดซับจะเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนผิวที่สารไปเกาะเรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) ซึ่งจะอยู่ในรูปการสะสมตัวของสารหรือความเข้มข้นของสาร กระบวนการนี้จะเกิดการเคลื่อนย้ายถ่ายโอนมวลสาร (Mass transfer) โดยกระบวนการดูดซับสามารถแยกได้เป็น 2 ประเภท คือ การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) และการดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

2.5.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption)

เป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับและองค์ประกอบของสารที่ถูกดูดซับมีค่ามากกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลขององค์ประกอบภายในของสารละลาย ทำให้องค์ประกอบของสารที่ถูกดูดซับสามารถยึดติดบนพื้นผิวของตัวดูดซับได้ด้วยแรงทางกายภาพ ได้แก่ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waals Forces) และแรงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic force) หรือเรียกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน โดยการดูดซับประเภทนี้จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีของตัวดูดซับ เนื่องจากดูดซับประเภทนี้มีพลังงานการคายความร้อนค่อนข้างน้อย และสามารถเกิดการผันกลับของกระบวนการได้ง่าย ซึ่งเป็นข้อดี เพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่ายด้วย การดูดซับประเภทนี้มักจะเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer adsorption) โดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับ และจะเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลาย

2.5.2 การดูดซับทางเคมี

เป็นปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นเมื่อตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของตัวถูกดูดซับเดิม คือ มีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเดิมแล้วมีการจัดเรียงอะตอมไปเป็นสารประกอบใหม่ขึ้น ตารางที่ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นหรือใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเคมีมีค่าสูงกว่าการดูดซับทางกายภาพ โดยมีพันธะเคมีซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง ทำให้การกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับจะทำได้ยาก คือไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ (Irreversible) และ การดูดซับประเภทนี้จะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) เท่านั้น

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบระหว่างการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี

ตัวแปร	การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
ค่าความร้อนในการดูดซับ (kJ/mol)	< 20	50-400
อุณหภูมิที่เกิดการดูดซับ	ต่ำ	สูง
แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล	Vander Waals	พันธะเคมี
การผันกลับของปฏิกิริยา	ผันกลับได้	ส่วนใหญ่ผันกลับไม่ได้
การดูดซับบนแก๊ส-ของแข็ง	เกิดได้เกือบทุกชนิด	เกิดเฉพาะบางระบบ
พลังงานกระตุ้น	ไม่เกี่ยวข้อง	เกี่ยวข้อง
จำนวนชั้นของการดูดซับ	Monolayer และ Multilayer	Monolayer

2.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ [25]

กระบวนการดูดซับจะเกิดได้อย่างมีประสิทธิภาพมากหรือน้อย นอกจากจะขึ้นอยู่กับตัวดูดซับแล้ว ภาวะแวดล้อมอื่น ๆ เช่น สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวดูดซับก็ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการดูดซับ โดยปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ ได้แก่

2.6.1 ธรรมชาติของตัวดูดซับ (Nature of the adsorbent)

1. พื้นที่ผิวและโครงสร้างรูพรุน (Surface area and pore structure)

เมื่อตัวดูดซับมีพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้โอกาสในการเกิดการดูดซับเพิ่มมากขึ้น ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเพียงอย่างเดียวไม่สามารถใช้อธิบายความสามารถในการเกิดการดูดซับว่าจะเกิดได้ดีหรือไม่ ดังนั้น โครงสร้างรูพรุนก็เป็นอีกสมบัติหนึ่งที่ช่วยให้พื้นที่ผิวสามารถดูดซับสารได้มากขึ้น ตัวอย่างเช่น โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับด้วยตัวดูดซับ แต่ไม่สามารถเข้าไปอยู่ในรูพรุนของตัวดูดซับได้ ก็จะทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับของตัวดูดซับลดลง

2. ขนาดของตัวดูดซับ (Particle size)

ขนาดของตัวดูดซับจะมีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับก็ต่อเมื่อตัวดูดซับนั้นไม่มีรูพรุน โดยพื้นที่ผิวของตัวดูดซับที่มีขนาดอนุภาคเล็กจะมีพื้นที่ผิวมากกว่าตัวดูดซับที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ แต่ในกรณีที่ตัวดูดซับมีพื้นที่ผิวรูพรุนมาก พื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับจะอยู่ในรูพรุน จึงทำให้อัตราของขนาดอนุภาคต่อประสิทธิภาพในการดูดซับน้อยลง จนอาจจะกล่าวได้ว่าการดูดซับไม่ขึ้นกับขนาดของตัวดูดซับ

3. หมู่ฟังก์ชันทางเคมี (Functional group)

หมู่ฟังก์ชันส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการเกิดการดูดซับ เนื่องจากหมู่ฟังก์ชันทางเคมีสามารถยึดเหนี่ยวกับสารที่ถูกดูดซับจนเกิดเป็นการดูดซับทางเคมี ทำให้การดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นการดูดซับที่เกิดอย่างจำเพาะเจาะจงกับสารที่ถูกดูดซับ ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสูงขึ้น

2.6.2 ลักษณะของสารที่ถูกดูดซับ (Characteristic of the adsorbate)

ลักษณะของสารที่ถูกดูดซับเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการดูดซับ ตัวอย่างเช่น สารที่ถูกดูดซับมีขนาดอนุภาคโมเลกุลที่ใหญ่กว่ารูพรุนของตัวดูดซับ จะทำให้เกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว เนื่องจากตัวถูกดูดซับไม่สามารถเข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับได้ นอกจากนี้สิ่งเจือปนก็เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการดูดซับเช่นกัน โดยสิ่งเจือปนเข้าไปลดพื้นที่ผิวในการดูดซับน้อยลง

2.6.3 ภาวะดำเนินการดูดซับ

1. ความเป็นกรด-เบส หรือ pH

ความเป็นกรด-เบสนั้นเป็นผลมาจากไฮโดรเจนไอออนและไฮดรอกไซด์ไอออน ซึ่งส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของโมเลกุล เช่น การละลายน้ำของสาร ดังนั้นค่า pH จึงมีผลต่อความสามารถในการดูดซับ

2. อุณหภูมิ (Temperature)

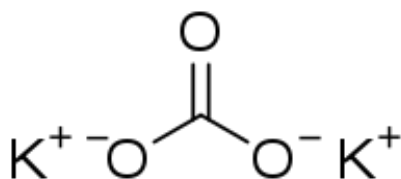
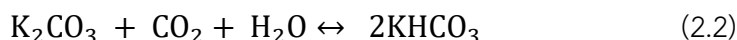
อัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยานั้นจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงเมื่อทำการลดอุณหภูมิลง โดยทั่วไปแล้วตัวดูดซับที่ใช้ในการดูดซับจะมีช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการดูดซับให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น จนถึงช่วงอุณหภูมิหนึ่งการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้การดูดซับน้อยลง เนื่องจากกระบวนการดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายพลังงานความร้อน (Exothermic reaction)

2.7 โพแทสเซียมคาร์บอเนต (Potassium carbonate, K_2CO_3) [26-29]

โพแทสเซียมคาร์บอเนต มีลักษณะเป็นผงสีขาว (รูปที่ 2.4) ละลายในน้ำได้ดี แต่ไม่ละลายในเอทานอล ละลายในน้ำได้สารละลายเป็นเบสแก่ โพแทสเซียมคาร์บอเนตเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์กับคาร์บอนไดออกไซด์ ตามสมการที่ (2.1)



เมื่อทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ จะได้โพแทสเซียมไบคาร์บอเนต



รูปที่ 2.8 โครงสร้างและลักษณะทางกายภาพของโพแทสเซียมคาร์บอเนต [26]

2.7.1 โพลแทสเซียมกับการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

โพลแทสเซียมคาร์บอเนตถูกนำมาใช้กำจัดคาร์บอนไดออกไซด์จากแก๊สในอุตสาหกรรมมาหลายร้อยปี โพลแทสเซียมคาร์บอเนต คือตัวดูดซับโลหะแอลคาไลน์ในรูปสารประกอบคาร์บอเนต (Alkali metal carbonate based adsorbents) เป็นตัวดูดซับในรูปสารประกอบของแข็งเป็นตัวดูดซับที่สามารถเกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ภายใต้ภาวะที่มีความชื้นและได้ผลิตภัณฑ์เป็นไบคาร์บอเนต ซึ่งโพลแทสเซียมคาร์บอเนตเป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูง ราคาถูก สามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ที่ช่วงอุณหภูมิต่ำประมาณ 50-100 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพไม่สูงมาก ซึ่งข้อดีข้อเสียอื่น ๆ ของโพลแทสเซียมคาร์บอเนตจะแสดงในตารางที่ 2.3 โดยปกติจะใช้สารละลายโพลแทสเซียมคาร์บอเนต 25-35 %wt สามารถใช้กับคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความดันสูงถึง 1000 kPa ได้

ตารางที่ 2.4 ข้อดีข้อเสียของโพลแทสเซียมคาร์บอเนต

ข้อดี	ข้อเสีย
- ราคาถูก	- ไม่เหมาะสำหรับแก๊สที่มีความเป็นกรด ที่มีความดันคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำกว่า 15 psi
- ใช้สำหรับการนำคาร์บอนไดออกไซด์จำนวนมาก ออกจากระบบ	- กัดกร่อนสูง
- ดีสำหรับแก๊สที่มีไฮโดรคาร์บอนมวลโมเลกุลหนักๆ	- ต้องมีการออกแบบแบบพิเศษ เมื่อนำไปใช้ในระบบ
- สามารถกำจัด Carbonyl sulfide Carbon disulfide ได้บางส่วน	- Hydrogen sulfide
- สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับ ammonia, hydrogen และ town-gas plants	- ไม่นิยมใช้ร่วมกับเอมีน
- สามารถดูดซับที่อุณหภูมิสูง	
- ใช้พลังงานน้อยสำหรับการนำกลับมาใช้	

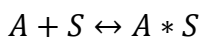
2.8 จลนศาสตร์ของการดูดซับ [12, 25, 30-31]

สำหรับการออกแบบหรือสังเคราะห์วัสดุดูดซับชนิดใหม่ การศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับมีความสำคัญอย่างยิ่ง เพราะจะได้ศึกษาอัตราการดูดซับของวัสดุดูดซับ อัตราการเกิดปฏิกิริยาของวัสดุดูดซับที่ออกแบบขึ้นมา เพื่อที่จะสามารถทำนายการเกิดปฏิกิริยา ระยะเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยารวมไปถึงปริมาณสารที่ใช้ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ในกระบวนการทางอุตสาหกรรมได้

โดยงานวิจัยนี้พิจารณาจลนศาสตร์การดูดซับที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ คือ แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order) แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo-second order) และแบบจำลองการเสื่อมสภาพ (Deactivation modeling)

2.8.1 แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม

แบบจำลองนี้เป็นแบบจำลองที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายที่จะนำมาใช้อธิบายการดูดซับจากสมมติฐานการดูดซับของตัวถูกดูดซับที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต (Electrostatic interaction) ระหว่างผิวของตัวดูดซับกับโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ เนื่องจากการดูดซับเป็นการดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption) และอัตราการดูดซับจะขึ้นกับตำแหน่งในการเกิดปฏิกิริยา (Active site) เพียงตัวแปรเดียว โดยความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับจะคงที่ตลอดการดูดซับ และค่าคงที่อัตราการดูดซับ (k_1) จะแปรผันตรงตามความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวดูดซับ ทำให้สามารถคำนวณหาอัตราเร็วในการดูดซับได้โดยใช้สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับของ Lagergren จากปฏิกิริยาการดูดซับ



เมื่อ A คือ ตัวถูกดูดซับ

S คือ ตัวดูดซับ

$A * S$ คือ สารประกอบที่เกิดจากการดูดซับ (Adsorbed compound)

สามารถเขียนสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมได้ดังนี้

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad (2.3)$$

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (2.4)$$

เมื่อ q_e คือ ค่าการดูดซับของตัวถูกดูดซับเมื่อเวลาเข้าสู่ ∞ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

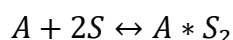
q_t คือ ค่าการดูดซับของตัวถูกดูดซับ ณ เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

k_1 คือ ค่าคงที่อัตราการเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (ต่อนาที)

t คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)

2.8.2 แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม

แบบจำลองนี้ใช้อธิบายการดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับอีกแบบจำลองหนึ่งที่ได้รับคามนิยม ใช้สำหรับอธิบายการดูดซับที่ผิวของตัวดูดซับ บนสมมติฐานการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนผิวตัวดูดซับเป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าและเป็นการดูดซับทางเคมีที่มีผลมาจากตำแหน่งการเกิดปฏิกิริยา จากปฏิกิริยาการดูดซับ โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะขึ้นกับความสามารถในการดูดซับบนตัวดูดซับ ขึ้นกำหนดอัตรา คือ ขั้นตอนการดูดซับทางเคมีซึ่งเกิดจากการสร้างพันธะเคมีระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ



เมื่อ A คือ ตัวถูกดูดซับ

S คือ ตัวดูดซับ

$A * S_2$ คือ สารประกอบที่เกิดจากการดูดซับ (Adsorbed compound)

สามารถเขียนสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองเทียมได้ดังนี้

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \quad (2.5)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{q_e} t + \frac{1}{k_2 q_e} \quad (2.6)$$

เมื่อ q_e คือ ค่าการดูดซับของตัวถูกดูดซับเมื่อเวลาเข้าสู่ ∞ (มิลลิกรัม/กรัม)

q_t คือ ค่าการดูดซับของตัวถูกดูดซับ ณ เวลาใดๆ (มิลลิกรัม/กรัม)

k_2 คือ ค่าคงที่อัตราการเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (มิลลิกรัมต่อกรัม/นาที่)

t คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที่)

2.8.3 แบบจำลองการเสื่อมสภาพ (Deactivation modeling)

ในขณะที่เกิดปฏิกิริยา จะมีผลิตภัณฑ์เกิดขึ้น ซึ่งจะไปปกคลุมพื้นผิวของตัวดูดซับ ทำให้เกิดการขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาระหว่างตัวถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ ส่งผลให้อัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาลดลง แบบจำลองการเสื่อมสภาพจึงได้เพิ่มพจน์ในการพิจารณาผลของการเสื่อมสภาพของตัวดูดซับในรูปความว่องไวในการทำปฏิกิริยา โดยอยู่ภายใต้สมมติฐานดังต่อไปนี้

- ปฏิกิริยาเกิดที่ภาวะอุณหภูมิคงที่ (Isothermal)

- ไม่มีพิจารณาการถ่ายโอนมวลกับสิ่งแวดล้อม
- ระบบอยู่ในภาวะเสถียรเทียม (Pseudo-steady state)
- การเสื่อมสภาพของตัวดูดซับ จะมีความเกี่ยวข้องกับตำแหน่งว่องไวของของแข็ง (m) และค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (n) สามารถเขียนอยู่ในสมการ 2.7 ดังนี้

$$-\frac{da}{dt} = k_d C^n a^m \quad (2.7)$$

ในการคำนวณความว่องไวของตัวดูดซับ (a) จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ

ปฏิกิริยาอันดับ 1 ($n=1$) เนื่องจากตำแหน่งที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา (active site) ถูกปกคลุมด้วยผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น

ปฏิกิริยาอันดับ 0 ($m=0$) เนื่องจากความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับหรือคาร์บอนไดออกไซด์ไม่มีผลต่ออย่างนัยสำคัญต่อการดูดซับ

สามารถเขียนสมการแบบจำลองการเสื่อมสภาพของตัวถูกดูดซับ โดยพิจารณาที่ ($m=0, n=1$)

$$\frac{C}{C_0} = \exp\left(\frac{-k_0 W}{Q_0} * \exp(-k_d t)\right) \quad (2.8)$$

$$\ln\left(\ln\left(\frac{C_0}{C}\right)\right) = \ln\left(\frac{k_0 W}{Q_0}\right) - k_d t \quad (2.9)$$

เมื่อ	C_0	คือ ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (%)
	C	คือ ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ขาออก (%)
	k_0	คือ ค่าคงที่อัตราการดูดซับ (ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลโมล·นาทึ)
	k_d	คือ ค่าคงที่ของอัตราการเสื่อมสภาพ (ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลโมล·นาทึ)
	Q_0	คือ อัตราการไหลของแก๊สที่ป้อนเข้า (ลูกบาศก์เมตร/นาทึ)
	W	คือ น้ำหนักของตัวดูดซับของแข็ง (กิโลกรัม)
	t	คือ เวลา (นาทึ)

2.9 การจำลองกระบวนการทางเคมี [25]

ในปัจจุบันโปรแกรมคอมพิวเตอร์เข้ามามีบทบาทอย่างมากในกระบวนการทางวิศวกรรม โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ส่วนมากในงานด้านวิศวกรรม เรียกว่า โปรแกรมการจำลองกระบวนการทางเคมี (Chemical process simulator) ซึ่งมีหลายบริษัทที่ผลิตขึ้นให้ใช้ในการจำลองภาวะที่แตกต่างกันในกระบวนการอุตสาหกรรม โปรแกรมที่ใช้ในการจำลองกระบวนการเหล่านี้ได้แก่ ASPEN, CHEMCAD, PRO/II และ HYSYS โปรแกรมเหล่านี้จะเตรียมแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับอุปกรณ์หลัก ๆ ไว้ให้แก่ผู้ใช้งาน เช่น เครื่องปฏิกรณ์ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ถังแยกของเหลวจากไอ หอกลั่น หอดูดซับ ป้อน วาล์ว และท่อ เป็นต้น โดยผู้ใช้นำแบบจำลองอุปกรณ์เหล่านี้มาทำการต่อเข้าด้วยกัน เพื่อจำลองกระบวนการเสมือนจริงและตั้งภาวะในการดำเนินการจริงหรือภาวะที่ต้องการทราบผลลัพธ์ทางกระบวนการ โดยการกำหนดภาวะของกระแสขาเข้าและภาวะดำเนินการบางประการที่จำเป็นในแต่ละหน่วยปฏิบัติการ เพื่อให้โปรแกรมสามารถคำนวณภาวะที่ยังขาดอยู่ได้ เช่น ปริมาณผลิตภัณฑ์ พลังงานที่ป้อนเข้า หรือ ผลลัพธ์ของกระบวนการ อัตราส่วน และความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อออกแบบกระบวนการก่อให้เกิดประโยชน์หลายประการ เช่น

- ใช้คำนวณหาภาวะที่เหมาะสมในการควบคุมกระบวนการให้มีประสิทธิภาพ
- ลดค่าใช้จ่ายในการสร้างโรงงานต้นแบบ (Pilot plant)
- ช่วยวางแผนการผลิตล่วงหน้า
- คาดเดาผลลัพธ์ของกระบวนการที่จะเกิดขึ้นได้
- ไม่สิ้นเปลืองงบประมาณและลดเวลาที่ใช้ในการทดสอบในกระบวนการจริง

โปรแกรม Aspen Plus จัดเป็นหนึ่งในโปรแกรมที่นิยมใช้กันมากทั่วโลก โดยบริษัท AspenTech, Inc. ขั้นตอนการใช้งานแบ่งออกเป็น

1. ระบุองค์ประกอบ (Chemical components) ทำการเพิ่มสารเคมีทั้งหมดที่ใช้ในกระบวนการจำลอง โดยเลือกจาก Aspen Plus databanks หรือ สารที่ไม่มีอยู่ใน Aspen Plus databanks ด้วยการระบุสารได้เอง
2. ระบุวิธีการที่ใช้ในการคำนวณหาคุณสมบัติทางกายภาพ (Physical properties) ขององค์ประกอบที่ผสมอยู่ในกระบวนการ
3. การสร้าง Process flowsheet โดยวิธีการสร้าง Process flowsheet มีวิธีการคร่าว ๆ ดังนี้
 - กำหนดอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการทั้งหมด

- เลือกแบบจำลองของอุปกรณ์จาก Aspen Plus Model Library แล้ววางบน Process flowsheet
- กำหนดกระแสการไหล (Streams) และ ตั้งชื่อกระแสการไหล
- เชื่อมกระแสการไหลเข้าไปยังอุปกรณ์ในกระบวนการที่อยู่บน Process flowsheet

4. ตั้งค่าองค์ประกอบ อัตราการไหล อุณหภูมิและความดันของกระแสการไหลที่ป้อนเข้ากระบวนการ

5. ระบุภาวะ (Operating conditions) สำหรับแต่ละอุปกรณ์ในกระบวนการ

เมื่อทำตามขั้นตอนทั้ง 5 เสร็จแล้ว ก็สั่งโปรแกรมคำนวณ (RUN) เพื่อให้ระบบคำนวณผลลัพธ์ของกระบวนการจำลองออกมา โดยการคำนวณของโปรแกรม Aspen Plus เป็นการใช้หลักของ ดุลมวล (Material balance) ในภาวะคงตัว (Steady state)

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Krittaya และคณะ (2019) [32] นำยางธรรมชาติมาขึ้นรูปเป็นโฟมยางสำหรับการดูดซับ CO₂ โดยความสามารถในการดูดซับ CO₂ ของโฟมน้ำยางธรรมชาติที่ผลิตโดยการผสมกับเครื่องผสมเค้ก (CM) จะสูงกว่าที่ผลิตด้วยเครื่องกวนสารแบบใบกวน (OS) แต่ค่าความจุ CO₂ ทั้งสองก็ยังคงต่ำ เพื่อปรับปรุงความสามารถในการดูดซับ CO₂ จึงได้มีการผสมใช้นอนุภาคซิลิกาที่ก่อนและหลังการตัดแปรด้วย 3-aminopropyltriethoxysilane ในโฟมยาง CM โฟมยาง CM ที่เติมอนุภาคซิลิกาตัดแปร 5 ส่วนโดยน้ำหนักต่อยางร้อยละ (phr) (4.08 mg/g) มีความสามารถในการดูดซับ CO₂ ของโฟมยางอยู่ที่ประมาณ 1.11 เท่าของโฟมยาง CM ที่เติมอนุภาคซิลิกาที่ไม่ผ่านการตัดแปร (3.69 mg/g) และเป็น 2.87 เท่าของโฟมยาง CM (1.42 mg/g) ตามลำดับ การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาพบว่าขนาดและจำนวนรูพรุนต่อเซลล์ของโฟมยาง CM สูงกว่าโฟม OS การดูดซับ CO₂ ของวัสดุดูดซับมีทั้งการดูดซับทางกายภาพระหว่างโฟมยางที่เตรียมโดยวิธีที่ต่างกันและการดูดซับทางเคมีที่เกิดจากการเติมอนุภาคซิลิกาหลังผ่านการตัดแปร

Krittaya และคณะ (2020) [33] ยางธรรมชาติแห้งถูกนำมาเตรียมเป็นวัสดุดูดซับ CO₂ เพื่อแก้ปัญหาข้อเสียของการใช้น้ำยางธรรมชาติเป็นตัวดูดซับ โดยศึกษาผลของประเภทสารตัดแปรต่อความสามารถในการดูดซับ CO₂ ของคอมพอสิตยางธรรมชาติ/ซิลิกาภายใต้อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ โดยความสามารถในการดูดซับ CO₂ ของวัสดุคอมพอสิตยางธรรมชาติ/ซิลิกาเพิ่มขึ้นจาก 1.81 เป็น 6.71 mg/g หลังจากเติมอนุภาคซิลิกาที่ตัดแปรโดย 3-aminopropyltrimethoxysilane โดยวัสดุคอมพอสิตยางธรรมชาติ/ซิลิกาที่ตัดแปรโดย 3-aminopropyltrimethoxysilane มีความสามารถในการดูดซับ CO₂ สูงกว่าการใช้สารตัดแปรชนิด

N - [(3-trimethoxysilyl) propyl] ethylenediamine หรือ N - [(3-trimethoxysilyl)propyl] diethylenetriamine นอกจากนี้พบว่าอุณหภูมิในการดูดซับที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้โซ่ของสารดัดแปรมีความยืดหยุ่นมากขึ้น มีความสามารถในการจับ CO₂ สูงขึ้น

จารุวรรณ (2561) [12] ปรับปรุงตัวดูดซับของแข็งให้มีความสามารถในการดักจับ CO₂ สูงขึ้น งานวิจัยนี้ได้ทำการปรับปรุงความสามารถในการดักจับ CO₂ จากแก๊สเสียด้วยตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนแกมมา-ออลูมินา ตัวแปรในการปรับปรุงการเตรียมตัวดูดซับด้วยวิธีอิมเพรกเนชัน ได้แก่ ชนิดเบสที่แตกต่างกัน 4 ชนิด ค่าความเป็นเบสของสารละลายที่ใช้ในการเตรียมตัวดูดซับในช่วง 8 ถึง 12 และระยะเวลาที่ใช้ในการเตรียมตัวดูดซับในช่วง 12 ถึง 24 ชั่วโมง พบว่าการเตรียมตัวดูดซับในภาวะเบสทำให้พื้นที่ผิว ปริมาณโลหะกัมมันต์การกระจายตัวของโพแทสเซียมคาร์บอเนต และค่าความเป็นเบสบนผิวของตัวดูดซับมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นการเตรียมตัวดูดซับด้วยวิธีอิมเพรกเนชันในภาวะเบสจะให้ตัวดูดซับที่มีความสามารถในการดูดซับได้ดีกว่าการเตรียมตัวดูดซับแบบดั้งเดิม นอกจากนี้ได้ศึกษาแบบจำลองการดูดซับทั้ง 3 แบบ คือแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม และแบบจำลองการเชื่อมสภาพ พบว่าแบบจำลองการเชื่อมสภาพเหมาะสมที่สุดในการอธิบายจลนศาสตร์ของตัวดูดซับ

