

AMINE-MODIFIED WASTE TIRE POWDER FOR CO₂ CAPTURE



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Chemical Technology

Department of Chemical Technology

FACULTY OF SCIENCE

Chulalongkorn University

Academic Year 2021

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผงบยารยนต์เหลือทิ้งดัดแปรด้วยแอมีนสำหรับการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์
โดย	น.ส.ณภัสรจิรา จารี
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ)	
.....	กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรวัฒน์ เสมอ)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุวิมล วงศ์สกุลเกษัช)	

ณภัทร์จิรา จารี : ผงยางรถยนต์เหลือทิ้งดัดแปรด้วยแอมีนสำหรับการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์. (AMINE-MODIFIED WASTE TIRE POWDER FOR CO₂ CAPTURE) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อเตรียมวัสดุดูดซับจากผงยางรถยนต์เหลือทิ้ง (WR) โดยการดัดแปรด้วยแอมีนเพื่อเพิ่มความจำเพาะต่อการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ ปัจจัยต่าง ๆ ที่ศึกษาได้แก่ อัตราการไหลของแก๊สขาเข้า (50 70 และ 100 มิลลิลิตรต่อนาที) ขนาดอนุภาคของผงยาง (20 40 และ 60 เมช) ผงยางก่อนและหลังการบำบัดด้วยสารละลายกรด ชนิดของแอมีน (เตตระเอทิลีนเพนตะแอมีนและพอลิเอทิลีนไดอิมีน) ความเข้มข้นของสารละลายแอมีน (ร้อยละ 2.5 5 และ 10 โดยน้ำหนัก) และอุณหภูมิในการดูดซับ (30 45 และ 60 องศาเซลเซียส) วัสดุดูดซับถูกพิสูจน์เอกลักษณ์ผ่านการวิเคราะห์ลักษณะพื้นที่ผิวจำเพาะ หมู่ฟังก์ชัน ร้อยละของธาตุและลักษณะสันฐานวิทยา ความสามารถการดูดซับของผงยางเหลือทิ้งถูกทดสอบโดยเครื่องปฏิกรณ์แสดงตนเลสภายใต้ภาวะอุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ผงยางเหลือทิ้งขนาดเมช 60 มีค่าความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นหลังบำบัดด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1 โมลาร์ (WR60A) เทียบกับผงยางเหลือทิ้งขนาด 60 เมชก่อนบำบัดด้วยสารละลายกรด (WR60) โดยใช้อัตราการไหลของแก๊สขาเข้าในการดูดซับ 70 มิลลิลิตรต่อนาที เพื่อศึกษาชนิดและปริมาณของแอมีนที่เหมาะสม ผงยางเหลือทิ้งขนาด 60 เมชก่อนการบำบัดด้วยสารละลายกรด (WR60) ถูกนำมาดัดแปรเพื่อทดสอบหาค่าความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่า การดัดแปรด้วยเตตระเอทิลีนเพนตะแอมีนที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักช่วยเพิ่มค่าความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ให้กับ WR60 ได้มากที่สุด (10.41 มิลลิกรัมต่อกรัม) หลังจากนั้นนำ WR60A ซึ่งเป็นวัสดุที่เตรียมจากผงยางเหลือทิ้งหลังบำบัดด้วยสารละลายกรดมาดัดแปรด้วยเตตระเอทิลีนเพนตะแอมีนที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก (WR60A_10T) พบว่า ค่าการดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้น (11.64 มิลลิกรัมต่อกรัม) ที่ภาวะอุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศโดยใช้อัตราการไหลของแก๊สขาเข้า 70 มิลลิลิตรต่อนาที ผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า WR60A_10T มีค่าความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุด นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังได้ศึกษาความสามารถในการดูดซับหลังจากการฟื้นฟูสภาพและจลนพลศาสตร์ของวัสดุดูดซับ พบว่า WR60A_10T มีค่าความจุในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงเพียงร้อยละ 4.02 หลังจากผ่านการดูดซับ-คายซับทั้งหมด 10 ครั้ง แบบจำลองจลนพลศาสตร์แบบอวาฟรามิ (Avrami's model) สามารถอธิบายกลไกการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้

สาขาวิชา เคมีเทคนิค
ปีการศึกษา 2564

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6171944923 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORD: waste tire powder, carbondioxide adsorbent, amine impergnation,
carbondioxide adsorption

Napatjira Jaree : AMINE-MODIFIED WASTE TIRE POWDER FOR CO₂ CAPTURE. Advisor:
Assoc. Prof. SIRILUX POOMPRADUB, Ph.D.

This research aimed to prepare adsorbent material from modified waste tire rubber (WR) by amine to increase selectivity for CO₂ capture. Various factors which studied were inlet flowrate (50, 70 and 100 ml min⁻¹), WR particle size (20, 40 and 60 mesh), WR with and without acid treatment, amine type (Tetraethylenepentamine: TEPA, Polyethylenimine: PEI), amine concentration (2.5, 5 and 10 %w/w) and adsorption temperature (30, 45 and 60 °C). The adsorbent materials were characterized by analysis of specific surface area, functional groups, percentage of element and morphology. The CO₂ adsorption ability of WR was investigated by using a stainless steel reactor under ambient temperature and atmospheric pressure. The results showed that the CO₂ adsorption capacity of WR with 60 mesh size increased after treated by 1 M sulfuric acid solution (WR60A) compared to WR60 using the inlet gas of 70 ml min⁻¹. Then, to optimize amine type and amine concentration, WR60 before acid treatment was modified to investigate CO₂ adsorption capacity. It was found that the CO₂ adsorption capacity of WR60 after 10%w/w TEPA modification was the highest (10.41 mg g⁻¹). After that, WR60 after acid treatment (WR60A) modified with 10%w/w TEPA showed the increase of CO₂ adsorption capacity (11.64 mg g⁻¹) under the ambient temperature and atmospheric pressure using the inlet flowrate at 70 ml min⁻¹. It can be concluded that the CO₂ adsorption capacity of WR60A_10T was the highest. In this research, the CO₂ adsorption capacity after regeneration and kinetic of adsorbents was also studied. It was found that the CO₂ adsorption capacity of WR60A_10T was dropped by only 4.02 % after 10th cycle adsorption-desorption. The CO₂ adsorption mechanism could be explained by Avrami's kinetic model

Field of Study: Chemical Technology

Student's Signature

Academic Year: 2021

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

งานวิทยานิพนธ์เรื่องนี้มีโอกาสสำเร็จได้หากไม่ได้รับความช่วยเหลือและอนุเคราะห์จากบุคคลต่าง ๆ โดยเฉพาะขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์.ดร. ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ ที่ช่วยกรุณาให้คำปรึกษาต่าง ๆ ทั้งในเรื่องของงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และในเรื่องของการทำงานและใช้ชีวิตทั่วไป

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรวัฒน์ เสมอ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ รองศาสตราจารย์ ดร.สุวิมล วงศ์สกุลเกษัช กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ภายนอกมหาวิทยาลัย ที่ได้อนุเคราะห์สละเวลาอันมีค่าในการเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อีกทั้งให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์จนวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุ (PETROMAT) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้การสนับสนุนเงินทุนสำหรับการศึกษาและเงินทุนในการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณคณาจารย์ เจ้าหน้าที่ นักวิทยาศาสตร์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิค และภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่คอยให้การสนับสนุนและอำนวยความสะดวกในการทำงาน รวมถึงให้คำแนะนำและให้กำลังใจในการทำงานวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วง

ขอขอบคุณทั้งพี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิค ทั้งระดับปริญญาตรีและบัณฑิตศึกษาที่คอยให้ความช่วยเหลืออำนวยความสะดวกต่าง ๆ รวมทั้งให้คำปรึกษาและให้กำลังใจในการทำงานวิจัยจนงานสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ เพื่อน ๆ เคมีเทคนิค รุ่นที่ 58 ทุกคนที่คอยเป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนในระหว่างเวลาที่ได้ทำวิทยานิพนธ์นี้ตลอด

และสุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา พี่ชาย ครอบครัวทุกคนที่ได้คอยเป็นกำลังใจสนับสนุนในด้านการทำงานและด้านทุนทรัพย์ตลอดจนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ณภัสรจิรา จารี

สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ญ
สารบัญตาราง.....	1
บทที่ 1.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 จุดประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2.....	6
2.1 ภาวะโลกร้อน.....	6
2.2 แก๊สเรือนกระจก.....	7
2.3 การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์.....	10
2.3.1 การดูดซึม (Absorption).....	10
2.3.2 เมมเบรน (Membrane).....	11
2.3.3 การกลั่นแยกที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic Distillation).....	12

2.3.4 การดูดซับ (Adsorption).....	13
2.3.4.1 การดูดซับทางกายภาพ.....	14
2.3.4.2 การดูดซับทางเคมี.....	14
2.4 วัสดุดูดซับ	15
2.5 การดัดแปรวัสดุดูดซับ.....	16
2.5.1 การกราฟต์ (Grafting).....	16
2.5.2 การเปียกชุ่ม (Impregnation)	17
2.6 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ (Adsorption Kinetic).....	17
2.6.1 แบบจำลองอันดับหนึ่งเทียม.....	17
2.6.2 แบบจำลองอันดับสองเทียม.....	18
2.6.3 แบบจำลองอาฟรามี่.....	18
2.7 ยางรถยนต์	19
2.7.1 องค์ประกอบทางเคมีของยางรถยนต์.....	19
2.7.1.1 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber: NR).....	19
2.7.1.2 ยางสไตรีน-บิวทาไดอีน (Styrene Butadiene Rubber: SBR).....	19
2.7.1.3 ยางบิวทาไดอีน (Butadiene Rubber: BR).....	19
2.7.1.4 คาร์บอนแบล็ก (Carbon Black)	20
2.7.1.5 สารวัลคาไนซ์ (Vulcanizing Agent)	20
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	20
บทที่ 3	23
3.1 สารเคมีที่ใช้.....	23
3.2 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้.....	23
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	24
3.3.1 การบำบัดผงยางเหลือทิ้งด้วยกรด	24

3.3.2 การตัดแปรงยางเหลือทิ้งด้วยแอมีน	24
3.3.3 การบำบัดผงยางเหลือทิ้งด้วยกรดและตัดแปรงด้วยแอมีน	24
3.4 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของวัสดุดูดซับ	25
3.4.1 การศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุดูดซับ	25
3.4.2 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนวัสดุดูดซับ	25
3.4.3 การศึกษาร้อยละธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจนและซัลเฟอร์	26
3.4.4 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวัสดุดูดซับ	27
3.5 การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์	27
3.6 กระบวนการนำกลับมาใช้ซ้ำ (Regeneration Process)	28
3.7 การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ	28
บทที่ 4	30
4.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของวัสดุดูดซับ	30
4.1.1 พื้นที่ผิวจำเพาะ	30
4.1.1.1 ผงยางเหลือทิ้ง	30
4.1.1.2 ผงยางเหลือทิ้งบำบัดด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก	30
4.1.1.3 ผงยางเหลือทิ้งตัดแปรงด้วยสารละลายแอมีน	31
4.1.2 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนวัสดุดูดซับ	33
4.1.3 การศึกษาร้อยละธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจนและซัลเฟอร์	36
4.1.4 ลักษณะสัณฐานวิทยา	38
4.2 การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์	40
4.2.1 ผลของอัตราการไหลของแก๊สขาเข้าต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์	40
4.2.2 ผลของขนาดผงยางเหลือทิ้งที่มีต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์	41
4.2.3 ผลของการบำบัดด้วยกรด	42
4.2.4 ผลของการตัดแปรงด้วยแอมีน	42

4.2.5 ผลของการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดแล้วดัดแปรด้วยเอมีน	43
4.2.6 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์	43
4.3 การฟื้นฟูสภาพวัสดุดูดซับเพื่อนำกลับมาใช้ซ้ำ	44
4.4 จลนพลศาสตร์ของวัสดุดูดซับ	45
บทที่ 5	48
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	48
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	49
บรรณานุกรม.....	50
ภาคผนวก ก.....	59
ภาคผนวก ข.....	60
ภาคผนวก ค.....	61
ภาคผนวก ง.....	62
ภาคผนวก จ.....	63
ภาคผนวก ฉ.....	64
ภาคผนวก ช.....	65
ประวัติผู้เขียน.....	66

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1 โครงสร้างของสารประกอบแอมีนชนิดต่าง ๆ	2
รูปที่ 2.1 ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิพื้นผิวโลกเฉลี่ยระหว่างแผ่นดินและมหาสมุทร ในช่วงปี ค.ศ. 1850 ถึง ค.ศ. 2019 [10]	6
รูปที่ 2.2 ปริมาณแก๊สเรือนกระจกชนิดต่าง ๆ ที่ถูกปลดปล่อยตั้งแต่ ปี ค.ศ. 1990 ถึง ค.ศ. 2020 [14].....	7
รูปที่ 2.3 สัดส่วนปริมาณแก๊สเรือนกระจก (Greenhouse Gas: GHG) ชนิดต่าง ๆ ที่สำคัญในการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจก [14].....	8
รูปที่ 2.4 ปริมาณการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์จากการคาดคะเน ตั้งแต่ช่วง ปี ค.ศ. 2014 จนถึง ค.ศ. 2030 [16].....	9
รูปที่ 2.5 การปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกตามภูมิภาคต่าง ๆ อ้างอิงจากข้อมูลพื้นฐานของสถานการณ์ในช่วง ปี ค.ศ. 2010 ถึง 2050 [18].....	10
รูปที่ 2.6 กระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้แอมีน [31]	11
รูปที่ 2.7 กระบวนการเลือกผ่านคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้เมมเบรน [31].....	12
รูปที่ 2.8 กระบวนการเลือกผ่านคาร์บอนไดออกไซด์โดยกระบวนการกลั่นแยกที่อุณหภูมิต่ำ [31] ..	13
รูปที่ 2.9 กระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ [31].....	14
รูปที่ 2.10 แผนภาพโครงสร้างของ MOFs [32]	16
รูปที่ 2.11 ลักษณะพื้นผิวของวัสดุดูดซับในการเติมแอมีน.....	17
รูปที่ 3.1 เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะยี่ห้อ Micromeritics รุ่น Asap 2020 (สหรัฐอเมริกา).....	25
รูปที่ 3.2 เครื่องวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันยี่ห้อ Thermo Ficher รุ่น Nicolet iS5 (สหรัฐอเมริกา).....	26
รูปที่ 3.3 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ ยี่ห้อ ParkinElmer รุ่น 2499 Series II (สหรัฐอเมริกา)	26
รูปที่ 3.4 เครื่องวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐาน ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-5480LV (ประเทศญี่ปุ่น).....	27

รูปที่ 3.6	แผนภาพอุปกรณ์ในการทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์.....	28
รูปที่ 3.7	แผนภาพการดำเนินงานวิจัย.....	29
รูปที่ 4.1	ภาพจำลองโครงสร้างของผงยางเหลือทิ้งก่อนและหลังเกิดปฏิกิริยาซัลโฟเนตชัน [56]	31
รูปที่ 4.2	แผนภาพจำลองลักษณะของพื้นผิวผงยางเหลือทิ้งก่อนและหลังเติมแอมีน	32
รูปที่ 4.3	ลักษณะโครงสร้างของแอมีน (a) TEPA (b) PEI.....	33
รูปที่ 4.4	FTIR สเปกตรัมของผงยางเหลือทิ้งก่อนตัดแปร (a) WR60 และหลังตัดแปรด้วย TEPA (b) WR60_2.5T (c) WR60_5T (d) WR60_10T	35
รูปที่ 4.5	FTIR สเปกตรัมของผงยางเหลือทิ้งก่อนตัดแปร (a) WR60 และหลังตัดแปรด้วย PEI (b) WR60_2.5P (c) WR60_5P (d) WR60_10P	35
รูปที่ 4.6	FTIR สเปกตรัมของผงยางเหลือทิ้งก่อนตัดแปร (a) WR60 หลังตัดแปรด้วย TEPA (b) WR60_10T และหลังบำบัดด้วยกรดและตัดแปรด้วย TEPA (c) WR60A_10T.....	36
รูปที่ 4.7	ลักษณะพื้นผิวของวัสดุดูดซับที่เตรียมจากผงยางเหลือทิ้ง (a) WR60 (b) WR60A	38
รูปที่ 4.8	ลักษณะพื้นผิวของวัสดุดูดซับที่เตรียมจากผงยางเหลือทิ้ง (a) WR60_2.5T (b) WR60_2.5P (c) WR60_5T (d) WR60_5P (e) WR60_10T (f) WR60_10P และ (g) WR60A_10T	39

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	23
ตารางที่ 4.1 พื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุดูดซับจากผงยางเหลือทิ้งชนิดต่าง ๆ.....	31
ตารางที่ 4.2 ร้อยละของธาตุคาร์บอน ไนโตรเจน ไฮโดรเจนและซัลเฟอร์	37
ตารางที่ 4.3 ค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของวัสดุดูดซับชนิด WR60 ที่อัตราการไหลแก๊สขาเข้าต่าง ๆ ที่เวลาการดูดซับเท่ากัน	40
ตารางที่ 4.4 ค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของผงยางเหลือทิ้งก่อนและหลังตัดแปรที่อัตราของแก๊สขาเข้า 70 มิลลิลิตรต่อนาที.....	41
ตารางที่ 4.5 ค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของ WR60A_10T ที่อุณหภูมิต่าง ๆ	44
ตารางที่ 4.6 ค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของวัสดุดูดซับหลังฟื้นฟูสภาพและนำกลับใช้ซ้ำ.....	45
ตารางที่ 4.7 แบบจำลองจลนพลศาสตร์ของวัสดุดูดซับที่ภาวะอุณหภูมิห้อง (30 °C).....	47

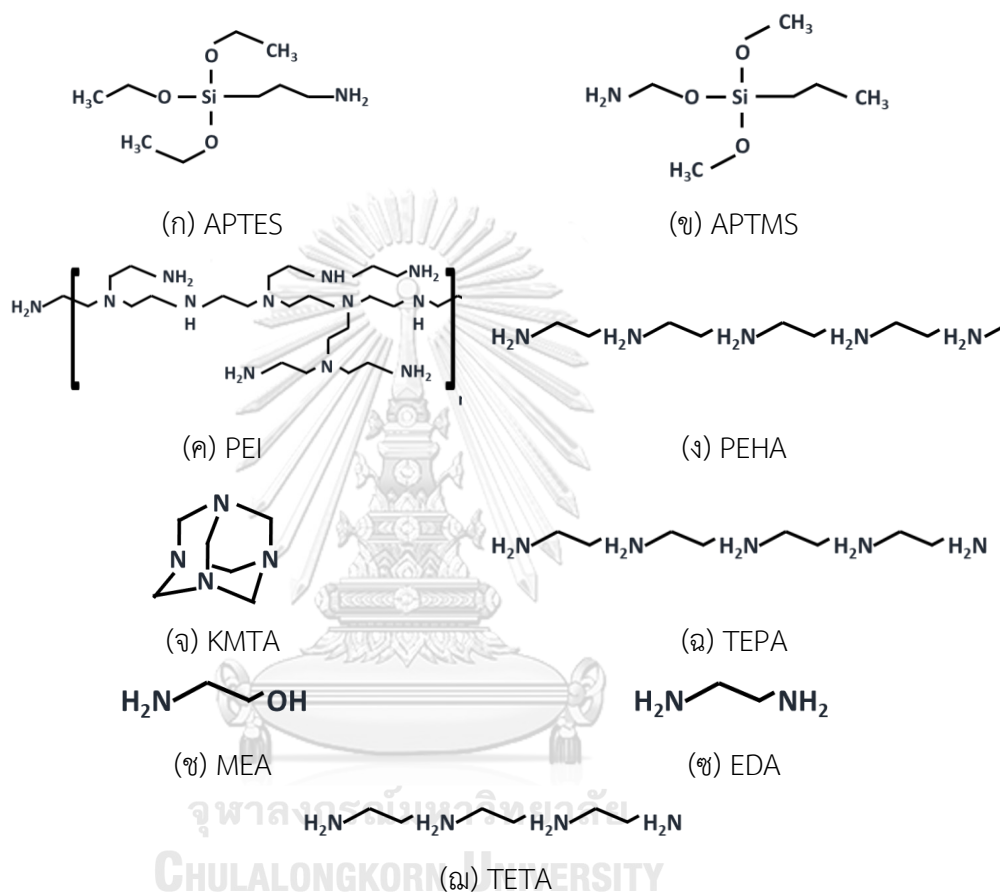
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) เป็นต้นเหตุของการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อนในชั้นบรรยากาศซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นทุกปี [1] โดยเกือบร้อยละ 80 ของการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์มาจากการเผาเชื้อเพลิงฟอสซิลในอุตสาหกรรมเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานของกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ [2] การพัฒนาเทคโนโลยีดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ถือเป็นทางเลือกหนึ่งที่ช่วยลดปัญหาข้างต้น จำเป็นต้องอาศัยวัสดุดูดซับที่มีรูพรุน [3] วัสดุที่นิยมนำมาใช้เป็นวัสดุดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ได้แก่ โลหะออกไซด์ (Metal Oxides-based Adsorbents) ซีโอไลต์ (Zeolite) ซิลิกา (Silica) ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) โครงข่ายโลหะ-สารอินทรีย์ (Metal Organic Frameworks: MOFs) และสารอินทรีย์พอลิเมอร์ (Organic Polymer) [4] อย่างไรก็ตาม วัสดุดังกล่าวมีข้อเสียบางประการ อาทิ มีประสิทธิภาพการดูดซับลดลงเมื่อทำการดูดซับในภาวะที่มีความชื้น มีความจำเพาะต่อคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำหรือมีความอ่อนไหวต่อความชื้น [5] ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยสนใจพัฒนาวัสดุดูดซับชนิดใหม่จากยางรถยนต์ที่หมดอายุการใช้งานแล้ว เนื่องจากยางรถยนต์มีส่วนประกอบของทั้งยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ ที่มีโครงสร้างแบบร่างแหจากการวัลคาไนเซชัน (Vulcanization) ส่งผลให้ยางมีความยืดหยุ่นและต้านทานต่อความร้อนได้ดี อีกทั้งยังมีสารเติมแต่งประเภทคาร์บอนแบล็กหรือซิลิกาที่ส่งผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ [4, 6] นอกจากนี้แนวทางการดำเนินงานวิจัยนี้ยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้งที่มีปริมาณมาก อย่างไรก็ตามแม้ว่ายางรถยนต์เหลือทิ้งสามารถใช้เป็นวัสดุดูดซับได้ แต่ประสิทธิภาพในการดูดซับต่ำ จึงจำเป็นต้องปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุให้มีความจำเพาะเจาะจงในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์มากขึ้น กล่าวคือ การเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะให้มากขึ้น ตลอดจนการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันให้มีความว่องไวต่อการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ การพัฒนาวัสดุดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยการดัดแปรโดยการเติมหมู่แอมินลงบนวัสดุรองรับ (Support) อีกทั้งเพิ่มความแข็งแรงในการยึดติดระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และผิวของตัวรองรับ สารประกอบแอมินที่นิยมใช้ ได้แก่ 3-แอมิโนโพรพิลไตรเอทอกซิเลน (3-Aminopropyltriethoxysilane: APTES) 3-แอมิโนโพรพิลไตรเมทอกซิเลน (3-Aminopropyltrimethoxysilane: APTMS) พอลิเอทิลีนอิมิน