บุญญาและพิมพ์ิกา (2561) [13] พัฒนาวัสตุดูดซับ CO₂ จากน้ำยางธรรมชาติดัดแปรด้วยไดแอลลิลเอมีน (Diallylamine) โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติดัดแปรถูกวิเคราะห์โดยเครื่องฟูเรียร์ ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ จากนั้นนำน้ำยางธรรมชาติดัดแปรไปขึ้นรูปให้เป็นโฟมยางและเติมซิลิกา เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการดักจับ CO₂ สำหรับการดัดแปรพื้นผิวของอนุภาคซิลิกา จะเติมตัวประสานประเภทไซเลน เพื่อทำให้การกระจายตัวของอนุภาคซิลิกาในยางธรรมชาติดัดแปรดีขึ้นและเติมเตตระเอทิลีนเพนตามีน เพื่อเพิ่มความจุการดูดซับ CO₂ ด้วยหมู่เอมีน ยางธรรมชาติดัดแปรที่ผสมซิลิกาอิมตัวด้วยเตตระเอทิลีนเพนตามีน มีค่าความจุการดูดซับ CO₂ 3.59 มิลลิกรัมต่อกรัมที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดันบรรยากาศปกติ

บทที่ 3

เครื่องมือและวิธีการดำเนินงาน

3.1 สารเคมีและวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องมือที่ใช้ในการขึ้นรูปวัสดุอุดซึบจากยางธรรมชาติและยางธรรมชาติผสมโพลีเอทิลีนคาร์บอเนต ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องมือ	รุ่น/ยี่ห้อ
เครื่องตีเค้ก	ยี่ห้อ OTTO รุ่น HM273 ประเทศไทย
ตู้อบสาร	ยี่ห้อ WTB Binder รุ่น FD115 ประเทศสหรัฐอเมริกา
เครื่องชั่งสาร	ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น PB3002-S ประเทศ สวิสเซอร์แลนด์
เทปให้ความร้อน	-
ถุงมือยางไนไตรล์	ยี่ห้อ Touch-N-Tuff รุ่น 92-600
ปิកเกอร์ขนาด 50 ml	-
หลอดหยดสารพลาสติก	-
แท่งแก้วคนสาร	-
ช้อนตักสาร	-
ถาดแก้วขนาด 30x30 cm	-
ไม้พาย	-

3.1.2 สารตั้งต้นและสารเคมี

สารเคมีที่ใช้ในการขึ้นรูปวัสดุอุดซึบจากยางธรรมชาติและยางธรรมชาติผสมโพลีเอทิลีนคาร์บอเนต แสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สารตั้งต้นและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

สารเคมี	เกรด/บริษัท
Natural rubber	60% DRC HAL สถาบันวิจัยยาง (ประเทศไทย)
Potassium oleate	10%wt Technical สถาบันวิจัยยาง (ประเทศไทย)
Sulfur	50%wt Technical สถาบันวิจัยยาง (ประเทศไทย)
Zinc diethyl thiocarbamate	50%wt Technical สถาบันวิจัยยาง (ประเทศไทย)
Zinc 2-mercaptobenzothiazole	50%wt Technical สถาบันวิจัยยาง (ประเทศไทย)
Wingstray L	50%wt Technical สถาบันวิจัยยาง (ประเทศไทย)
Diphenyl guanidine	33%wt Technical สถาบันวิจัยยาง (ประเทศไทย)
Zinc oxide	50%wt Technical สถาบันวิจัยยาง (ประเทศไทย)
Sodium silicofluoride	12.5%wt Technical สถาบันวิจัยยาง (ประเทศไทย)
Potassium carbonate	AR บริษัท Qrec chemical (ประเทศไทย)
Nitrogen gas	ไทย เจแปน แก๊ส จำกัด (ประเทศไทย)
Nitrogen mixed Carbon dioxide 12%	ไทย เจแปน แก๊ส จำกัด (ประเทศไทย)

3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

เครื่องมือวิเคราะห์ใช้ในการวิเคราะห์วัสดุดูดซับจากยางธรรมชาติและยางธรรมชาติผสมโพแทสเซียมคาร์บอเนต แสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 เครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้ในงานวิจัย

เครื่องมือวิเคราะห์	รุ่น/สถาบันวิจัย
ชุดอุปกรณ์ทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์	-
Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)	ศูนย์บริการวิเคราะห์ทดสอบ ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2 การดำเนินงานวิจัย

3.2.1 การเตรียมวัสดุทดสอบจากยางธรรมชาติ

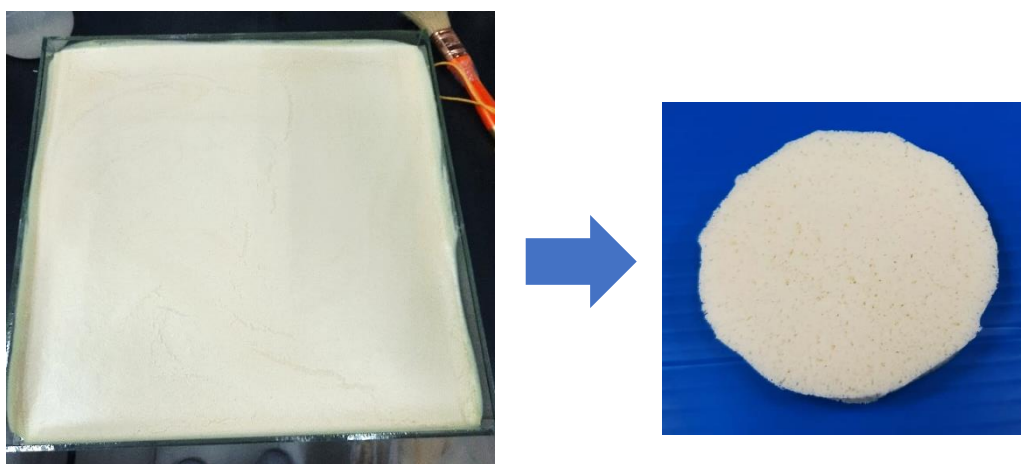
ตารางที่ 3.4 แสดงสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมวัสดุทดสอบจากยางธรรมชาติและยางธรรมชาติผสม โพลีเอทิลีนคาร์บอเนต โดยขั้นตอนการเตรียมมีดังต่อไปนี้ ขั้นแรกเติมสารเคมี set A ลงในน้ำยางธรรมชาติที่ใส่ อยู่ในเครื่องตีเค้ก กวนผสมกันเป็นเวลา 10 นาที เติมสารเคมี set B ลงไปและปั่นต่อเป็นเวลา 1 นาที ต่อมาเติม สารเคมี set C ผสมเป็นเวลา 1 นาที สุดท้ายเติมสารเคมี set D ลงไปปั่นกวนต่ออีก 30 วินาที หลังจากนั้นนำไป ยางคอมพาวนด์เทลงถาดแก้ว เกลี่ยให้ทั่วและนำเข้าตู้อบสารที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ใน ส่วนของการเตรียมยางธรรมชาติผสมโพลีเอทิลีนคาร์บอเนตปฏิบัติเหมือนกับการเตรียมยางธรรมชาติ แต่มีการ เพิ่มโพลีเอทิลีนคาร์บอเนตลงไปในสารเคมี set A

ตารางที่ 3.4 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมยางธรรมชาติและยางธรรมชาติผสมโพลีเอทิลีนคาร์บอเนต

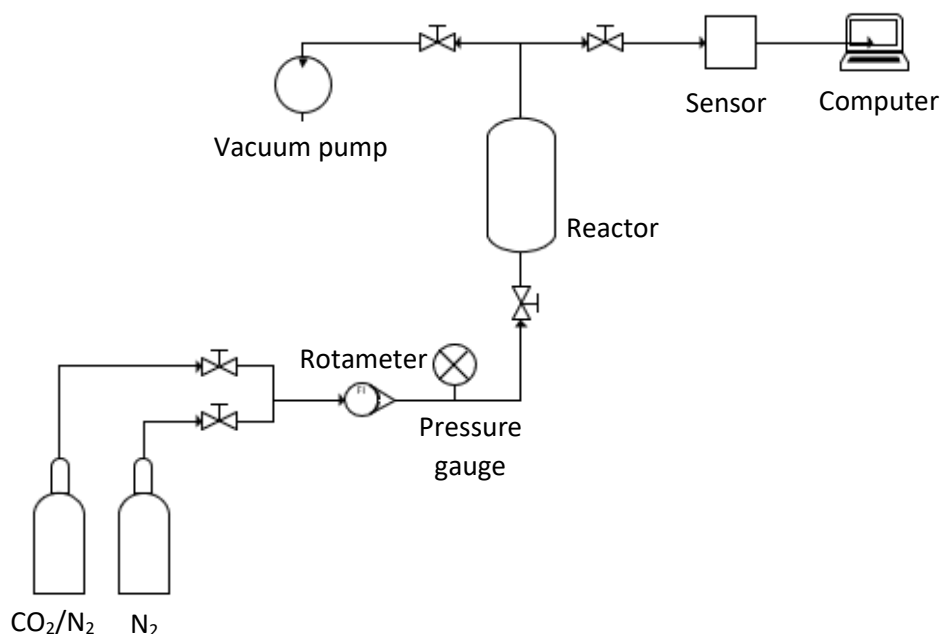
Set	Ingredient	NR (phr)	NR-5K	NR-10K	NR-15K
-	60% น้ำยางธรรมชาติ	100	100	100	100
A	10% โพลีเอทิลีนโอลิเอต	15	15	15	15
	50% โพลีเอทิลีนคาร์บอเนต	-	5	10	15
B	50% ซัลเฟอร์	4	4	4	4
	50% ซิงก์ไดเมทิลไดไทโอคาร์บาเมต	2	2	2	2
	50% ซิงก์เมอร์แคปโตเบนโซไทอะโซล	2	2	2	2
	50% วิงสเตย์แอล	2	2	2	2
C	33% ไดฟีนิลกัวนิดีน	2	2	2	2
	50% ซิงก์ออกไซด์	10	10	10	10
D	12.5% โซเดียมซิติโคฟลูออไรด์	8	8	8	8

3.2.2 การทดสอบหาความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในวัสดุดูดซับ

นำวัสดุดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่เตรียมไว้มาตัดเป็นแผ่นให้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.5 เซนติเมตร (รูปที่ 3.1) ความหนา 1.5-2 เซนติเมตรและน้ำหนักประมาณ 3-4 กรัมบรรจุลงในเครื่องปฏิกรณ์ (Reactor) ซึ่งประกอบเข้ากับชุดทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ดังแสดงรูปที่ 3.2 เป็นแผนภาพระบบดูดซับที่ใช้ในการทดลอง หลังจากบรรจุวัสดุดูดซับลงในเครื่องปฏิกรณ์แล้ว จะให้ความร้อนโดยใช้เทปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ภายใต้ภาวะสูญญากาศ เป็นเวลา 20 นาที เพื่อเป็นการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในวัสดุดูดซับและดูดอากาศรวมถึงแก๊สต่าง ๆ ที่อยู่ภายในเครื่องปฏิกรณ์ออก จากนั้นทำการเปิดโปรแกรม Gaslab 2.1 ที่คอมพิวเตอร์ ซึ่งเป็นโปรแกรมที่แสดงค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เซ็นเซอร์สามารถตรวจวัดได้ ต่อสายแก๊สไนโตรเจนเข้าเครื่องปฏิกรณ์ โดยกำหนดอัตราการไหลเข้า 100 cc/min เพื่อไล่คาร์บอนไดออกไซด์ออกจากระบบภายในเครื่องปฏิกรณ์จนเหลือคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำกว่า 0.1% โดยปริมาตร จากนั้นเปลี่ยนเป็นสายแก๊สผสมระหว่างไนโตรเจน 88% และคาร์บอนไดออกไซด์ 12% โดยปริมาตร ต่อเข้าเครื่องปฏิกรณ์โดยควบคุมการไหลของแก๊สผสมเข้า 100 cc/min เป็นเวลา 5 นาที โปรแกรมจะแสดงค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (ร้อยละโดยปริมาตร) ต่อเวลา (วินาที) จนกระทั่งความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นไปถึงระดับสูงสุด ร้อยละความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกที่ได้มาวิเคราะห์หาความจุในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของวัสดุดูดซับและกราฟระหว่างโมลของคาร์บอนไดออกไซด์กับเวลาเพื่อศึกษาแบบจำลองทางจลศาสตร์ต่อไป



รูปที่ 3.1 วัสดุดูดซับจากยางธรรมชาติผสมโพแทสเซียมคาร์บอเนต และนำไปตัดเป็นวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.5 เซนติเมตร



รูปที่ 3.2 แผนภาพระบบดูดซับของเครื่อง CO₂ Analyzer

3.2.3 การทดสอบหาความจุการดูดซับ CO₂ ในวัสดุดูดซับที่อุณหภูมิต่าง ๆ

การทดสอบด้วยกระบวนการเดียวกับการหาความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ แต่จะให้ความร้อนในขณะเปลี่ยนแปลงเป็นสายแก๊สผสมระหว่างไนโตรเจน 88% และคาร์บอนไดออกไซด์ 12% โดยปริมาตร ต่อเข้าเครื่องปฏิกรณ์โดยควบคุมการไหลของแก๊สผสมเข้า 100 cc/min เป็นเวลา 5 นาที โปรแกรมจะแสดงค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (ร้อยละโดยปริมาตร) ต่อเวลา (วินาที) จนกระทั่งความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นไปถึงระดับสูงสุด ร้อยละความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกที่ได้มาวิเคราะห์หาความจุในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของวัสดุดูดซับและกราฟระหว่างโมลของคาร์บอนไดออกไซด์กับเวลาเพื่อศึกษาแบบจำลองทางจลศาสตร์ต่อไป

3.2.4 การคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับ CO₂

ผลการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ CO₂ ตามเวลาที่ได้จากการบันทึกค่าของเซ็นเซอร์ สามารถนำมาคำนวณความสามารถในการดูดซับ CO₂ ตาม สมการ (3.1)

$$q = \frac{1}{m} \int_0^t Q(C_{in} - C_{out}) dt \quad (3.1)$$

- เมื่อ q คือ ความสามารถในการดูดซับ CO_2 (มิลลิกรัม CO_2 ต่อกรัมตัวดูดซับ)
 m คือ มวลของตัวดูดซับ (กรัม)
 C_{in} คือ ความเข้มข้นของ CO_2 ขาเข้า (% โดยน้ำหนัก)
 C_{out} คือ ความเข้มข้นของ CO_2 ขาออก (% โดยน้ำหนัก)
 Q คือ อัตราการไหลของแก๊สโดยมวล (กรัมต่อวินาที)
 t คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับ (วินาที)

3.2.5 การศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับ

ข้อมูลที่บันทึกได้จากเซนเซอร์วัดความเข้มข้นของ CO_2 คือ ความเข้มข้นของ CO_2 ที่ระยะเวลาต่างๆ ดังนั้นค่าที่ถูกรับบันทึกจะถูกนำมาใช้ในการคำนวณเพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสมกับตัวดูดซับ CO_2 โดยในงานวิจัยนี้จะทำการหาจลนศาสตร์ที่เหมาะสมของตัวดูดซับจากโปรแกรม Matlab ซึ่งเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่มีฟังก์ชัน Curve fitting ใช้สำหรับการสร้างกราฟความสัมพันธ์และหาค่าคงที่ของข้อมูลในสมการรูปแบบต่าง ๆ ที่ต้องการได้ อีกทั้งยังแสดงค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (R-Squared) เพื่อพิจารณาความน่าเชื่อถือของข้อมูล โดยมีวิธีดังต่อไปนี้

1. สร้างตารางและใส่ข้อมูลใน Command windows เพื่อใช้สำหรับใส่ข้อมูลของเวลา, ความเข้มข้นของ CO_2 และค่าความสามารถในการดูดซับ CO_2
2. ทำการสร้างกราฟโดยเลือกฟังก์ชัน Curve fitting
3. เลือกข้อมูลเวลาที่ใช้การดูดซับเป็นแกน x และข้อมูลแกน y ตามจลนศาสตร์ที่ต้องการศึกษา
4. เลือกรูปแบบการจัดสมการเอง (Custom equation) และใส่สมการจลนศาสตร์ที่ต้องการศึกษา
 - การหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาของแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมและปฏิกิริยาอันดับสองเทียม จากสมการที่ (2.4) และ (2.6) จะนำข้อมูลที่บันทึกได้มาพล็อตกราฟ โดยจัดรูปให้อยู่ในรูปสมการระหว่างความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ (q_t) และระยะเวลา (t)
 - การหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาของแบบจำลองการเสื่อมสภาพ จากสมการที่ (2.8) จะนำข้อมูลที่บันทึกได้มาพล็อตกราฟ โดยจัดรูปให้อยู่ในรูปการณแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ CO_2 ขาออกและเวลา
5. แทนค่าตัวแปรที่ทราบค่าลงในสมการ และปรับช่วงการหาค่าตัวแปรที่ต้องการทราบของโปรแกรม
6. ทำการเก็บค่าตัวแปร ค่าคงที่

3.2.6 การหาค่าพารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์

จากแบบจำลองการเสื่อมสภาพ เมื่อได้ค่าคงที่ของอัตราการดูดซับเริ่มต้น (k_0) และค่าคงที่อัตราการเสื่อมสภาพ (k_d) สามารถนำค่าคงที่มาอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์กับอุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับในรูปแบบของอาร์เรเนียส (Arrhenius's form)

$$\ln k_0 \text{ or } \ln k_d = \ln A - \frac{E_a}{RT} \quad (3.2)$$

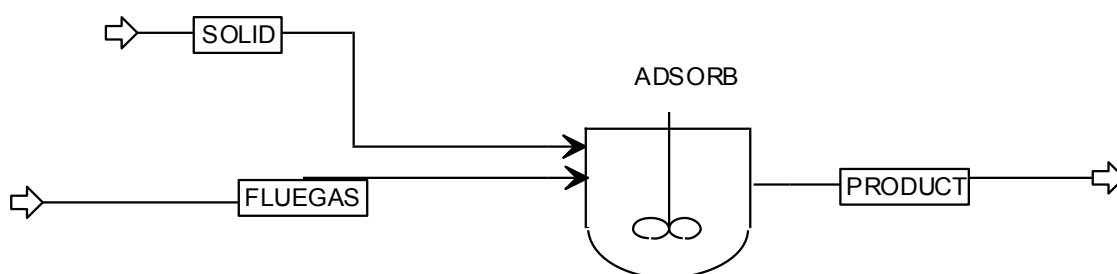
เมื่อ R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส ($8.314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$)

A คือ Frequency factor หรือ Pre-exponential factor

E_a คือ พลังงานกระตุ้น (กิโลจูลต่อกิโลโมล)

3.2.7 การสร้างแบบจำลองการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์

ในงานวิจัยนี้สร้างแบบจำลองการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ของวัสดุดูดซับจากยางธรรมชาติผสมโพแทสเซียมคาร์บอเนตด้วยโปรแกรมจำลองกระบวนการ Aspen Plus V.11.0 โดยใช้ข้อมูลทางจลนศาสตร์ตัวดูดซับที่ได้จากหัวข้อ 3.6.2 มาใช้ในการสร้างแบบจำลองการดูดซับที่ภาวะต่าง ๆ โดยรูปที่ 3.3 แสดงแบบจำลองการดักจับ CO_2 ด้วยวัสดุดูดซับจากยางธรรมชาติผสมโพแทสเซียมคาร์บอเนต



รูปที่ 3.3 แบบจำลองการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยวัสดุดูดซับจากยางธรรมชาติผสมโพแทสเซียมคาร์บอเนต

โดยกระบวนการคาร์บอนไดออกไซด์จะเริ่มจากแก๊สเผาไหม้ (Flue gas) และวัสดุดูดซับผ่านเข้ากระบวนการดูดซับ โดยในกระบวนการนี้จะใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ (CSTR) เพราะความเข้มข้นของ

คาร์บอนไดออกไซด์เท่ากันตลอดทั้งระบบ ทำให้ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ไม่มีผลต่อการดูดซับ โดยมีภาวะดำเนินการในหอดูดซับในตารางที่ 3.5 และตัวแปรที่จะศึกษาจะแสดงในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.5 ภาวะในการสร้างแบบจำลองการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

Base Method	NTRL
Input mode	Steady state
Steam class	MIXCISLD
Ambient pressure:	1.01325 บาร์
ปฏิกิริยาในการดูดซับ	
ID	Adsorption
Type	POWERLAW
Reaction type	Kinetic
Stoichiometry	$K_2CO_3(CISOLID) + CO_2 + H_2O \rightarrow 2KHCO_3(CISOLID)$
Reaction phase	Vapor
Solids	Reacting phase and solid phase
k (Exponential factor)	0.00275
E (Activation energy)	-9,709.09 กิโลโมลต่อกิโลจูล
หอดูดซับ	
อัตราการป้อนเข้าของ CO ₂	12 %vol
อัตราส่วนระหว่าง NR : K ₂ CO ₃	85:15 โดยน้ำหนัก
Pressure:	1 บาร์
Resident time	300 วินาที
Kinetics Adsorption	$K_2CO_3(CISOLID) + CO_2 + H_2O \rightarrow 2KHCO_3(CISOLID)$

ตารางที่ 3.6 ตัวแปรต่าง ๆ ที่ต้องการศึกษาในการสร้างแบบจำลองการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

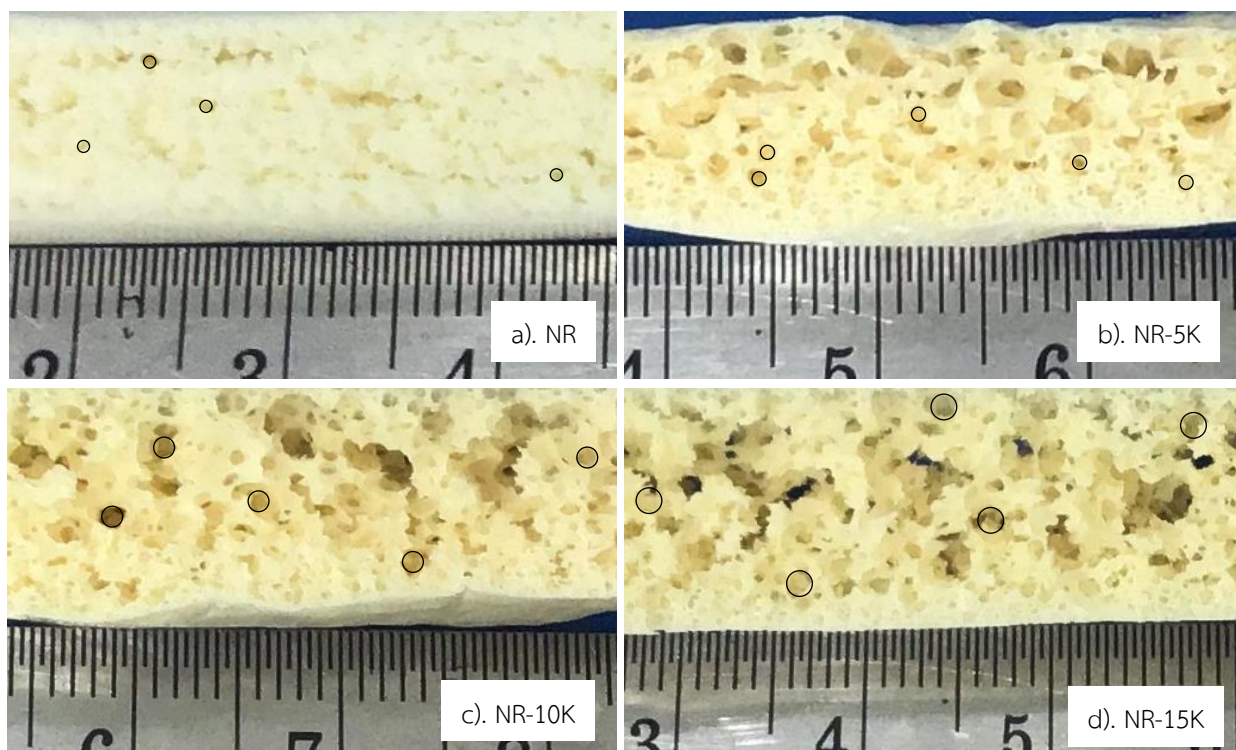
ตัวแปรที่จะศึกษา	ค่า	Ref
อุณหภูมิในการดูดซับ	40 60 80 °C	[12]
ปริมาณน้ำ	7 13.5 22.5 %vol	
อัตราการไหลของแก๊ส	0.075 0.15 0.2 ml/min	[32]
อุณหภูมิของแก๊สขาเข้า	50 60 70 °C	

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ลักษณะทางกายภาพของยางธรรมชาติผสมโพแทสเซียมคาร์บอเนต

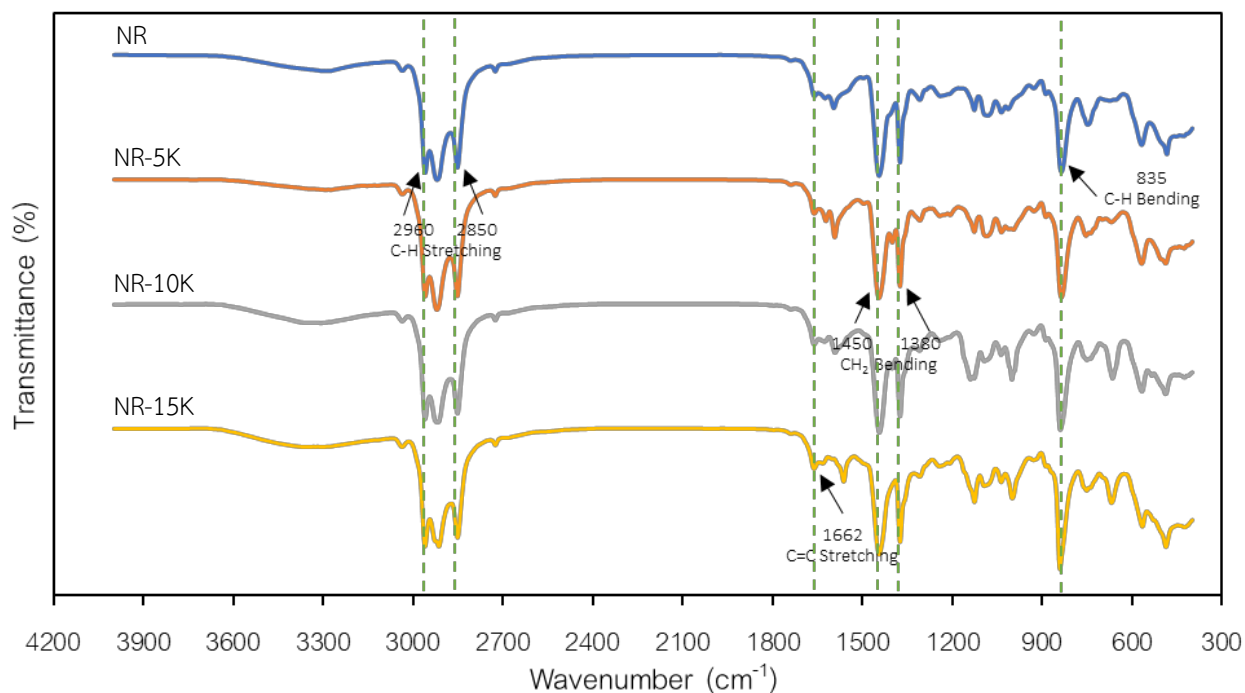
รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวัสดุดูดซับจากการธรรมชาติผสมโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้นต่าง ๆ โดยใช้กล้องถ่ายภาพจาก Ipad Gen 6 พบว่าลักษณะรูพรุนของวัสดุดูดซับมีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อปริมาณโพแทสเซียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น โดยวัสดุดูดซับจากยางธรรมชาติมีขนาดรูพรุนเฉลี่ย 0.5 มิลลิเมตร และวัสดุดูดซับจากยางธรรมชาติผสมโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ 5, 10, 15 phr มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยเท่ากับ 0.75, 1.25 และ 1.5 มิลลิเมตร ตามลำดับ นอกจากนี้สีของวัสดุดูดซับจากยางธรรมชาติหลังเติม K_2CO_3 มีสีเหลืองเข้มเมื่อเปรียบเทียบกับสีของวัสดุดูดซับจากยางธรรมชาติที่ไม่ได้ทำการเติม K_2CO_3 ซึ่งมีสีเหลืองอ่อน



รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายตัดขวาง (Cross section) จากกล้องถ่ายภาพ Ipad Gen 6 ของวัสดุดูดซับจากยางธรรมชาติ และยางธรรมชาติผสมโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ปริมาณ 0, 5, 10 และ 15

4.2 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับด้วยเทคนิค FTIR

รูปที่ 4.2 แสดง FTIR สเปกตรัมของวัสดุดูดซับจากยางธรรมชาติและวัสดุดูดซับจากยางธรรมชาติผสมโพแทสเซียมคาร์บอเนต พบพีกยางธรรมชาติที่เลขคลื่น 2960-2850 เซนติเมตร⁻¹ แสดงการสั่นของพันธะ C-H แบบยืดหด (Stretching) การสั่นของพันธะ C=C แบบยืดหดที่เลขคลื่น 1662 เซนติเมตร⁻¹ การสั่นของพันธะ CH₂ แบบงอ (Bending) ที่เลขคลื่น 1450 และ 1380 เซนติเมตร⁻¹ การสั่นของพันธะ C-H แบบงอที่เลขคลื่น 835 เซนติเมตร⁻¹ [34] การเติมโพแทสเซียมคาร์บอเนตไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันของวัสดุดูดซับจากยางธรรมชาติ จึงสังเกตได้ว่า FTIR สเปกตรัมของวัสดุดูดซับยางธรรมชาติร่วมกับ K₂CO₃ มีสเปกตรัมไม่แตกต่างจากวัสดุดูดซับจากยางธรรมชาติ

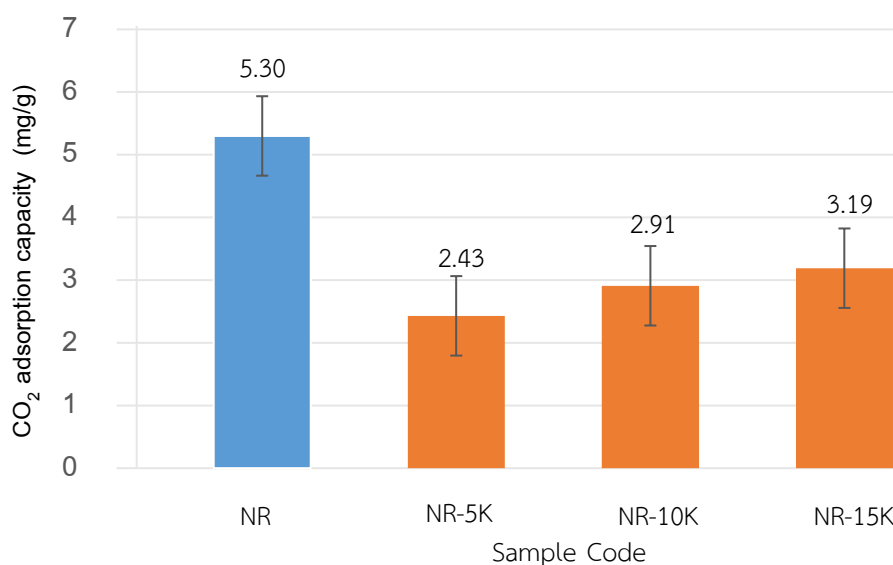


รูปที่ 4.2 FTIR สเปกตรัมของวัสดุดูดซับจากยางธรรมชาติผสมโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ปริมาณต่าง ๆ

4.3 ความสามารถในการดูดซับของวัสดุดูดซับจากยางธรรมชาติ

4.3.1 ผลของปริมาณโพแทสเซียมคาร์บอเนตต่อความสามารถในการดูดซับ

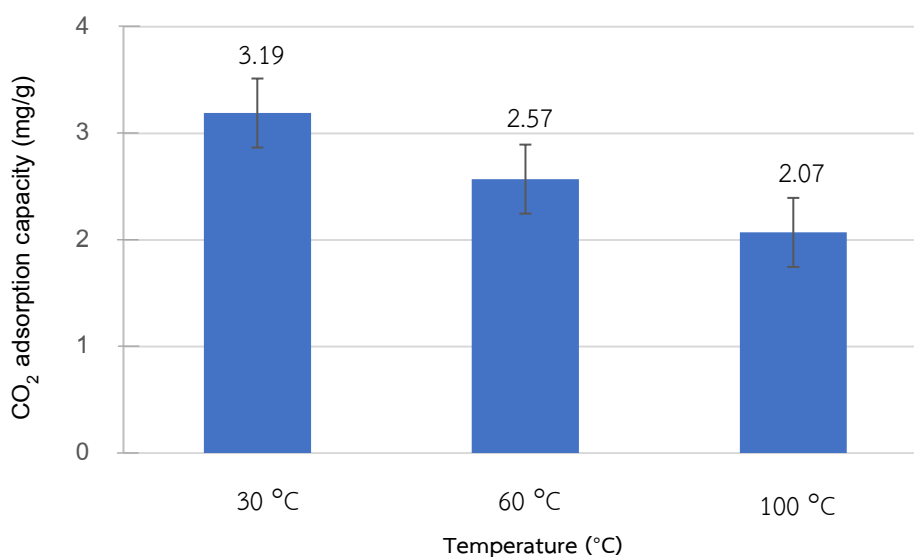
งานวิจัยนี้ได้มีการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับ CO_2 ของตัวดูดซับยางธรรมชาติผสมโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ปริมาณ 5 10 และ 15 phr เพื่อศึกษาผลของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ค่าความสามารถในการดูดซับถูกคำนวณผ่านสมการ (3.1) ผลการทดลองการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ แสดงดังกราฟที่ 4.1 พบว่าการเติมโพแทสเซียมคาร์บอเนตส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุดูดซับจากยางธรรมชาติ ซึ่งมีผลมาจากลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวัสดุดูดซับยางธรรมชาติที่ผสมโพแทสเซียมคาร์บอเนต แสดงขนาดของรูพรุนในวัสดุที่ใหญ่ขึ้น การเคลื่อนที่ของโมเลกุลคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ ทำให้การเกิดอันตรกิริยาระหว่างวัสดุดูดซับลดลง แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มปริมาณโพแทสเซียมคาร์บอเนตส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับของวัสดุดูดซับจากยางธรรมชาติผสมโพแทสเซียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเติมโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่เพิ่มขึ้น เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวของการดูดซับ ทำให้โมเลกุลของ CO_2 เกิดปฏิกิริยาเคมีกับโพแทสเซียมคาร์บอเนตดังสมการที่ (2.2) แต่อย่างไรก็ตาม ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวัสดุดูดซับจากยางธรรมชาติโพแทสเซียมคาร์บอเนตมีรูพรุนของวัสดุที่ใหญ่กว่า ทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับ CO_2 ยังคงน้อยกว่าวัสดุดูดซับยางธรรมชาติ จากผลการทดลองพบว่าการเพิ่มปริมาณ K_2CO_3 ที่ 15 phr ให้ค่าการดูดซับ CO_2 สูงสุด ดังนั้นในการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อความสามารถในการดูดซับโดยผู้วิจัยได้เลือกวัสดุดูดซับจากยางธรรมชาติผสมโพแทสเซียมคาร์บอเนต 15 phr เพื่อไปทำการศึกษาต่อ



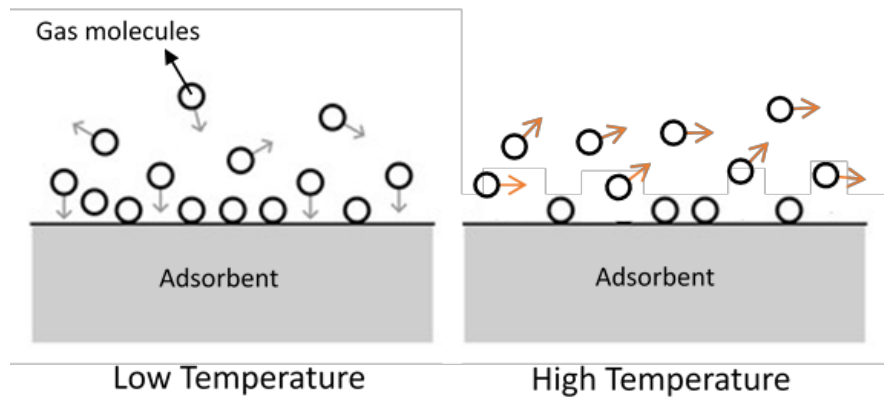
กราฟที่ 4.1 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยของวัสดุดูดซับจากยางธรรมชาติผสมโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ปริมาณต่าง ๆ

4.3.2 ผลของอุณหภูมิต่อความสามารถในการดูดซับ

ผลของอุณหภูมิที่ต่างกัน (30, 60 และ 100 องศาเซลเซียส) ต่อความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของวัสดุดูดซับจากยางธรรมชาติผสมโพแทสเซียมคาร์บอเนต 15 phr ที่ภาวะความดันบรรยากาศ แสดงดังกราฟที่ 4.2 พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น ค่าความสามารถในการดูดซับ CO₂ ลดลง เนื่องจากปฏิกิริยาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน เป็นผลมาจากเกิดการสร้างพันธะเคมีระหว่างโพแทสเซียมคาร์บอเนตกับคาร์บอนไดออกไซด์ อีกทั้งการเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดการผันกลับตามสมการที่ (2.1) เกิดการคายการดูดซับของคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิก้ส่งผลต่อพลังงานจลน์ของแก๊สให้เพิ่มสูงขึ้น ทำให้แก๊สเกิดการแพร่กระจายได้เร็วขึ้น โมเลกุลของแก๊สสามารถเคลื่อนที่ผ่านพื้นผิวของวัสดุดูดซับหรือเคลื่อนที่ผ่าน Adsorption site อย่างรวดเร็ว (รูปที่ 4.3) ทำให้ค่าความสามารถการดูดซับลดลง



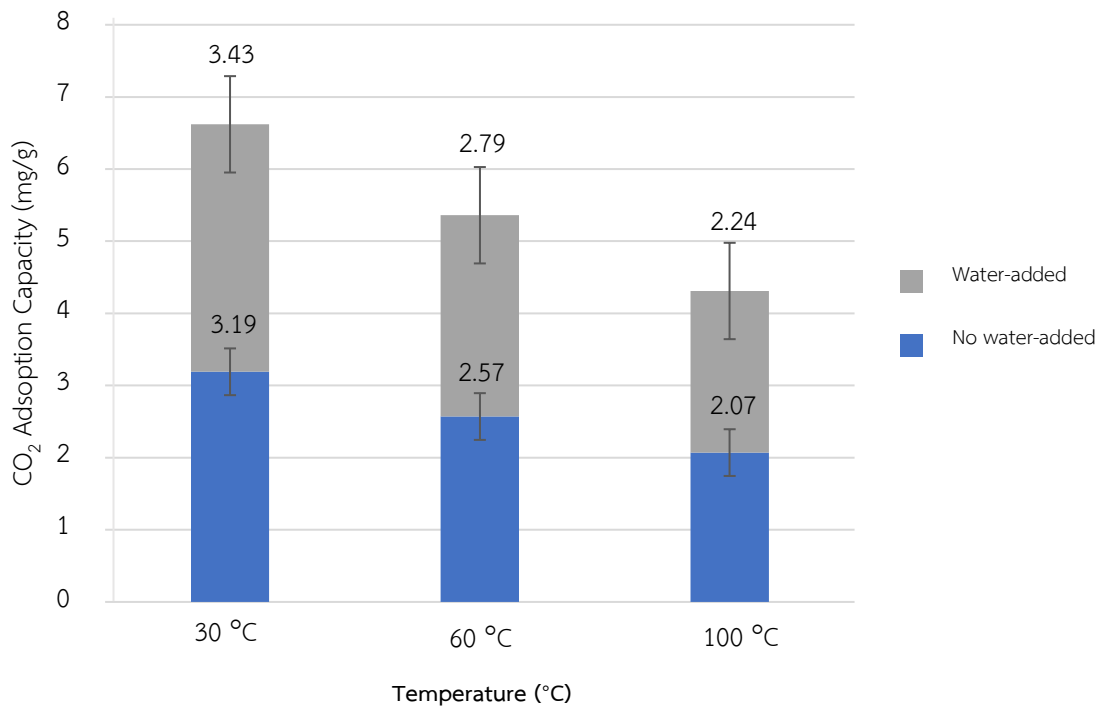
กราฟที่ 4.2 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยของ NR-15K ที่อุณหภูมิต่าง ๆ



รูปที่ 4.3 การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น

4.3.3 ผลของน้ำต่อความสามารถในการดูดซับ

ความสามารถการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของวัสดุดูดซับจากยางธรรมชาติผสม K_2CO_3 ในกรณีที่มีน้ำและไม่มีน้ำ แสดงดังกราฟที่ 4.3 พบว่าการดูดซับ CO_2 ในกรณีที่มีน้ำสูงกว่ากรณีที่ไม่มีน้ำในทุก ๆ อุณหภูมิในการดูดซับ เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างโพแทสเซียมคาร์บอเนตและคาร์บอนไดออกไซด์จะต้องมีน้ำเป็นองค์ประกอบด้วยตามสมการที่ (2.1) เมื่อมีปริมาณน้ำเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ปฏิกิริยาไปข้างหน้ามากขึ้น ความสามารถในการดูดซับ CO_2 จึงเพิ่มสูงขึ้น



กราฟที่ 4.3 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยของ NR-15K กรณีที่มีน้ำและไม่มีน้ำ

4.4 การศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับของวัสดุดูดซับจากยางธรรมชาติผสมโพแทสเซียมคาร์บอเนต

ตัวดูดซับแต่ละชนิดมีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับต่างกัน ดังนั้นงานวิจัยจึงได้ศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับของวัสดุดูดซับจากยางธรรมชาติ เพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสมกับวัสดุดูดซับที่ถูกพัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ ซึ่งมีการศึกษาจลนศาสตร์ที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบคือแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียมและแบบจำลองการเสื่อมสภาพ

4.4.1 แบบจำลองจลนศาสตร์ของวัสดุดูดซับโดยเติมโพแทสเซียมคาร์บอเนตในปริมาณต่างๆ

วัสดุดูดซับจากยางธรรมชาติผสมโพแทสเซียมคาร์บอเนตจะนำมาพิจารณาการดูดซับที่อุณหภูมิห้อง (30 °C) และภาวะความดันบรรยากาศ แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าคงที่ปฏิกิริยาของแบบจำลองจลนศาสตร์รูปแบบต่าง ๆ ของวัสดุดูดซับ

วัสดุดูดซับ	แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม		แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม		แบบจำลองการเสื่อมสภาพ		
	k_1	R^2	k_2	R^2	k_0	k_d	R^2
	NR	0.03121	0.9950	9.246	0.8634	0.1695	0.0492
NR-5K	0.04383	0.9966	21.28	0.8997	0.08813	0.06883	0.9977
NR-10K	0.03729	0.9951	15.42	0.8980	0.0955	0.0538	0.9953
NR-15K	0.03521	0.9926	12.94	0.9011	0.1173	0.0619	0.9955
NR-15K (H ₂ O)	0.03270	0.9900	10.54	0.9063	0.14030	0.06328	0.9952

- แบบจำลองการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม

โดยข้อมูลที่นำมาพิจารณาหาแบบจำลองที่เหมาะสม คือ ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของวัสดุดูดซับและระยะเวลา

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (2.4)$$

นำสมการที่ 2.4 มาจัดรูปให้อยู่ในความสัมพันธ์ของความสามารถในการดูดซับและระยะเวลาดังแสดงในสมการที่ (4.1) และสมการนี้ไปหาค่าคงที่ในฟังก์ชัน Curve fitting ดังแสดงในตารางที่ 4.1

$$q_t = q_e(1 - e^{-k_1 t}) \quad (4.1)$$

- แบบจำลองการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม

โดยข้อมูลที่นำมาหาแบบจำลองที่เหมาะสม คือ ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของวัสดุดูดซับและระยะเวลา เช่นเดียวกับแบบจำลองการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{q_e} t + \frac{1}{k_2 q_e} \quad (2.6)$$

นำสมการที่ (2.6) มาจัดรูปให้อยู่ในความสัมพันธ์ของความสามารถในการดูดซับและระยะเวลาดังแสดงในสมการที่ (4.2) และสมการนี้ไปหาค่าคงที่ในฟังก์ชัน Curve fitting ดังแสดงในตารางที่ 4.1

$$q_t = \frac{k_2 q_e^2 t}{1 + k_2 q_e t} \quad (4.2)$$

- แบบจำลองการเสื่อมสภาพ

สำหรับแบบจำลองการเสื่อมสภาพ จะนำข้อมูลจากการทดลองมาหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกและระยะเวลา เพื่อหาค่าคงที่พิจารณาค่าคงที่ของปฏิกิริยา 2 ตัว คือ ค่าคงที่ของอัตราการดูดซับ (k_0) และ ค่าคงที่ของอัตราการเสื่อมสภาพ (k_d)

$$\frac{C}{C_0} = \exp\left(\frac{-k_0 W}{Q_0} * \exp(-k_d t)\right) \quad (2.8)$$

นำสมการที่ (2.5) มาจัดรูปให้อยู่ในความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกและระยะเวลาดังแสดงในสมการที่ (4.3) และสมการนี้ไปหาค่าคงที่ในฟังก์ชัน Curve fitting ดังแสดงในตารางที่ 4.1

$$C = C_0 \exp\left(\frac{-k_0 W}{Q_0} * \exp(-k_d t)\right) \quad (4.3)$$

การพิจารณาแบบจำลองจลนศาสตร์ที่เหมาะสมกับวัสดุดูดซับจากยางธรรมชาติผสมโพแทสเซียมคาร์บอเนตในงานวิจัยนี้ จะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (R^2) ค่าคงที่ของแบบจำลองใดมีค่า R^2 เข้าใกล้หนึ่ง แสดงว่า แบบจำลองนั้นเหมาะสมกับวัสดุดูดซับในงานวิจัยนี้

จากตารางที่ 4.1 เมื่อพิจารณาจากค่า R^2 แล้ว แบบจำลองการเสื่อมสภาพมีค่า R^2 เข้าใกล้หนึ่งมากที่สุด ขณะที่วัสดุดูดซับจากยางธรรมชาติผสมโพแทสเซียมคาร์บอเนตเกิดการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้น มีการเกิดปฏิกิริยาเคมีและผลิตภัณฑ์เกิดขึ้น ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นนั้นจะไปปกคลุมพื้นผิวของตัวดูดซับ ทำให้เกิดการขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาระหว่างตัวถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ ส่งผลให้อัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาลดลง ทำให้วัสดุดูดซับมีการเสื่อมสภาพ ซึ่งผลของการเสื่อมสภาพของตัวดูดซับขึ้นกับตำแหน่งวงวาของของแข็งเท่านั้นและไม่ขึ้นกับค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดูดซับ

4.4.2 แบบจำลองการเสื่อมสภาพของวัสดุดูดซับโดยเติมโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ต่าง ๆ

จากการพิจารณาแบบจำลองจลนศาสตร์ที่เหมาะสม พบว่าแบบจำลองการเสื่อมสภาพเหมาะสมที่สุดกับวัสดุดูดซับในงานวิจัยนี้ จึงนำแบบจำลองนี้มาศึกษาต่อ โดยศึกษาวัสดุดูดซับจากยางธรรมชาติผสมโพแทสเซียมคาร์บอเนต 15 phr ในกรณีที่มีน้ำ ที่อุณหภูมิต่างๆ (30, 60 และ 100 องศาเซลเซียส)

ตารางที่ 4.2 ค่าคงที่ปฏิกิริยาของแบบจำลองการเสื่อมสภาพของ NR-15K ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

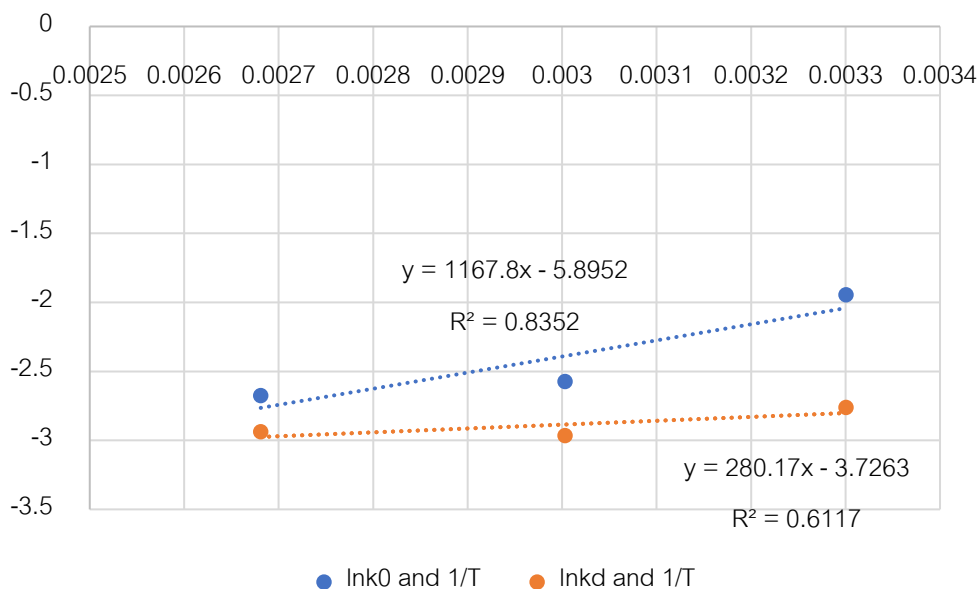
อุณหภูมิ (°C)	k_0	k_d	R^2
30	0.14030	0.06328	0.9952
60	0.07624	0.05157	0.9962
100	0.06888	0.05303	0.9960