(Polyethylenimine: PEI) เพนตะเอทิลีนเฮกซะมีน (Pentaethylenehexamine: PEHA) เฮกซะเมทิลีนเตตระมีน (Hexamethylenetetramine HMTA) เตตระเอทิลีนเพนตะมีน (Tetraethylenepentamine: TEPA) มอนอเอทานอลามีน (Monoethanolamine: MEA) เอทิลีนไดเอมีน (Ethylenediamine: EDA) ไตรเอทิลีนเตตระมีน (Triethylenetetramine: TETA) เป็นต้น (รูปที่ 1.1) [4]



รูปที่ 1.1 โครงสร้างของสารประกอบแอมีนชนิดต่าง ๆ

วิธีการดัดแปรโดยการเติมหมู่แอมีนที่นิยมใช้ในปัจจุบัน มี 2 วิธี คือ การทำให้เปียกชุ่ม (Impregnation) เป็นการจำกัดการเคลื่อนไหวของแอมีนด้วยการนำไปเคลือบที่วัสดุโดยตรง โดยแอมีนจะค่อย ๆ แพร่ซึมเข้าสู่รูพรุน และการกราฟต์ (Grafting) เป็นการทำให้แอมีนเกิดปฏิกิริยาเคมีหรือเกิดการเชื่อมพันธะระหว่างแอมีนกับพื้นผิวของวัสดุ แต่ปริมาณของแอมีนบริเวณพื้นผิวจะน้อยกว่าเมื่อเทียบกับวิธีเปียกชุ่ม [7]

นอกจากนี้วัสดุดูดซับยังสามารถนำมาผ่านกระบวนการการฟื้นฟูสภาพ (Regeneration) ซึ่งสามารถทำได้โดยการลดความดัน (Pressure swing adsorption) ร่วมกับการเพิ่มอุณหภูมิ (Temperature swing adsorption) [8] หรือเรียกว่าการดูดซับ

สลับความดันร่วมกับการดูดซับแบบสลับอุณหภูมิ ความดันที่ลดลงหรืออุณหภูมิที่สูงขึ้น ส่งผลให้วัสดุดูดซับเกิดการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์แล้วสามารถนำกลับมาใช้งานได้อีกครั้ง ในงานวิจัยนี้คาดหวังว่าการพัฒนาวัสดุดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จากผงยางเหลือทิ้งรถยนต์ เหลือทิ้งโดยการปรับปรุงคุณภาพของผงยางเหลือทิ้งรถยนต์ ดัดแปรให้มีความจำเพาะเจาะจง ในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์มากขึ้น รวมถึงสามารถฟื้นฟูสภาพและนำกลับมาใช้ซ้ำได้ จนกลายเป็นวัสดุทางเลือกในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ต่อไปในอนาคต

1.2 จุดประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เตรียมวัสดุดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จากผงยางเหลือทิ้งรถยนต์เหลือทิ้งดัดแปรด้วยแอมีน
- 1.2.2 พิสูจน์เอกลักษณ์และศึกษาสมบัติการดูดซับและคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ ตลอดจนการนำกลับมาใช้ซ้ำของผงยางเหลือทิ้งรถยนต์เหลือทิ้งดัดแปรด้วยแอมีน

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้วัสดุดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเตรียมจากผงยางเหลือทิ้งรถยนต์เหลือทิ้งดัดแปร

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

- 1.4.1 ค้นคว้าเอกสารและข้อมูลที่เกี่ยวข้อง จัดเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย
- 1.4.2 วิเคราะห์องค์ประกอบและพิสูจน์เอกลักษณ์ของผงยางเหลือทิ้งรถยนต์เหลือทิ้งก่อนดัดแปร
 1. วิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะด้วยเทคนิค N_2 adsorption/desorption
 2. วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier Transform infrared spectroscopy (FT-IR)
 3. วิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยเทคนิค CHN/S analysis
 4. วิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM)
 5. วิเคราะห์เสถียรภาพของวัสดุเมื่อได้รับความร้อนด้วยเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA)
- 1.4.3 บำบัดผงยางเหลือทิ้งด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตรเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวของผงยางเหลือทิ้งรถยนต์เหลือทิ้ง

1.4.4 เตรียมวัสดุดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยการเติมหมู่แอมีนลงบนยางที่ถูกปรับสภาพแล้วโดยวิธีเปียกชุ่มลงบนยาง ตัวแปรที่ศึกษาคือ (1) ขนาดอนุภาคของผงยางเหลือทิ้งรถยนต์เหลือทิ้ง คือ 20 40 และ 60 เมช (2) ชนิดของหมู่แอมีนที่แตกต่างกันในการนำมาดัดแปร คือ TEPA และ PEI และ (3) ปริมาณของแอมีน คือ ร้อยละ 2.5 5 และ 10 โดยน้ำหนักของยาง โดยเตรียมได้ดังนี้

1. ชั่งน้ำหนักผงยางเหลือทิ้ง ประมาณ 10 – 30 กรัม
2. เตรียมสารประกอบแอมีนแต่ละชนิดโดยเตรียมในปริมาณ ร้อยละ 2.5 5 และ 10 โดยน้ำหนักของยาง
3. ละลายสารประกอบแอมีนในเอทานอล
4. ปั่นกวนสารละลายแอมีนเป็นเวลา 30 นาที
5. ผสมยางลงไปในการละลายแอมีน จากนั้นปั่นกวนเป็นเวลา 3 ชั่วโมง
6. นำไปอบในตู้อบลมร้อน (Oven) ที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

1.4.5 วิเคราะห์องค์ประกอบและพิสูจน์เอกลักษณ์ของยางหลังดัดแปรด้วยแอมีน

1. วิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะด้วยเทคนิค N₂ adsorption/desorption
2. วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FT-IR
3. วิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยเทคนิค CHN/S analysis
4. วิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM
5. วิเคราะห์เสถียรภาพของวัสดุเมื่อได้รับความร้อนด้วยเทคนิค TGA

1.4.6 ศึกษาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของยางที่ปรับสภาพด้วยกรดและดัดแปรด้วยแอมีน

1. ศึกษาผลของขนาดผงยางเหลือทิ้ง อัตราการไหลของแก๊สเข้า ชนิดสารดัดแปรที่ใช้ ปริมาณของหมู่แอมีน และอุณหภูมิที่มีผลต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเครื่องปฏิกรณ์สแตนเลสชนิดเบดนิ่ง (Fixed-bed stainless steel reactor)
2. ศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของผงยางเหลือทิ้งรถยนต์เหลือทิ้งก่อนและหลังการดัดแปร

1.4.7 ศึกษาการฟื้นฟูสภาพวัสดุดูดซับเพื่อนำกลับมาใช้ซ้ำด้วยวิธีดูดซับสลับความดันร่วมกับการดูดซับแบบสลับอุณหภูมิ

1.4.8 วิเคราะห์ สรุปผลการทดลอง และเขียนรายงานวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้วัสดุดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเตรียมจากผงยางเหลือทิ้งรถยนต์เหลือทิ้งดัดแปร



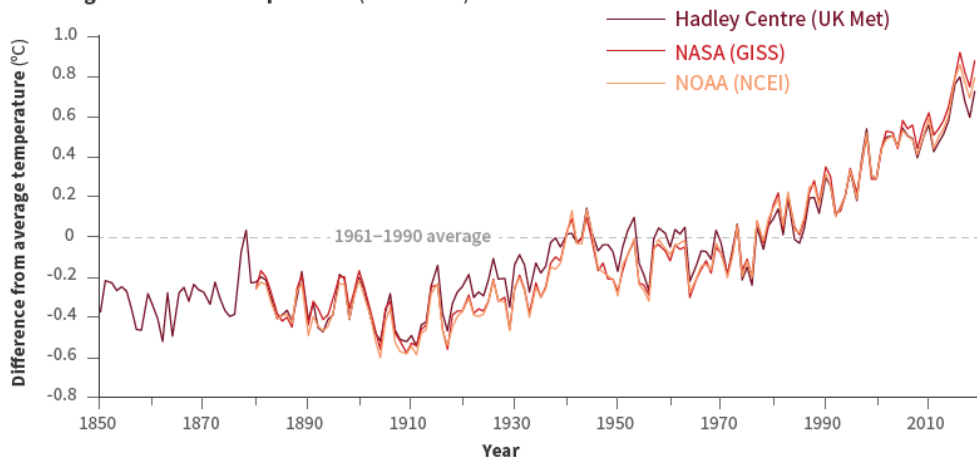
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ภาวะโลกร้อน

ภาวะโลกร้อน คือ ปรากฏการณ์ที่โลกมีอุณหภูมิเฉลี่ยในชั้นบรรยากาศเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศ โดยนับตั้งแต่ปี ค.ศ.1906 จนถึงในปัจจุบัน อุณหภูมิเฉลี่ยของชั้นบรรยากาศโลกเพิ่มสูงขึ้น ในแต่ละภูมิภาคจะมีช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกันไปตามสภาพภูมิประเทศ และยังมีแนวโน้มที่จะสูงขึ้นเรื่อย ๆ ต่อไปในอนาคต [9] โดยจากข้อมูลของ National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) climate government (รูป 2.1) ที่รวบรวมข้อมูลจาก Met office Hadley Centre for Climate Science and Services (UK Met) NASA Goddard Institute for Space Studied (NASA GISS) และ National Centers for Environmental Information (NCEI) แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิพื้นผิวโลกเฉลี่ยของทั้งบริเวณแผ่นดินและมหาสมุทรตั้งแต่ ค.ศ. 1850 จนถึงปัจจุบัน เพิ่มขึ้นประมาณ 0.99 องศาเซลเซียสเมื่อเทียบกับจากฐานข้อมูลอุณหภูมิของโลกเฉลี่ยในปี ค.ศ. 1961 - ค.ศ. 1990 [10]

Annual global surface temperature (1850–2019)



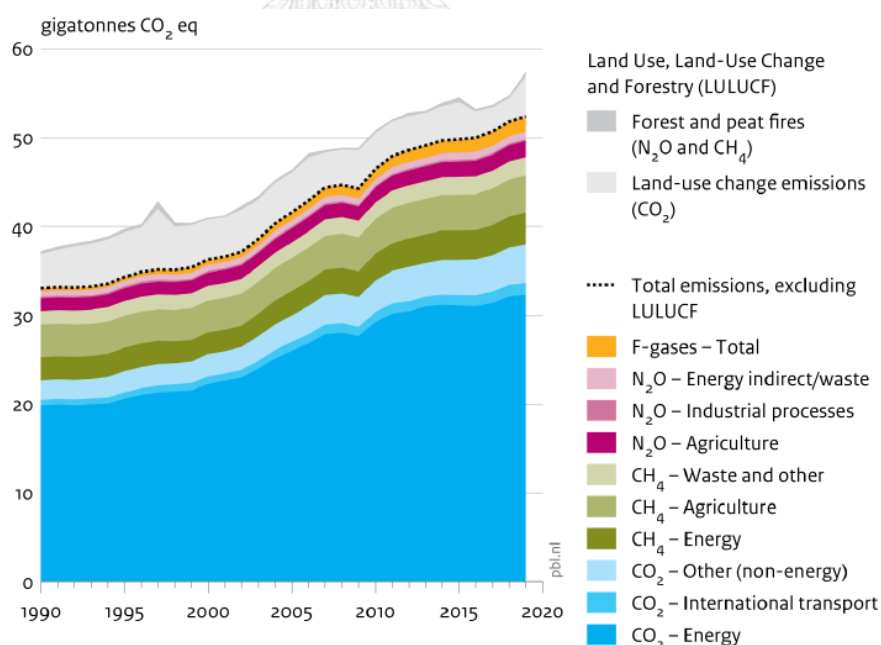
รูปที่ 2.1 ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิพื้นผิวโลกเฉลี่ยระหว่างแผ่นดินและมหาสมุทร ในช่วงปี ค.ศ. 1850 ถึง ค.ศ. 2019 [10]

การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมินั้นเริ่มในช่วง ค.ศ. 1850 ถึง ค.ศ. 1900 ซึ่งเป็นช่วงเริ่มต้นของยุคอุตสาหกรรม โดยปัจจัยหลัก ๆ มาจากการกระทำของมนุษย์ คือ การเผาเชื้อเพลิงฟอสซิลในอุตสาหกรรมเพื่อนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานของกิจกรรมต่าง ๆ ของ

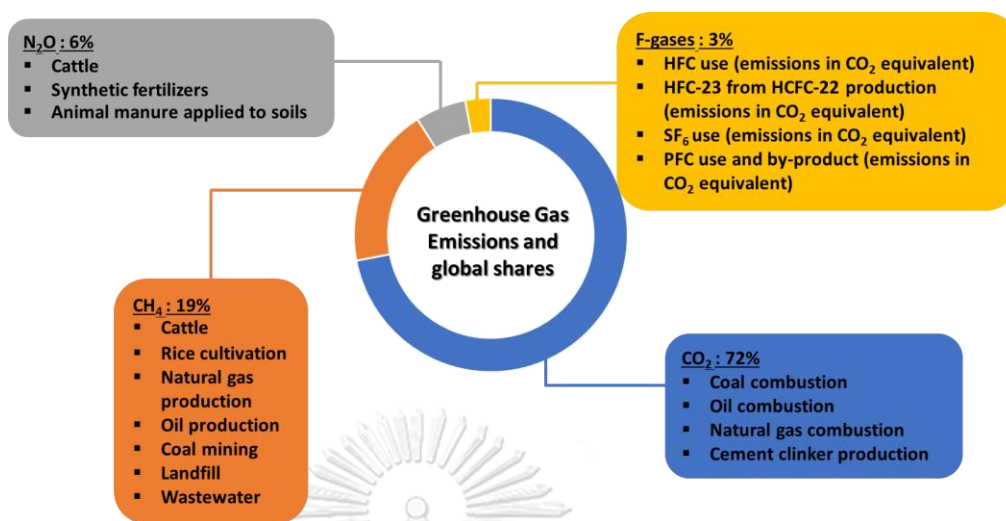
มนุษย์ โดยผลของการเผาไหม้เชื้อเพลิงส่งผลให้มีการปลดปล่อยแก๊สชั้นสู่ชั้นบรรยากาศเป็นจำนวนมาก [11] และส่งผลกระทบต่อให้ระดับของแก๊สเรือนกระจก (Greenhouse gas) ในชั้นบรรยากาศเพิ่มมากขึ้นมหาศาลจนส่งผลให้อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกสูงขึ้นและนำไปสู่ผลกระทบต่อภาวะภูมิอากาศ [12]

2.2 แก๊สเรือนกระจก

แก๊สเรือนกระจก คือ แก๊สที่ทำหน้าที่ดูดซับรังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์ที่สะท้อนจากแผ่นเปลือกโลกและมหาสมุทรสู่ชั้นห้วงอวกาศ โดยการดูดซับรังสีความร้อนจะส่งผลให้อุณหภูมิเฉลี่ยของพื้นผิวโลกเหมาะสมต่อการอยู่อาศัยของสิ่งมีชีวิต ปัจจุบันปริมาณแก๊สที่ถูกปลดปล่อยมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง จากรูปที่ 2.2 แสดงให้เห็นถึงปริมาณแก๊สเรือนกระจกชนิดต่าง ๆ บนโลก เพิ่มสูงขึ้นเกือบครึ่งหนึ่งของปริมาณแก๊สที่ถูกปล่อยตั้งแต่ปี ค.ศ. 1990 และคาดการณ์ว่าภายในปี ค.ศ. 2050 อาจมีการเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 200 ของปริมาณที่ถูกปลดปล่อยในปัจจุบัน [13] แก๊สเรือนกระจกประกอบไปด้วยแก๊สต่าง ๆ อาทิ มีเทน ไนตรัสออกไซด์ ซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ เพอร์ฟลูออโรคาร์บอน ไนโตรเจนไตรฟลูออไรด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ ที่เป็นตัวขับเคลื่อนสำคัญในสัดส่วนที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ดังนี้



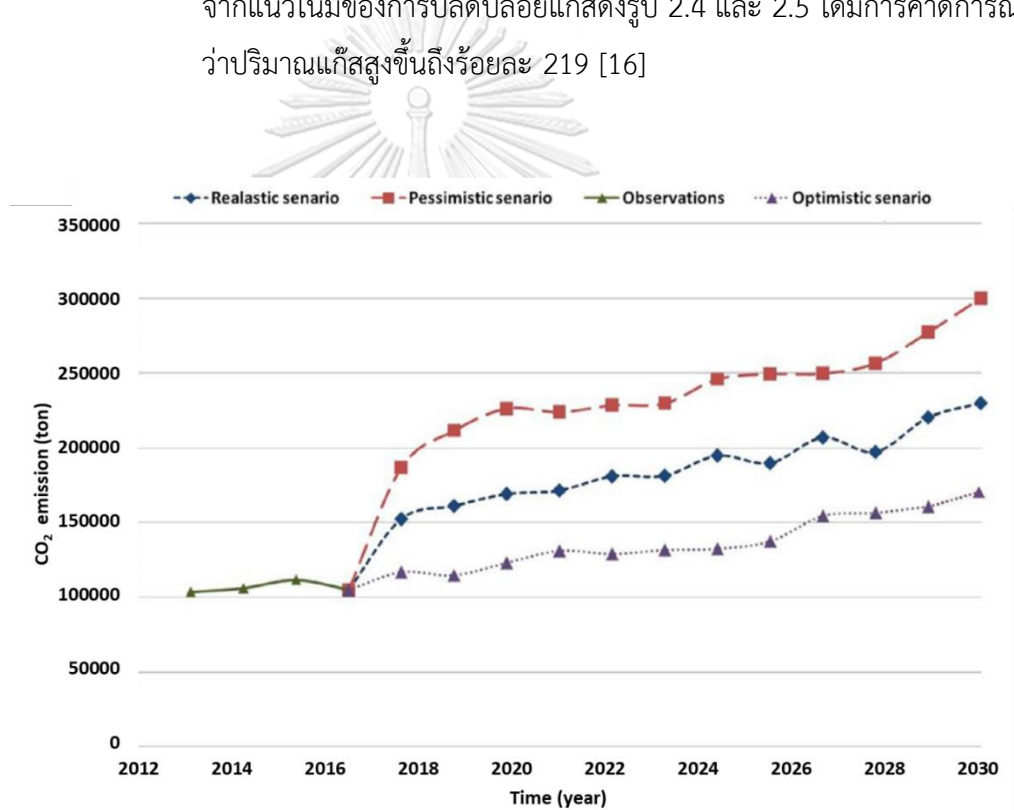
รูปที่ 2.2 ปริมาณแก๊สเรือนกระจกชนิดต่าง ๆ ที่ถูกปลดปล่อยตั้งแต่ ปี ค.ศ. 1990 ถึง ค.ศ. 2020 [14]



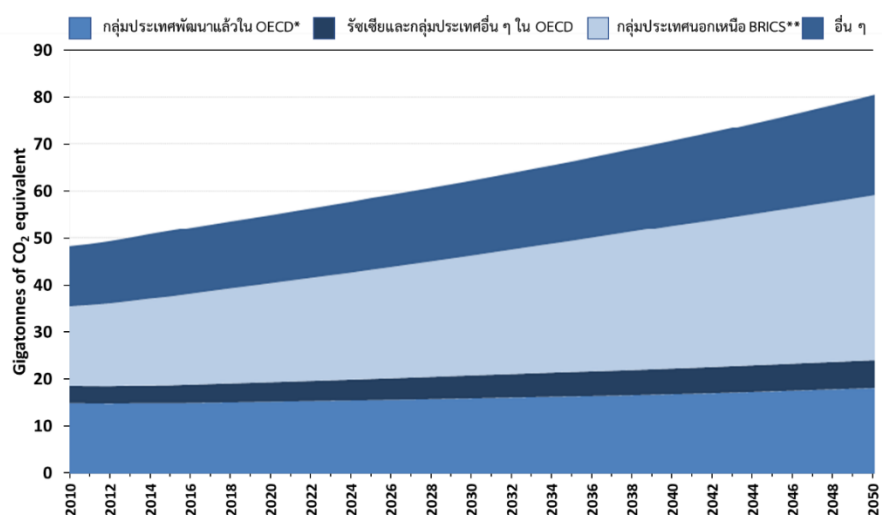
รูปที่ 2.3 สัดส่วนปริมาณแก๊สเรือนกระจก (Greenhouse Gas: GHG) ชนิดต่าง ๆ ที่สำคัญ ในการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจก [14]