จากตารางที่ 4.2 เมื่อพิจารณาค่าคงที่อัตราการดูดซับเริ่มต้นและค่าคงที่อัตราการเสื่อมสภาพที่ได้จากแบบจำลองการเสื่อมสภาพ พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ค่าคงที่อัตราการดูดซับเริ่มต้นมีค่าลดลง เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน การเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้การผันกลับของปฏิกิริยาได้ อีกทั้งยังทำให้ระบบมีพลังงานจลน์ของแก๊สสูงขึ้น เกิดการชนกันของอนุภาคเพิ่มมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการชนกันของอนุภาคที่มากขึ้นอาจไม่ทำให้เกิดสารผลิตภัณฑ์ อาจเกิดการชนที่ทำให้อนุภาคแยกออกจากกัน ทำให้การชนของอนุภาคไม่เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ สังเกตจากค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับที่มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ แต่ค่าคงที่อัตราการเสื่อมสภาพของตัวดูดซับ ที่อุณหภูมิ 30-60 องศาเซลเซียส ค่า k_d มีค่าสูงขึ้น อาจเกิดจากเมื่อใช้อุณหภูมิในการดูดซับต่ำ น้ำอาจจะไปปกคลุมพื้นผิวตัวดูดซับ ทำให้ไม่เกิดปฏิกิริยาการดูดซับระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และตัวดูดซับ แต่ที่อุณหภูมิ 60-100 องศาเซลเซียส มีอัตราการเสื่อมสภาพมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาเคมีได้มากขึ้น ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพมากขึ้น

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของแบบจำลองการเสื่อมสภาพกับอุณหภูมินั้น สามารถนำมาอธิบายผ่านสมการอาร์เรเนียส ดังสมการที่ (3.2)

$$\ln k_0 \text{ or } \ln k_d = \ln A - \frac{E_a}{RT} \quad (3.2)$$

โดยจะนำค่าคงที่ทั้งสองมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln k_0$ กับ $1/T$ และ $\ln k_d$ กับ $1/T$ แสดงดังในกราฟที่ 4.4



กราฟที่ 4.4 ผลของอุณหภูมิต่อค่าคงที่อัตราการดูดซับเริ่มต้นและค่าคงที่การเสื่อมสภาพ

จากการสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln k_0$ กับ $1/T$ และ $\ln k_d$ กับ $1/T$ กราฟรูปที่ 4.3 ค่าพลังงานในการกระตุ้นและ Frequency factor หรือ Pre-exponential factor จะได้จากการคำนวณค่าความชันและจุดตัดแกนตั้งของกราฟตามลำดับ จากกราฟ $\ln k_0$ กับ $1/T$ และ $\ln k_d$ กับ $1/T$ การดูดซับสูงมีค่าพลังงานกระตุ้นเป็นลบเท่ากับ $-9,709.09$ และ $-2,329.33$ กิโลจูลต่อโมล และมีค่า Frequency factor ที่ 0.00275 และ 0.02408 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัม·นาทึ โดยพลังงานกระตุ้นมีค่าเป็นลบไม่ได้หมายถึงเกิดการขัดขวางการเกิดปฏิกิริยา แต่ปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับการจับตัวของโมเลกุล [35]

4.5 ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของแบบจำลองการเสื่อมสภาพกับอุณหภูมิ สามารถนำมาสร้างแบบจำลองเพื่อศึกษาความสามารถในการดูดซับ CO_2 ของวัสดุดูดซับโดยดำเนินการตามภาวะในตารางที่ 3.5 แต่จะต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองว่าเหมาะสมหรือไม่ โดยใช้ปริมาณน้ำ (Water content) มาเป็นตัวแปรปรับค่าการดูดซับ CO_2 จากแบบจำลองให้สอดคล้องกับการทดลอง ซึ่งจะแสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบผลจากการทำแบบจำลองกับผลการทดลอง

Water content (%vol)	Temp Adsorption (°C)	CO ₂ adsorbed (kg/s)	Weight adsorbent (g/s)	Adsorption Capacity (mg/g)	Adsorption Capacity Exp. (mg/g)	%Error
0.11	30	4.29E-08	1.36E-02	3.149	3.43	8.19
	60	4.28E-08	1.31E-02	3.264	2.79	16.99
	100	2.93E-08	1.44E-02	2.033	2.24	9.25
						11.47

จากผลการเปรียบเทียบผลจากการทำแบบจำลองกับการทดลองจริง พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อน 11.47% หมายความว่าแบบจำลองนี้สามารถได้ผลการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ใกล้เคียงกับการทดลองจริงเมื่อแบบจำลองมีความเหมาะสมจึงนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และสร้างสมการทำนายค่าการดูดซับของวัสดุดูดซับต่อไป

4.6 ศึกษาแบบจำลองการดูดซับของวัสดุดูดซับจากยางธรรมชาติผสมโพแทสเซียมคาร์บอเนต

การศึกษาแบบจำลองการดูดซับของวัสดุดูดซับจากยางธรรมชาติผสมโพแทสเซียมคาร์บอเนต ดำเนินการโดยกระบวนการดูดซับ CO₂ ในหอดูดซับตามภาวะในตารางที่ 3.5 และตารางที่ 3.6 โดยจะได้ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกและนำไปคำนวณความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับนำไปวิเคราะห์ผลเชิงสถิติ เพื่อศึกษาว่าตัวแปรตัวใดบ้างที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

4.6.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลการสร้างแบบจำลอง

จากผลการสร้างแบบจำลองการดูดซับ CO₂ ในภาวะต่าง ๆ ในตารางที่ 3.6 นำค่าความสามารถในการดูดซับ CO₂ ที่คำนวณได้และภาวะต่างๆที่ใช้มาวิเคราะห์ผลความแปรปรวน การวิเคราะห์ผลการทดลองแบบ ANOVA แสดงไว้ในตารางที่ 4.4 โดยตัวแปร A คือ อุณหภูมิในการดูดซับ ตัวแปร B คือ ปริมาณน้ำ ตัวแปร C คือ อัตราการไหลของแก๊ส ตัวแปร D คือ อุณหภูมิของแก๊สขาเข้า ตัวแปร AB คือ อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิในการดูดซับกับปริมาณน้ำ ตัวแปร AC คือ อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิในการดูดซับกับอัตราการไหลของแก๊ส ตัวแปร AD คือ อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิในการดูดซับกับอุณหภูมิของแก๊สขาเข้า ตัวแปร BC คือ อันตรกิริยาระหว่าง

ปริมาณน้ำกับอัตราการไหลของแก๊ส ตัวแปร BD คือ อันตรกิริยาระหว่างปริมาณน้ำกับอุณหภูมิของแก๊สขาเข้า ตัวแปร CD คือ อันตรกิริยาระหว่างอัตราการไหลของแก๊สกับอุณหภูมิของแก๊สขาเข้า และอันตรกิริยากำลังสองของ A B C และ D

ตารางที่ 4.4 ตาราง ANOVA ของตัวแปรทั้งหมดที่ทำการสร้างแบบจำลอง

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value
A-Temp adsorption	31.72	1	31.72	2586.77	< 0.0001
B-Water content	142.99	1	142.99	11661.19	< 0.0001
C-Flow rate gas	111.96	1	111.96	9130.63	< 0.0001
D-Temp gas	2.23	1	2.23	181.70	< 0.0001
AB	4.18	1	4.18	340.79	< 0.0001
AC	3.48	1	3.48	283.48	< 0.0001
AD	0.0608	1	0.0608	4.96	0.0293
BC	16.54	1	16.54	1348.58	< 0.0001
BD	1.38	1	1.38	112.73	< 0.0001
CD	0.2081	1	0.2081	16.98	0.0001
A ²	0.1940	1	0.1940	15.82	0.0002
B ²	0.0096	1	0.0096	0.7837	0.3792
C ²	0.0355	1	0.0355	2.90	0.0935
D ²	0.0560	1	0.0560	4.57	0.0363
Residual	0.8093	66	0.0123		
Cor Total	323.10	80			

การวิเคราะห์ ANOVA เป็นการพิจารณาผลของตัวแปรที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยพิจารณาผลจากค่าของ P-Value ถ้าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่า ตัวแปรนั้นมีผลต่อความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ และถ้าค่าของ P-Value มากกว่า 0.05 แสดงว่าตัวแปรนั้นส่งผลต่อ

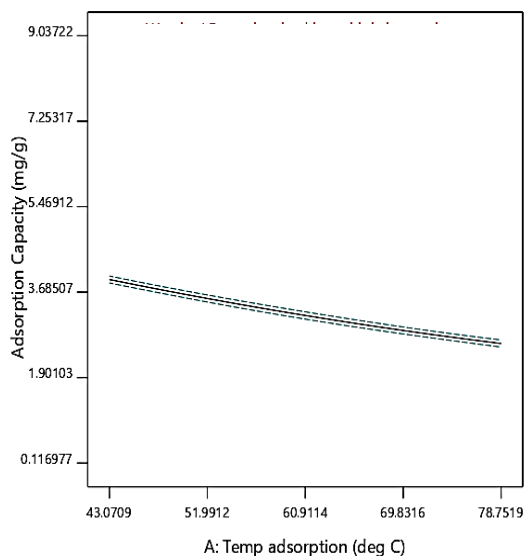
ความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพียงเล็กน้อยหรือไม่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เลย

จากตารางที่ 4.4 พบว่า ตัวแปรที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ CO_2 อย่างมีนัยสำคัญ คือ อุณหภูมิในการดูดซับ (A) ปริมาณน้ำ (B) อัตราการไหลของแก๊ส (C) อุณหภูมิของแก๊สขาเข้า (D) อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิในการดูดซับกับปริมาณน้ำ (AB) อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิในการดูดซับกับอัตราการไหลของแก๊ส (AC) อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิในการดูดซับกับอุณหภูมิของแก๊สขาเข้า (AD) อันตรกิริยาระหว่างปริมาณน้ำกับอัตราการไหลของแก๊ส (BC) อันตรกิริยาระหว่างปริมาณน้ำกับอุณหภูมิของแก๊สขาเข้า (BD) อันตรกิริยาระหว่างอัตราการไหลของแก๊สกับอุณหภูมิของแก๊สขาเข้า (CD) และอันตรกิริยากำลังสองของอุณหภูมิในการดูดซับ (A) และอุณหภูมิของแก๊ส (D) อย่างไรก็ตาม ตารางที่ 4.6 สามารถบอกได้ว่าตัวแปรต้นตัวใดที่มีอิทธิพลต่อความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ แต่ไม่สามารถบอกการส่งผลในเชิงบวกหรือลบได้ ดังนั้นจะต้องพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ของตัวแปรต้นกับตัวแปรตาม เพื่อให้สามารถบอกผลของตัวแปรต้นว่าส่งผลเชิงบวกหรือผลเชิงลบต่อตัวแปรตามได้

4.6.2 ความสัมพันธ์ของตัวแปรต้นกับความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

- ผลของอุณหภูมิในการดูดซับต่อความสามารถในการดูดซับ

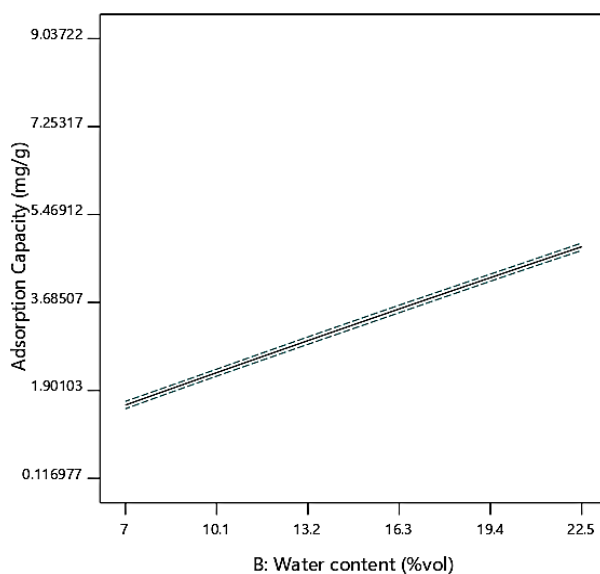
จากกราฟที่ 4.4 พบว่า เมื่ออุณหภูมิของการดูดซับเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ความสามารถในการดูดซับ CO_2 ของตัวดูดซับลดลง โดยมีแนวโน้มเดียวกันกับการทดลองการดูดซับ CO_2 ในกราฟที่ 4.2 อิทธิพลของอุณหภูมิในการดูดซับมีผลเชิงลบกับความสามารถในการดูดซับ CO_2 กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิของการดูดซับเพิ่มสูงขึ้น จะทำให้ความสามารถในการดูดซับ CO_2 ลดลง



กราฟที่ 4.5 ผลของอุณหภูมิในการดูดซับต่อความสามารถในการดูดซับ

- ผลของปริมาณน้ำต่อความสามารถในการดูดซับ

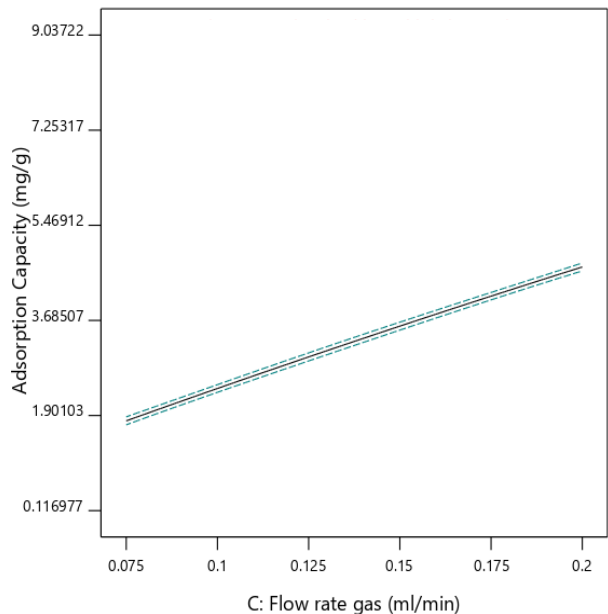
จากกราฟที่ 4.5 พบว่า เมื่อปริมาณน้ำเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ความสามารถในการดูดซับ CO_2 ของตัวดูดซับเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากน้ำเป็นสารตั้งต้นในสมการการเคมีของโพแทสเซียมคาร์บอเนต เมื่อปริมาณน้ำสูงขึ้น ส่งผลทำให้ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้ามากขึ้น ซึ่งอิทธิพลของปริมาณน้ำมีผลเชิงบวกกับความสามารถในการดูดซับ CO_2 กล่าวคือเมื่อปริมาณน้ำเพิ่มสูงขึ้น จะทำให้ความสามารถในการดูดซับ CO_2 เพิ่มขึ้น



กราฟที่ 4.6 ผลของปริมาณน้ำต่อความสามารถในการดูดซับ

- ผลของอัตราการไหลของแก๊สต่อความสามารถในการดูดซับ

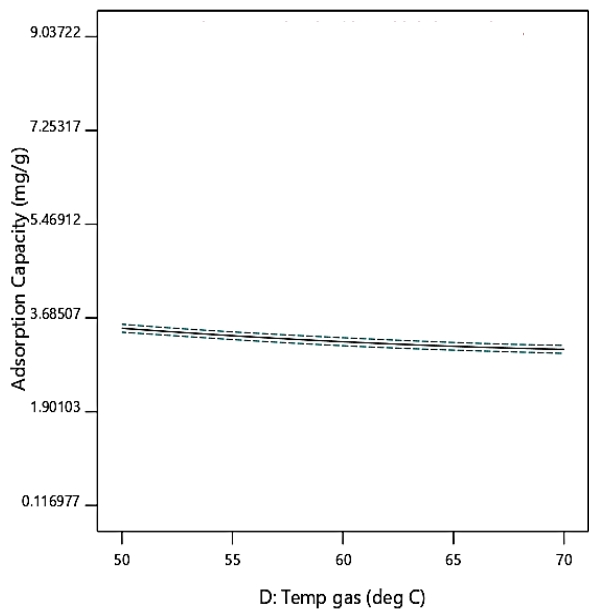
จากกราฟที่ 4.6 พบว่า เมื่ออัตราการไหลของแก๊สเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ความสามารถในการดูดซับ CO_2 ของตัวดูดซับเพิ่มขึ้นด้วย ขณะที่อัตราการไหลต่ำ ๆ มีปริมาณ CO_2 เข้ามาในระบบน้อย ทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับน้อย แต่ที่อัตราการไหลสูง ๆ มีปริมาณ CO_2 เข้ามาในระบบมาก ค่าความสามารถในการดูดซับจึงมากขึ้น ซึ่งอิทธิพลของอัตราการไหลของแก๊สมีผลเชิงบวกกับความสามารถในการดูดซับแก๊ส CO_2 กล่าวคือเมื่ออัตราการไหลของแก๊สเพิ่มสูงขึ้น จะทำให้ความสามารถในการดูดซับ CO_2 เพิ่มขึ้น



กราฟที่ 4.7 ผลของอัตราการไหลของแก๊สต่อความสามารถในการดูดซับ

- ผลของอุณหภูมิของแก๊สเข้าสู่ต่อความสามารถในการดูดซับ

จากกราฟในตารางที่ 4.7 พบว่าอุณหภูมิของแก๊สเข้าสู่เมื่อเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ความสามารถในการดูดซับ CO₂ ของตัวดูดซับลดลงด้วย แต่จากแนวโน้มของกราฟไม่ได้ส่งผลให้มีการลดลงอย่างชัดเจน ซึ่งอิทธิพลของอุณหภูมิของแก๊สเข้าสู่อาจจะมีผลเชิงลบกับความสามารถในการดูดซับ CO₂ กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิของแก๊สเข้าสู่เพิ่มสูงขึ้น จะทำให้ความสามารถในการดูดซับ CO₂ ลดลงเล็กน้อย



กราฟที่ 4.8 ผลของอุณหภูมิของแก๊สเข้าสู่ต่อความสามารถในการดูดซับ

4.6.3 การสร้างสมการทำนายความสามารถในการดูดซับ CO₂ ของวัสดุดูดซับ

การสร้างสมการทำนายความสามารถในการดูดซับ CO₂ โดยนำค่าปัจจัยที่ได้จากการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการถดถอย (Regression) ในตารางที่ 4.5 มาสร้างสมการอันดับที่หนึ่งในรูปของ Codes factor ได้ดังสมการที่ (4.1)

ตารางที่ 4.5 ความคลาดเคลื่อนของค่าสัมประสิทธิ์สำหรับแสดงสมการถดถอยแบบเส้นตรง

Factor	Coefficient Estimate	df	Standard Error	95% CI Low	95% CI High
Intercept	3.29	1	0.0380	3.22	3.37
A-Temp adsorption	-0.7706	1	0.0152	-0.8008	-0.7403
B-Water content	1.63	1	0.0151	1.60	1.66
C-Flow rate gas	1.44	1	0.0151	1.41	1.47
D-Temp gas	-0.2042	1	0.0152	-0.2345	-0.1740
AB	-0.3392	1	0.0184	-0.3759	-0.3025
AC	-0.3087	1	0.0183	-0.3453	-0.2721
AD	0.0411	1	0.0185	0.0043	0.0780
BC	0.6704	1	0.0183	0.6339	0.7068
BD	-0.1951	1	0.0184	-0.2318	-0.1584
CD	-0.0755	1	0.0183	-0.1121	-0.0389
A ²	0.1038	1	0.0261	0.0517	0.1559
B ²	-0.0238	1	0.0269	-0.0776	0.0299
C ²	-0.0466	1	0.0274	-0.1012	0.0081
D ²	0.0558	1	0.0261	0.0037	0.1079

โดย Y คือ ความสามารถในการดูดซับ CO₂ ส่วนตัวแปรอื่นๆใช้สัญลักษณ์ A คือ อุณหภูมิในการดูดซับ B คือ ปริมาณน้ำ C คือ อัตราการไหลของแก๊ส D คือ อุณหภูมิของแก๊สขาเข้า AB คือ อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิในการดูดซับกับปริมาณน้ำ AC คือ อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิในการดูดซับกับอัตราการไหลของแก๊ส AD คือ อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิในการดูดซับกับอุณหภูมิของแก๊สขาเข้า BC คือ อันตรกิริยาระหว่างปริมาณน้ำกับ

อัตราการไหลของแก๊ส BD คือ อันตรกิริยาระหว่างปริมาณน้ำกับอุณหภูมิของแก๊สขาเข้า และ CD คือ อันตรกิริยาระหว่างอัตราการไหลของแก๊สกับอุณหภูมิของแก๊สขาเข้า

$$Y = 3.29 - 0.7706A + 1.63B + 1.44C - 0.2042D - 0.3392AB - 0.3087AC + 0.0411AD + 0.6704BC - 0.1951BD - 0.0755CD + 0.1038A^2 - 0.0238B^2 - 0.0466C^2 + 0.0558D^2 \quad (4.1)$$

ค่าความคลาดเคลื่อนของสัมประสิทธิ์ (Coefficient estimate) ของตัวแปรแต่ละชนิดอยู่ในช่วงค่าความเชื่อมั่น 95% ดังแสดงในตารางที่ 4.5 พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่าการดูดซับ CO₂ แบบส่งเสริม (positive) และขัดแย้ง (negative) โดยปริมาณน้ำ (B) อัตราการไหลของแก๊ส (C) อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิในการดูดซับกับอุณหภูมิของแก๊สขาเข้า (AD) อันตรกิริยาระหว่างปริมาณน้ำกับอัตราการไหลของแก๊ส (BC) อันตรกิริยากำลังสองของอุณหภูมิในการดูดซับ (A²) และอุณหภูมิของแก๊ส (D²) มีผลส่งเสริมค่าการดูดซับ CO₂ ในทิศทางบวก แต่อุณหภูมิในการดูดซับ (A) อุณหภูมิของแก๊สขาเข้า (D) อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิในการดูดซับกับปริมาณน้ำ (AB) อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิในการดูดซับกับอัตราการไหลของแก๊ส (AC) อันตรกิริยาระหว่างปริมาณน้ำกับอุณหภูมิของแก๊สขาเข้า (BD) อันตรกิริยาระหว่างอัตราการไหลของแก๊สกับอุณหภูมิของแก๊สขาเข้า (CD) อันตรกิริยากำลังสองของปริมาณน้ำ (B²) และอัตราการไหลของแก๊ส (C²) มีผลส่งเสริมค่าการดูดซับ CO₂ ในทิศทางลบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ความเชื่อมั่น 95% (P<0.05)

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการเตรียมตัวดูดซับจากยางธรรมชาติผสมโพแทสเซียมคาร์บอเนต การเติมโพแทสเซียมคาร์บอเนตในปริมาณที่มากขึ้น (5 10 15 phr) ไม่ได้ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของวัสดุดูดซับจากยางธรรมชาติ เมื่อพิจารณาจากกราฟ FTIR แต่ส่งผลต่อรูพรุนของวัสดุดูดซับมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งพิจารณาได้จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพของวัสดุดูดซับ ซึ่งความสามารถในการดูดซับ CO_2 ของวัสดุดูดซับ (0 5 10 15 phr) มีค่าเท่ากับ 5.30 2.43 2.91 และ 3.19 มิลลิกรัม CO_2 ต่อกรัมของตัวดูดซับ (mg/g) ตามลำดับ ค่าการดูดซับของวัสดุดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณโพแทสเซียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น แต่ก็ยังน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุดูดซับจากยางธรรมชาติ (NR)

ต่อมานำวัสดุดูดซับจากยางธรรมชาติผสมโพแทสเซียมคาร์บอนที่ 15 phr ไปศึกษาผลของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อความสามารถในการดูดซับ CO_2 พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น (30 60 100 °C) ส่งผลให้ค่าความสามารถในการดูดซับลดลงเท่ากับ 3.19 2.57 และ 2.07 mg/g ตามลำดับ และอันเป็นผลเนื่องมาจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ทำให้พลังงานจลน์ของแก๊สเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งทำให้เกิดปฏิกิริยาผันกลับซึ่งเป็นการคาย CO_2 ออกมาจากตัวดูดซับ และศึกษาผลของน้ำต่อความสามารถในการดูดซับ CO_2 ของวัสดุดูดซับ พบว่าอุณหภูมิของการดูดซับที่เพิ่มสูงขึ้น (30 60 100 °C) กรณีที่มีน้ำมีค่าการดูดซับ CO_2 (3.43 2.79 และ 2.24 mg/g) มากกว่ากรณีที่ไม่มีน้ำ (3.19 2.57 และ 2.07 mg/g)

เมื่อนำวัสดุดูดซับจากยางธรรมชาติผสมโพแทสเซียมคาร์บอเนตไปศึกษาแบบจำลองจลนศาสตร์การดูดซับทั้ง 3 แบบ คือ แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม และ แบบจำลองการเสื่อมสภาพ โดยพิจารณาจากค่า R^2 มีค่าใกล้เคียง 1 มากที่สุด พบว่า แบบจำลองการเสื่อมสภาพ เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดที่นำมาใช้ในการอธิบายจลนศาสตร์ของวัสดุดูดซับจากยางธรรมชาติผสมโพแทสเซียมคาร์บอเนต

จากแบบจำลองการเสื่อมสภาพ ทำให้สามารถหาความสัมพันธ์ของค่าคงที่กับอุณหภูมิ โดยจะนำวัสดุดูดซับจากยางธรรมชาติผสมโพแทสเซียมคาร์บอนที่ 15 phr กรณีที่มีน้ำไปศึกษาต่อในการสร้างแบบจำลองการดูดซับ CO_2 โดยโปรแกรม Aspen plus แต่ต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ซึ่งพบว่าผลจากแบบจำลองกับผลจากการทดลองจริงมีความคลาดเคลื่อน 11.47% จากนั้นจึงศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ คือ

อุณหภูมิในการดูดซับ ปริมาณน้ำ อัตราการไหลของแก๊สและอุณหภูมิของแก๊สขาเข้า ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับ CO₂ อย่างไร โดยจะนำข้อมูลมาวิเคราะห์เชิงสถิติ โดยพิจารณาจากค่า P-value < 0.05 พบว่าตัวแปรทั้ง 4 ตัวส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับอย่างมีนัยสำคัญ โดยปริมาณน้ำและอัตราการไหลของแก๊สมีอิทธิพลในเชิงบวกต่อความสามารถในการดูดซับ และอุณหภูมิในการดูดซับและอุณหภูมิของแก๊สขาเข้ามีอิทธิพลเชิงลบต่อความสามารถในการดูดซับ CO₂ และจากการวิเคราะห์เชิงสถิติ ทำให้เราสามารถสร้างทำนายความสามารถในการดูดซับ CO₂ จากสัมประสิทธิ์ของสมการถดถอย จะได้ดังสมการ (4.1)

5.2 ข้อเสนอแนะ

- ควรมีการควบคุมปัจจัยภายนอกที่อาจส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับ เช่น ไม่ทำการทดลองในวันที่ฝนตก เนื่องจากความชื้นจะทำให้ความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับมีผลผิดพลาดได้
- ควรมีการปรับสูตรยางในการเตรียมโดยวิธี Cake mixing เพื่อให้วัสดุดูดซับมีขนาดรูพรุนที่เล็กลง
- ควรมีการเตรียมวัสดุดูดซับจากยางธรรมชาติผสมโพแทสเซียมคาร์บอเนตโดยใช้วิธีอื่น เช่น Two roll mill หรือ Internal mixing เพื่อให้วัสดุดูดซับมีขนาดรูพรุนที่ไม่ใหญ่ขึ้น
- ควรมีการทำการทดลองจริงเพื่อเปรียบเทียบค่าความสามารถในการดูดซับกับการสร้างแบบจำลองการดูดซับ CO₂

เอกสารอ้างอิง

- [1] บริษัท วิศวกรรมเคมี จำกัด, "ภาวะโลกร้อนกับการแก้ปัญหา," บริษัท วิศวกรรมเคมี จำกัด, [Online]. Available: http://www.tcesolutions.com/news_detail.php?news_id=17. [Accessed 16 กุมภาพันธ์ 2563].
- [2] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน, "การปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) จากการใช้พลังงาน 6 เดือนแรกปี 2562," ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร.
- [3] องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน), "สถานการณ์ก๊าซเรือนกระจก / อนุสัญญา UNFCCC & กฎกติการะหว่างประเทศ," องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน), [Online]. Available: <http://www.tgo.or.th/2015/thai/content.php?s1=9&s2=30&sub3=sub3>. [Accessed 8 มกราคม 2564].
- [4] องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน), "พระราชกฤษฎีกา," องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน), [Online]. Available: <http://www.tgo.or.th/2015/thai/content.php?s1=5&s2=7&sub3=sub3>. [Accessed 8 มกราคม 2564].
- [5] P., Pradthana, "กระบวนการดูดซับ (Adsorption Process)," Pradthana's Weblog, 19 มีนาคม 2551. [Online]. Available: <https://pradthana.wordpress.com/2008/04/13/adsorption-process/>. [Accessed 20 มีนาคม 2563].
- [6] ปริญา มาสวัสดิ์ และ หนึ่งฤทัย ไชยวงศ์, "การใช้เทคนิคการสกัดด้วยตัวดูดซับของแข็งและเทคนิคดิจิทัลอิมเมจอัลเลอร์เมตรีสำหรับการวิเคราะห์โครเมียม (VI) ปริมาณน้อยในตัวอย่างน้ำ," *Narsuan University Journal : Science and Technology 2017*, pp. 112-117.
- [7] ©PACKAGING INDUSTRIAL INTELLIGENCE UNIT, [Online]. Available: https://packaging.oie.go.th/new/admin_control_new/html-demo/file_technology/9163825470.pdf. [Accessed 16 กุมภาพันธ์ 2563].

- [8] C. Sudsuansi, "Adsorbition of methane and carbon dioxide on activated carbon and metal organic frameworks," Thesis Master of science, Chulalongkorn University, 2018.
- [9] เลิศ รักสันติชาติ, "การฟื้นฟูสภาพซีโอไลต์ชนิดเอกซ์ที่ไซด์แล้วสำหรับการดูดซับเอทีลีนไกลคอล," วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- [10] บวรชัย เจริญธีรบูรณ์, " การขจัดกำมะถันและไนโตรเจนแบบดูดซับของน้ำมันดีเซลโดยใช้ซีโอไลต์วายเป็น แลกเปลี่ยนไอออนในระบบสองขั้นตอน," วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2562.
- [11] Y. Guang, L. Hongchao, O. Tomonori and K. Hirofumi, "CO₂ Capture by Carbon Aerogel– Potassium Carbonate Nanocomposites," *International Journal of Chemical Engineering* 2016, 2559.
- [12] จารุวรรณ เจริญชัยเพชร, "การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับ K₂CO₃ /Al₂O₃ เติร์ยมในภาวะเบส," วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2561.
- [13] ปุญญา ชัยศรี และ พิมพิกา รัตนอาภรณ์, "วัสดุดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากคอมพอสิตยางธรรมชาติ ดัดแปร," ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2559.
- [14] Pubchem, "Carbon dioxide," National Center for Biotechnology Information, [Online]. Available: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/carbon-dioxide>. [Accessed 30 1 2564].
- [15] milanospettacoli, "ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์," milanospettacoli, 2019. [Online]. Available: <https://th.milanospettacoli.com/1023-the-environmental-impact-of-carbon-dioxide>. [Accessed 25 มีนาคม 2564].
- [16] Reference, "Where Does Carbon Dioxide Come From?," Reference, 27 Mar 2020. [Online]. Available: <https://www.reference.com/science/carbon-dioxide-come-85f591a4711a3b97>. [Accessed 30 1 2564].

- [17] มาริสา คุณธนวงศ์, "ยางสังเคราะห์มีแตกต่างจากยางธรรมชาติอย่างไร," ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, [Online]. Available: <https://www.mtec.or.th/post-knowledges/3977/>. [Accessed 1 มกราคม 2564].
- [18] อาเคล มะหะหมัด, "Vystar พัฒนยางธรรมชาติที่มีการกำจัดโปรตีนออกไป," การยางแห่งประเทศไทย, 29 กันยายน 2017. [Online]. Available: <https://km.raot.co.th/news/detail/56>. [Accessed 31 มกราคม 2564].
- [19] Somkit Chuenarrom, "ส่วนประกอบของน้ำยางธรรมชาติ," Rubberdigest, 1 สิงหาคม 2014. [Online]. Available: <https://rubberdigest.com/?p=98>. [Accessed 31 มกราคม 2564].
- [20] พรทิพย์ ศรีโสภาก, "สารเคมีสำหรับยาง," โครงการฟิสิกส์และวิศวกรรม, 19 พฤศจิกายน 2547. [Online]. Available: http://www.dss.go.th/images/st-article/pep_11_2547_additives_rubber.pdf. [Accessed 31 มกราคม 2564].
- [21] สถาบันพลาสติก, "เทคโนโลยีการผลิตยางคอมพาวด์," สถาบันพลาสติก, 27 ตุลาคม 2557. [Online]. Available: <http://rubber.oie.go.th/box/Article/25239/%E0%B9%80%E0%B8%97%E0%B8%84%E0%B9%82%E0%B8%99%E0%B9%82%E0%B8%A5%E0%B8%A2%E0%B8%B5%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B8%9C%E0%B8%A5%E0%B8%B4%E0%B8%95%E0%B8%A2%E0%B8%B2%E0%B8%87%E0%B8%84%E0%B8%AD%E0%B8%A1%E0%B8%9E%E0%B8>. [Accessed 31 มกราคม 2564].
- [22] ชินรัตน์ ลาภพูลธนะอนันต์, "การวัลคาไนซ์ผลิตภัณฑ์จากน้ำยาง," ศูนย์วิจัยเทคโนโลยียาง, กันยายน 2558. [Online]. Available: http://www.mahidolrubber.org/files/vulcanized_latex.pdf. [Accessed 31 มกราคม 2564].
- [23] Ankita Saikia, "Modelling the Vulcanization Reaction of Devulcanized Rubber," Thesis Master of Applied Science, o the University of Waterloo, 2014.
- [24] เดชา ฉัตรศิริเวช, กระบวนการดูดซับ, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555.

- [25] กนกพล โรจนกิจ, "การออกแบบกระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วมจากแก๊สธรรมชาติโดยใช้ $K_2CO_3/V-Al_2O_3$," วิทยาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2562.
- [26] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี, "โพแทสเซียมคาร์บอเนต," วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี, 27 พฤศจิกายน 2561.
[Online]. Available:
<https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B9%82%E0%B8%9E%E0%B9%81%E0%B8%97%E0%B8%AA%E0%B9%80%E0%B8%8B%E0%B8%B5%E0%B8%A2%E0%B8%A1%E0%B8%84%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B9%8C%E0%B8%9A%E0%B8%AD%E0%B9%80%E0%B8%99%E0%B8%95>. [Accessed 3 กุมภาพันธ์ 2564].
- [27] TNJ Chemical Industry Co., Ltd, "Potassium Carbonate CAS 584-08-7," TNJ Chemical Industry Co., Ltd, [Online]. Available: http://th.tnjchem.com/potassium-carbonate-cas-584-08-7_p177.html. [Accessed 3 กุมภาพันธ์ 2564].
- [28] Abdelbaki Benamor, Mustafa Nasser, and Mohammed J Al-Marri, "Gas Processing Technology-Treatment and Utilization : Hot Potassium Carbonate Solutions," *Encyclopedia of Sustainable Technologies*, p. 377, 2017.
- [29] G. T. Rochelle, E. Chen, B. Oyenekan, A. Sexton, J. Davis, M. Hilliard and A. Veawab, "CO₂ Capture by Absorption with Potassium Carbonate," Department of Energy, University of Texas, Austin, TX (United States), 2006.
- [30] Nathphatsorn Jongartklang, Pornpote Piumsomboon, Benjapon Chalermssinsuwan, "Correlations of kinetic parameter for CO₂ sorption using K₂CO₃/Al₂O₃ solid sorbent with various flow regimes/patterns," *The 3rd TChE International Conference 2013*, 2013.
- [31] ชชาติยา ตรีพูนสุข, "การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้โพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินาและการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็งในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบด," วิทยาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2562.

- [32] Krittaya Panploo, Benjapon Chalermssinsuwan, Sirilux Poompradub, "Natural rubber latex foam with particulate fillers for carbon dioxide adsorption and regeneration," *RSC Advances*, pp. 28916-28923, 2019.
- [33] Krittaya Panploo, Benjapon Chalermssinsuwan, Sirilux Poompradub, "Effect of amine types and temperature of a natural rubber based composite material on the carbon dioxide capture," *Chemical engineering journal* 402, p. 125332, 2020.
- [34] B. Kaewpetch, S. Prasongsuk, S. Poompradub, "Devulcanization of natural rubber vulcanizates by *Bacillus cereus* TISTR 2651," *eXPRESS Polymer Letters*, vol. 13, pp. 877-888, 2019.
- [35] H. Scott Fogler, Pearson New International Edition Element of Chemical Engineering, British Library, 2014.
- [36] H. Bekhtia, H. Bouchafaab, R. Meloukic, A. Travertd, Y. Boucheffaa, "Adsorption of CO₂ over MgO Impregnated NaY zeolites and modeling study," *Microporous and Mesoporous Materials*, p. 109866, 2020.

ภาคผนวก ก

การคำนวณปริมาณสารในเตรียมวัสดุชุดขับจากยางธรรมชาติผสมโพแทสเซียมคาร์บอเนต

ตัวอย่าง NR-5K

ตาราง ก.1 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมยางธรรมชาติและยางธรรมชาติผสมโพแทสเซียมคาร์บอเนต

Ingredient (% by weight)	NR-5K (phr)
60% น้ำยางธรรมชาติ	100
10% โพแทสเซียมโอลีเอต	15
50% โพแทสเซียมคาร์บอเนต	5
50% ซัลเฟอร์	4
50% ซิงก์ไดเมทิลไดไทโอคาร์บาเมต	2
50% ซิงก์เมอร์แคปโตเบนโซไทอะโซล	2
50% วิงสเตย์แอล	2
33% ไดฟีนิลกัวนิดีน	2
50% ซิงก์ออกไซด์	10
12.5% โซเดียมซลิโคฟลูออไรด์	8

1.เตรียม 60% น้ำยางธรรมชาติ 100 phr

น้ำยางธรรมชาติ	100 g	มีเนื้อยางธรรมชาติ	60 g
ถ้าต้องการเตรียมน้ำยางธรรมชาติ	250 g	จะมีเนื้อยางธรรมชาติ	150 g

2.เตรียมโพแทสเซียมโอลีเอต 15 phr

น้ำยางธรรมชาติ	100 phr	มีเนื้อยางธรรมชาติ	150 g
ถ้าต้องการโพแทสเซียมโอลีเอต	15 phr	จะต้องใช้ปริมาณสาร	22.5 g

3.คำนวณด้วยวิธีตามข้อ 2 กับทุก ๆ สารเคมี จะได้

โพแทสเซียมคาร์บอเนต	5 phr	จะต้องใช้ปริมาณสาร	7.5 g
ซัลเฟอร์	4 phr	จะต้องใช้ปริมาณสาร	6 g
ซิงก์ไดเมทิลไดไทโอคาร์บาเมต	2 phr	จะต้องใช้ปริมาณสาร	3 g

ซิงก์เมอร์แคปโทเบนโซไทอะโซล	2 phr	จะต้องใช้ปริมาณสาร	3 g
วีสเตย์แอล	2 phr	จะต้องใช้ปริมาณสาร	3 g
ไดฟีนิลกัวนิติน	2 phr	จะต้องใช้ปริมาณสาร	3 g
ซิงก์ออกไซด์	10 phr	จะต้องใช้ปริมาณสาร	15 g
โซเดียมซิลิโคฟลูออไรด์	8 phr	จะต้องใช้ปริมาณสาร	12 g

การคำนวณความสามารถการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จากข้อมูลการทดลอง

จากโปรแกรม Gaslab 2.1 จะได้ข้อมูลร้อยละของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เซนเซอร์สามารถวัดได้ต่อเวลา เมื่อนำข้อมูลมาวาดกราฟจะได้กราฟ Breakthrough curve ในทางทฤษฎี ซึ่งพื้นที่ใต้กราฟหาได้จากสมการที่ ก.1

$$q = \frac{1}{m} \int_0^t Q(C_{in} - C_{out}) dt \quad (ก.1)$$

เมื่อ q คือ ความสามารถในการดูดซับ CO_2 (มิลลิกรัม CO_2 /กรัมตัวดูดซับ)

m คือ มวลของตัวดูดซับ (กรัม)

C_{in} คือ ความเข้มข้นของ CO_2 ขาเข้า (% โดยน้ำหนัก)

C_{out} คือ ความเข้มข้นของ CO_2 ขาออก (% โดยน้ำหนัก)

Q คือ อัตราการไหลของแก๊สโดยมวล (กรัม/วินาที)

t คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับ (วินาที)

แต่ในงานวิจัยนี้จะใช้โปรแกรม Excel การคำนวณความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จากสมการ ดังนี้

$$\text{Volume } CO_{2,out} (\text{mol/min}) = \frac{\text{Gas flow rate} * \%CO_2}{100} \quad (ก.2)$$

$$\text{Volume } CO_{2,add} (\text{mol/min}) = \frac{\text{Gas flow rate} * \%CO_{2,final}}{100} - \frac{\text{Gas flow rate} * \%CO_2}{100} \quad (ก.3)$$

$$\text{Mass } CO_{2,add} (\text{g/min}) = \frac{44 \text{ g/min} * \text{Volume } CO_{2,add} * \text{Pressure (atm)}}{\left(0.082 \frac{\text{L*atm}}{\text{mol*K}}\right) (273+T (^{\circ}\text{C}))K} \quad (ก.4)$$

$$\text{Strip area (g)} = \text{Mass } CO_{2,add} * (\text{Time2} - \text{Time1}) \quad (ก.5)$$

$$\text{Area (g)} = \text{Sum of all strip area} \quad (ก.6)$$

$$CO_2 \text{ adsorption capacity (mg/g)} = \frac{\text{Area} * 1000}{\text{Initial adsorbent loading}} \quad (ก.7)$$

ตัวอย่าง ข้อมูล NR-5K จากโปรแกรม Gaslab 2.1

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

ภาวะ	ค่า	หน่วย
มวลของตัวดูดซับ	4.0315	G
อัตราการไหลของแก๊สโดยปริมาตร	0.1	L/min
อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา	30	°C
ความดัน	1	atm
ช่วงเวลาที่ใช้	0.016667 - 0.033333	min
%CO ₂ (t=0.016667 นาที)	0.2465	mol/L
%CO ₂ (t=0.033333 นาที)	0.3486	mol/L
%CO ₂ final	12	mol/L

$$\text{Volume CO}_{2,\text{out}} = \frac{0.1 \text{ L/min} * 0.2465 \text{ mol/L}}{100} = 0.00025 \text{ mol/min}$$

$$\text{Volume CO}_{2,\text{add}} = \frac{0.1 \text{ L/min} * 12 \text{ mol/L}}{100} - \frac{0.1 \text{ L/min} * 0.2465 \text{ mol/L}}{100} = 0.01173 \text{ mol/min}$$

$$\text{Mass CO}_{2,\text{add}} = \frac{44 \text{ g/min} * 0.01173 \text{ mol/L} * 1 \text{ atm}}{\left(0.082 \frac{\text{L} \cdot \text{atm}}{\text{mol} \cdot \text{K}}\right) (273 + 30) \text{ K}} = 0.02077 \text{ g/min}$$

$$\text{Strip area} = 0.02077 \text{ g/min} * (0.016667 - 0.033333) \text{ min} = 0.00035 \text{ g}$$

เมื่อคิดผลรวมของ Strip area จะได้ Area = 0.00981 g

$$\text{CO}_2 \text{ adsorption capacity} = \frac{0.00981 \text{ g} * 1000}{4.0315 \text{ g}} = 2.43 \text{ mg CO}_2/\text{g adsorbent}$$

ภาคผนวก ข

การหาแบบจำลองจลนศาสตร์ในรูปแบบต่างๆ

ตัวอย่าง NR-5K

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลที่ใช้ในการหาแบบจำลองจลนศาสตร์ในรูปแบบต่างๆ

ภาวะ	ค่า	หน่วย
มวลของตัวดูดซับ (W)	4.0315	G
อัตราการไหลของแก๊สโดยปริมาตร (Q_0)	0.1	L/min
อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา	30	°C
ความดัน	1	atm
ความเข้มข้นของ CO_2 เริ่มต้น (C_0)	12	mol/L
$q_e = \text{Maximum } q_t$	0.004902	mg/g

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลที่ได้จากการทดลองและคำนวณตามแบบจำลองจลนศาสตร์ต่างๆ

t(s)	C	strip area	q_t
1	0.246478	0.000346	0.000173
2	0.348643	0.000343	0.000345
3	0.450757	0.00034	0.000515
4	0.597807	0.000336	0.000683
5	0.743610	0.000331	0.000848
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
209	11.81988	4.53E-06	0.004899
210	11.93983	9.9E-07	0.004899
211	11.89797	2.23E-06	0.004901
212	11.95904	4.23E-07	0.004901
213	11.89863	2.21E-06	0.004902

นำข้อมูลจากตารางที่ ข.2 มาวาดกราฟตามสมการที่ 4.1-4.3 เพื่อหาแบบจำลองจลนศาสตร์ที่ต้องการ โดยใส่ค่าคงที่ต่างๆตามในตารางที่ ข.1

แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม $q_t = q_e(1 - e^{-k_1 t})$ (4.1)

แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม $q_t = \frac{k_2 q_e^2 t}{1 + k_2 q_e t}$ (4.2)

แบบจำลองการเสื่อมสภาพ $C = C_0 \exp\left(\frac{-k_0 W}{Q_0} * \exp(-k_d t)\right)$ (4.3)

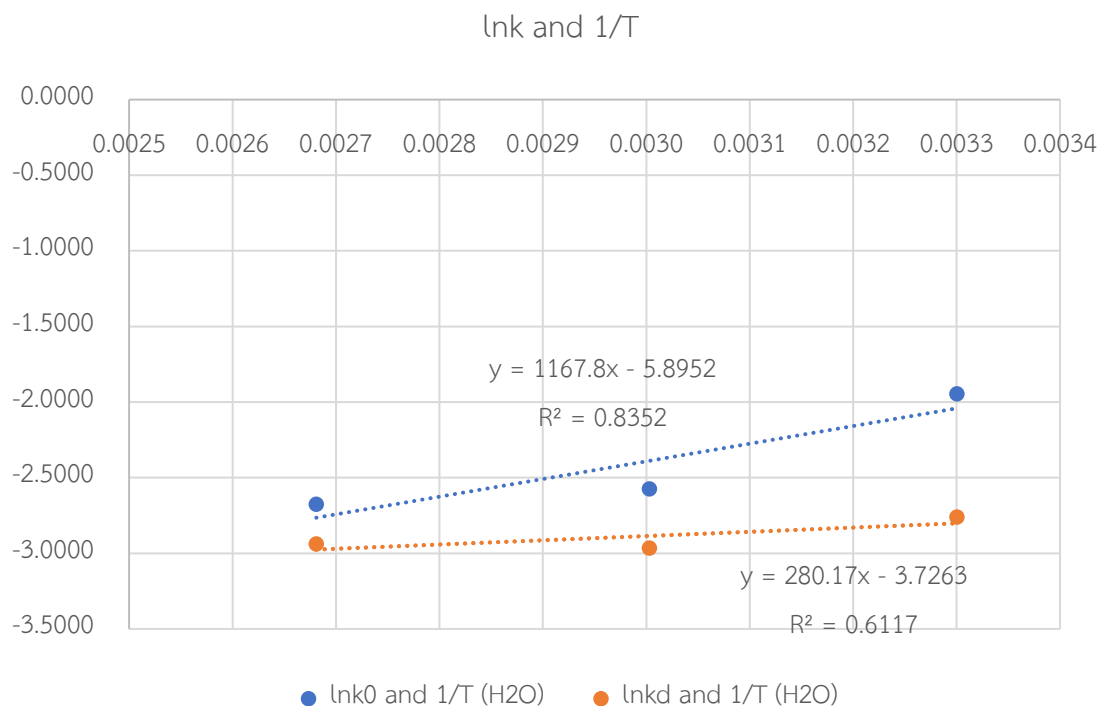
การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ในรูปของ Power law

ศึกษาวัสดุดูดซับจากยางธรรมชาติผสมโพแทสเซียมคาร์บอเนต 15 phr ในกรณีที่มีน้ำ โดยนำค่า k_0 และ k_d ที่ได้มาสร้างความสัมพันธ์กับอุณหภูมิในรูปแบบของอาร์เรเนียส ดังในสมการ 3.2

$$\ln k_0 \text{ or } \ln k_d = \ln A - \frac{E_a}{RT} \quad (3.2)$$

ตารางที่ ข.3 ค่า k_0 และ k_d ที่ได้จากแบบจำลองการเสื่อมสภาพ

อุณหภูมิ (°C)	k_0	k_d	1/T	$\ln k_0$	$\ln k_d$
30	0.1173	0.0619	0.0033	-2.14302	-2.78224
60	0.05782	0.04848	0.003003	-2.85042	-3.0266
100	0.04692	0.04788	0.002681	-3.05931	-3.03906



กราฟที่ ข.1 ผลของอุณหภูมิต่อค่าคงที่อัตราการดูดซับเริ่มต้นและค่าคงที่การเสื่อมสภาพ