- 2.2.1 มีเทน (CH₄) เป็นแก๊สที่มีตามธรรมชาติ แต่มีบางส่วนที่เกิดจากมนุษย์ถึงร้อยละ 60 คือ จากการฝังกลบกำจัดขยะ การปศุสัตว์ การเกษตร การใช้เชื้อเพลิงในการเผาไหม้ การบำบัดน้ำเสีย และอุตสาหกรรมต่าง ๆ [15-17]
- 2.2.2 ไนตรัสออกไซด์ (N₂O) เป็นแก๊สที่เกิดขึ้นจากตามธรรมชาติเช่นเดียวกับมีเทน แต่มีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นอีกประมาณร้อยละ 17 ในช่วงยุคอุตสาหกรรม เนื่องจากการใช้กรดไนตริก การใช้ปุ๋ย รวมทั้งการเผาป่าและการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล [15-17]
- 2.2.3 ซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF₆) เป็นแก๊สที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อาทิ ในกระบวนการผลิตเซมิคอนดักเตอร์ หรือสวิตช์เกียร์ในระบบไฟฟ้าแรงสูง [17]
- 2.2.4 เพอร์ฟลูออโรคาร์บอน (PFCs) และไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน (HFCs) เป็นแก๊สที่เกิดจากการกระทำของมนุษย์ และถูกนำมาใช้ในระบบทำความเย็นแทนที่แก๊สคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (CFCs) ในขณะที่ PFCs ถูกปลดปล่อยจากอุตสาหกรรมการถลุงอะลูมิเนียม หรือการผลิตสารกึ่งตัวนำ [16, 17]
- 2.2.5 ไนโตรเจน ไตรฟลูออไรด์ (NF₃) เป็นแก๊สที่เกิดจากกระบวนการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์รวมถึงวงจรรขนาดเล็ก [17]

2.2.6 คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) เป็นแก๊สที่มีสัดส่วนมากที่สุด คือ ร้อยละ 72 ของแก๊สเรือนกระจก เนื่องจากเป็นแก๊สที่ถูกปลดปล่อยจากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น น้ำมัน แก๊สธรรมชาติ ถ่านหิน ในการกระบวนการเผาไหม้ และกระบวนการผลิตต่าง ๆ อาทิ การเผาไหม้ในระดับครัวเรือน หรือ การเผาไหม้ในระดับอุตสาหกรรม เช่น โรงงานและโรงไฟฟ้า โดยเฉพาะในช่วงภายในช่วงกว่า 170 ปีที่ผ่านมา คาร์บอนไดออกไซด์มีปริมาณความเข้มข้นอยู่ที่ประมาณ 414 ppm ซึ่งเพิ่มสูงขึ้นจากในอดีตมากถึงร้อยละ 47 เมื่อเทียบกับปริมาณของแก๊สในยุคก่อนอุตสาหกรรมในช่วง ค.ศ. 1850 และจากแนวโน้มของการปลดปล่อยแก๊สดังรูป 2.4 และ 2.5 ได้มีการคาดการณ์ว่าปริมาณแก๊สสูงขึ้นถึงร้อยละ 219 [16]



รูปที่ 2.4 ปริมาณการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์จากการคาดคะเน ตั้งแต่ช่วง ปี ค.ศ. 2014 จนถึง ค.ศ. 2030 [16]



*OECD: Organization for Economic Co-operation and Development (องค์การเพื่อความร่วมมือทางเศรษฐกิจและการพัฒนา)

**BRICS: กลุ่มประเทศกำลังพัฒนาที่มีการพัฒนาและการเติบโตทางเศรษฐกิจอย่างรวดเร็ว ได้แก่ บราซิล (Brazil) รัสเซีย (Russia) อินเดีย (India) และ จีน (China)

รูปที่ 2.5 การปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกตามภูมิภาคต่าง ๆ อ้างอิงจากข้อมูลพื้นฐานของสถานการณ์ในช่วง ปี ค.ศ. 2010 ถึง 2050 [18]

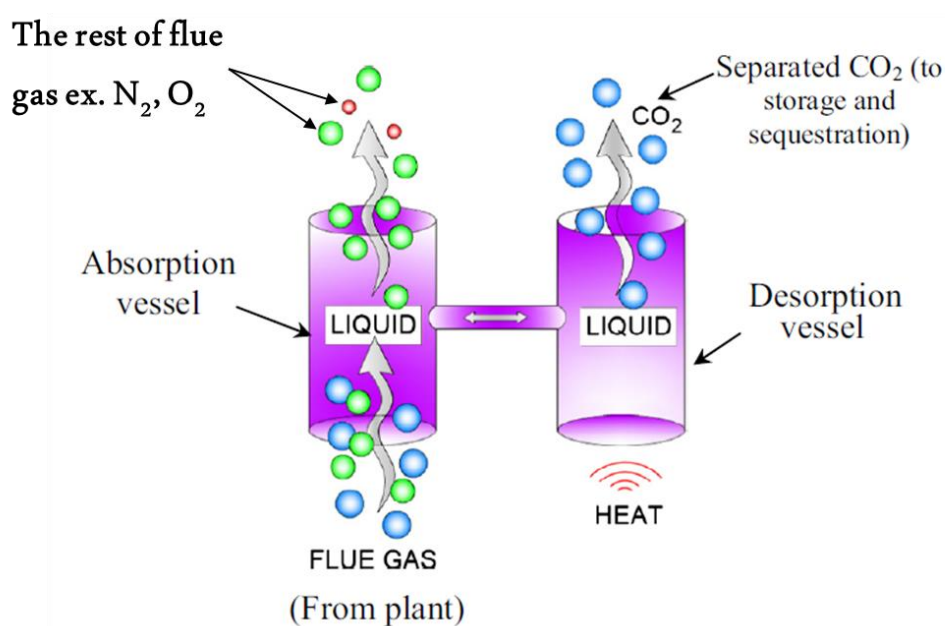
2.3 การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์

เทคโนโลยีการการดักจับและกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Capture and Storage : CCS) คือ กระบวนการซึ่งประกอบไปด้วยเทคนิคที่ช่วยในการดักจับและกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ [19] เพื่อช่วยแก้ไขปัญหาในการลดปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่ก่อให้เกิดปรากฏการณ์โลกร้อน เทคโนโลยี CCS มีการเติบโตอย่างรวดเร็วและมีการพัฒนาเทคโนโลยีหลากหลายเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการดักจับแก๊ส อาทิ การใช้เมมเบรน (Membrane) [20-24] การดูดซึม (Absorption) [25, 26] การดูดซับ (Adsorption) [27] การกลั่นแยกที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic distillation) [28] เทคโนโลยีดั้งเดิมที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย คือ การดูดซึมแก๊สโดยใช้สารละลายแอมีน ถูกใช้ในระดับอุตสาหกรรมมาเป็นระยะเวลาาน ทว่า พบปัญหาหลายประการ เช่น ความต้องการพลังงานเพิ่มเติมเพื่อใช้ในการบีบอัดคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดักจับ จำเป็นต้องนำแก๊สที่ดักจับไปบำบัดเป็นปริมาณมากเนื่องจากมีความดันย่อยและความเข้มข้นในแก๊สไอเสียที่ค่อนข้างต่ำ และต้องใช้พลังงานจำนวนมากในการบำบัดตัวดูดซึมเพื่อนำกลับมาใช้ซ้ำ [29-31]

2.3.1 การดูดซึม (Absorption)

กระบวนการดูดซึม ดังรูป 2.6 เป็นกระบวนการซึ่งคาร์บอนไดออกไซด์ถูกนำเข้าหรือฝังตัว (ดูดซึม) จากแก๊สไอเสียสู่สารละลายแอมีนโดยกระบวนการทางเคมี และปล่อยให้แก๊สที่เหลือไหลผ่านคอลัมน์ที่ใช้ในการดูดซึมอย่างอิสระ จากนั้นตัวดูดซึมจะถูกนำ

กลับมาใช้อีกครั้งโดยการปรับความเข้มข้นของสารละลายแอมีนใหม่เพื่อใช้ซ้ำในการดักจับ โดยในการดักจับวิธีนี้ มีข้อเสียหลายประการดังที่ได้กล่าวไปในข้างต้น รวมถึงยังอาจส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์เนื่องจากอาจเกิดการกัดกร่อนที่อาจเพิ่มค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษามากขึ้น และสารละลายอาจเกิดความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาต่อสารประกอบอื่น ๆ จากผลิตภัณฑ์ผลพลอยได้ในแก๊สไอเสีย ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความบริสุทธิ์ความเข้มข้นที่นำไปสู่ประสิทธิภาพที่ลดลงลง การเพิ่มขึ้นของต้นทุนของพลังงานที่ใช้ในกระบวนการ [25, 26]



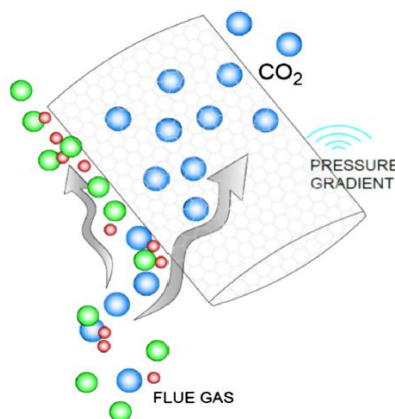
รูปที่ 2.6 กระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้แอมีน [31]

CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.3.2 เมมเบรน (Membrane)

การแยกแก๊สโดยใช้เมมเบรน (รูปที่ 2.7) เป็นการใช้เมมเบรนเลือกผ่านเพียงแคร์บอนไดออกไซด์จากแก๊สไอเสีย ซึ่งการแยกโดยใช้เมมเบรนมีกลไกหลากหลายในกระบวนการ เช่น การละลายและการแพร่ การดูดซับและการแพร่ การเลือกผ่านและการถ่ายโอนด้วยไอออน โดยการนำพอลิเมอร์หรือเซรามิกมาใช้เป็นวัสดุในการทำเมมเบรนเพื่อกรองคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สไอเสีย วัสดุถูกออกแบบมาเป็นพิเศษเพื่อใช้เพิ่มความจำเพาะในการดักจับแก๊สและสามารถเป็นได้ทั้งวัสดุที่มีรูพรุนหรือไม่มีรูพรุน ประสิทธิภาพการใช้เมมเบรนเพื่อแยกคาร์บอนไดออกไซด์เป็นไปได้ดีในภาวะที่เลือกผ่านจากแก๊สผสมไนโตรเจน แต่วิธีดังกล่าวยังมีข้อเสียบางประการที่ส่งผลกระทบต่อการใช้ งาน เช่น

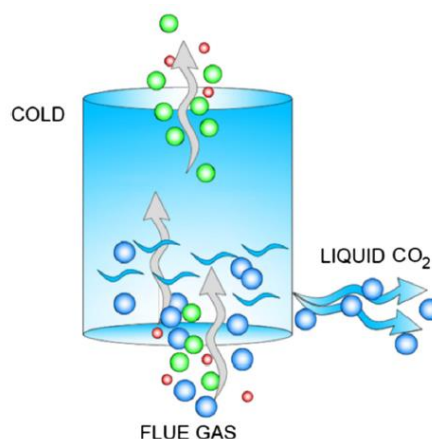
การใช้งานเพื่อแยกจากแก๊สผสมที่มีปริมาณมาก เมมเบรนจะต้องมีขนาดที่ใหญ่มากเพื่อรองรับการเลือกผ่าน ส่งผลต่อค่าใช้จ่ายและต้นทุนที่เพิ่มขึ้น รวมถึงความทนทานต่ออุณหภูมิสูงของวัสดุที่ใช้ในการผลิตเมมเบรนที่ยังคงต้องพัฒนาต่อไป [20-24]



รูปที่ 2.7 กระบวนการเลือกผ่านคาร์บอนไดออกไซด์โดยการใช้เมมเบรน [31]

2.3.3 การกลั่นแยกที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic Distillation)

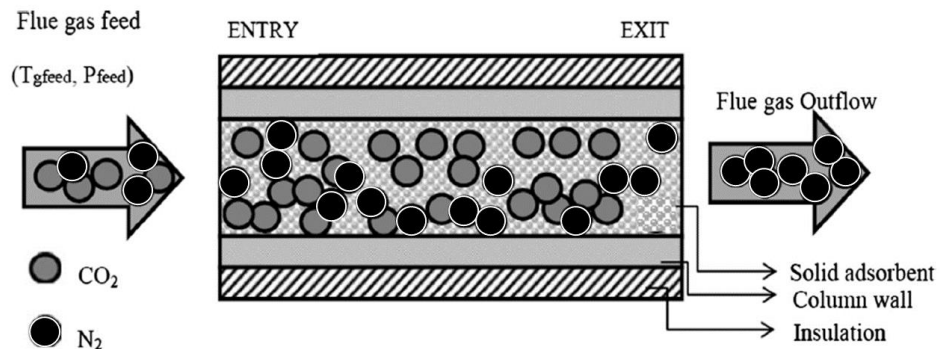
เทคโนโลยีการกลั่นแยกคาร์บอนไดออกไซด์ในภาวะอุณหภูมิต่ำดังแสดงในรูป 2.8 เป็นการใช้กลไกการทำงานของอุณหภูมิต่ำที่สถานะของเหลวและความต่างกันของความดันในแก๊สแต่ละชนิดในแก๊สไอเสีย โดยคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกทำให้เย็นลงและควบแน่นเป็นของเหลว จากนั้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกเปลี่ยนเป็นของเหลวจึงถูกดึงออกจากแก๊สไอเสีย โดยส่วนใหญ่วิธีนี้จะนิยมใช้ในการแยกคาร์บอนไดออกไซด์จากแก๊สธรรมชาติ ข้อดีหลัก ๆ ของวิธีนี้ คือ กระบวนการสามารถผลิตคาร์บอนไดออกไซด์เหลวพร้อมสำหรับการขนส่งได้อย่างสะดวก เหมาะกับกระบวนการที่คาร์บอนไดออกไซด์มีความเข้มข้นสูง แต่ทว่ากระบวนการนี้ต้องใช้พลังงานสูงในการเริ่มต้นกระบวนการใหม่ อีกทั้งยังมีต้นทุนการดำเนินงานที่ค่อนข้างสูง รวมถึงมีโอกาสสูงที่จะเกิดการอุดตันภายในระบบจากสิ่งแปลกปลอมภายในแก๊สระหว่างกระบวนการอีกด้วย [28]



รูปที่ 2.8 กระบวนการเลือกผ่านคาร์บอนไดออกไซด์โดยกระบวนการกลั่นแยกที่อุณหภูมิต่ำ [31]

2.3.4 การดูดซับ (Adsorption)

การแยกโดยการดูดซับ แสดงดังรูปที่ 2.9 เป็นกระบวนการแยกแก๊สผสม โดยมีกลไกการทำงานโดยอาศัยความแตกต่างในสมบัติการดูดซับ/การคายซับของส่วนประกอบในแก๊สผสม [32-34] โดยการดูดซับ หมายถึง การยึดเกาะของไอออน อะตอม โมเลกุลจากของเหลว แก๊ส หรือของแข็งที่ละลายติดกับพื้นผิว โดยที่ไอออน อะตอม หรือโมเลกุลที่ถูกยึดติดจะก่อตัวเป็นฟิล์มบนพื้นผิวของวัสดุ เรียกว่าตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ในขณะที่วัสดุที่ยึดไอออนหรือโมเลกุลเหล่านั้นจะถูกเรียกว่าวัสดุดูดซับ (Adsorbent) การดูดซับมีความแตกต่างจากการดูดซึม เนื่องจากในขั้นตอนของกระบวนการดูดซึม ของไหล (Fluids) หรือตัวถูกดูดซับจะละลายในของเหลวที่ทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับ ในขณะที่กลไกของการดูดซับจะเกิดขึ้นบนพื้นผิวเพียงเท่านั้น ซึ่งต่างจากการดูดซึมที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของทั้งปริมาณตัวดูดซับ [27]



รูปที่ 2.9 กระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ [31]

ข้อดีของกระบวนการดูดซับในการนำมาใช้งาน คือสามารถนำวัสดุดูดซับกลับมาใช้ซ้ำได้อย่างสะดวกเมื่อนำไปผ่านกระบวนการทางความร้อนร่วมกับความดัน ซึ่งเป็นการใช้พลังงานในกระบวนการที่น้อยกว่ากระบวนการอื่น ๆ ถึงแม้ว่าเทียบกับกระบวนการอื่น ๆ การดูดซับจะมีความจำเพาะต่อกันน้อยกว่า แต่ทว่าวัสดุดูดซับก็มีลักษณะทนทานกว่า อีกทั้งมีความจำเพาะของวัสดุดูดซับต่อการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์และค่าความจุการดูดซับแก๊สที่มาก ประสิทธิภาพของวัสดุดูดซับหลังผ่านการดูดซับ/คายซับในหลาย ๆ วัฏจักรมีการลดลงเพียงเล็กน้อย

ชนิดของพันธะที่เกิดขึ้นระหว่างวัสดุดูดซับและตัวถูกดูดซับขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ สารเคมีหรือสิ่งที่ใช้ แบ่งได้ดังนี้ [27]

2.3.4.1 การดูดซับทางกายภาพ

หลักการของการดูดซับทางกายภาพคือเกิดการดึงดูดอ่อน ๆ ระหว่างโมเลกุลโดยเป็นผลจากแรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waals forces) ซึ่งเป็นผลของการรวมแรงทั้ง 2 ชนิด ได้แก่ แรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic force) การดูดซับทางกายภาพสามารถเกิดการผันกลับของกระบวนการง่าย ทำให้สามารถฟื้นฟูและนำกลับมาใช้ใหม่ได้ สารที่ถูกดูดซับสามารถเกาะอยู่รอบ ๆ ผิวของวัสดุดูดซับในหลาย ๆ ชั้น (Multilayer) หรือโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะเกาะติดอยู่กับโมเลกุลของวัสดุดูดซับในชั้นก่อนหน้า ซึ่งจำนวนชั้นของตัวถูกดูดซับที่เกิดขึ้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสารถูกดูดซับ [29-31]

2.3.4.2 การดูดซับทางเคมี

การดูดซับทางเคมี เป็นการยึดเกาะของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและพื้นผิวของวัสดุดูดซับผ่านการสร้างพันธะเคมี ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี คือ แรงยึด

เหนี่ยวนำระหว่างอะตอมเดิมถูกทำลายแล้วเกิดการจัดเรียงอะตอมเป็นสารประกอบขึ้นใหม่ ในกลไกของการเกิดการดูดซับทางเคมีที่มีพันธะเคมี จะมีความแข็งแรงกว่าการเกิดการดูดซับทางกายภาพเนื่องจากการดูดซับทางกายภาพมีกลไกการเกิดแรงแวนเดอร์วาลส์เพียงอย่างเดียว [29-31]

2.4 วัสดุดูดซับ

2.4.1 วัสดุที่มีส่วนประกอบของสารประกอบคาร์บอน

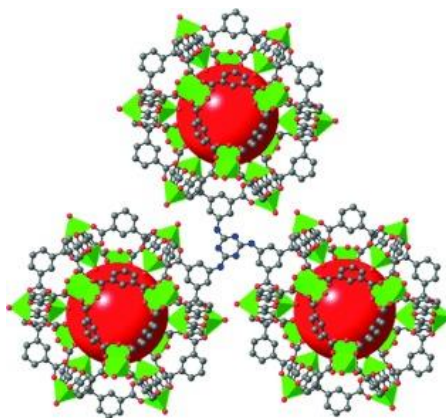
วัสดุที่มีคาร์บอนเป็นส่วนประกอบโดยส่วนใหญ่ เช่น ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) มักถูกสังเคราะห์ขึ้นโดยกรรมวิธีไพโรไลซิส (Pyrolysis) และการกระตุ้นวัสดุให้มีโครงสร้างที่เป็นรูพรุน สามารถทำได้โดยใช้สารประกอบอัลคาไลน์หรือกรดในการเป็นตัวกระตุ้นทางเคมี ในการศึกษาการดูดซับบนถ่านหรือถ่านกัมมันต์จะถูกพิจารณาในการดักจับแก๊สที่ภาวะความดันที่สูง นอกจากสมบัติของพื้นผิวที่สามารถกระตุ้นให้เกิดรูพรุนยังมีข้อดีอื่น ๆ เช่น ราคาที่ไม่สูงในการนำมาปรับใช้เป็นวัสดุดูดซับ อีกทั้งยังมีความไวต่อความชื้นต่ำ [35]

2.4.2 ซีโอไลต์

ซีโอไลต์ได้ถูกนำมาใช้ในเป็นวัสดุดูดซับทางกายภาพในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์อย่างกว้างขวาง โดยประสิทธิภาพของซีโอไลต์เกี่ยวข้องกับความหนาแน่น ขนาด และองค์ประกอบทางเคมีของไอออนบวกในโครงสร้างที่มีรูพรุน ในการนำไปใช้งานจะมีข้อจำกัดในเรื่องของความชื้นของแก๊สที่เกิดขึ้น เนื่องจากซีโอไลต์มีสมบัติที่ไวต่อความชื้น ดังนั้นจึงมีเงื่อนไขในกระบวนการฟื้นฟูที่ต้องใช้อุณหภูมิที่ค่อนข้างสูง (อยู่ในช่วงที่มากกว่า 300 องศาเซลเซียส) [36, 37]

2.4.3 โครงข่ายโลหะ-สารอินทรีย์ (Metal Organic Framework: MOFs)

โครงข่ายโลหะ-สารอินทรีย์ เป็นวัสดุดูดซับของแข็งชนิดใหม่ที่พัฒนามาจากการรวมกันของไอออนของโลหะที่เชื่อมโยงด้วยพันธะโคออดิเนต (Coordination bonding) ดังรูปที่ 2.10 ความน่าสนใจของ MOFs คือ มีโครงสร้างของรูพรุนที่สามารถควบคุมได้ รวมถึงพื้นที่ผิวรูพรุนที่สามารถปรับปรุงได้ อีกทั้งสมบัติของพื้นที่ผิวที่ค่อนข้างสูง จึงถูกพัฒนาเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์และได้แสดงความสามารถในการดูดซับที่เหมาะสมกับการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์บริสุทธิ์ที่ภาวะความดันสูง แต่มีความสามารถในการดักจับที่ต่ำลงในภาวะที่เป็นแก๊สผสมเนื่องจากมีความจำเพาะต่อคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต่ำ [5]



รูปที่ 2.10 แผนภาพโครงสร้างของ MOFs [32]

2.4.4 เมโซพอร์ซิลิกา (Mesoporous silica)

เมโซพอร์ซิลิกา เป็นวัสดุที่มีลักษณะเด่นในหลาย ๆ ด้าน เช่น พื้นที่ผิวที่สูง ขนาดรูพรุนที่ใหญ่ และความเสถียรทางโครงสร้างที่สูง รวมถึงมีเสถียรภาพทางความร้อนอีกด้วย อย่างไรก็ตาม ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์นั้นไม่สูงพอ อันเนื่องมาจากความจำเพาะต่อคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำ รวมถึงสมบัติที่ไวต่อความชื้น เนื่องจากพื้นผิวของซิลิกาประกอบไปด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) จึงสามารถนำไปดัดแปรเพื่อพัฒนาความสามารถในการดักจับให้มีความจำเพาะเพิ่มขึ้นได้ [38, 39]