หลังจาก plot กราฟได้แล้ว จะนำค่าความชันและจุดตัดแกน y มาหาค่าคงที่ E_a และ A เพื่อนำไปใช้ดำเนินการสร้างแบบจำลอง

จากกราฟ lnk0 and 1/T ได้สมการ : $y = 1167.8x - 5.8952$

หาค่า E_a : $1167.8 = -E_a/R$; $R=8.314 \text{ J/K mol}$

$$\text{ดังนั้น } E_a = -9709.09 \text{ J/mol}$$

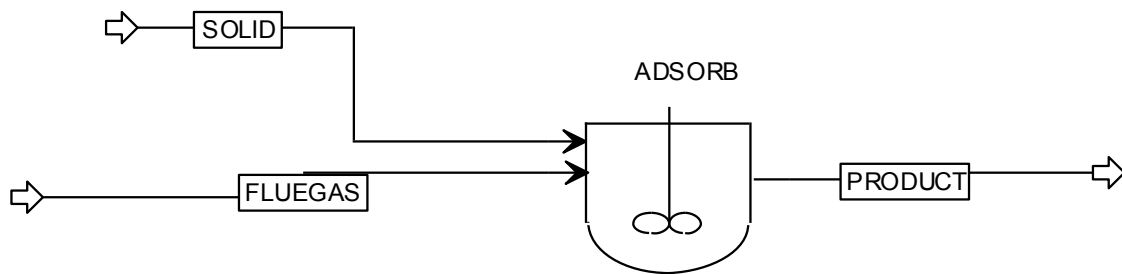
หาค่า A : $-5.8952 = \ln A$

$$\text{ดังนั้น } A = 0.00275$$

ภาคผนวก ค

การสร้างแบบจำลอง

สร้างแบบจำลองการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ของวัสดุดูดซับจากยางธรรมชาติผสมโพแทสเซียมคาร์บอเนตด้วยโปรแกรมจำลองกระบวนการ Aspen Plus V.11.0 โดยใช้ข้อมูลทางจลนพลศาสตร์ตัวดูดซับที่ได้จากการคำนวณในภาคผนวก ข. โดยการศึกษาจะมีการปรับเปลี่ยนค่าที่ต้องการศึกษาตามตารางที่ 3.6



รูปที่ ค.1 แบบจำลองการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยวัสดุดูดซับจากยางธรรมชาติผสมโพแทสเซียมคาร์บอเนต

สาย Solid จะใส่ข้อมูลดังรูปที่ ค.1

Capital: ___ USD Utilities: ___ USD/Year Energy Savings: ___ MW (___%) Exchangers - Unknown: 0 OK: 0 Risk: 0

FLUEGAS (MATERIAL) x ADSORB (RCSTR) x Results Summary - Streams (All) x Main Flowsheet x SOLID (MATERIAL) x +

Mixed CI Solid NC Solid Flash Options EO Options Costing Comments

Specifications

State variables

Substream name: CISOLID

Temperature: 30 C

Pressure: 1 bar

Total flow basis: Mass

Total flow rate: 1.33e-05 kg/sec

Composition

Mass-Frac

Component	Value
K2CO3	15
KHCO3	
AL2O3	
NR	85
Total	100

Component Attribute

Particle Size Distribution

รูปที่ ค.1 ข้อมูลสาย Solid

สาย Flue gas จะใส่ข้อมูลดังรูปที่ ค.2 ซึ่งจะมีการปรับเปลี่ยนค่าที่ต้องการศึกษาตรงช่องสี่เหลี่ยมสีแดง

Specifications

Flash Type: Temperature Pressure

State variables

Temperature: 70 C

Pressure: 1 atm

Vapor fraction: []

Total flow basis: Volume

Total flow rate: 0.2 l/min

Solvent: []

Reference Temperature

Volume flow reference temperature: C

Component concentration reference temperature: []

Composition

Mole-Frac

Component	Value
H2O	0.225
O2	[]
CO2	0.12
K2CO3	[]
KHCO3	[]
AL2O3	[]
N2	0.655
Total	1

Balance

รูปที่ ค.2 ข้อมูลสาย Flue gas

ตัวหอดูดซับ จะใส่ข้อมูลดังรูปที่ ค.3 ซึ่งจะมีการปรับเปลี่ยนค่าที่ต้องการศึกษาตรงช่องสี่เหลี่ยมสีแดง

Specifications

Operating conditions

Pressure: 1 bar

Temperature: 80 C

Duty: 0 kJ/sec

Vapor fraction: []

Holdup

Valid phases: Vapor-Only 2nd Liquid

Specification type: Residence time

Reactor

Volume: 1 cum

Resi. time: 300 sec

Phase

Phase: []

Volume: [] cum

Volume frac: []

Residence time: [] sec

รูปที่ ค.3 ข้อมูลหอดูดซับ

ตารางที่ ค.1 ค่าความสามารถในการดูดซับของวัสดุดูดซับจากยางธรรมชาติผสมโพแทสเซียมคาร์บอเนต 15 phr ของตัวแปรที่ศึกษา

Temp gas (°C)	Flow gas (L/min)	Water content (%v)	Temp adsorption (°C)	FLUEGAS (kg/s)	PRODUCT (kg/s)	CO ₂ Adsorp (kg/s)	Capacity.Sim (mg/g)	
50	0.075	0.07	40	2.49E-07	2.33E-07	1.64E-08	1.231	
			60	2.49E-07	2.36E-07	1.26E-08	0.945	
			80	2.49E-07	2.39E-07	9.82E-09	0.736	
		0.135	40	2.53E-07	2.23E-07	3.02E-08	2.266	
			60	2.53E-07	2.29E-07	2.35E-08	1.763	
			80	2.53E-07	2.34E-07	1.85E-08	1.387	
	0.225	40	2.82E-07	2.31E-07	5.17E-08	3.876		
		60	2.82E-07	2.41E-07	4.09E-08	3.065		
		80	2.82E-07	2.50E-07	3.26E-08	2.444		
	0.15	0.07	0.07	40	4.98E-07	4.65E-07	3.24E-08	2.433
				60	4.98E-07	4.73E-07	2.50E-08	1.877
				80	4.98E-07	4.78E-07	1.96E-08	1.467
0.135			40	5.06E-07	4.47E-07	5.87E-08	4.400	
			60	5.06E-07	4.60E-07	4.60E-08	3.448	
			80	5.06E-07	4.69E-07	3.64E-08	2.729	
0.225		40	5.64E-07	4.67E-07	9.77E-08	7.324		
		60	5.64E-07	4.86E-07	7.81E-08	5.859		
		80	5.64E-07	5.02E-07	6.29E-08	4.715		
0.2		0.07	0.07	40	6.64E-07	6.21E-07	4.27E-08	3.205
				60	6.64E-07	6.31E-07	3.31E-08	2.480
				80	6.64E-07	6.38E-07	2.59E-08	1.943
	0.135		40	6.74E-07	5.98E-07	7.64E-08	5.729	
			60	6.74E-07	6.14E-07	6.02E-08	4.512	
			80	6.74E-07	6.26E-07	4.78E-08	3.586	
	0.225	40	7.53E-07	6.27E-07	1.25E-07	9.381		
		60	7.53E-07	6.52E-07	1.01E-07	7.558		
		80	7.53E-07	6.71E-07	8.16E-08	6.119		

ตารางที่ ค.1 (ต่อ) ค่าความสามารถในการดูดซับของวัสดุดูดซับจากยางธรรมชาติผสมโพแทสเซียมคาร์บอเนต 15 phr ของตัวแปรที่ศึกษา

Temp gas (°C)	Flow gas (L/min)	Water content (%v)	Temp adsorption (°C)	FLUEGAS (kg/s)	PRODUCT (kg/s)	CO ₂ Adsorp (kg/s)	Capacity.Sim (mg/g)	
60	0.075	0.07	40	2.41E-07	2.26E-07	1.59E-08	1.194	
			60	2.41E-07	2.29E-07	1.22E-08	0.917	
			80	2.41E-07	2.32E-07	9.52E-09	0.714	
	0.135	0.075	0.135	40	2.41E-07	2.13E-07	2.89E-08	2.167
				60	2.41E-07	2.19E-07	2.25E-08	1.685
				80	2.41E-07	2.24E-07	1.77E-08	1.325
	0.225	0.075	0.225	40	2.50E-07	2.04E-07	4.61E-08	3.457
				60	2.50E-07	2.14E-07	3.64E-08	2.730
				80	2.50E-07	2.21E-07	2.90E-08	2.174
	0.15	0.075	0.07	40	4.83E-07	4.51E-07	3.15E-08	2.362
				60	4.83E-07	4.59E-07	2.43E-08	1.822
				80	4.83E-07	4.64E-07	1.90E-08	1.424
0.135		0.075	0.135	40	4.83E-07	4.27E-07	5.62E-08	4.216
				60	4.83E-07	4.39E-07	4.40E-08	3.302
				80	4.83E-07	4.48E-07	3.48E-08	2.612
0.225		0.075	0.225	40	5.01E-07	4.13E-07	8.78E-08	6.586
				60	5.01E-07	4.31E-07	7.01E-08	5.255
				80	5.01E-07	4.44E-07	5.63E-08	4.221
0.2		0.075	0.07	40	6.44E-07	6.02E-07	4.15E-08	3.113
				60	6.44E-07	6.12E-07	3.21E-08	2.408
				80	6.44E-07	6.19E-07	2.52E-08	1.887
	0.135	0.075	0.135	40	6.44E-07	5.71E-07	7.33E-08	5.496
				60	6.44E-07	5.86E-07	5.77E-08	4.325
				80	6.44E-07	5.98E-07	4.58E-08	3.435
	0.225	0.075	0.225	40	6.68E-07	5.55E-07	1.13E-07	8.476
				60	6.68E-07	5.77E-07	9.08E-08	6.806
				80	6.68E-07	5.94E-07	7.33E-08	5.496

ตารางที่ ค.1 (ต่อ) ค่าความสามารถในการดูดซับของวัสดุดูดซับจากยางธรรมชาติผสมโพแทสเซียมคาร์บอเนต 15 phr ของตัวแปรที่ศึกษา

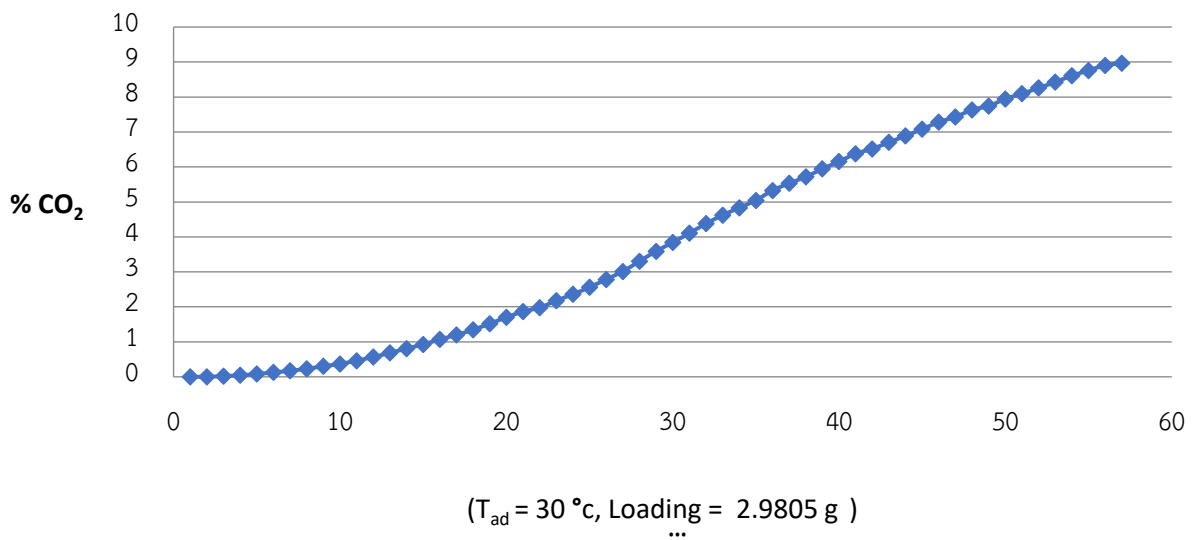
Temp gas (°C)	Flow gas (L/min)	Water content (%v)	Temp adsorption (°C)	FLUEGAS (kg/s)	PRODUCT (kg/s)	CO ₂ Adsorp (kg/s)	Capacity.Sim (mg/g)
60	0.075	0.07	40	2.41E-07	2.26E-07	1.59E-08	1.194
			60	2.41E-07	2.29E-07	1.22E-08	0.917
			80	2.41E-07	2.32E-07	9.52E-09	0.714
		0.135	40	2.41E-07	2.13E-07	2.89E-08	2.167
			60	2.41E-07	2.19E-07	2.25E-08	1.685
			80	2.41E-07	2.24E-07	1.77E-08	1.325
		0.225	40	2.50E-07	2.04E-07	4.61E-08	3.457
			60	2.50E-07	2.14E-07	3.64E-08	2.730
			80	2.50E-07	2.21E-07	2.90E-08	2.174
	0.15	0.07	40	4.83E-07	4.51E-07	3.15E-08	2.362
			60	4.83E-07	4.59E-07	2.43E-08	1.822
			80	4.83E-07	4.64E-07	1.90E-08	1.424
		0.135	40	4.83E-07	4.27E-07	5.62E-08	4.216
			60	4.83E-07	4.39E-07	4.40E-08	3.302
			80	4.83E-07	4.48E-07	3.48E-08	2.612
		0.225	40	5.01E-07	4.13E-07	8.78E-08	6.586
			60	5.01E-07	4.31E-07	7.01E-08	5.255
			80	5.01E-07	4.44E-07	5.63E-08	4.221
	0.2	0.07	40	6.44E-07	6.02E-07	4.15E-08	3.113
			60	6.44E-07	6.12E-07	3.21E-08	2.408
			80	6.44E-07	6.19E-07	2.52E-08	1.887
		0.135	40	6.44E-07	5.71E-07	7.33E-08	5.496
			60	6.44E-07	5.86E-07	5.77E-08	4.325
			80	6.44E-07	5.98E-07	4.58E-08	3.435
		0.225	40	6.68E-07	5.55E-07	1.13E-07	8.476
			60	6.68E-07	5.77E-07	9.08E-08	6.806
			80	6.68E-07	5.94E-07	7.33E-08	5.496

ตารางที่ ค.1 (ต่อ) ค่าความสามารถในการดูดซับของวัสดุดูดซับจากยางธรรมชาติผสมโพแทสเซียมคาร์บอเนต 15 phr ของตัวแปรที่ศึกษา

Temp gas (°C)	Flow gas (L/min)	Water content (%v)	Temp adsorption (°C)	FLUEGAS (kg/s)	PRODUCT (kg/s)	CO ₂ Adsorp (kg/s)	Capacity.Sim (mg/g)	
70	0.075	0.07	40	2.34E-07	2.19E-07	1.55E-08	1.159	
			60	2.34E-07	2.23E-07	1.19E-08	0.890	
			80	2.34E-07	2.25E-07	9.24E-09	0.693	
	0.135	0.075	0.135	40	2.34E-07	2.06E-07	2.81E-08	2.105
				60	2.34E-07	2.13E-07	2.18E-08	1.636
				80	2.34E-07	2.17E-07	1.72E-08	1.286
	0.225	0.075	0.225	40	2.34E-07	1.91E-07	4.33E-08	3.244
				60	2.34E-07	2.00E-07	3.41E-08	2.561
				80	2.34E-07	2.07E-07	2.72E-08	2.039
	0.15	0.075	0.07	40	4.69E-07	4.38E-07	3.06E-08	2.296
				60	4.69E-07	4.45E-07	2.36E-08	1.770
				80	4.69E-07	4.50E-07	1.84E-08	1.383
0.135		0.075	0.135	40	4.69E-07	4.14E-07	5.47E-08	4.101
				60	4.69E-07	4.26E-07	4.28E-08	3.210
				80	4.69E-07	4.35E-07	3.39E-08	2.539
0.225		0.075	0.225	40	4.69E-07	3.86E-07	8.28E-08	6.209
				60	4.69E-07	4.03E-07	6.60E-08	4.948
				80	4.69E-07	4.16E-07	5.29E-08	3.970
0.2		0.075	0.07	40	6.25E-07	5.85E-07	4.04E-08	3.027
				60	6.25E-07	5.94E-07	3.12E-08	2.341
				80	6.25E-07	6.01E-07	2.44E-08	1.833
	0.135	0.075	0.135	40	6.25E-07	5.54E-07	7.13E-08	5.350
				60	6.25E-07	5.69E-07	5.61E-08	4.208
				80	6.25E-07	5.81E-07	4.45E-08	3.340
	0.225	0.075	0.225	40	6.25E-07	5.18E-07	1.07E-07	8.009
				60	6.25E-07	5.40E-07	8.56E-08	6.421
				80	6.25E-07	5.56E-07	6.90E-08	5.178

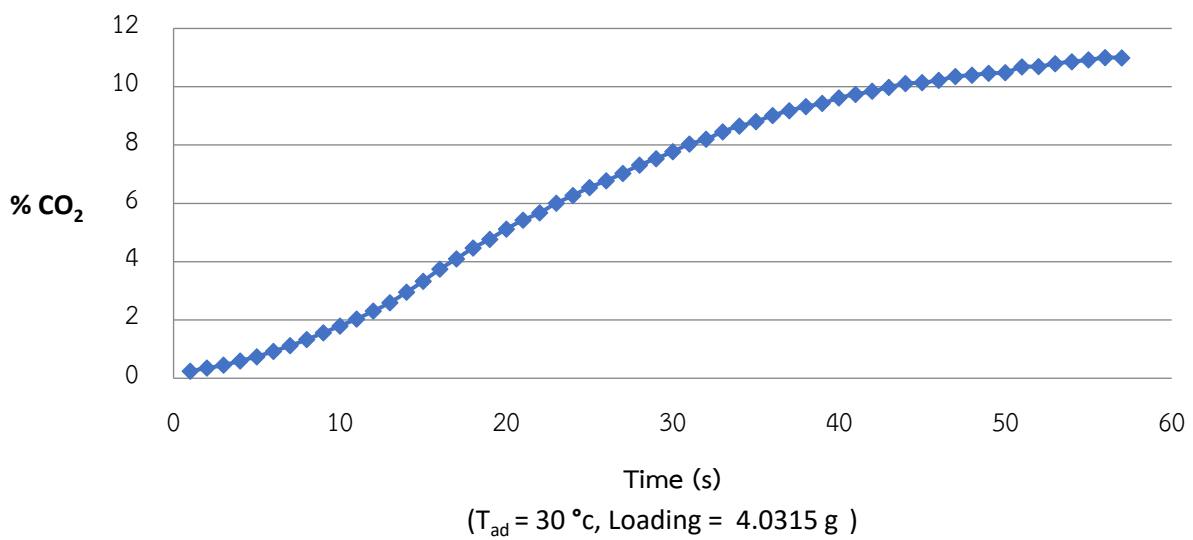
ภาคผนวก ง

Carbon dioxide breakthrough curve



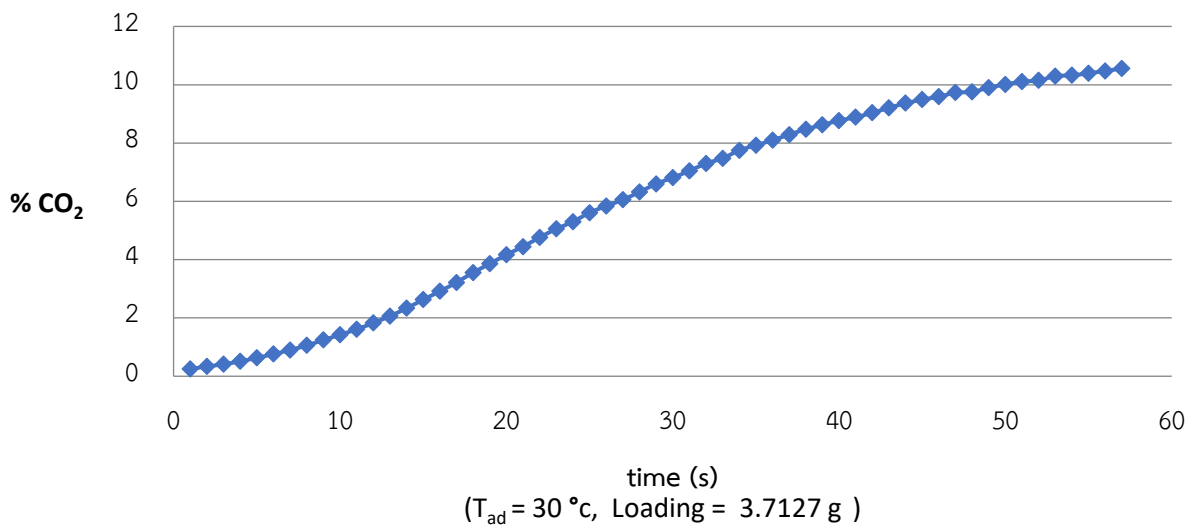
กราฟที่ ง.1 Carbon dioxide breakthrough curve เฉลี่ยของ NR 30 °C

Carbon dioxide breakthrough curve



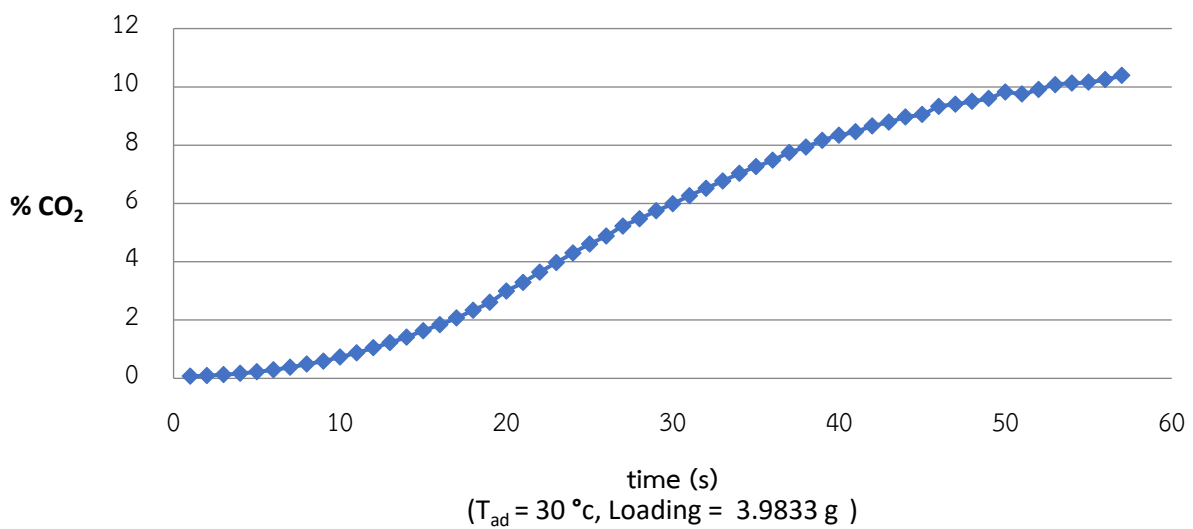
กราฟที่ ง.2 Carbon dioxide breakthrough curve เฉลี่ยของ NR-5K 30 °C

Carbon dioxide breakthrough curve



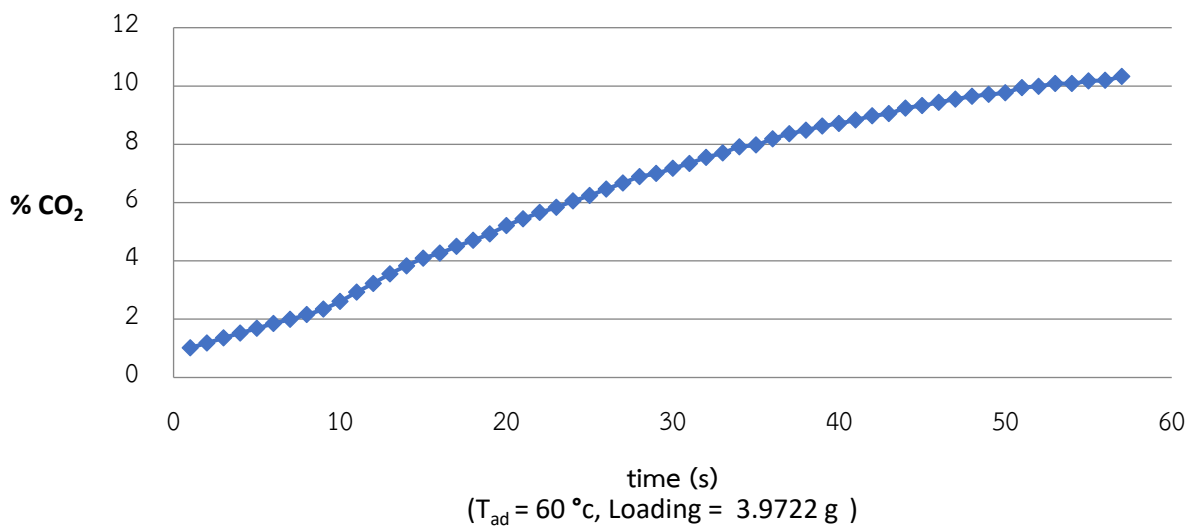
กราฟที่ ๓.3 Carbon dioxide breakthrough curve เฉลี่ยของ NR-10K 30 °C