2.5 การดัดแปรวัสดุดูดซับ

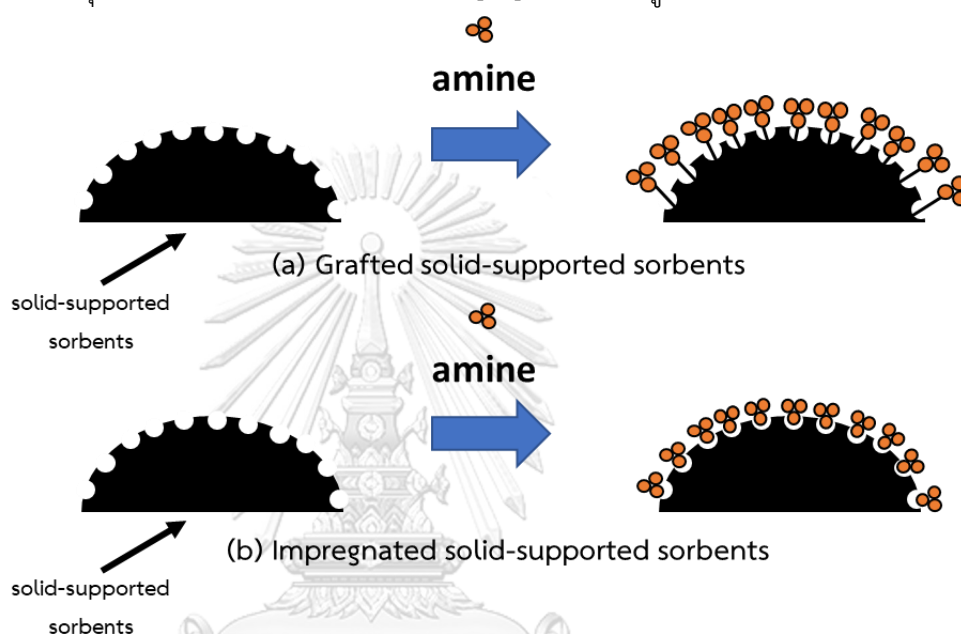
การปรับปรุงความสามารถในการดูดซับและความจำเพาะต่อการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ ทำได้โดยการดัดแปรวัสดุดูดซับของแข็งด้วยสารเคมีบนพื้นผิว โดยสารดัดแปรที่นิยมใช้ ได้แก่ สารประกอบที่มีอนุพันธ์แอมีน เนื่องจากมีหมู่เบสที่ว่องไวในการเกิดอันตรกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีสมบัติเป็นกรดด้วยพันธะเคมีที่แข็งแรง โดยรูปแบบของการดัดแปรแอมีนลงบนพื้นผิวของวัสดุมีลักษณะแตกต่างกันไปดังนี้ [40]

2.5.1 การกราฟต์ (Grafting)

การกราฟต์เป็นการนำเอมิโนซิลเลน (Aminosilanes) มากราฟต์ลงบนพื้นผิวของวัสดุดูดซับ เป็นวิธีที่เหมาะสมกับวัสดุดูดซับที่มีพื้นผิวที่ประกอบด้วยสารประกอบไฮดรอกซิล เนื่องจากจะเกิดพันธะโคเวเลนต์ที่แข็งแรงระหว่างสารที่นำมากราฟต์และพื้นผิวของวัสดุดูดซับ โดยปริมาณของแอมีนที่นำมาดัดแปรขึ้นอยู่กับหมู่ซิลานอล (Silanol group) บนพื้นผิว [41] ดังแสดงในรูป 2.11 (a)

2.5.2 การเปียกชุ่ม (Impregnation)

การทำให้เปียกชุ่ม เป็นกระบวนการที่พื้นผิวของวัสดุดูดซับถูกดัดแปร วัสดุดูดซับถูกเคลือบหรือเติมเต็มผิวโดยการดัดแปรสารละลายต่าง ๆ สารละลายที่นำไปดัดแปรจะค่อยๆ แพร่ลงในรูพรุนและเกิดแรงดึงดูดอ่อน ๆ ที่ยึดติดกับผิวของวัสดุดูดซับ สารประกอบแอมีนหลายชนิดถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการนำมาดัดแปรตามความแตกต่างของขนาดโมเลกุลและปริมาณของแอมีนที่ต้องการ [42] ดังแสดงในรูป 2.11 (b)



รูปที่ 2.11 ลักษณะพื้นผิวของวัสดุดูดซับในการเติมแอมีน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.6 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ (Adsorption Kinetic)

เป็นสมการที่ถูกนำมาใช้ศึกษากลไกในการดูดซับ อัตราการดูดซับ และเวลาที่ใช้ในการดูดซับถึงสมดุลระหว่างพื้นผิวของวัสดุดูดซับและสารที่ถูกดูดซับ การศึกษาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์นิยมใช้แบบจำลองสมการ 3 ชนิด คือ แบบจำลองอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first Order) แบบจำลองอันดับสองเทียม (Pseudo-second Order) และแบบจำลองอาฟรามี่ (Avrami's Equation) [43-45]

2.6.1 แบบจำลองอันดับหนึ่งเทียม

แบบจำลองอันดับหนึ่งเทียม ใช้ในการศึกษากลไกในการเกิดการดูดซับจากผลของการดูดซับทางกายภาพ โดยอัตราในการดูดซับของแบบจำลองนี้ขึ้นอยู่กับสมบัติทาง

กายภาพของวัสดุดูดซับ เช่น พื้นที่ผิว ขนาดของรูพรุนและปริมาตรของรูพรุน สมการแบบจำลองอันดับหนึ่งเทียมมีรูปสมการ ดังสมการที่ (1)

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

- โดย q_t คือ ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ณ เวลาใด ๆ (มิลลิโมลต่อกรัม)
 q_e คือ ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ณ ภาวะสมดุล (มิลลิโมลต่อกรัม)
 k_1 คือ ค่าคงที่จลนพลศาสตร์แบบจำลองอันดับหนึ่งเทียม (นาที⁻¹)
 t คือ เวลาใด ๆ (นาที)

2.6.2 แบบจำลองอันดับสองเทียม

แบบจำลองอันดับสองเทียม ใช้ในการอธิบายกระบวนการดูดซับจากผลของการดูดซับทางเคมี โดยมีขั้นกำหนดอัตรา (Rate-limiting step) คือ ขั้นตอนการดูดซับทางเคมีซึ่งเกิดจากการสร้างพันธะเคมีระหว่างวัสดุดูดซับและตัวถูกดูดซับ มีรูปสมการ ดังสมการที่ (2) นี้

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

- โดย k_2 คือ ค่าคงที่จลนพลศาสตร์แบบจำลองอันดับสองเทียม (นาที⁻¹)

2.6.3 แบบจำลองอาฟราเมีย

แบบจำลองอาฟราเมียได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่ออธิบายและจำลองการเปลี่ยนแปลงและการตกผลึกของวัสดุ โดยทั่วไป แบบจำลองอาฟราเมียนิยมถูกใช้ในการอธิบายกลไกการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของวัสดุดูดซับที่ประกอบด้วยแอมีน โดยกลไกที่เกิดการดูดซับของวัสดุดูดซับเป็นผลของการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมีทั้งสองแบบร่วมกัน สมการแบบจำลองมีรูปสมการดังนี้

$$q_t = q_e (1 - e^{-(k_a t)^{n_a}}) \dots (3)$$

- โดย k_a คือ ค่าคงที่จลนพลศาสตร์แบบจำลองอาฟราเมีย (นาที⁻¹)
 n_a คือ อันดับของสมการจลนพลศาสตร์

2.7 ยางรถยนต์

ยางรถยนต์ คือ อุปกรณ์หลักของรถยนต์ซึ่งทำหน้าที่รองรับน้ำหนักของรถยนต์ ทำให้การขับเคลื่อนของรถยนต์ไปได้อย่างปลอดภัย ในยุคแรกเริ่มยางรถยนต์ทำมาจากยางธรรมชาติทั้งหมดรวมทั้งชิ้นล้อ และค่อย ๆ ถูกเปลี่ยนแปลงในยุคต่อมาจนพัฒนาเป็นล้อยางในปัจจุบันที่บรรจุลมภายใน ยางรถยนต์ถูกจัดเป็นวัสดุคอมพอสิต (Composite) โดยทั่วไปยางรถยนต์มีองค์ประกอบต่าง ๆ ดังนี้ ยางธรรมชาติ ยางสังเคราะห์ต่าง ๆ เช่น ยางสไตรีน-บิวทาไดอิน ยางบิวทาไดอิน คาร์บอนแบล็ก สารวัลคาไนซ์ (Vulcanizing Agent) และสารเติมแต่งชนิดอื่น ๆ โดยในปัจจุบัน ปริมาณยางรถยนต์ที่ถูกทิ้งเพื่อรอการกำจัดมีปริมาณสูงมากถึง 17 ล้านตันต่อปี โดยเฉพาะในประเทศไทยที่มีปริมาณถึง 6 แสนตันต่อปี [46]

2.7.1 องค์ประกอบทางเคมีของยางรถยนต์

2.7.1.1 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber: NR)

ยางธรรมชาติ มีชื่อทางเคมีของยางธรรมชาติ คือ ซิส-1, 4-พอลิไอโซพรีน (C_5H_8) โดยมีสมบัติเชิงกลที่สูงเนื่องจากโมเลกุลเรียงตัวเป็นระเบียบเมื่อถูกดึงหรือยืดออก มีความต้านทานแรงสูง การเติมคาร์บอนแบล็กสามารถปรับปรุงคุณภาพและช่วยให้สมบัติเชิงกลดียิ่งขึ้น อีกทั้ง มีสมบัติที่ไม่ชอบน้ำและความทนทานต่อการกัดกร่อนความเข้มข้นอ่อนต่างและน้ำเกลือ [47]

2.7.1.2 ยางสไตรีน-บิวทาไดอิน (Styrene Butadiene Rubber: SBR)

ยางสไตรีน-บิวทาไดอิน เป็นยางสังเคราะห์ที่ถูกคิดค้นในช่วงสงครามโลก นิยมนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมยางรถยนต์ มีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกับยางธรรมชาติ จัดเป็นโคพอลิเมอร์ของสไตรีนและบิวทาไดอิน ความทนทานต่อแรงดึงไม่สูงมากนัก (เมื่อปริมาณของสไตรีนมากขึ้น ยางจะทนต่อแรงดึงได้น้อยลง) สายโมเลกุลของยาง SBR โดยทั่วไปจะมีการจัดเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ ทำให้เมื่อถูกยืดจึงทำให้ไม่สามารถตกลึกได้ ทำให้มีค่าอดทนต่อแรงดึงต่ำ จำเป็นต่อการเติมสารเสริมแรงเข้าช่วยในเวลาใช้งาน เช่น คาร์บอนแบล็กหรือซิลิกา [48]

2.7.1.3 ยางบิวทาไดอิน (Butadiene Rubber: BR)

ยางบิวทาไดอิน เป็นพอลิเมอร์ที่ถูกนำไปใช้ในการผลิตสารประกอบยางรถยนต์อย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะการนำไปผสมกับยางธรรมชาติและยางสไตรีน-บิวทาไดอิน มีสมบัติที่ยืดหยุ่นที่ภาวะอุณหภูมิต่ำได้ดี ต้านทานต่อการขูดถูได้ดี นิยมนำไปเป็นส่วนผสมกับยางชนิดอื่น ๆ เพื่อพัฒนาสมบัติต่าง ๆ เพื่อให้มีคุณภาพดีขึ้น [49]

2.7.1.4 คาร์บอนแบล็ก (Carbon Black)

คาร์บอนแบล็ก เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาแก๊สธรรมชาติหรือน้ำมันในเตาเผา จัดเป็นส่วนผสมที่สำคัญสำหรับผลิตภัณฑ์หลาย ๆ ชนิด เช่น ยางรถยนต์ หมึก ฟิล์ม หรือสี เป็นส่วนประกอบที่สำคัญในการผลิตยางรถยนต์ประมาณร้อยละ 30 ของน้ำหนักยาง 1 เส้น [50]

2.7.1.5 สารวัลคาไนซ์ (Vulcanizing Agent)

สารวัลคาไนซ์ เป็นสารที่ทำให้ยางเกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล (crosslink) ในบริเวณที่ปฏิกิริยาว่องไว เพื่อปรับปรุงให้สมบัติของยางดีขึ้น ปฏิกิริยาที่เกิดจากถูกเรียกว่า การคงรูป หรือการวัลคาไนซ์ โดยสารคงรูปที่นิยมใช้มากที่สุดถึงร้อยละ 90 ได้แก่ กำมะถัน [51]

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Panploo และคณะ [52] ศึกษาผลของการเติมซิลิกาลงในโพลียเอทิลีนที่มีผลต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ โดยเปรียบเทียบผลระหว่างซิลิกาที่ไม่ผ่านการดัดแปรและซิลิกาที่ดัดแปรด้วย APTES พบว่า การเติมซิลิกาที่ดัดแปรลงในโพลียเอทิลีน ส่งผลให้มีค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าการเติมซิลิกาไม่ดัดแปร (4.08 และ 3.69 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ) ซึ่งเป็นผลมาจากความเป็นรูพรุนของโพลียเอทิลีนที่ช่วยในการดูดซับทางกายภาพ และการดัดแปรหมู่แอมินบนซิลิกาช่วยเพิ่มการดูดซับทางเคมีเนื่องจากมีความจำเพาะต่อการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์

Pozuelo และคณะ [3] ศึกษาผลการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อเติมหมู่ฟังก์ชันแอมิน 3 วิธีที่ต่างกันลงบนตัวรองรับ ได้แก่ (ก) การกราฟต์ด้วยไตรเอทิลซิลานออร์แกนอสิลาน (organosilanes) (ข) วิธีเปียกชุ่มด้วย PEI และ (ค) การกราฟต์ร่วมกับการเปียกชุ่ม พบว่า ค่าการดูดซับของวัสดุดูดซับที่ถูกเติมแอมินด้วยการกราฟต์และการเปียกชุ่มมีค่าเป็น 61.3 และ 67.1 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ เนื่องจากการเปียกชุ่มส่งผลทำให้โมเลกุลของแอมินถูกเติมบนตัวรองรับได้มากกว่าการกราฟต์ ในขณะที่ค่าการดูดซับของการกราฟต์ร่วมกับการเปียกชุ่ม มีค่าลดลงเหลือเพียง 36.6 มิลลิกรัมต่อกรัม เนื่องจากรูพรุนของวัสดุดูดซับถูกปิดกั้นด้วยปริมาณของแอมินที่มากเกินไป

Wang และคณะ [53] ศึกษาผลของการนำกรดซัลฟิวริกมาปรับปรุงผิวของเบนโทไนต์ (Bentonite) เพื่อนำมาเตรียมวัสดุดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้น 6 โมลต่อลิตร พบว่า เบนโทไนต์ที่ถูกบำบัดด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกมีรูพรุนและพื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้นเกือบ 80% เมื่อเทียบกับตัวรองรับที่ไม่ได้บำบัดด้วย

กรดซัลฟิวริก ซึ่งมีส่วนช่วยในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากขึ้น โดยค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของเบนโทไนต์ก่อนและหลังดัดแปร มีค่าเป็น 26 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 135 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

Hernandez และคณะ [54] นำยางรถยนต์บดละเอียด (Ground tire rubber: GTR) มาบำบัดด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 95 โดยปริมาตร เพื่อศึกษาและพัฒนาประสิทธิภาพในความเข้ากันได้กับคอมพอสิตโพลีโพรพิลีน พบว่า GTR ที่บำบัดด้วยกรดซัลฟิวริก (GTR-MA) มีการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวเกือบร้อยละ 625 (3.133 ± 0.027 ตร.เมตรต่อกรัม) เมื่อเทียบกับ GTR ที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยกรดซัลฟิวริก (0.432 ± 0.014 ตร.เมตรต่อกรัม) เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ GTR-MA ที่มีความขรุขระและมีรูพรุนเพิ่มมากขึ้นจากเดิมมีลักษณะพื้นผิวที่เรียบ นอกจากนี้ เมื่อนำไปผสมเป็นคอมพอสิตของโพลีโพรพิลีน ยังช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกลให้กับคอมพอสิตอีกด้วย

Dinda และคณะ [55] ศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ เช่น ขนาดพื้นที่ผิวและรูพรุนที่แตกต่างกันของซีโอไลต์ หมู่แอมินชนิดต่าง ๆ ได้แก่ MEA EDA DETA และ TETA ที่ถูกเติมโดยวิธีเปียกชุ่ม รวมถึงความเข้มข้นของแอมินที่มีผลต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าซีโอไลต์ที่มีพื้นที่ผิวและรูพรุนสูงมีค่าการดูดซับที่สูงกว่าเนื่องจากผลของการดูดซับทางกายภาพ ในขณะที่ความเข้มข้นของแอมินร้อยละ 30 ส่งผลให้มีค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุดเมื่อเทียบกับความเข้มข้นอื่น ๆ นอกจากนี้ TETA ยังส่งผลให้ค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าแอมินอีกสามชนิดเนื่องจากมีจำนวนหมู่แอมินที่มากกว่า

Wang และคณะ [2] ศึกษาผลการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของ ZSM-5 เมื่อดัดแปรด้วย TEPA ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กัน ตั้งแต่ร้อยละ 30 50 70 และ 90 โดยน้ำหนัก พบว่าที่ร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก มีค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงที่สุด (1.80 มิลลิโมลต่อกรัม) และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นร้อยละ 90 โดยน้ำหนัก แอมินจะไปบดบังรูพรุนและพื้นที่ผิวของ ZSM-5 ทำให้ไปขัดขวางการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และทำให้ประสิทธิภาพของการดูดซับลดลง

จากการศึกษาผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้น ทำให้ผู้วิจัยมีความสนใจพัฒนาวัสดุดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จากผงยางเหลือทิ้งรถยนต์เหลือทิ้งโดยการปรับปรุงสภาพพื้นผิวและรูพรุนและเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับทางเคมีด้วยการเติมสารประกอบที่มีหมู่ฟังก์ชันแอมินที่มีความจำเพาะต่อคาร์บอนไดออกไซด์ลงในผงยางเหลือทิ้งรถยนต์เหลือทิ้งด้วยวิธีเปียกชุ่ม เนื่องจากเป็นวิธีที่ทำให้มีปริมาณของแอมินเกาะติดบนพื้นผิวของตัวรองรับมากกว่า โดยเลือกใช้สารประกอบแอมิน TEPA และ PEI ซึ่งมีความแตกต่างกันทางด้านโครงสร้างและ

ขนาดของมวลโมเลกุล ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของผงยางเหลือทิ้งรถยนต์เหลือทิ้งที่ผ่านการดัดแปร เช่น ขนาดอนุภาคของผงยางเหลือทิ้งรถยนต์เหลือทิ้ง ผลของสารประกอบแอมีนที่มีจำนวนหมู่แอมีนแตกต่างกัน ความเข้มข้นของสารประกอบแอมีนที่แตกต่างกัน วิเคราะห์องค์ประกอบและพิสูจน์เอกลักษณ์ของผงยางเหลือทิ้งรถยนต์เหลือทิ้งทั้งก่อนและหลังดัดแปร อีกทั้งศึกษาผลของการฟื้นฟูสภาพวัสดุดูดซับเพื่อนำกลับมาใช้ซ้ำด้วยวิธีดูดซับสลับความดันร่วมกับการดูดซับแบบสลับอุณหภูมิ และศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของผงยางเหลือทิ้งรถยนต์เหลือทิ้งก่อนและหลังการดัดแปร



บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการดำเนินงาน

3.1 สารเคมีที่ใช้

สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยมีรายการดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

Chemical	Company
Absolute ethanol (99.99%v/v) (EtOH) AR Grade	Qrec chemicals Co., Ltd. (Thailand)
Sulfuric acid (98% v/v) (H ₂ SO ₄) AR Grade	Qrec chemicals Co., Ltd. (Thailand)
Polyethylenimine (PEI) (~Branched with the average molecular weight of 800)	Sigma-Aldrich Co., Ltd. (USA)
Tetraethylenepentamine (TEPA) (Technical grade Mw 189.30)	Sigma-Aldrich Co., Ltd. (USA)
Nitrogen gas (99.99%) (N ₂)	Thai-Japan Gas Co., Ltd (Thailand)
Mixed gas (12%v/v CO ₂ / 88%v/v N ₂)	Thai-Japan Gas Co., Ltd (Thailand)

3.2 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้

- 3.2.1 พยางรถยนต์เหลือทิ้งขนาด 20 เมช (841 ไมครอน)
(บริษัท ยูเนี่ยนพัฒนกิจ จำกัด)
- 3.2.2 พยางรถยนต์เหลือทิ้งขนาด 40 เมช (400 ไมครอน)
(บริษัท ยูเนี่ยนพัฒนกิจ จำกัด)
- 3.2.3 พยางรถยนต์เหลือทิ้งขนาด 60 เมช (250 ไมครอน)
(บริษัท ยูเนี่ยนพัฒนกิจ จำกัด)
- 3.2.4 ปีกเกอร์ (Pyrex, Germany) ขนาด 50 100 250 500 และ 1000 มิลลิลิตร
- 3.2.5 ขวดดูแรน (Schott Duran, Germany) ขนาด 500 มิลลิลิตร
- 3.2.6 กระบอกตวง (Witeg, Germany) ขนาด 10 และ 50 มิลลิลิตร
- 3.2.7 โกร่งบดสาร (Thailand) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 เซนติเมตร
- 3.2.8 ท่อแก้วควบแน่น (NK laboratory, Thailand) ขนาด 300 มิลลิเมตร
- 3.2.9 ปั๊มน้ำชนิด Submersible pump (Aqua Zonic, China)
- 3.2.10 ซ้อนตักสารเคมี (Thailand)

- 3.2.11 อลูมิเนียมฟอยล์ (Diamond, USA)
- 3.2.12 แผงแม่เหล็กกวนสาร (Isolab, Germany)
- 3.2.13 เครื่องกวนสารละลายพร้อมเตาให้ความร้อน รุ่น C-MAG HS7 (IKA, Japan)
- 3.2.14 ตู้อบลมร้อน รุ่น ED/FD (Binder, USA)
- 3.2.15 ตู้อบสุญญากาศ รุ่น LVO-2030 (Daihan Labtech, South Korea)
- 3.2.16 ชุดอุปกรณ์วัดการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ (Swagelog, USA)

3.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.3.1 การบำบัดผงยางเหลือทิ้งด้วยกรด

นำผงยางเหลือทิ้งทั้ง 3 ขนาด น้ำหนัก 30 กรัม ผสมลงในสารละลายกรด ซัลฟิวริกความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร ปริมาตร 300 มิลลิลิตร (อัตราส่วน ผงยางเหลือทิ้ง 1 กรัม ต่อ สารละลายกรด 10 มิลลิลิตร) กวนผสมเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปกรองล้างด้วยปั๊มสุญญากาศ ล้างสารละลายกรดออกด้วยน้ำกลั่น จนกระทั่งค่า pH เป็นกลาง จากนั้นนำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และนำไปอบในภาวะสุญญากาศอีกครั้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง [54, 56]

3.3.2 การตัดแปรผงยางเหลือทิ้งด้วยแอมีน

นำผงยางเหลือทิ้งทั้ง 3 ขนาด (20, 40 และ 60 เมช) น้ำหนัก 30 กรัม ตัดแปรด้วยสารละลายแอมีน 2 ชนิด คือ TEPA และ PEI ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ (ร้อยละ 2.5, 5 และ 10 โดยน้ำหนัก) นำแอมีนมาละลายในเอทานอล ที่อัตราส่วนแอมีน 1 กรัม ต่อ เอทานอล 10 กรัม เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นนำผงยางเหลือทิ้งมาผสมกับสารละลายแอมีนที่เตรียมไว้เป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำเข้าในตู้อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง [53]

3.3.3 การบำบัดผงยางเหลือทิ้งด้วยกรดและตัดแปรด้วยแอมีน

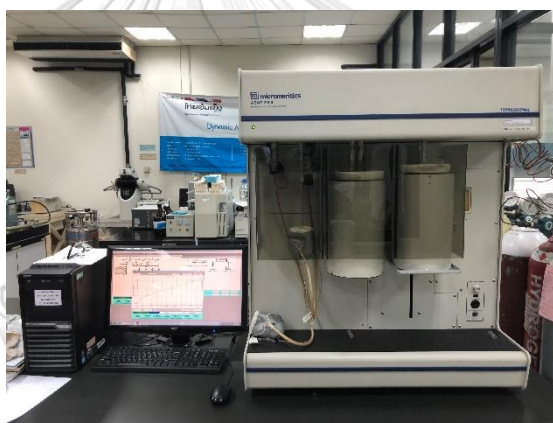
นำผงยางเหลือทิ้งมาบำบัดด้วยกรดตามขั้นตอนที่ 3.3.1 จากนั้น เมื่อตัวอย่างที่เตรียมแห้งสนิท จึงนำไปตัดแปรด้วยแอมีน ตามขั้นตอนที่ 3.3.2 จึงได้วัสดุดูดซับตามที่ต้องการ โดยสัญลักษณ์ที่ใช้ในการกำหนดชื่อสาร มีดังนี้ WR หมายถึง วัสดุดูดซับจากผงยางเหลือทิ้ง ตัวเลข 20 40 และ 60 หมายถึง ขนาดของผงยางเหลือทิ้งที่ใช้ในการตัดแปร

ตัวเลข 2.5 5 และ 10 หมายถึง ความเข้มข้นร้อยละโดยน้ำหนักของแอมีน ตามลำดับ
T หมายถึง TEPA และ P หมายถึง PEI

3.4 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของวัสดุดูดซับ

3.4.1 การศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุดูดซับ

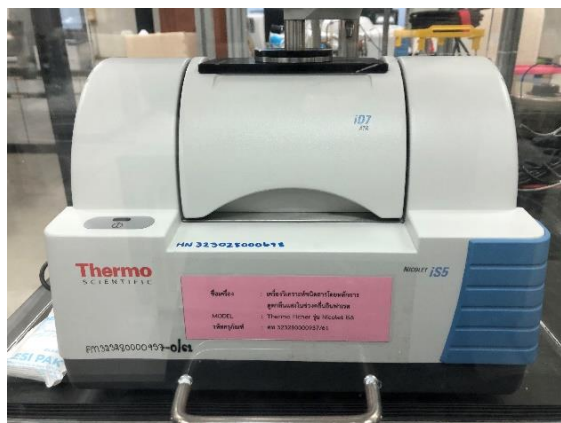
ศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุดูดซับที่เตรียมโดยใช้เทคนิคการดูดซับและคายซับแก๊สไนโตรเจน ผ่านการคำนวณด้วยวิธีของ Brunauer-Emmett-Teller surface are (BET) ด้วยเครื่องยี่ห้อ Micromeritics รุ่น Asap 2020 (สหรัฐอเมริกา) ดังรูปที่ 3.1 โดยสารตัวอย่างจะถูกนำไปคายแก๊ส (degas) ก่อนทำการวิเคราะห์ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที



รูปที่ 3.1 เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะยี่ห้อ Micromeritics รุ่น Asap 2020
(สหรัฐอเมริกา)

3.4.2 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนวัสดุดูดซับ

ศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนผิวของวัสดุดูดซับที่เตรียมได้โดยใช้เทคนิค FT-IR โดยเครื่องยี่ห้อ Thermo Ficher รุ่น Nicolet iS5 (สหรัฐอเมริกา) ดังรูปที่ 3.2 โดยความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 4000 เซนติเมตร⁻¹ ถึง 400 เซนติเมตร⁻¹ วิเคราะห์ที่ความละเอียด (resolution) 4 เซนติเมตร⁻¹ จำนวน 64 สแกน



รูปที่ 3.2 เครื่องวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันยี่ห้อ Thermo Ficher รุ่น Nicolet iS5 (สหรัฐอเมริกา)

3.4.3 การศึกษาร้อยละธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจนและซัลเฟอร์

ศึกษาองค์ประกอบธาตุของวัสดุดูดซับที่เตรียมได้โดยเครื่อง ParkinElmer รุ่น 2499 Series II (สหรัฐอเมริกา) ดังรูปที่ 3.3 ซึ่งน้ำหนักตัวอย่างประมาณ 2 มิลลิกรัม บรรจุลงในฟอยแคปซูลจากนั้นบรรจุลงในเครื่อง ตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ถูกเผาในเครื่อง ปฏิกรณ์แบบไพโรไลซิส ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ภายใต้ภาวะที่มีแก๊สฮีเลียม แก๊สที่ได้จากการเผาไหม้ของตัวอย่างถูกแยกโดยวิธีคอลัมน์โครมาโทกราฟี (Chromatographic column) และถูกคำนวณเป็นค่าร้อยละองค์ประกอบของธาตุที่มีในตัวอย่าง



รูปที่ 3.3 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ ยี่ห้อ ParkinElmer รุ่น 2499 Series II (สหรัฐอเมริกา)

3.4.4 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวัสดุดูดซับ

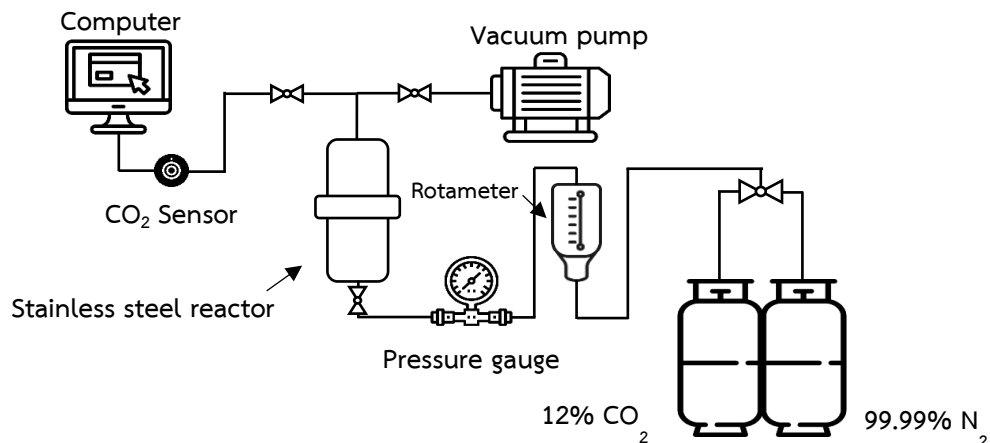
ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวัสดุดูดซับที่เตรียมได้โดยเครื่องวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐาน ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-5480LV (ประเทศญี่ปุ่น) ดังแสดงในรูป 3.4 โดยนำตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์บรรจุลงบนแท่นวาง (Stub) แล้วนำไปเคลือบทองคำก่อนนำไปวิเคราะห์ที่ความต่างศักย์ 15 kV และกำลังขยาย 1500 เท่า



รูปที่ 3.4 เครื่องวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐาน ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-5480LV (ประเทศญี่ปุ่น)

3.5 การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

การทดสอบดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ศึกษาโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์สแตนเลสชนิดเบดนิ่ง ดังรูป 3.6 ภายใต้อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) และภาวะบรรยากาศ เริ่มต้นโดยบรรจุวัสดุดูดซับที่เตรียมลงในเครื่องปฏิกรณ์สแตนเลส (Stainless steel reactor) ประมาณ 3 กรัม จากนั้นให้ความร้อนแก่วัสดุดูดซับด้วยเทปให้ความร้อน (Heating tape) ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส พันโดยรอบของเครื่องปฏิกรณ์ พร้อมกับเปิดแก๊สไนโตรเจนที่ภาวะความดันสุญญากาศโดยใช้ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump) ไหลผ่านวัสดุดูดซับเป็นเวลา 20 นาที เมื่อเครื่องปฏิกรณ์ถูกลดอุณหภูมิลงจนถึงอุณหภูมิห้อง เปิดแก๊สผสม (CO_2 ร้อยละ 12 โดยปริมาตร และ N_2 ร้อยละ 88 โดยปริมาตร) ที่อัตราการไหลแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เข้า 25, 50, 70 และ 100 มิลลิลิตรต่อนาที วัดผลการดูดซับแก๊สผ่านทางอุปกรณ์รับรู้คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 sensor) และหยุดทำการดูดซับแก๊สเมื่อผลการดูดซับแสดงร้อยละของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ร้อยละ 12 ตามช่วงเวลาที่ได้กำหนด [8, 43]



รูปที่ 3.5 แผนภาพอุปกรณ์ในการทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

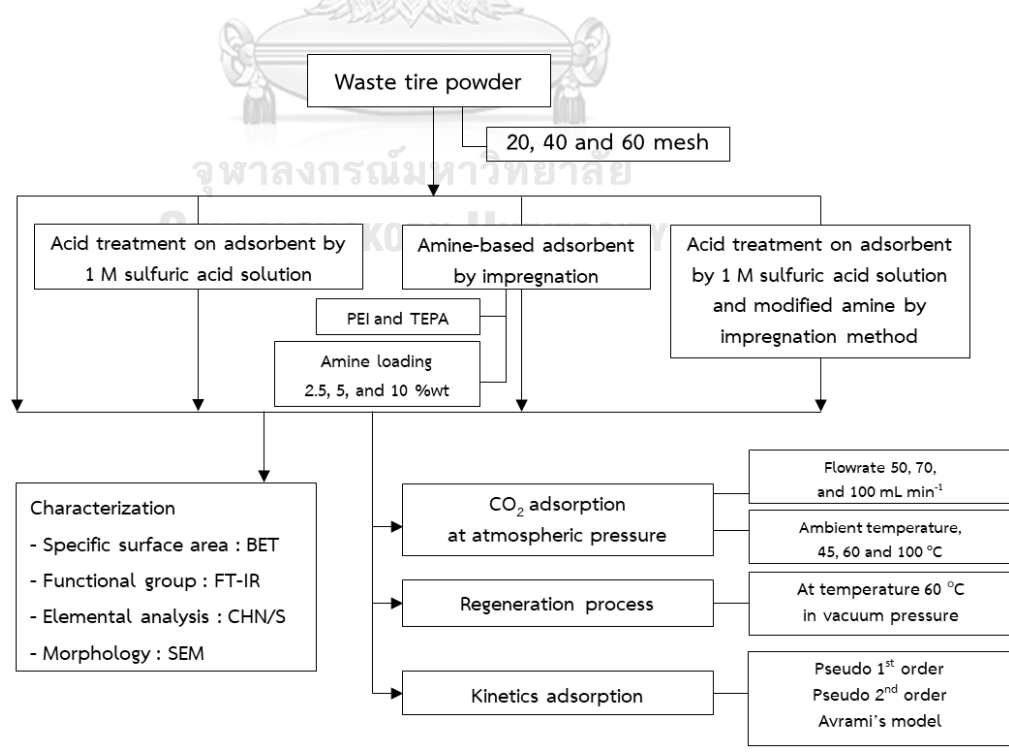
3.6 กระบวนการนำกลับมาใช้ซ้ำ (Regeneration Process)

วัสดุดูดซับที่ผ่านการทดสอบการดูดซับแล้ว ถูกทดสอบการนำกลับมาใช้ซ้ำโดยใช้กระบวนการดูดซับสลับความดันร่วมกับการดูดซับสลับอุณหภูมิ ในภาวะที่มีแก๊สไนโตรเจน โดยเริ่มต้นจากลดความดันของวัสดุดูดซับที่บรรจุในเครื่องปฏิกรณ์โดยใช้ปั๊มสุญญากาศและให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที เมื่อเครื่องปฏิกรณ์ที่บรรจุวัสดุดูดซับอุณหภูมิลดลงจนถึงอุณหภูมิห้อง เปิดแก๊สผสมเริ่มทำการทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ซ้ำอีกครั้ง [8, 43]

3.7 การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ

การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ โดยใช้แบบจำลองจลนพลศาสตร์ 3 แบบจำลอง คือ แบบจำลองอันดับหนึ่งเทียม แบบจำลองอันดับสองเทียม และแบบจำลองอาฟรามี ดังแสดงในสมการที่ (1) (2) และ (3) ในบทที่ 2

ภาพรวมของขั้นตอนการดำเนินงานทั้งหมดของงานวิจัยแสดงในรูปที่ 3.7 ผงยางเหลือทิ้งที่ประกอบด้วย 3 ขนาด คือ 20, 40 และ 60 เมช จะถูกนำไปทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เบื้องต้นเพื่อหาขนาดของผงยางเหลือทิ้งที่เหมาะสมที่สุด จากนั้นจะถูกนำไปพัฒนาให้เป็นวัสดุดูดซับด้วย 3 กระบวนการดังนี้ 1) การบำบัดพื้นผิวด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก 2) การดัดแปรโดยเติมหมู่เอมีน ได้แก่ TEPA หรือ PEI ที่ร้อยละความเข้มข้นต่าง ๆ ได้แก่ 2.5, 5 และ 10 โดยน้ำหนัก 3) การบำบัดด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกดังข้อ 1) ก่อนนำไปดัดแปรโดยเติมหมู่เอมีนดังข้อ 2) จากนั้นนำไปพิสูจน์เอกลักษณ์โดยวิเคราะห์พื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุน หมู่ฟังก์ชัน องค์ประกอบธาตุ ลักษณะทางสัณฐานวิทยา และเสถียรภาพทางความร้อนของวัสดุดูดซับ นำวัสดุดูดซับมาทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ภาวะความดันบรรยากาศ โดยใช้อัตราการไหลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เข้าต่าง ๆ ได้แก่ 50, 70 และ 100 มิลลิลิตรต่ออนาที และที่ภาวะอุณหภูมิต่าง ๆ คือ อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส), 45, 60 และ 100 องศาเซลเซียส รวมถึงศึกษาการฟื้นฟูสภาพวัสดุดูดซับเพื่อนำกลับมาใช้ซ้ำด้วยวิธีดูดซับสลับความดันร่วมกับการดูดซับแบบสลับอุณหภูมิ ที่ภาวะอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสรวมกับการใช้ปั๊มสุญญากาศ และศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของวัสดุดูดซับผ่านสามสมการ คือ แบบจำลองอันดับหนึ่งเทียม แบบจำลองอันดับสองเทียม และแบบจำลองอาฟรามิ



รูปที่ 3.6 แผนภาพการดำเนินงานวิจัย

บทที่ 4

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของวัสดุดูดซับ

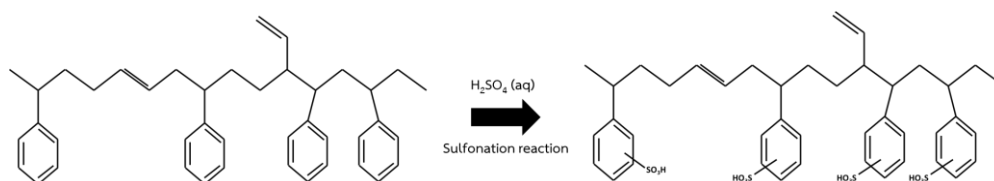
4.1.1 พื้นที่ผิวจำเพาะ

4.1.1.1 ผงยางเหลือทิ้ง

ผงยางเหลือทิ้งก่อนการบำบัดและการดัดแปรถูกนำมาวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะด้วยเทคนิค Gas adsorption ดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่า WR20 มีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยที่สุด คือ 1.438 ตารางเมตรต่อกรัม ในส่วนของ WR40 แสดงพื้นที่ผิวจำเพาะ (1.444 ตารางเมตรต่อกรัม) ที่มีค่าสูงกว่า WR20 ในขณะที่ WR60 มีผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะที่มากที่สุด คือ 2.023 ตารางเมตรต่อกรัม กล่าวโดยสรุป คือ เมื่อเบอร์เมซของผงยางเพิ่มขึ้น ขนาดของอนุภาคผงยางเหลือทิ้งมีขนาดเล็กลง โดยเมื่อผงยางเหลือทิ้งยังมีขนาดเล็กจะส่งผลให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะที่เพิ่มขึ้น ดังนั้น WR60 ที่มีขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะที่มากที่สุดจึงเหมาะสมต่อการนำไปเตรียมเป็นวัสดุดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ต่อไป

4.1.1.2 ผงยางเหลือทิ้งบำบัดด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก

WR60 ถูกนำไปทำการปรับปรุงผิวด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร (WR60A) หลังจากการบำบัดแล้วได้นำไปวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าพื้นที่ผิวของ WR60A มีค่าเท่ากับ 2.149 ตารางเมตรต่อกรัม แสดงให้เห็นว่าการบำบัดของผงยางเหลือทิ้งด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกมีแนวโน้มที่ทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะของ WR60A มีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 6.23 เมื่อเทียบกับพื้นที่ผิวจำเพาะของ WR60 โดยเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาซัลโฟเนชัน (sulfonation) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยผงยางเหลือทิ้งมีโครงสร้างที่ประกอบด้วยสไตรีน-บิวทาไดอีน เมื่อทำการเติมสารละลายกรดไปบนผิวของผงยางเหลือทิ้ง จึงเกิดการซัลโฟเนชันในบริเวณของหมู่เบนซีน ส่งผลให้ผงยางเหลือทิ้งมีความขรุขระเพิ่มมากขึ้น กล่าวโดยสรุป คือ พื้นที่ผิวจำเพาะของ WR60A เพิ่มขึ้นเมื่อทำการบำบัดด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกเมื่อเทียบกับ WR60 ดังนั้น WR60A จึงเหมาะสมต่อการนำไปเตรียมเป็นวัสดุดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ต่อไป



รูปที่ 4.1 ภาพจำลองโครงสร้างของพยางเหลื่อทั้งก่อนและหลังเกิดปฏิกิริยาซัลโฟเนตชัน

[56]

ตารางที่ 4.1 พื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุดูดซับจากพยางเหลื่อทั้งชนิดต่าง ๆ

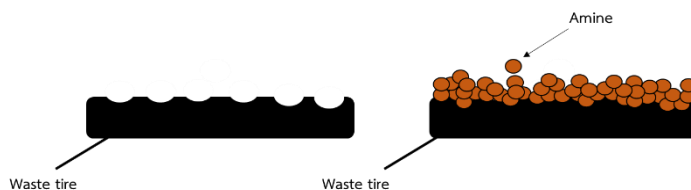
Sample code	Specific surface area (m ² /g)
WR20 ^a	1.438
WR40 ^b	1.444
WR60 ^c	2.023
WR60A ^d	2.149
WR60_2.5T	2.709
WR60_2.5P	2.332
WR60_5T	2.716
WR60_5P	2.221
WR60_10T	8.011
WR60_10P	3.685
WR60A_10T ^e	1.835

^a พยางเหลื่อทั้งขนาดเมช 20 ^b พยางเหลื่อทั้งขนาดเมช 40 ^c พยางเหลื่อทั้งขนาดเมช 60 ^d พยางเหลื่อทั้งขนาดเมช 60 หลังจากบำบัดด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก ^e พยางเหลื่อทั้งขนาดเมช 60 หลังจากบำบัดด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกและดัดแปรด้วยแอมิน

4.1.1.3 พยางเหลื่อทั้งดัดแปรด้วยสารละลายแอมิน

WR60 ถูกนำไปดัดแปรด้วยสารละลายแอมินที่แตกต่างกันสองชนิด คือ TEPA และ PEI ที่ความเข้มข้นที่ต่าง ๆ คือ ร้อยละ 2.5 5 และ 10 โดยน้ำหนัก จากนั้นจึงนำไปวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่า WR60 หลังถูกดัดแปรด้วยสารละลายแอมินทั้งสองชนิดที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน มีแนวโน้มพื้นที่ผิวจำเพาะที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากลักษณะของพื้นผิวของพยางเหลื่อทั้งที่มีลักษณะที่ราบเรียบ หรือไม่มีรูพรุน (non-porous) แตกต่างจากลักษณะของวัสดุดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ชนิดอื่น ๆ ที่มีรูพรุน (porous material) [57-59] เมื่อทำการเติมแอมินลงไป แอมินจะลงไปปกคลุม