Carbon dioxide breakthrough curve



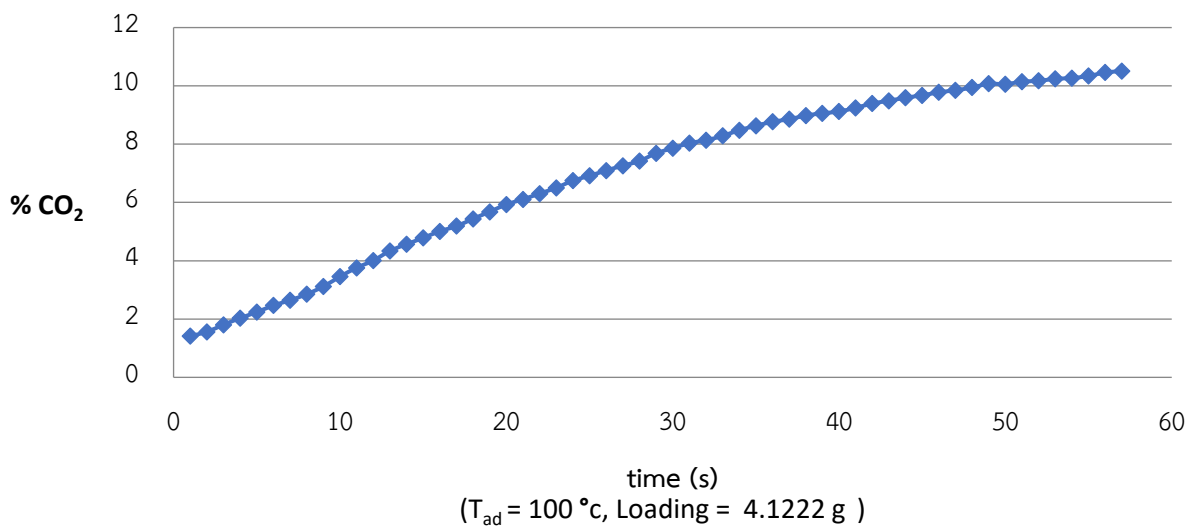
กราฟที่ ๓.4 Carbon dioxide breakthrough curve เฉลี่ยของ NR-15K 30 °C

Carbon dioxide breakthrough curve



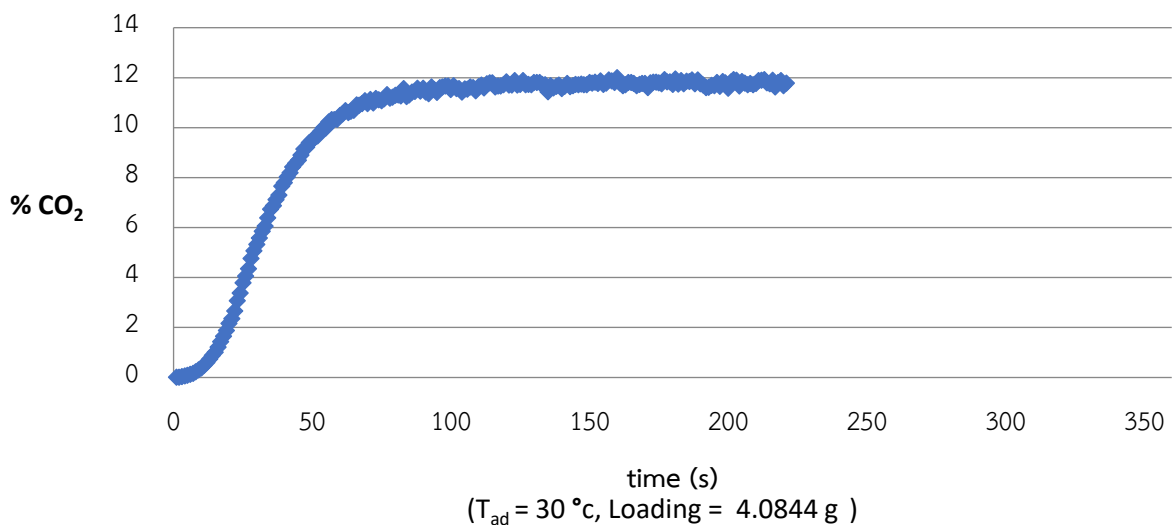
กราฟที่ ๓.5 Carbon dioxide breakthrough curve เฉลี่ยของ NR-15K 60 °C

Carbon dioxide breakthrough curve



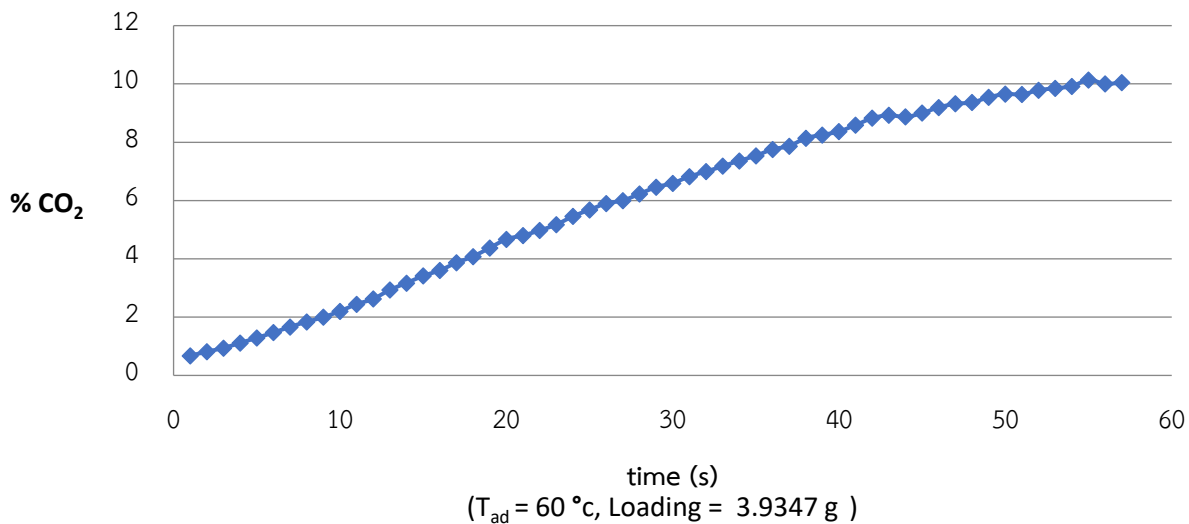
กราฟที่ ๓.6 Carbon dioxide breakthrough curve เฉลี่ยของ NR-15K 100 °C

Carbon dioxide breakthrough curve

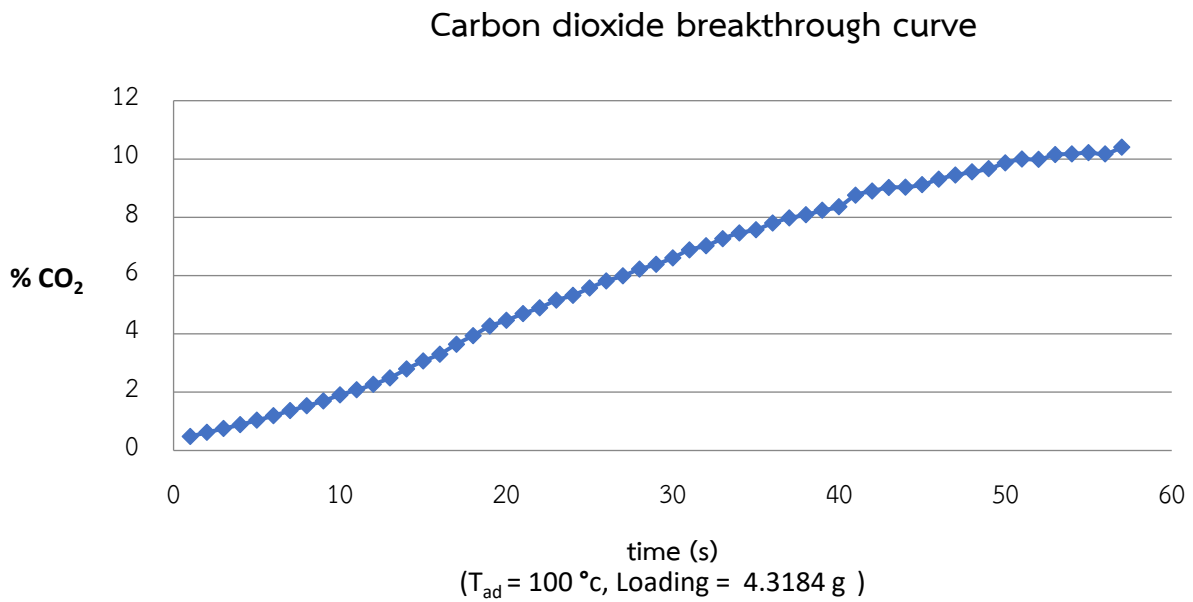


กราฟที่ ๗.7 Carbon dioxide breakthrough curve เฉลี่ยของ NR-15K 30 °C กรณีที่มีน้ำ

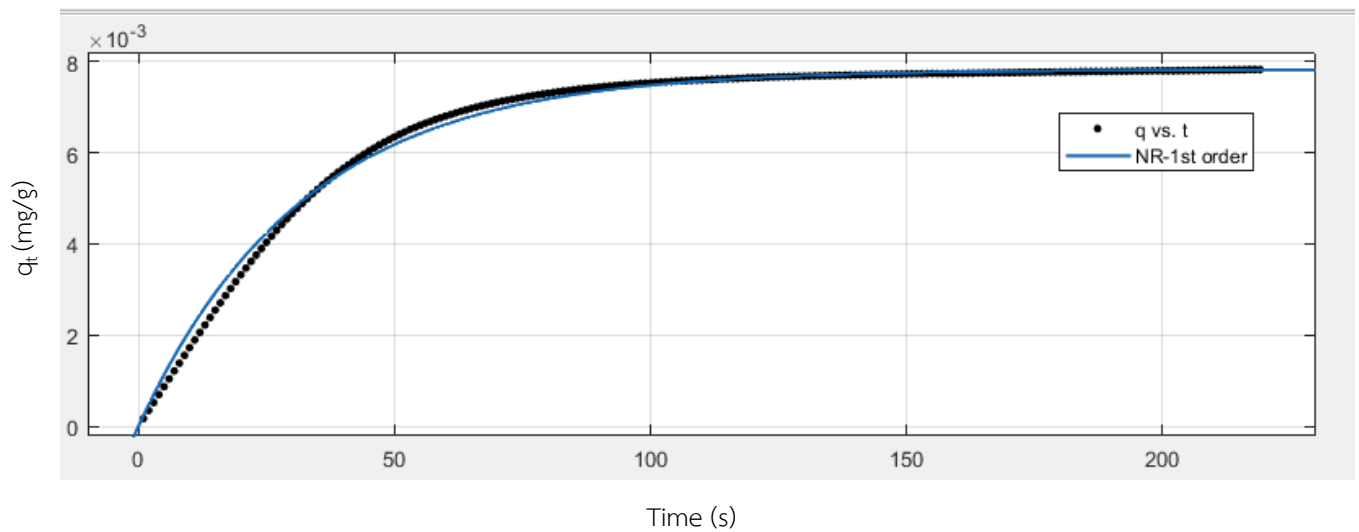
Carbon dioxide breakthrough curve



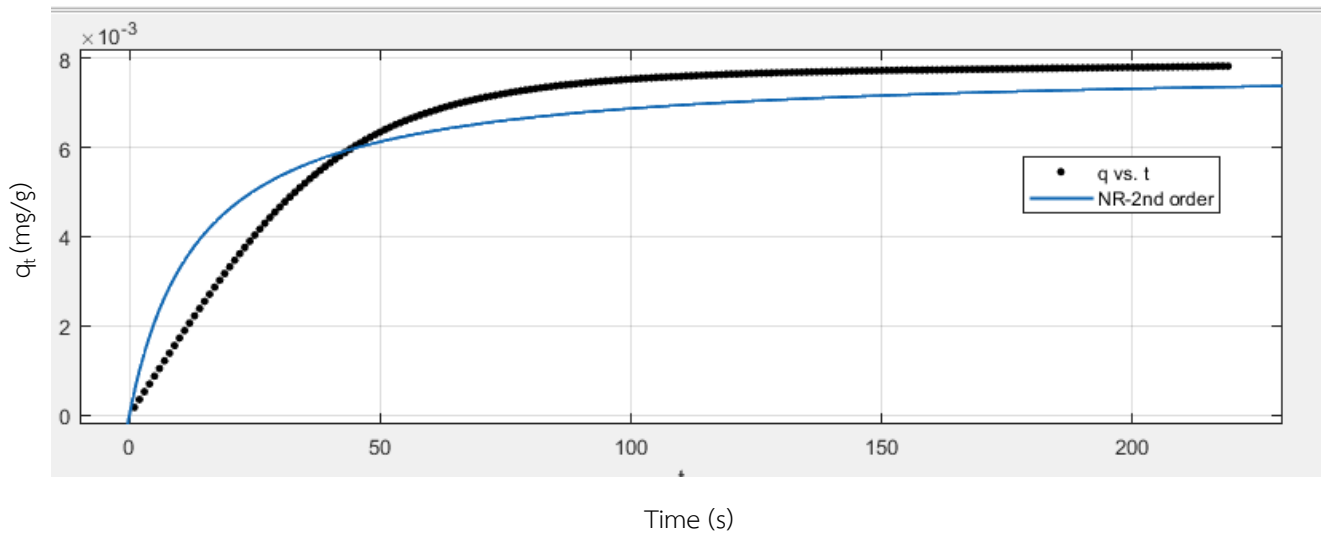
กราฟที่ ๗.8 Carbon dioxide breakthrough curve เฉลี่ยของ NR-15K 60 °C กรณีที่มีน้ำ



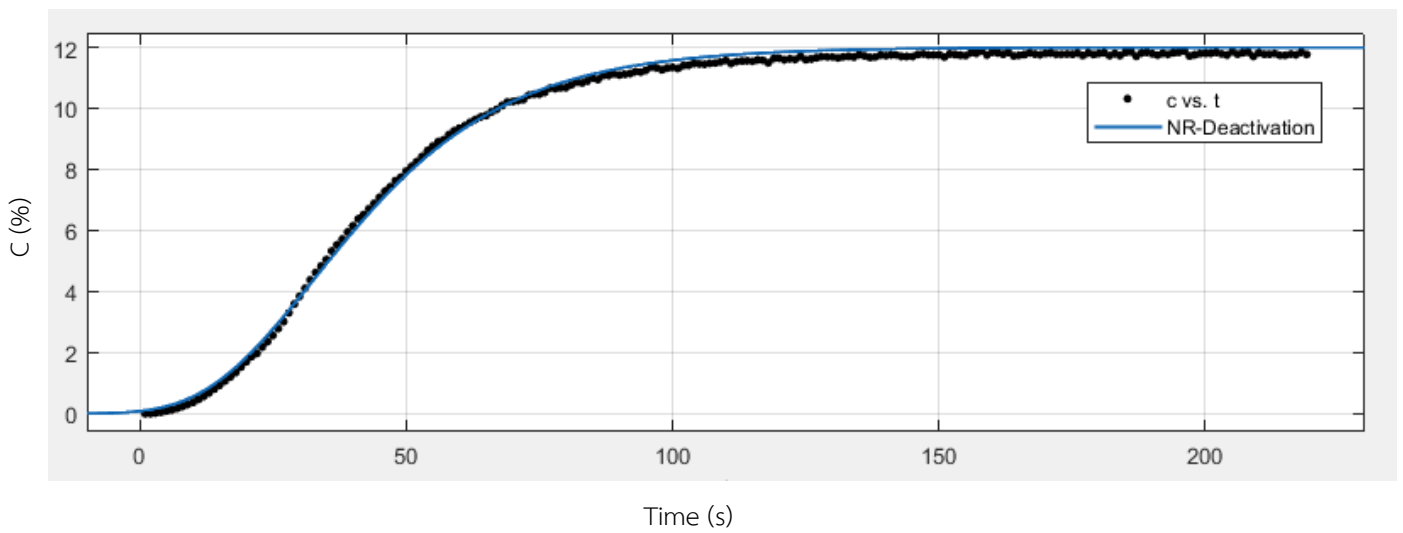
กราฟที่ ง.9 Carbon dioxide breakthrough curve เฉลี่ยของ NR-15K 100 °C กรณีที่มีน้ำ



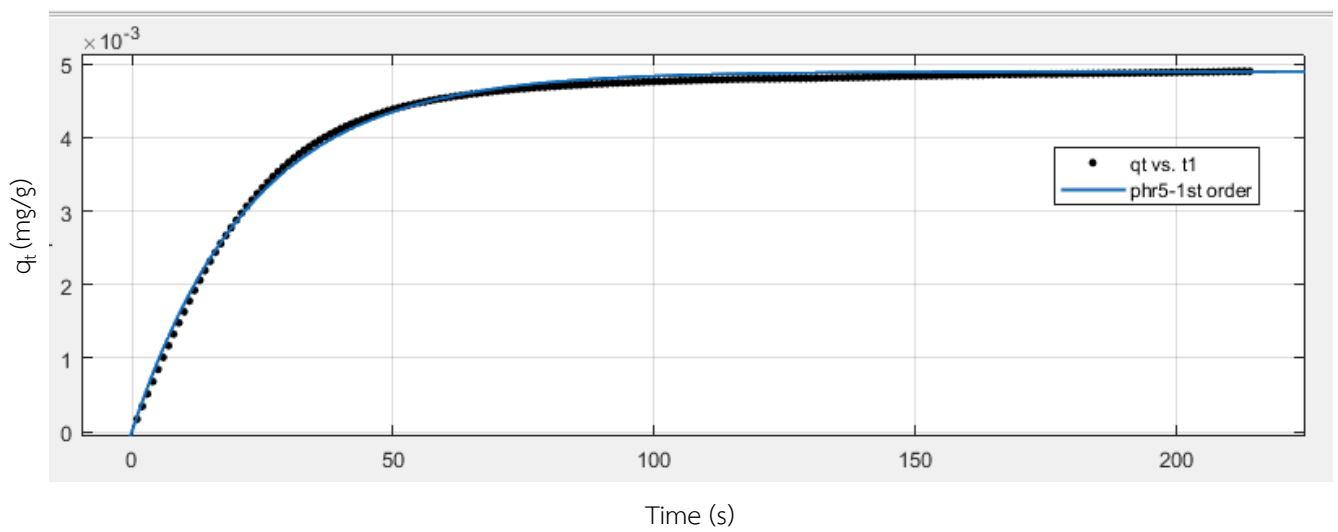
กราฟที่ ง.10 แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมของ NR 30 °C



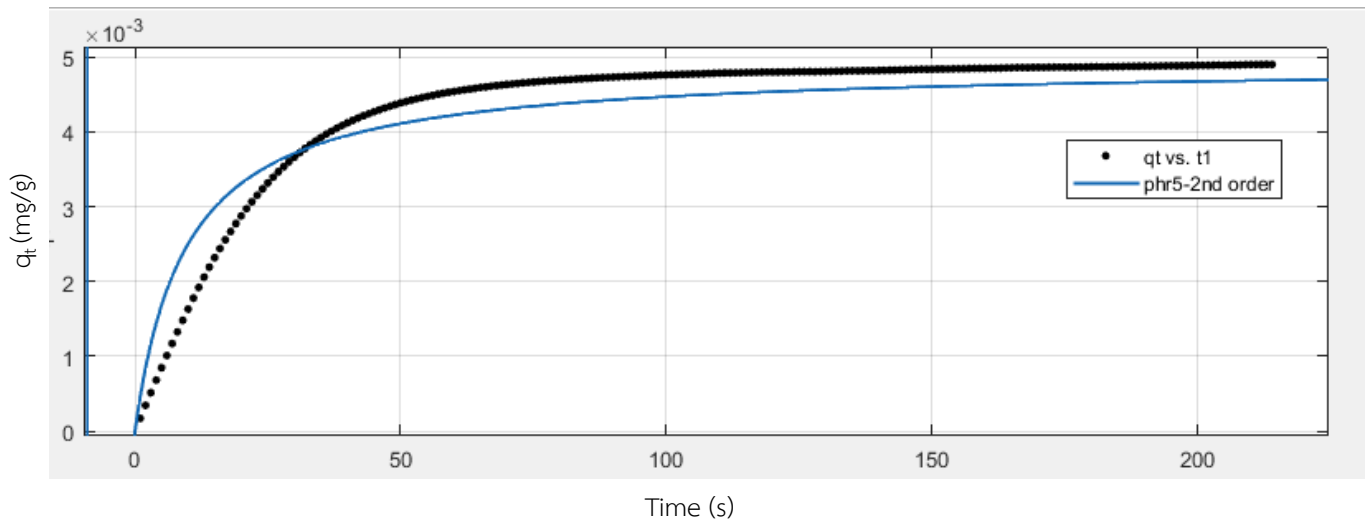
กราฟที่ ง.11 แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียมของ NR 30 °C



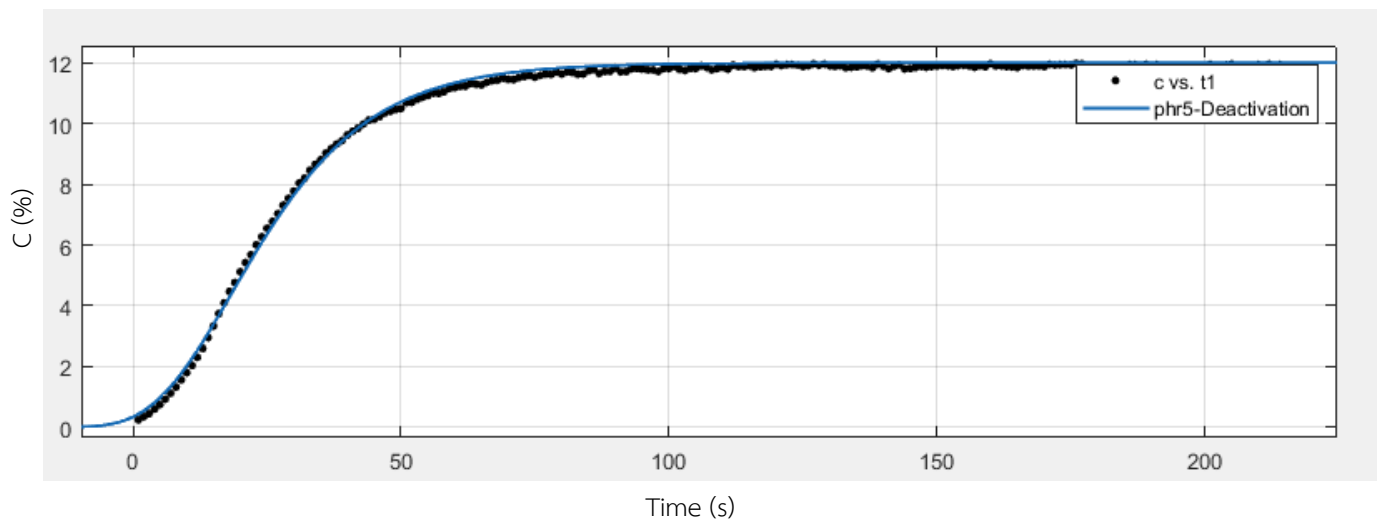
กราฟที่ ง.12 แบบจำลองการเสื่อมสภาพของ NR 30 °C



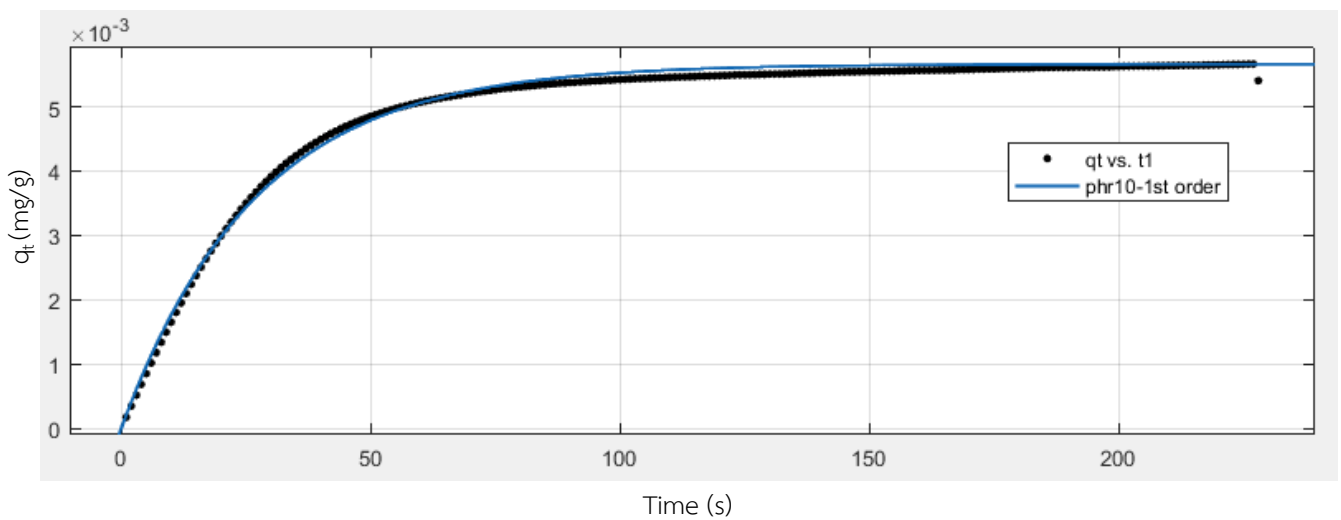
กราฟที่ ง.13 แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมของ NR-5K 30 °C