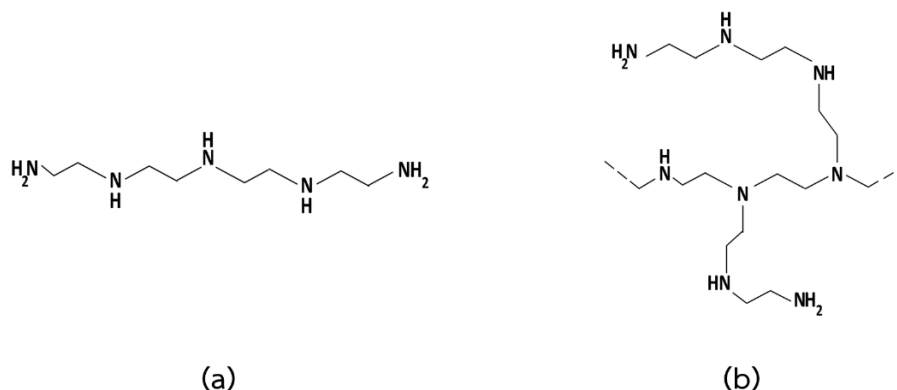
บริเวณพื้นผิวและเกาะกันเป็นกลุ่มก้อน จนส่งผลให้พื้นที่ผิวจำเพาะที่วิเคราะห์ได้มีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.2 เมื่อเทียบกับ WR60



รูปที่ 4.2 แผนภาพจำลองลักษณะของพื้นผิวผิวยางเหลือทิ้งก่อนและหลังเติมแอมีน

เมื่อพิจารณาพื้นที่ผิวจำเพาะของ WR60_2.5T และ WR60_2.5P ในตารางที่ 4.1 สังเกตว่าส่วนของ WR60_2.5T หรือวัสดุดูดซับที่ถูกเตรียมด้วยแอมีนชนิด TEPA จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะที่มีค่าสูงกว่า WR60_2.5P หรือวัสดุดูดซับที่ถูกเตรียมด้วยแอมีนชนิด PEI เนื่องจาก TEPA เป็นแอมีนมีลักษณะโครงสร้างที่เป็นเส้นตรงในขณะที่ PEI เป็นแอมีนที่มีลักษณะโครงสร้างแบบร่างแห ดังรูปที่ 4.3 ดังนั้น WR60_2.5P ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะที่น้อยกว่า (2.332 ตารางเมตรต่อกรัม) อาจเกิดจาก PEI บนผิวของผิวยางที่เกาะและบดบังบริเวณผิว ในขณะที่ WR60_2.5T ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะที่มากกว่า (2.709 ตารางเมตรต่อกรัม) อาจเป็นเพราะขนาดของ TEPA ที่เล็กกว่า PEI จึงมีความเกาะและบดบังพื้นผิวน้อยกว่า ต่อมา เมื่อพิจารณาวัสดุดูดซับชนิด WR60_5T และ WR60_5P พบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะของทั้งวัสดุดูดซับสองชนิดนี้มีการเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเทียบกับพื้นที่ผิวจำเพาะของ WR60_2.5T และ WR60_2.5P แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาระหว่างวัสดุดูดซับ พบว่า พื้นที่ผิวจำเพาะมีแนวโน้มไปในทางเดียวกับวัสดุดูดซับสองชนิดก่อนหน้า คือ WR60_5T มีพื้นที่ผิวจำเพาะที่มากกว่า WR60_5P เช่นเดียวกัน

เมื่อพิจารณาที่วัสดุดูดซับชนิด WR60_10T และ WR60_10P ดังตารางที่ 4.1 พบว่า พื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุดูดซับทั้งสองชนิดมีค่ามากกว่าวัสดุดูดซับชนิดอื่น ๆ ที่ได้พิจารณาก่อนหน้าทั้งหมด (8.011 ตารางเมตรต่อกรัม และ 3.685 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ) โดยอาจเป็นผลมาจากปริมาณแอมีนที่ได้เติมลงไปด้วยวิธีเปียกชุ่มที่มากกว่า จึงอาจเป็นผลทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่าวัสดุดูดซับชนิดอื่น ๆ เกือบเท่าตัว นอกจากนี้ พื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุดูดซับชนิด WR60_10T และ WR60_10P มีแนวโน้มเช่นเดียวกับวัสดุดูดซับชนิดอื่น ๆ คือ วัสดุดูดซับชนิดที่เติมด้วยแอมีนชนิด TEPA คือ WR60_10T มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่าวัสดุดูดซับชนิดที่เติมด้วยแอมีนชนิด PEI ดังนั้น จึงเลือก TEPA ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ในการนำไปใช้เพื่อตัดแปรผิวยางเหลือทิ้งหลังผ่านการบำบัดด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก



รูปที่ 4.3 ลักษณะโครงสร้างของแอมีน (a) TEPA (b) PEI

4.1.1.4 ผงยางเหลือทิ้งบำบัดด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกและตัดแปรด้วยสารละลายแอมีน

WR60A ถูกนำไปตัดแปรด้วยสารละลายแอมีนชนิด TEPA ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก (WR60A_10T) จากนั้นจึงถูกนำไปวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่า พื้นที่ผิวจำเพาะของ WR60A_10T มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับทั้ง WR60A และ WR60_10T (1.835 ตารางเมตรต่อกรัม) ทั้งนี้มีผลมาจากเมื่อผงยางเหลือทิ้งถูกบำบัดพื้นที่ผิวและส่งผลให้พื้นที่ผิวจำเพาะมีค่าเพิ่มขึ้น การตัดแปรด้วยสารละลายแอมีนลงไปในผงยางเหลือทิ้งอาจส่งผลให้สารละลายแอมีนนั้นสามารถกระจายตามพื้นที่ผิวที่ถูกสารละลายกรดซัลฟิวริกบำบัดได้ดีขึ้น ซึ่งสารละลายแอมีนอาจกระจายไปตามความขรุขระของพื้นที่ผิวผงยางเหลือทิ้ง ทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุดูดซับลดลงจากเดิมเมื่อเทียบกับ WR60A

4.1.2 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนวัสดุดูดซับ

รูปที่ 4.4 – 4.6 แสดงผลของหมู่ฟังก์ชันบนวัสดุดูดซับที่เตรียมจากผงยางเหลือทิ้งที่ตัดแปรด้วยสารละลายแอมีนต่างชนิดที่ปริมาณต่าง ๆ พบว่า วัสดุดูดซับที่เตรียมจากผงยางเหลือทิ้งก่อนการตัดแปร WR60 ในรูปที่ 4.4 (a) – 4.6 (a) แสดงช่วงคลื่นที่ตำแหน่งเลขคลื่น (Wavenumber) 2914.68 เซนติเมตร⁻¹ และ 2846.13 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งแสดงถึงหมู่ CH₃ แบบยืดไม่สมมาตรชนิด C-H แอลิฟาติก (Aliphatic C–H unsymmetrical stretching vibration) และหมู่ CH₂ แบบยืดสมมาตรชนิด C-H แอลิฟาติก (Aliphatic C–H symmetrical stretching vibration) ซึ่งบ่งชี้ว่าตัวอย่างผงยางเหลือทิ้งที่นำมาเตรียมเป็นวัสดุดูดซับนั้นมีส่วนประกอบของยางสังเคราะห์หรือยางธรรมชาติ [60-62] นอกจากนี้ยังพบช่วงคลื่นที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1536 เซนติเมตร⁻¹ บ่งชี้ถึงพันธะ C-S ที่แสดงถึงการเชื่อมโยงของซัลเฟอร์ในกระบวนการขึ้นรูปของยางบนผงยางเหลือทิ้ง [63, 64]

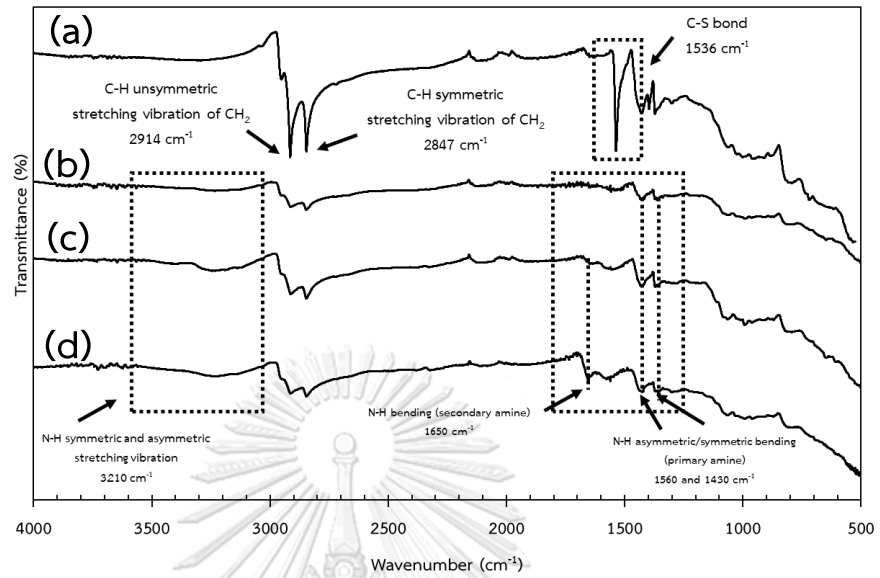
รูปที่ 4.4 (b) - (d) แสดงผลของหมู่ฟังก์ชันของผงยางเหลือทิ้งหลังจากตัดแปรด้วย TEPA พบว่ามีช่วงคลื่นเพิ่มขึ้นที่ช่วงตำแหน่งเลขคลื่น 3210 เซนติเมตร⁻¹ แสดงถึงหมู่แอมีนแบบยึดที่สมมาตรและไม่สมมาตรของ N-H (N-H Symmetric and asymmetric stretching vibration of amine groups) [65, 66] อีกทั้ง ยังพบว่าตำแหน่งเลขคลื่น 1650 เซนติเมตร⁻¹ บ่งบอกถึงหมู่แอมีนทุติยภูมิชนิดงอ (Secondary amine N-H bending) อีกทั้งช่วงตำแหน่ง 1560 และ 1430 เซนติเมตร⁻¹ ที่แสดงถึงหมู่ปฐมภูมิของ N-H แบบงอที่ไม่สมมาตรและสมมาตร (Primary amine asymmetric/symmetric bending) [2, 53, 65] อีกทั้งเมื่อพิจารณาในช่วงปริมาณที่แตกต่างกัน พบว่า เมื่อปริมาณของ TEPA เพิ่มขึ้น ช่วงเลขคลื่น 3210 เซนติเมตร⁻¹ และ 1560 ถึง 1430 เซนติเมตร⁻¹ ที่บ่งบอกถึงลักษณะเฉพาะตัวของแอมีนจะมีช่วงกว้างขึ้น

เมื่อพิจารณาในรูปที่ 4.5 (b) - (d) ซึ่งแสดงผลของหมู่ฟังก์ชันของผงยางเหลือทิ้งหลังจากตัดแปรด้วย PEI พบการเพิ่มขึ้นของช่วงคลื่นตำแหน่งเลขคลื่น 3210 เซนติเมตร⁻¹ รวมถึงช่วงตำแหน่ง 1560 และ 1430 เซนติเมตร⁻¹ เช่นเดียวกับกับรูปที่ 4.5 ซึ่งแสดงผลของหมู่ฟังก์ชันของผงยางเหลือทิ้งหลังจากถูกตัดแปรด้วย TEPA อีกทั้งเมื่อพิจารณาในช่วงของปริมาณ PEI ที่แตกต่างกัน พบว่า ช่วงเลขคลื่น 3210 เซนติเมตร⁻¹ และ 1560 ถึง 1430 เซนติเมตร⁻¹ ที่บ่งบอกถึงลักษณะเฉพาะตัวของแอมีนจะมีช่วงกว้างขึ้นเช่นเดียวกัน รวมถึงผงยางเหลือทิ้งตัดแปรด้วย PEI ที่มีลักษณะช่วงคลื่นเพิ่มขึ้นในบริเวณเลขคลื่นที่ใกล้เคียงกันหลังจากตัดแปรด้วย PEI รวมถึงมีช่วงกว้างของเลขคลื่นเพิ่มขึ้นเช่นกันเมื่อเพิ่มปริมาณของ PEI

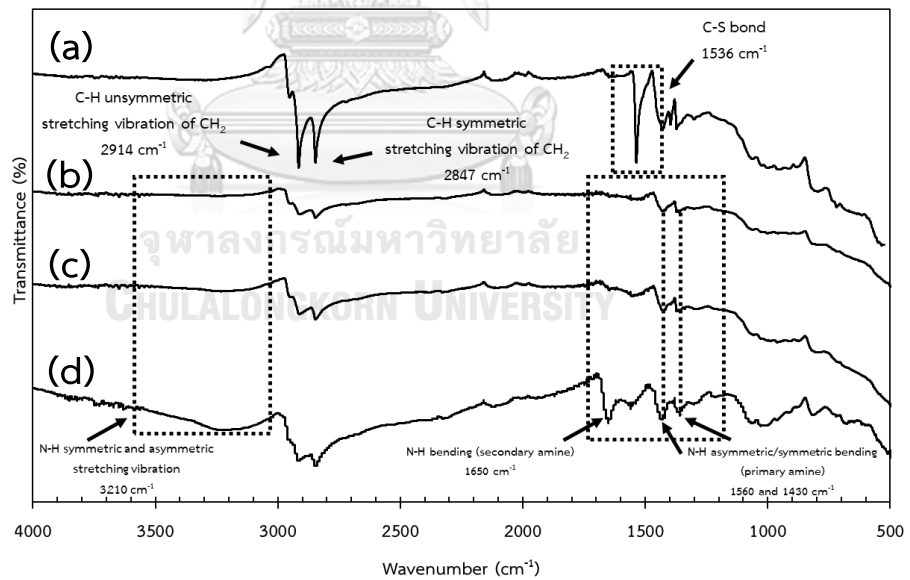
เมื่อพิจารณาที่ WR60_10P หรือในรูปที่ 4.6 (d) จะพบว่าช่วงเลขคลื่นตำแหน่ง 3210 เซนติเมตร⁻¹ จะมีการเพิ่มขึ้นของช่วงคลื่นที่มากกว่า WR60_10T หรือในรูปที่ 4.5 (d) โดยอาจเป็นผลมาจากจำนวนหมู่ของตำแหน่งกัมมันต์ (Active site) ในโครงสร้างโมเลกุลของ PEI มีจำนวนมากกว่าโครงสร้างโมเลกุลของ TEPA และอีกประการหนึ่งเมื่อพิจารณาที่ช่วงคลื่นเลขคลื่น 1536 เซนติเมตร⁻¹ ที่บ่งบอกถึงพันธะ C-S ในทั้ง WR60_10T และ WR60_10P พบว่าไม่มีการปรากฏช่วงคลื่นดังกล่าวดังที่ปรากฏใน WR ซึ่ง เป็นผลมาจากปฏิกิริยาการทำลายพันธะ (Devulcanization) ระหว่างธาตุคาร์บอนและซัลเฟอร์เนื่องจากการเติมแอมีนลงบนผงยางเหลือทิ้ง [63, 64]

รูปที่ 4.6 (a) - (c) แสดงผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของ WR60 WR60_10T และ WR60A_10T ตามลำดับ พบว่า WR60A_10T หรือรูปที่ 4.7 (c) พบการเพิ่มขึ้นของช่วงคลื่นตำแหน่งเลขคลื่น 3210 เซนติเมตร⁻¹ รวมถึงช่วงตำแหน่ง 1560 และ 1430 เซนติเมตร⁻¹ เช่นเดียวกับกับ WR60_10T หรือรูปที่ 4.7 (b) ซึ่งจากผลการวิเคราะห์

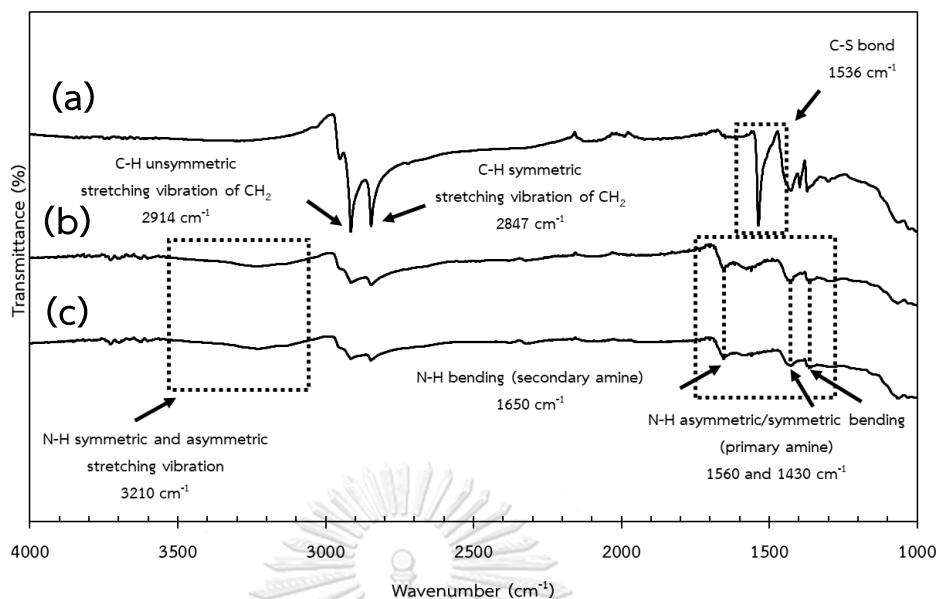
หมู่ฟังก์ชัน แสดงให้เห็นว่าหลังจากบำบัดผงยางเหลือทิ้งด้วยสารละลายกรด การตัดแปรร่วมมีนลงบนผงยางเหลือทิ้งเป็นไปอย่างสมบูรณ์ [60, 67]



รูปที่ 4.4 FTIR สเปกตรัมของผงยางเหลือทิ้งก่อนตัดแปรร่วม (a) WR60 และหลังตัดแปรร่วมด้วย TEPA (b) WR60_2.5T (c) WR60_5T (d) WR60_10T



รูปที่ 4.5 FTIR สเปกตรัมของผงยางเหลือทิ้งก่อนตัดแปรร่วม (a) WR60 และหลังตัดแปรร่วมด้วย PEI (b) WR60_2.5P (c) WR60_5P (d) WR60_10P



รูปที่ 4.6 FTIR สเปกตรัมของผงยางเหลือทิ้งก่อนดัดแปร (a) WR60 หลังดัดแปรด้วย TEPA (b) WR60_10T และหลังบำบัดด้วยกรดและดัดแปรด้วย TEPA (c) WR60A_10T

4.1.3 การศึกษาร้อยละธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจนและซัลเฟอร์

วัสดุดูดซับชนิดต่าง ๆ ที่ได้ถูกเตรียมจากผงยางเหลือทิ้ง ได้ถูกนำมาวิเคราะห์ร้อยละของธาตุคาร์บอน ไนโตรเจน ไฮโดรเจนและซัลเฟอร์บนวัสดุดูดซับจากผงยางเหลือทิ้งด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ โดยผลการวิเคราะห์ถูกแสดงดังตารางที่ 4.2 จากผลการวิเคราะห์ดังตาราง เมื่อพิจารณาที่วัสดุดูดซับชนิด WR60 และ WR60A พบว่า มีปริมาณร้อยละของธาตุมีความใกล้เคียงกัน จึงอาจสรุปได้ว่า การบำบัดผงยางเหลือทิ้งด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกไม่ได้ส่งผลให้ร้อยละองค์ประกอบของธาตุบนผงยางเหลือทิ้งเปลี่ยนแปลงไป

เมื่อพิจารณาผงยางเหลือทิ้งหลังผ่านการดัดแปรด้วยแอมีน คือ TEPA หรือ PEI ที่ปริมาณต่าง ๆ พบว่า ปริมาณร้อยละของธาตุไนโตรเจนมีปริมาณเพิ่มขึ้นแปรผันตามปริมาณร้อยละของสารละลายแอมีนที่ได้ดัดแปรบนผงยางเหลือทิ้ง และเมื่อพิจารณาในแต่ละปริมาณร้อยละของสารละลายแอมีนที่ได้ดัดแปรเท่า ๆ กัน ระหว่าง TEPA หรือ PEI พบว่า ปริมาณร้อยละของไนโตรเจนในตัวอย่างที่ดัดแปรด้วยสารละลายแอมีนชนิด PEI มีแนวโน้มที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ดัดแปรด้วยสารละลายแอมีนชนิด TEPA

อันเนื่องมาจากจำนวนหมู่กัมมันต์ในโมเลกุล PEI ที่อาจมากกว่าในโมเลกุลของ TEPA ดังแสดงในรูป 4.3

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาผลของปริมาณร้อยละของธาตุซัลเฟอร์บนวัสดุดูดซับ พบว่าปริมาณร้อยละของธาตุลดลงแปรผกผันกับปริมาณร้อยละของสารละลายแอมีนที่ได้เติมลงบนผงยางเหลือทิ้ง อีกทั้งเมื่อพิจารณาในตัวอย่างแต่ละชนิดที่ได้ตัดแปรด้วยสารละลายแอมีนที่แตกต่างกัน พบว่าวัสดุดูดซับที่ตัดแปรด้วยสารละลายแอมีนชนิด PEI มีแนวโน้มที่ปริมาณร้อยละของธาตุซัลเฟอร์ลดลงหรือน้อยกว่าวัสดุดูดซับที่ตัดแปรด้วยสารละลายแอมีนชนิด TEPA อันเนื่องมาจากผลของสารละลายแอมีนที่ได้ทำลายพันธะระหว่างธาตุคาร์บอนและซัลเฟอร์ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนวัสดุดูดซับดังที่ได้กล่าวไปในหัวข้อข้างต้น

เมื่อพิจารณาที่ผลการวิเคราะห์วัสดุดูดซับชนิด WR60A_10T พบว่า WR60A_10T มีร้อยละของธาตุสอดคล้องกับ WR60_10T โดยมีร้อยละของธาตุไนโตรเจนที่ใกล้เคียงกัน แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาที่ร้อยละของธาตุซัลเฟอร์ พบว่า WR60A_10T มีค่าร้อยละของธาตุซัลเฟอร์สูงกว่า WR60_10T เล็กน้อย ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการบำบัดด้วยสารละลายกรด

ตารางที่ 4.2 ร้อยละของธาตุคาร์บอน ไนโตรเจน ไฮโดรเจนและซัลเฟอร์

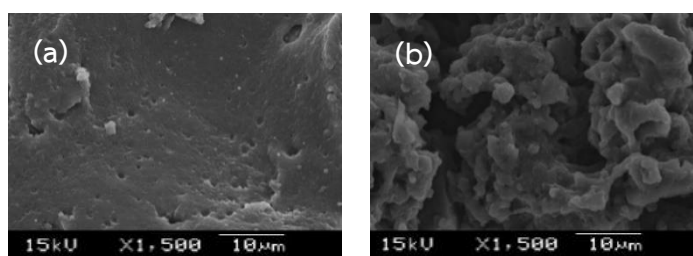
Sample code	Carbon (%)	Hydrogen (%)	Nitrogen (%)	Sulfur (%)
WR60	80.43	7.64	1.10	2.98
WR60A	81.05	7.62	1.09	2.96
WR60_2.5T	79.90	7.63	1.52	2.88
WR60_2.5P	80.20	7.61	1.71	2.76
WR60_5T	81.11	7.86	2.20	2.89
WR60_5P	80.11	8.02	2.41	2.74
WR60_10T	75.61	7.55	3.13	2.68
WR60_10P	74.05	7.45	3.52	2.46
WR60A_10T	74.70	7.67	3.54	2.88

4.1.4 ลักษณะสัณฐานวิทยา

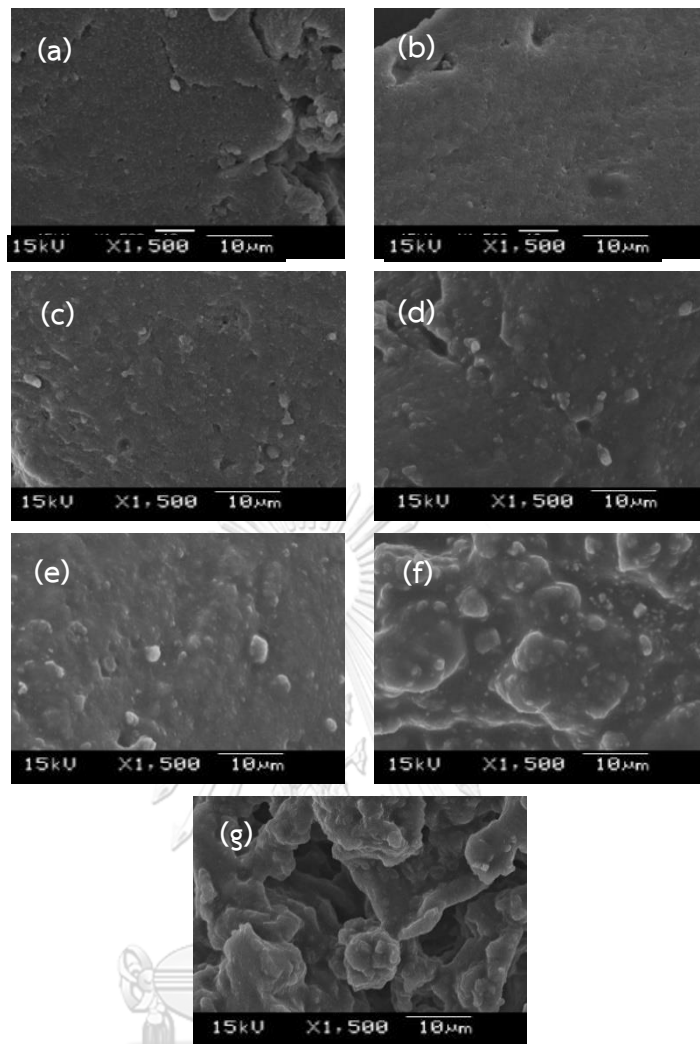
รูปที่ 4.7 (a) และ (b) แสดงสัณฐานของวัสดุดูดซับที่ได้เตรียมจากผงยางเหลือทิ้งก่อนและหลังจากบำบัดด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก พบว่า WR60 มีลักษณะพื้นผิวค่อนข้างเรียบ ไม่มีลักษณะความเป็นโพรง ในขณะที่ผงยางเหลือทิ้งหลังบำบัดกรดซัลฟิวริก WR60A พื้นผิวที่สังเกตได้ค่อนข้างมีลักษณะที่ขรุขระ ไม่ราบเรียบเสมอกัน ความเป็นโพรงค่อนข้างมาก สอดคล้องกับผลการทดลองในตารางที่ 4.1 ที่ได้กล่าวไว้ว่าผงยางเหลือทิ้งหลังบำบัดด้วยสารละลายกรดมีพื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุนมากขึ้น

รูปที่ 4.8 (a) – (f) แสดงสัณฐานของวัสดุดูดซับที่ได้เตรียมจากผงยางเหลือทิ้งหลังตัดแปรด้วยสารละลายแอมีน พบว่า หลังตัดแปรสารละลายแอมีนแล้ว สังเกตได้ว่าพื้นผิวไม่ราบเรียบและขรุขระมากขึ้น และมีแนวโน้มลักษณะที่ไม่สม่ำเสมอ ไม่ราบเรียบมากขึ้น เมื่อพิจารณาจากการเพิ่มร้อยละโดยน้ำหนักของแอมีนบนผงยางเหลือทิ้ง อีกทั้งเมื่อพิจารณาระหว่างความแตกต่างของแอมีนสองชนิด พบว่าผงยางเหลือทิ้งหลังตัดแปรด้วย PEI มีแนวโน้มความไม่สม่ำเสมอรวมถึงความขรุขระและไม่ราบเรียบมากกว่าผงยางเหลือทิ้งเหลือทิ้งหลังตัดแปร TEPA โดยอาจเป็นผลมาจากความเกาะเกาะของขนาดโมเลกุล PEI

รูปที่ 4.8 (g) แสดงสัณฐานของวัสดุดูดซับที่ได้เตรียมจากผงยางเหลือทิ้งหลังบำบัดด้วยสารละลายกรดแล้วตัดแปรด้วยสารละลายแอมีนชนิด WR60A_10T พบว่าพื้นผิวของผงยางมีลักษณะค่อนข้างขรุขระและเป็นโพรงจากผลของการบำบัดด้วยสารละลายกรด แต่มีความขรุขระและไม่ราบเรียบแตกต่างจาก WR60A เล็กน้อย และชั้นผิวของผงยางมีลักษณะคล้ายกับการเพิ่มตัวของผิวเล็กน้อย ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับ WR60_10T และ WR60_10P จึงอาจสรุปได้ว่าสามารถตัดแปรแอมีนลงบนวัสดุดูดซับที่บำบัดด้วยสารละลายกรดได้ สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์เบื้องต้นที่ผ่านมา



รูปที่ 4.7 ลักษณะพื้นผิวของวัสดุดูดซับที่เตรียมจากผงยางเหลือทิ้ง (a) WR60 (b) WR60A



รูปที่ 4.8 ลักษณะพื้นผิวของวัสดุดูดซับที่เตรียมจากผงยางเหลือทิ้ง (a) WR60_2.5T (b) WR60_2.5P (c) WR60_5T (d) WR60_5P (e) WR60_10T (f) WR60_10P และ (g) WR60A_10T

4.2 การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

4.2.1 ผลของอัตราการไหลของแก๊สขาเข้าต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของวัสดุดูดซับชนิด WR60 ที่ภาวะบรรยากาศและอุณหภูมิห้อง (30 °C) ที่อัตราการไหลของแก๊สขาเข้าต่าง ๆ ได้แก่ 50 70 และ 100 มิลลิลิตรต่อนาที เพื่อหาอัตราการไหลของแก๊สขาเข้าเริ่มต้นที่เหมาะสมในการทดลอง จากการทดลอง พบว่า อัตราการไหลของแก๊สขาเข้า 70 มิลลิลิตรต่อนาที ได้แสดงค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงที่สุด เมื่อเทียบกับที่อัตราการไหลของแก๊สขาเข้า 100 และ 50 มิลลิลิตรต่อนาที ตามลำดับ โดยการเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สจาก 50 ขึ้นไปที่ 70 มิลลิลิตรต่อนาที ส่งผลให้ค่าการดูดซับสูงขึ้น จาก 5.99 เป็น 7.10 มิลลิกรัมต่อกรัม โดยเป็นผลมาจากแรงขับ (Driving force) ที่เพิ่มขึ้น ทำให้แก๊สขาเข้าสามารถไหลผ่านวัสดุดูดซับได้มากขึ้นจนสามารถดักจับหรือดูดซับโมเลกุลของแก๊สได้ ในขณะที่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สจาก 70 ขึ้นไปที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที กลับส่งผลให้ค่าการดูดซับแก๊สลดลง เป็น 6.03 มิลลิกรัมต่อกรัม โดยอาจมีผลจาก ในเวลาดูดซับที่เท่ากัน ช่วงเวลาที่แก๊สไหลผ่านวัสดุดูดซับ (Retention time) ลดลงจากเดิม ทำให้โอกาสที่แก๊สจะสัมผัสกับพื้นผิวของวัสดุดูดซับลดลงในขณะที่แก๊สไหลผ่าน และระยะเวลาที่วัสดุดูดซับใช้ในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบจะลดลงเช่นกัน [8] ดังนั้น จึงอาจสรุปได้ว่า อัตราการไหล 70 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นอัตราการไหลของแก๊สขาเข้าที่เหมาะสมที่สุด จึงเลือกอัตราการไหลของแก๊สขาเข้านี้ในการนำมาใช้ทดสอบการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของวัสดุดูดซับชนิดต่าง ๆ ต่อไป

ตารางที่ 4.3 ค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของวัสดุดูดซับชนิด WR60 ที่อัตราการไหลแก๊สขาเข้าต่าง ๆ ที่เวลาการดูดซับเท่ากัน

Gas inlet flowrate (mL/min)	CO ₂ adsorption capacity (mg _{CO₂} /g _{adsorbent})
50	5.99 ± 0.226
70	7.10 ± 0.064
100	6.03 ± 0.065

4.2.2 ผลของขนาดผงยางเหลือทิ้งที่มีต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของผงยางเหลือทิ้งขนาด 20 40 และ 60 เมช พบว่า WR60 มีค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ 7.10 มิลลิกรัมต่อกรัมซึ่งมีค่ามากที่สุด โดยค่าการดูดซับมีแนวโน้มมากขึ้น เมื่อพื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับมีแนวโน้มสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์การพิสูจน์เอกลักษณ์พื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุดูดซับ ดังนั้น ในการเตรียมวัสดุดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ขั้นต่อไป จึงเลือก WR60 ที่มีผลที่ดีที่สุดเพื่อนำไปศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อการดูดซับต่อไป

ตารางที่ 4.4 ค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของผงยางเหลือทิ้งก่อนและหลังดัดแปรที่อัตราของแก๊สขาเข้า 70 มิลลิลิตรต่อนาที

Sample code	CO ₂ adsorption capacity (mg _{CO₂} /g _{adsorbent})
WR20	5.29 ± 0.026
WR40	6.76 ± 0.240
WR60	7.10 ± 0.064
WR60A	8.13 ± 0.111
WR60_2.5T	7.65 ± 0.044
WR60_2.5P	8.10 ± 0.209
WR60_5T	8.71 ± 0.046
WR60_5P	9.43 ± 0.234
WR60_10T	10.41 ± 0.243
WR60_10P	8.97 ± 0.283
WR60A_10T	11.64 ± 0.162

4.2.3 ผลของการบำบัดด้วยกรด

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของผงยางเหลือทิ้งขนาด 60 เมชก่อนและหลังถูกบำบัดด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร พบว่า ผงยางเหลือทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยสารละลายกรด มีแนวโน้มของค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงขึ้น สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ลักษณะของวัสดุดูดซับที่ผ่านมา เนื่องจากเมื่อพื้นผิวของผงยางเหลือทิ้งมีการบำบัดด้วยกรด ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะที่เพิ่มขึ้น อีกทั้งพื้นผิวที่มีลักษณะที่ไม่ราบเรียบ ขรุขระ รวมถึงมีลักษณะคล้ายโพรงเกิดขึ้น ซึ่งลักษณะของผิวที่เปลี่ยนไป มีแนวโน้มส่งผลให้วัสดุดูดซับสามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีขึ้นจากทางกายภาพ เนื่องจากเมื่อพื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับเพิ่มขึ้น ทำให้โมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์ มีโอกาสถูกดักจับได้มากกว่า ดังนั้น จึงเลือกตัวผงยางเหลือทิ้งขนาด 60 เมชหลังการบำบัดด้วยกรดซัลฟิวริก (WR60A) ในการนำไปใช้ในการทดสอบของตัวแปรต่อไป โดยจะทำการหาชนิดแอมินและความเข้มข้นของแอมินที่เหมาะสมก่อนในหัวข้อถัดไป

4.2.4 ผลของการตัดแปรด้วยแอมิน

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการดูดซับ คาร์บอนไดออกไซด์ของผงยางเหลือทิ้งขนาด 60 เมช หลังตัดแปรแอมินสองชนิด ได้แก่ TEPA หรือ PEI ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ คือ ร้อยละ 2.5 5 และ 10 โดยน้ำหนัก พบว่า ค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อร้อยละของแอมินที่ตัดแปรลงบนผงยางเหลือทิ้งเพิ่มขึ้น เนื่องจากความจำเพาะในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์โดยการดูดซับทางเคมีเพิ่มขึ้น โดยแอมินมีสมบัติเป็นเบส จึงสามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีสมบัติเป็นกรดได้ดี [55] นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาวัสดุดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์หลังตัดแปรแอมินที่แตกต่างกัน 2 ชนิด พบว่า วัสดุดูดซับตัดแปรด้วย PEI มีแนวโน้มการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าวัสดุดูดซับตัดแปรด้วย TEPA ซึ่งเป็นผลมาจากโมเลกุลของ PEI ที่มีจำนวนหมู่แอมินในโมเลกุลมากกว่า จึงเพิ่มความจำเพาะต่อการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น [55] แต่เมื่อพิจารณาที่วัสดุดูดซับที่ตัดแปรด้วยแอมินที่ร้อยละ 10 พบว่า WR60_10P มีค่าการดูดซับลดลงเมื่อเทียบกับ WR60_10T ซึ่งส่งผลจาก PEI ที่ตัดแปรลงบนวัสดุดูดซับ เมื่อมีปริมาณที่มากขึ้น อาจทำให้โมเลกุลที่มีขนาดใหญ่และมีจำนวนหมู่แอมินที่มากกว่าไปบดบังพื้นผิวและเกิดความเกาะกบนผิวของผงยางเหลือทิ้งจนทำให้เกิดการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ยากยิ่งขึ้น [68] ดังนั้น ในการศึกษาผลของตัวแปรอื่น ๆ ที่มีผลต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ จึงได้เลือกแอมินชนิด TEPA ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักที่มีผลทำให้ผงยางเหลือทิ้งมีผลการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ดีที่สุด

(10.41 มิลลิกรัมต่อกรัม) เพื่อนำไปศึกษาผลการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อนำไปใส่ลงบน WR60A ต่อไป

4.2.5 ผลของการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดแล้วตัดแปรด้วยเอมีน

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของผงยางรถยนต์ ขนาด 60 เมช หลังบำบัดด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตรและตัดแปรด้วยเอมีนชนิด TEPA ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก พบว่า WR60A_10T มีแนวโน้มการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงขึ้น เมื่อเทียบกับตัวดูดซับชนิดอื่น ๆ ที่ได้เตรียม เป็นผลมาจากผิวของผงยางเหลือทิ้งหลังถูกบำบัดด้วยสารละลายกรดมีพื้นที่ผิวจำเพาะที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้สามารถตัดแปรเอมีนลงบนผิวได้ดียิ่งขึ้นเมื่อเทียบกับวัสดุดูดซับที่ไม่ได้ถูกปรับปรุงด้วยกรด ส่งผลให้สามารถเพิ่มความจำเพาะในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีขึ้นทั้งทางกายภาพและทางเคมี [69]

จากวัสดุดูดซับทั้งหมดที่ได้ทำการทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่า WR60A_10T เป็นวัสดุดูดซับที่มีค่าความจุในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงที่สุด ดังนั้น จึงเลือกวัสดุดูดซับชนิดนี้เพื่อนำไปศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ต่อไป

4.2.6 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของวัสดุดูดซับ WT60A_10T จึงถูกนำมาทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน ได้แก่ ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) 45 องศาเซลเซียส และ 60 องศาเซลเซียส ที่ภาวะความดันบรรยากาศ ดังแสดงในตารางที่ 4.5 โดยพบว่า เมื่ออุณหภูมิในระหว่างการดูดซับเพิ่มขึ้น แนวโน้มของการดูดซับจะลดลง โดยค่าความจุการดูดซับของวัสดุดูดซับที่อุณหภูมิสูงลดลงจากค่าการดูดซับที่ภาวะอุณหภูมิห้องประมาณ 2 เท่า โดยมีค่าการดูดซับที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส และ 60 องศาเซลเซียส ที่ลดลงใกล้เคียงกัน ซึ่งผลการดูดซับของวัสดุดูดซับเป็นผลมาจากปฏิกิริยาคายความร้อนของการดูดซับ (Exothermic adsorption reaction) [70, 71] โดยปฏิกิริยาคายความร้อนของการดูดซับจะส่งผลให้เมื่ออุณหภูมิในการดูดซับสูงขึ้น อัตราเร็วในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเช่นกัน จึงส่งผลต่อมาให้เวลาที่แก๊สไหลผ่านวัสดุดูดซับในการดูดซับลดลง

ตารางที่ 4.5 ค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของ WR60A_10T ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

Temperature (°C)	CO ₂ adsorption capacity
	(mg _{CO₂} /g _{adsorbent})
30	11.64 ± 0.162
45	6.39 ± 0.396
60	5.63 ± 0.137

4.3 การฟื้นฟูสภาพวัสดุดูดซับเพื่อนำกลับมาใช้ซ้ำ

เพื่อศึกษาการฟื้นฟูสภาพของวัสดุดูดซับในการนำกลับมาใช้ซ้ำ วัสดุดูดซับชนิด WR60 และ WR60A_10T จึงถูกเลือกมาเพื่อทดสอบและเปรียบเทียบผลของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของวัสดุดูดซับเมื่อผ่านการฟื้นฟูสภาพวัสดุเพื่อนำกลับมาใช้ซ้ำ โดยภาวะที่ใช้ในการฟื้นฟูคือภายใต้แก๊สไนโตรเจนที่อัตราแก๊สเข้าเป็น 70 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสภายใต้ความดันสูญญากาศ การทดสอบการฟื้นฟูเพื่อนำกลับมาใช้ซ้ำเป็นจำนวน 10 ครั้ง ดังที่ได้แสดงในตารางที่ 4.6 พบว่า WR60 มีความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงประมาณร้อยละ 5.72 ต่อค่าความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จากวัฏจักรแรก และคงที่จนถึงวัฏจักรที่ 6 และความสามารถลดลงอีกครั้งในวัฏจักรที่ 7 ประมาณร้อยละ 6.21 ต่อค่าความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และมีค่าความสามารถเกือบคงที่จนถึงวัฏจักรที่ 10

ในขณะที่ WR60A_10T มีความสามารถในการดูดซับแก๊สลดลงจากวัฏจักรแรกประมาณร้อยละ 0.53 ต่อค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เท่านั้น และมีความสามารถในการดูดซับแก๊สเกือบคงที่จนถึงวัฏจักรที่ 10 และความสามารถในการดูดซับในวัฏจักรที่ 10 ลดลงจากวัฏจักรแรกเพียงร้อยละ 4.02 เท่านั้น แสดงให้เห็นได้ว่าวัสดุดูดซับที่เตรียมได้ มีประสิทธิภาพและสามารถนำไปใช้งานได้ต่อไป โดยอาจเกิดจากภายหลังฟื้นฟูสภาพ WR60A_10T หมู่มอมีนซึ่งมีความจำเพาะต่อการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ยังคงเกาะอยู่ที่ผิวของผงยาง จึงทำให้ยังคงความสามารถในการดูดซับได้ ดังผลการวิเคราะห์ร้อยละของธาตุ ดังตารางที่ จ.1 ในภาคผนวก จ.