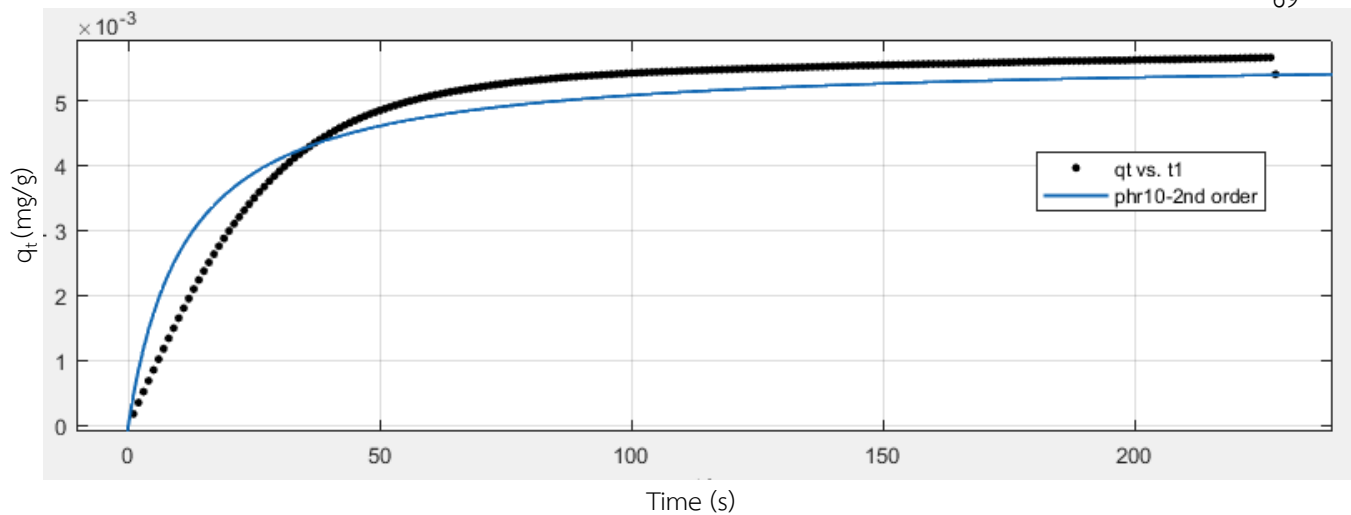
กราฟที่ ง.14 แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียมของ NR-5K 30°C



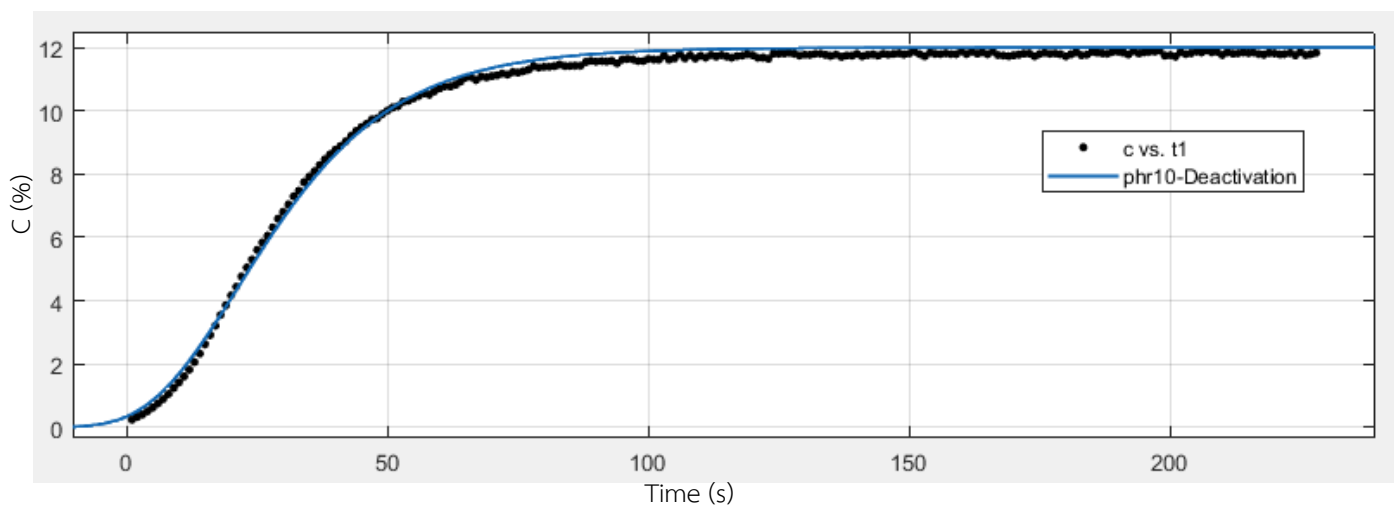
กราฟที่ ง.15 แบบจำลองการเสื่อมสภาพของ NR-5K 30°C



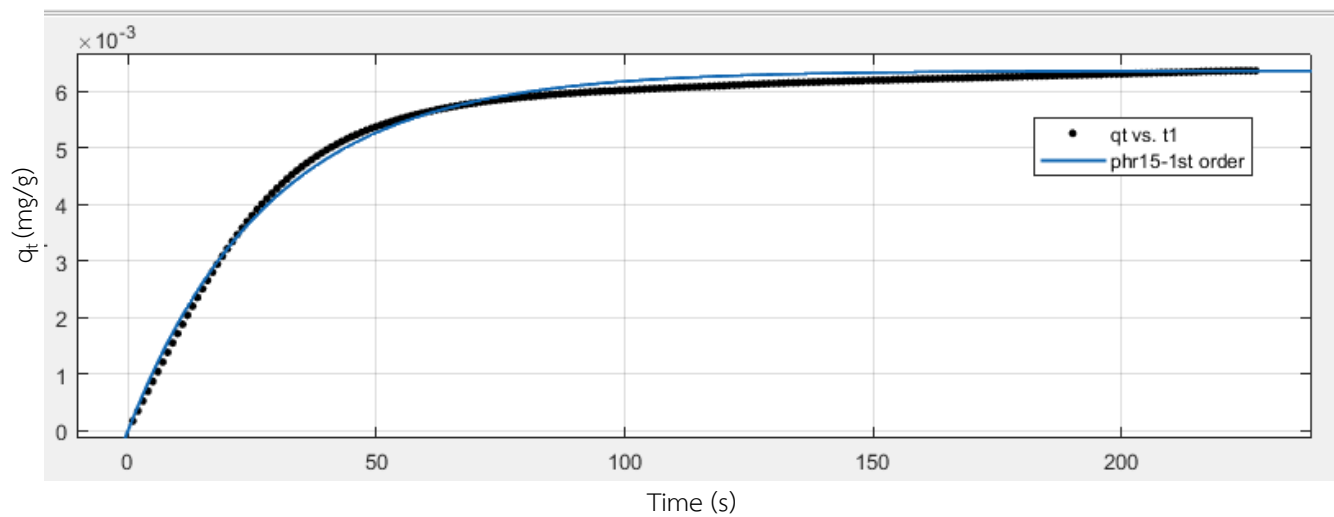
กราฟที่ ง.16 แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมของ NR-10K 30°C



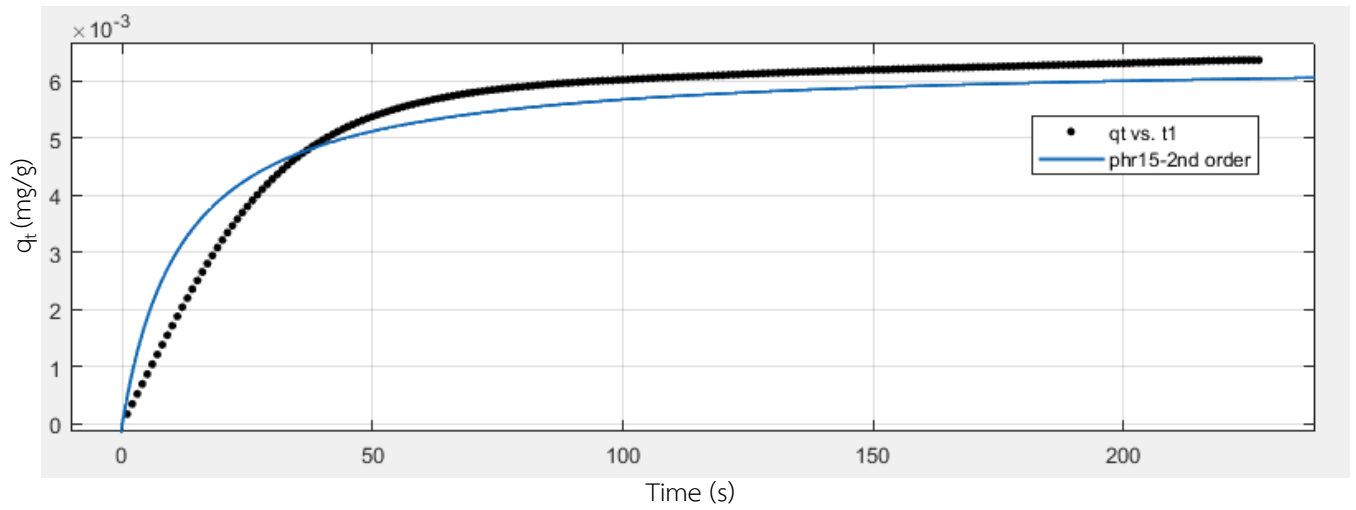
กราฟที่ ง.17 แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียมของ NR-10K 30 °C



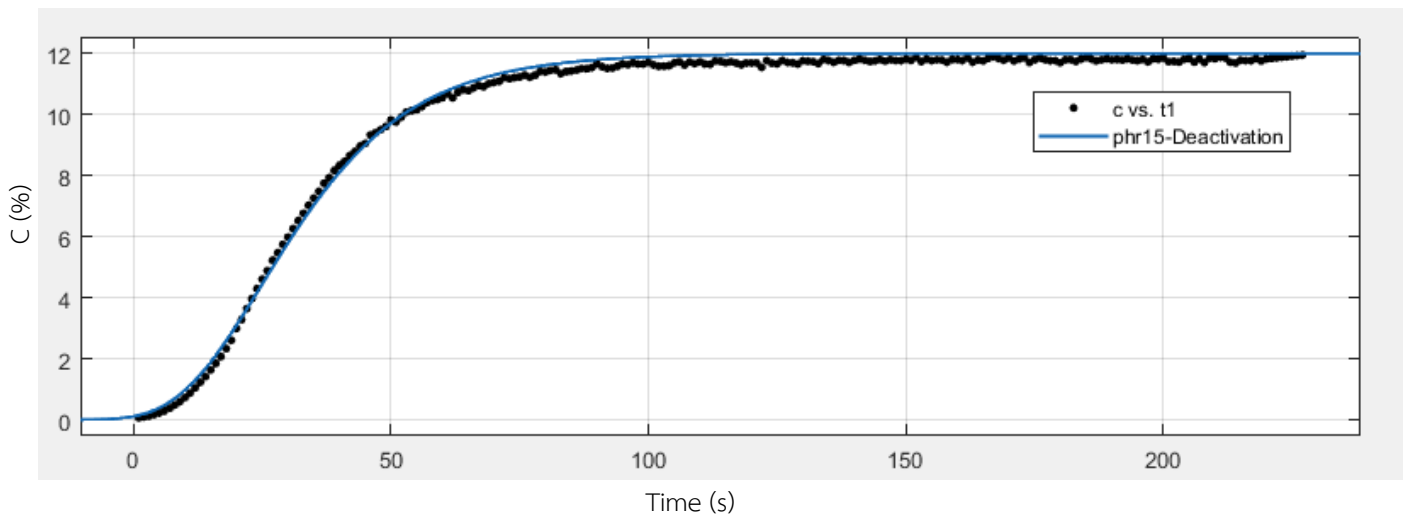
กราฟที่ ง.18 แบบจำลองการเสื่อมสภาพของ NR-10K 30 °C



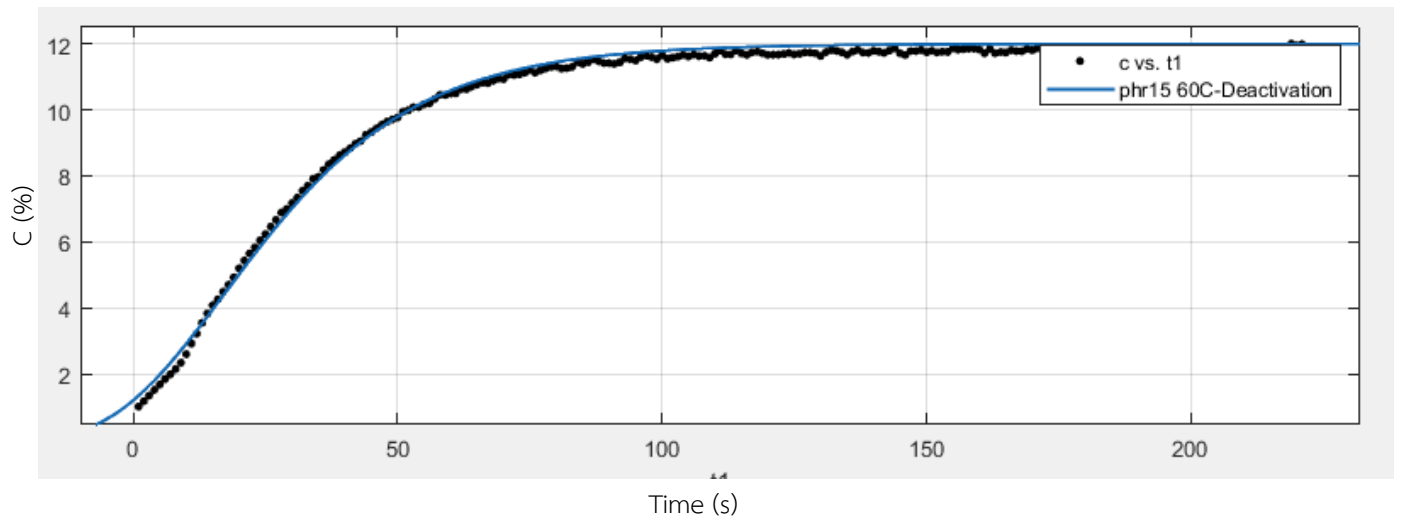
กราฟที่ ง.19 แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมของ NR-15K 30 °C



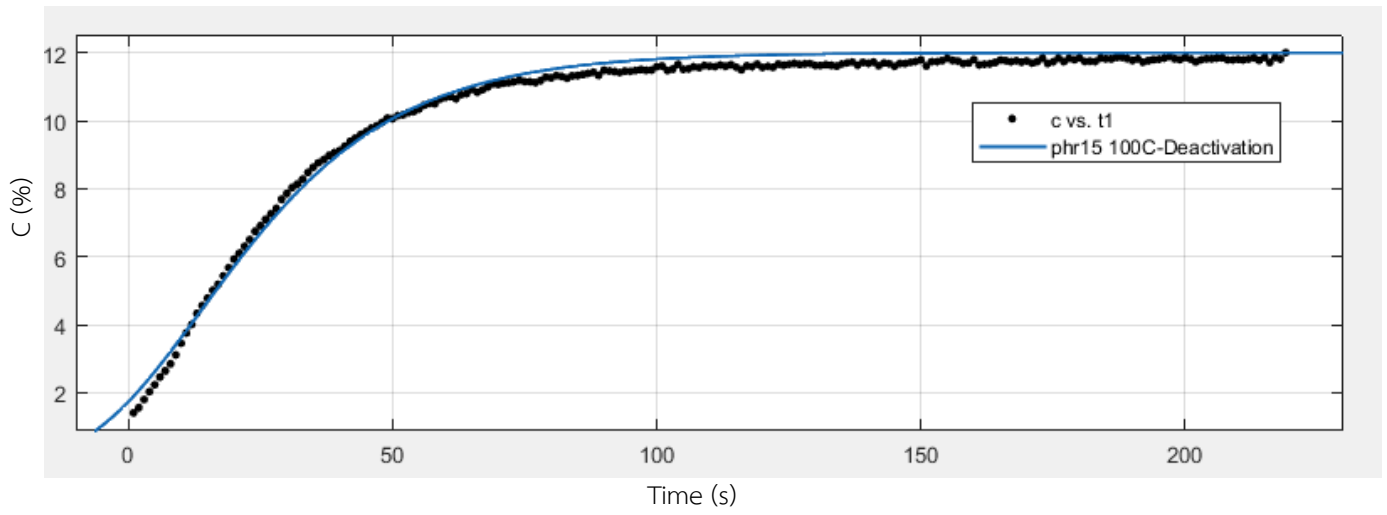
กราฟที่ ง.20 แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียมของ NR-15K 30 °C



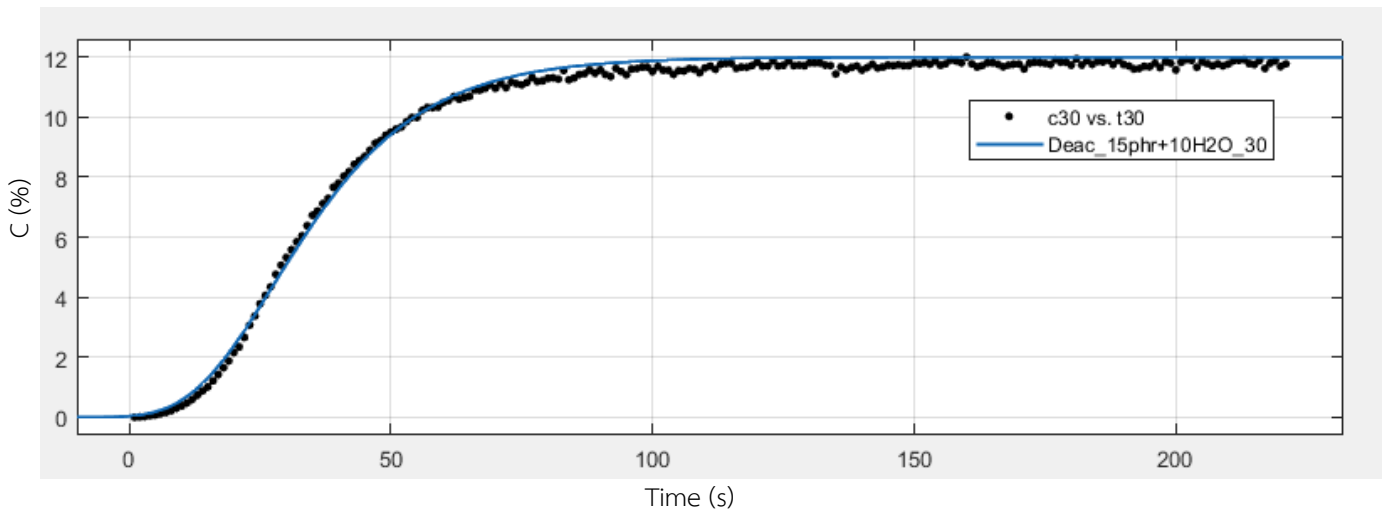
กราฟที่ ง.21 แบบจำลองการเสื่อมสภาพของ NR-15K 30 °C



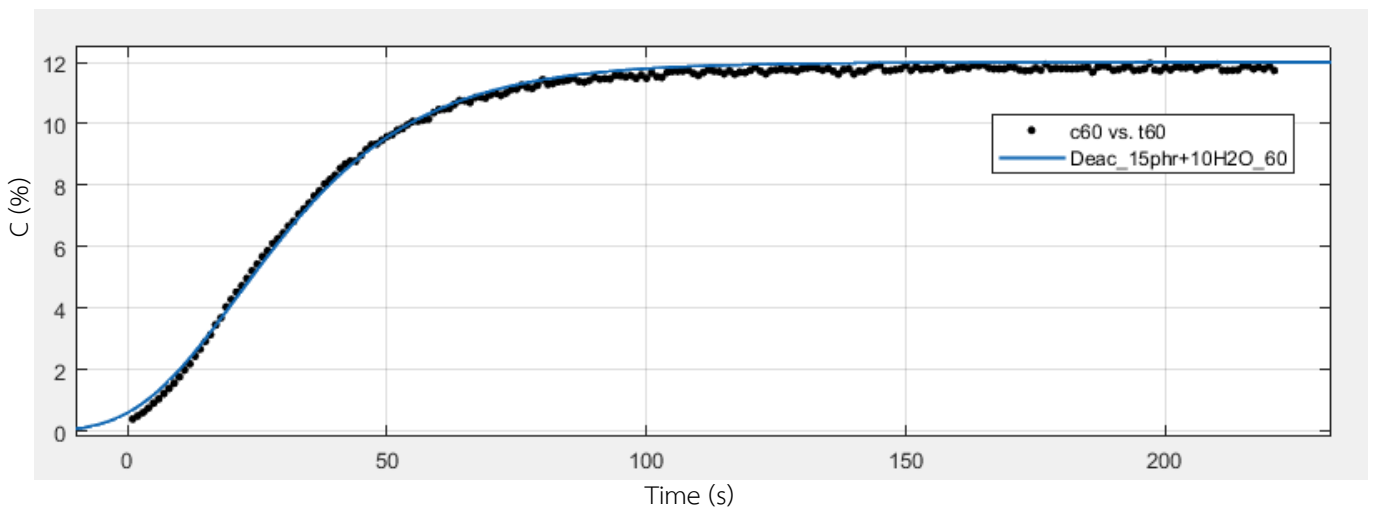
กราฟที่ ง.22 แบบจำลองการเสื่อมสภาพของ NR-15K 60 °C



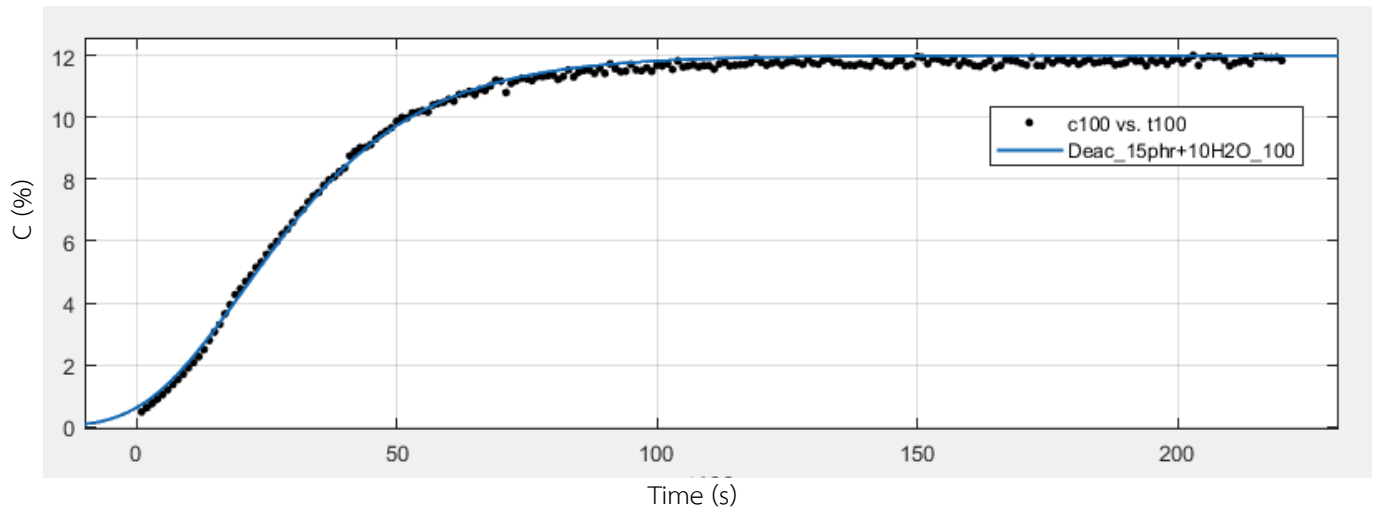
กราฟที่ ง.23 แบบจำลองการเสื่อมสภาพของ NR-15K 100 °C



กราฟที่ ง.24 แบบจำลองการเสื่อมสภาพของ NR-15K 30 °C กรณีที่มีน้ำ



กราฟที่ ง.25 แบบจำลองการเสื่อมสภาพของ NR-15K 60 °C กรณีที่มีน้ำ



กราฟที่ ง.26 แบบจำลองการเสื่อมสภาพของ NR-15K 100 °C กรณีที่มีน้ำ