ตารางที่ 4.6 ค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของวัสดุดูดซับหลังฟื้นฟูสภาพและนำกลับมาใช้ซ้ำ

Cycle	WR60	WR60A_10T
	CO ₂ adsorption capacity	CO ₂ adsorption capacity
	(mg _{CO₂} /g _{adsorbent})	(mg _{CO₂} /g _{adsorbent})
1	8.56	11.43
2	8.07	11.37
3	8.02	11.36
4	7.94	11.24
5	7.93	11.18
6	7.89	11.15
7	7.40	11.08
8	7.31	11.03
9	7.15	11.02
10	7.15	10.97

4.4 จลนพลศาสตร์ของวัสดุดูดซับ

เพื่อศึกษาความสามารถและภาวะของการดูดซับที่เหมาะสมในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในวัสดุดูดซับแต่ละชนิดที่แตกต่างกัน แบบจำลองจลนพลศาสตร์ที่แตกต่างกันถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ ได้แก่ แบบจำลองจลนพลศาสตร์สมการอันดับหนึ่งเทียม แบบจำลองจลนพลศาสตร์สมการอันดับสองเทียม และแบบจำลองจลนพลศาสตร์อาฟรามี การศึกษาแบบจำลองจลนพลศาสตร์ทั้งสามสมการถูกศึกษาผ่านวัสดุดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 2 ชนิดที่แตกต่างกัน คือ WR60 และ WR60A_10T เพื่อเปรียบเทียบผลของจลนพลศาสตร์

ตัวแปรสัมประสิทธิ์ของสมการต่าง ๆ (Model parameter) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ของแต่ละสมการถูกแสดงดังตารางที่ 4.7 พบว่า R^2 ของแบบจำลองสมการ Pseudo-first order มีค่าน้อยกว่า 0.98 และมีแนวโน้มที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับในแบบจำลองอื่น ๆ จึงอาจกล่าวได้ว่าแบบจำลองนี้ไม่เหมาะสมกับการใช้เพื่ออธิบายพฤติกรรมการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ต่อมา เมื่อพิจารณาตัวแปรสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ ของแบบจำลองสมการ Pseudo-second order พบว่า วัสดุดูดซับชนิด WR60 มีค่า R^2 มากกว่าวัสดุดูดซับ

อีกชนิดและมีค่าเข้าใกล้ 1 (0.996) แต่ทว่า แบบจำลองชนิดนี้เหมาะกับการอธิบายการดูดซับหรือพฤติกรรมดูดซับในภาวะที่วัสดุดูดซับเกิดการดูดซับทางเคมี [72] ซึ่งขัดแย้งกัน ดังนั้นจึงอาจอธิบายได้ว่าแบบจำลองนี้ไม่เหมาะสมกับการใช้เพื่ออธิบายพฤติกรรมดูดซับของวัสดุดูดซับเหล่านี้ และเมื่อพิจารณาค่าตัวแปรสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองสมการ Avrami's พบว่าวัสดุดูดซับชนิด WR60 มีค่า R^2 น้อยกว่าเมื่อเทียบกับวัสดุดูดซับชนิด WR60A_10T (0.972 และ 0.994) ซึ่งสอดคล้องกับขั้นตอนในการเตรียมวัสดุดูดซับ คือ มีการเติมหมู่ฟังก์ชันเพื่อเพิ่มความจำเพาะทางเคมีในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากแบบจำลองสมการชนิดนี้บ่งบอกหรืออธิบายถึงพฤติกรรมหรือภาวะของการดูดซับแก๊สเมื่อมีผลของการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมีร่วมกัน [73]

ในส่วนของคุณค่าคงที่ของ Avrami's ของวัสดุดูดซับทั้งสองชนิด (k_a) แสดงให้เห็นว่า WR60 มีแนวโน้มของ k_a ที่สูงกว่า WR60A_10T ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่ากระบวนการดูดซับของ WR60 เกิดขึ้นเร็วกว่า WR60A_10T โดยอาจอธิบายได้ว่า กระบวนการดูดซับของ WR60 เกิดขึ้นเร็วเนื่องจากการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ทางกายภาพเพียงเท่านั้น ในขณะที่ WR60A_10T มีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งทางกายภาพและเคมีควบคู่กัน นอกจากนี้ อันดับสมการของ Avrami's ของวัสดุดูดซับทั้งสองชนิด (n_A) มีค่าอยู่ในช่วง 0.846 และ 1.179 บ่งบอกถึงอัตราการดูดซับที่ค่อย ๆ ลดลงเมื่อเวลาผ่านไป เมื่อค่าของ n_A ที่เข้าใกล้ 1 [74]

ดังนั้น จากผลการทดลองดังตาราง สามารถอธิบายได้ว่าแบบจำลองชนิด Avrami's สามารถอธิบายภาวะหรือพฤติกรรมเกิดการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จากวัสดุดูดซับที่เตรียมได้

ตารางที่ 4.7 แบบจำลองจลนพลศาสตร์ของวัสดุดูดซับ WR60 และ WR60A_10T ที่
ภาวะอุณหภูมิห้อง (30 °C)

Model parameter		WR60	WR60A_10T
Pseudo-first	R^{2a}	0.957	0.973
	k_1 (1/s) ^b	0.009	0.014
	$q_{e,(Exp)}$ (mg/g) ^c	7.137	11.908
	$q_{e,(Cal)}$ (mg/g) ^d	7.099	11.872
Pseudo-second	R^{2a}	0.996	0.957
	k_2 (1/s) ^e	0.003	0.001
	$q_{e,(Exp)}$ (mg/g) ^c	7.137	11.908
	$q_{e,(Cal)}$ (mg/g) ^d	7.216	12.588
Avrami's	R^{2a}	0.972	0.994
	k_a (1/s) ^f	0.014	0.010
	n_a ^g	0.846	1.179
	$q_{e,(Exp)}$ (mg/g) ^c	7.137	11.908
	$q_{e,(Cal)}$ (mg/g) ^d	7.115	11.874

^a R^2 : สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ^b k_1 : ค่าคงที่จลนพลศาสตร์แบบจำลองอันดับหนึ่งเทียม (นาที่⁻¹) ^c $q_{e,(Exp)}$: ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จากการทดลอง (มิลลิกรัมต่อกรัม) ^d $q_{e,(Cal)}$: ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จากการคำนวณจลนพลศาสตร์ (มิลลิกรัมต่อกรัม) ^e k_2 : ค่าคงที่จลนพลศาสตร์แบบจำลองอันดับสองเทียม (นาที่⁻¹) ^f k_a : ค่าคงที่จลนพลศาสตร์แบบจำลองอาฟรามี (นาที่⁻¹) ^g n_a : อันดับของสมการจลนพลศาสตร์อาฟรามี

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ศึกษาความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของวัสดุดูดซับจากผงยางรถยนต์เหลือทิ้ง พบว่า เมื่อนำผงยางเหลือทิ้งขนาดต่าง ๆ (20 40 และ 60 เมช) มาทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่า ผงยางเหลือทิ้งขนาด 60 เมช (WR60) ให้ค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด คือ 7.10 ± 0.064 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เนื่องจากการมีพื้นที่ผิวสูงกว่าเมื่อเทียบกับ WR40 และ WR20 โดยอัตราการไหลของแก๊สเข้าที่ใช้ในการดูดซับ คือ อัตราการไหล 70 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งมีแรงขับเคลื่อนที่สูงกว่าการใช้อัตราการไหล 50 มิลลิลิตรต่อนาที และเวลาที่ใช้ในการไหลผ่านวัสดุดูดซับมากกว่าการใช้อัตราการไหล 100 มิลลิลิตรต่อนาที จึงได้เลือกตัวแปรดังกล่าวมาทำการบำบัดโดยสารละลายกรดซัลฟิวริก พบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุดูดซับ WR60A เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าการดูดซับเพิ่มขึ้นเป็น 8.13 ± 0.111 มิลลิกรัมต่อกรัม การศึกษาผลของแอมีนสองชนิด ได้แก่ TEPA และ PEI ถูกนำมาดัดแปรลงบน WR60 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ คือ ร้อยละ 2.5 5 และ 10 โดยน้ำหนัก ที่มีผลต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่า ความสามารถในการดูดซับของ WR60 เมื่อดัดแปรด้วย TEPA ที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก (WR60_10T) ดีที่สุด คือ 10.41 ± 0.243 มิลลิกรัมต่อกรัม เนื่องจาก TEPA มีโครงสร้างเป็นเส้นตรง มีความกะกะนั้นน้อยกว่า ส่งผลให้หมู่แอมีนมีความจำเพาะในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีกว่า PEI ที่มีโครงสร้างเป็นแบบร่างแห จึงได้เลือกภาวะดังกล่าวมาดัดแปรใน WR60A ค่าการดูดซับเพิ่มขึ้นเป็น 11.64 ± 0.162 มิลลิกรัมต่อกรัม กลไกการดูดซับเกิดได้ทั้งแบบกายภาพและเคมี ซึ่งสอดคล้องกับแบบจำลองจลนพลศาสตร์ชนิดอาฟรามิ นอกจากนี้เมื่อนำ WR60A_10T ไปผ่านการทดสอบการฟื้นฟูสภาพของวัสดุดูดซับ ความสามารถในการดูดซับลดลงไปเพียง ร้อยละ 4.02 เมื่อนำกลับมาใช้ซ้ำเป็นจำนวน 10 ครั้ง

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรศึกษาผลของความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้าที่แตกต่างกัน เช่น ศึกษาความสามารถการดูดซับของวัสดุดูดซับโดยการใช้คาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้าที่มีร้อยละความเข้มข้นมากกว่าร้อยละ 12 โดยปริมาตร

5.2.2 ควรศึกษาผลของการบำบัดสภาพพื้นผิวบนผิวของผงยางเหลือทิ้งด้วยวิธีที่หลากหลายและแตกต่างกัน เช่น การบำบัดผิวของผงยางเหลือทิ้งด้วยสารละลายชนิดต่าง ๆ ได้แก่ HNO_3 , HClO_4 หรือ NaClO



บรรณานุกรม

- [1] Y. Ren, R. Ding, H. Yue, S. Tang, C. Liu, J. Zhao, W. Lin, B. Liang, Amine-grafted mesoporous copper silicates as recyclable solid amine sorbents for post-combustion CO₂ capture, *Applied Energy* 198 (2017) 250-260.
- [2] Y. Wang, T. Du, Y. Song, S. Che, X. Fang, L. Zhou, Amine-functionalized mesoporous ZSM-5 zeolite adsorbents for carbon dioxide capture, *Solid State Sciences* 73 (2017) 27-35.
- [3] G. Gómez-Pozuelo, E.S. Sanz-Pérez, A. Arencibia, P. Pizarro, R. Sanz, D.P. Serrano, CO₂ adsorption on amine-functionalized clays, *Microporous and Mesoporous Materials* 282 (2019) 38-47.
- [4] A.A. Azmi, M.A.A. Aziz, Mesoporous adsorbent for CO₂ capture application under mild condition: A review, *Journal of Environmental Chemical Engineering* 7(2) (2019).
- [5] A.A. Abd, S.Z. Naji, A.S. Hashim, M.R. Othman, Carbon dioxide removal through physical adsorption using carbonaceous and non-carbonaceous adsorbents: A review, *Journal of Environmental Chemical Engineering* 8(5) (2020) 104142.
- [6] K. Pardrakee, Clean fuel from used tyre in two-stage procedure : hydrodesulfurization and pyrolysis, *Chemical Technology*, Chulalongkorn University, 2006.
- [7] K. Maresz, A. Ciemiega, J.J. Malinowski, J. Mrowiec-Biaton, Effect of support structure and polyamine type on CO₂ capture in hierarchically structured monolithic sorbents, *Chemical Engineering Journal* 383 (2020).
- [8] K. Panploo, B. Chalermisinsuwan, S. Poompradub, Natural rubber latex foam with particulate fillers for carbon dioxide adsorption and regeneration, *RSC Advances* 9 (2019) 28916-28923.
- [9] Z. Song, Y.H. Fu, Y. Du, Z. Huang, Global warming increases latitudinal divergence in flowering dates of a perennial herb in humid regions across eastern Asia, *Agricultural and Forest Meteorology* 296 (2021)

108209.

- [10] E.W. FRS, I. Fung, B.H. FRS, J.F.B.M. FRS, T.P. FRS, B. Santer, Climate Change Evidence & Causes, US National Academy of Sciences (2020).
- [11] S. Krishnamurthy, A. Lind, A. Bouzga, J. Pierchala, R. Blom, Post combustion carbon capture with supported amine sorbents: From adsorbent characterization to process simulation and optimization, Chemical Engineering Journal 406 (2021) 127121.
- [12] E. Bonnail, A.R. Borrero-Santiago, T. Nordtug, I.B. Øverjordet, D.F. Krause, M.V. Ardelan, Climate change mitigation effects: How do potential CO₂ leaks from a sub-seabed storage site in the Norwegian Sea affect Astarte sp. bivalves, Chemosphere 264 (2021) 128552.
- [13] M. Gautam, M. Agrawal, Greenhouse gas emissions from municipal solid waste management: A review of global scenario, Environmental Footprints and Eco-Design of Products and Processes, 2021, pp. 123-160.
- [14] J.G.J.O.J.A.H.W. Peters, Trends in global CO₂ and total greenhouse gas emissions - 2020 Report, PBL Netherlands Environmental Assessment Agency 4331 (2020).
- [15] E.R. de Sousa-Neto, L. Gomes, N. Nascimento, F. Pacheco, J.P. Ometto, Chapter 20 - Land use and land cover transition in Brazil and their effects on Greenhouse Gas Emissions, in: M.Á. Muñoz, R. Zornoza (Eds.), Soil Management and Climate Change, Academic Press, 2018, pp. 309-321.
- [16] P. Javadi, B. Yeganeh, M. Abbasi, S. Alipourmohajer, Energy assessment and greenhouse gas predictions in the automotive manufacturing industry in Iran, Sustainable Production and Consumption 26 (2021) 316-330.
- [17] G. Ko, J. Lee, Y. Seo, Separation efficiency and equilibrium recovery ratio of SF₆ in hydrate-based greenhouse gas separation, Chemical Engineering Journal 405 (2021) 126956.
- [18] V. Marchal, R. Dellink, D.v. Vuuren, C. Clapp, J. Château, E. Lanzi, B. Magné, J.v. Vliet, OECD Environmental Outlook to 2050 : Climate Change

- Chapter, OECD Environment Directorate, OECD Environment Directorate (ENV) and the PBL Netherlands Environmental Assessment Agency (PBL), 2011.
- [19] S. Stelitano, V. Lazzaroli, G. Conte, V. Pingitore, A. Policicchio, R.G. Agostino, Assessment of poly(L-lactide) as an environmentally benign CO₂ capture and storage adsorbent, *Journal of Applied Polymer Science* 137(48) (2020).
- [20] Y. Zhao, B.T. Jung, L. Ansaloni, W.S.W. Ho, Multiwalled carbon nanotube mixed matrix membranes containing amines for high pressure CO₂/H₂ separation, *Journal of Membrane Science* 459 (2014) 233-243.
- [21] E. Favre, Carbon dioxide recovery from post-combustion processes: Can gas permeation membranes compete with absorption?, *Journal of Membrane Science* 294 (2007) 50-59.
- [22] M. Ho, G. Allinson, D. Wiley, Reducing the Cost of CO₂ Capture from Flue Gases Using Membrane Technology, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 47 (2008) 1562-1568.
- [23] C.E. Powell, G.G. Qiao, Polymeric CO₂/N₂ gas separation membranes for the capture of carbon dioxide from power plant flue gases, *Journal of Membrane Science* 279(1) (2006) 1-49.
- [24] L. Zhao, E. Riensche, R. Menzer, L. Blum, D. Stolten, A parametric study of CO₂/N₂ gas separation membrane processes for post-combustion capture, *Journal of Membrane Science* 325(1) (2008) 284-294.
- [25] M. Zhang, Y. Guo, Rate based modeling of absorption and regeneration for CO₂ capture by aqueous ammonia solution, *Applied Energy*, 111 (2013) 142-152.
- [26] S. Yan, M. Fang, Z. Wang, Z. Luo, Regeneration performance of CO₂ rich solvents by using membrane vacuum regeneration technology: Relationships between absorbent structure and regeneration efficiency, *Applied Energy Journal* 98 (2012) 357-367.
- [27] M. Songolzadeh, M.T. Ravanchi, M. Soleimani, Carbon dioxide capture and storage: A general review on adsorbents, *International Journal of*

- Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering 6 (2012) 900-907.
- [28] C.F. Song, Y. Kitamura, S.H. Li, Evaluation of Stirling cooler system for cryogenic CO₂ capture, *Applied Energy* 98 (2012) 491-501.
- [29] G. Li, P. Xiao, D. Xu, P.A. Webley, Dual mode roll-up effect in multicomponent non-isothermal adsorption processes with multilayered bed packing, *Chemical Engineering Science* 66(9) (2011) 1825-1834.
- [30] J.-R. Li, Y. Ma, C. McCarthy, J. Sculley, J. Yu, H.-K. Jeong, P. Balbuena, H.-C. Zhou, Carbon dioxide capture-related gas adsorption and separation in metal-organic frameworks, *Coordination Chemistry Reviews* 255 (2011) 1791-1823.
- [31] R. Ben-Mansour, M.A. Habib, O.E. Bamidele, M. Basha, N.A.A. Qasem, A. Peedikakkal, T. Laoui, M. Ali, Carbon capture by physical adsorption: Materials, experimental investigations and numerical modeling and simulations – A review, *Applied Energy* 161 (2016) 225-255.
- [32] B. Li, Z. Zhang, Y. Li, K. Yao, Y. Zhu, Z. Deng, F. Yang, X. Zhou, G. Li, H. Wu, N. Nijem, Y.J. Chabal, Z. Lai, Y. Han, Z. Shi, S. Feng, J. Li, Enhanced binding affinity, remarkable selectivity, and high capacity of CO₂ by dual functionalization of a rht-type metal-organic framework, *Angewandte Chemie International Edition* 51(6) (2012) 1412-1415.
- [33] H. Li, M. Ditaranto, J. Yan, Carbon capture with low energy penalty: Supplementary fired natural gas combined cycles, *Applied Energy* 97 (2012) 164-169.
- [34] J.-R. Li, J. Sculley, H.-C. Zhou, Metal-organic frameworks for Separations, *Chemical Reviews* 112(2) (2012) 869-932.
- [35] S.A. Nicolae, P.Á. Szilágyi, M.M. Titirici, Soft templating production of porous carbon adsorbents for CO₂ and H₂S capture, *Carbon* 169 (2020) 193-204.
- [36] S. Choi, J.H. Drese, C.W. Jones, Adsorbent materials for carbon dioxide capture from large anthropogenic point sources, *ChemSusChem* 2(9) (2009) 796-854.

- [37] R.V. Siriwardane, M.-S. Shen, E.P. Fisher, J.A. Poston, Adsorption of CO₂ on molecular sieves and activated carbon, *Energy & Fuels* 15(2) (2001) 279-284.
- [38] J.C. Hicks, J.H. Drese, D.J. Fauth, M.L. Gray, G. Qi, C.W. Jones, Designing adsorbents for CO₂ capture from flue gas-hyperbranched aminosilicas capable of capturing CO₂ reversibly, *Journal of the American Chemical Society* 130(10) (2008) 2902-2903.
- [39] O. Leal, C. Bolivar, C. Ovalles, J.J. García, Y. Espidel, Reversible adsorption of carbon dioxide on amine surface-bonded silica gel, *Inorganica Chimica Acta* 240 (1995) 183-189.
- [40] C.-H. Yu, C.-H. Huang, C.-S. Tan, A review of CO₂ capture by absorption and adsorption, *Aerosol and Air Quality Research* 12(5) (2012) 745-769.
- [41] D.M. D'Alessandro, B. Smit, J.R. Long, Carbon Dioxide Capture: Prospects for New Materials, *Angewandte Chemie International Edition* 49(35) (2010) 6058-6082.
- [42] R. Serna-Guerrero, A. Sayari, Modeling adsorption of CO₂ on amine-functionalized mesoporous silica. 2: Kinetics and breakthrough curves, *Chemical Engineering Journal* 161(1) (2010) 182-190.
- [43] K. Panploo, B. Chalermssinsuwan, S. Poompradub, Effect of amine types and temperature of a natural rubber based composite material on the carbon dioxide capture, *Chemical Engineering Journal* 402 (2020) 125332.
- [44] X. Wang, L. Chen, Q. Guo, Development of hybrid amine-functionalized MCM-41 sorbents for CO₂ capture, *Chemical Engineering Journal* 260 (2015) 573-581.
- [45] M. Keramati, A.A. Ghoreyshi, Improving CO₂ adsorption onto activated carbon through functionalization by chitosan and triethylenetetramine, *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures* 57 (2014) 161-168.
- [46] M. Senin, S. Shahidan, A. Leman, n.i. ramzi hannan, Analysis of Physical Properties and Mineralogical of Pyrolysis Tires Rubber Ash Compared Natural Sand in Concrete material, *IOP Conference Series: Materials*

- Science and Engineering 160 (2016) 012053.
- [47] F.W. Barlow, Rubber compounding: Principles, Materials, and Techniques, CRC Press, Boca Raton, 1993.
- [48] K.S. Sisanth, M.G. Thomas, J. Abraham, S. Thomas, 1 - General introduction to rubber compounding, in: S. Thomas, H.J. Maria (Eds.), Progress in Rubber Nanocomposites, Woodhead Publishing 2017, pp. 1-39.
- [49] C. Chandrasekaran, 22 - Aging, Service Life, and Prediction, in: C. Chandrasekaran (Ed.), Anticorrosive Rubber Lining, William Andrew Publishing 2017, pp. 183-189.
- [50] H. Marsh, F. Rodríguez-Reinoso, CHAPTER 9 - Production and Reference Material, in: H. Marsh, F. Rodríguez-Reinoso (Eds.), Activated Carbon, Elsevier Science Ltd, Oxford, 2006, pp. 454-508.
- [51] A. bin Samsuri, 3.33 - Degradation of Natural Rubber and Synthetic Elastomers, in: B. Cottis, M. Graham, R. Lindsay, S. Lyon, T. Richardson, D. Scantlebury, H. Stott (Eds.), Shreir's Corrosion, Elsevier, Oxford, 2010, pp. 2407-2438.
- [52] K. Panploo, Amine modified silica/natural rubber composite for carbon dioxide adsorption, Chemical Technology, Chulalongkorn University, 2018, p. 10.
- [53] W. Wang, X. Wang, C. Song, X. Wei, J. Ding, J. Xiao, Sulfuric acid modified bentonite as the support of tetraethylenepentamine for CO₂ capture, Energy and Fuels 27(3) (2013) 1538-1546.
- [54] E.H. Hernández, J.F.H. Gámez, L.F. Cepeda, E.J.C. Muñoz, F.S. Corral, S.G.S. Rosales, G.N. Velázquez, P.G. Morones, D.I.S. Martínez, Sulfuric acid treatment of ground tire rubber and its effect on the mechanical and thermal properties of polypropylene composites, Journal of Applied Polymer Science 134(21) (2017) 44864(1-7).
- [55] S. Dinda, P. Murge, B. Chakravarthy Paruchuri, A study on zeolite-based adsorbents for CO₂ capture, Bulletin of Materials Science 42(5) (2019) 240(1-9).

- [56] M.T. Islam, R. Saenz-Arana, C. Hernandez, T. Guinto, M.A. Ahsan, D.T. Bragg, H. Wang, B. Alvarado-Tenorio, J.C. Noveron, Conversion of waste tire rubber into a high-capacity adsorbent for the removal of methylene blue, methyl orange, and tetracycline from water, *Journal of Environmental Chemical Engineering* 6(2) (2018) 3070-3082.
- [57] A. Pruna, A. Barjola, A. Carcel, B. Alonso, E. Gimenez, Effect of varying amine functionalities on CO₂ capture of carboxylated Graphene oxide-based cryogels, *Nanomaterials* 10 (2020) 1446.
- [58] C.S. Lee, Y.L. Ong, M.K. Aroua, W.M.A.W. Daud, Impregnation of palm shell-based activated carbon with sterically hindered amines for CO₂ adsorption, *Chemical Engineering Journal* 219 (2013) 558-564.
- [59] J. Shao, J. Zhang, X. Zhang, Y. Feng, H. Zhang, S. Zhang, H. Chen, Enhance SO₂ adsorption performance of biochar modified by CO₂ activation and amine impregnation, *Fuel* 224 (2018) 138-146.
- [60] B. Wu, M. Zhou, Recycling of waste tyre rubber into oil absorbent, *Waste management (New York, N.Y.)* 29 (2008) 355-9.
- [61] B. Kaewpetch, S. Prasongsuk, S. Poompradub, Devulcanization of natural rubber vulcanizates by *Bacillus cereus* TISTR 2651, *Express Polymer Letters* 13 (2019) 877-888.
- [62] A. Gorassini, G. Adami, P. Calvini, A. Giacomello, ATR-FTIR characterization of old pressure sensitive adhesive tapes in historic papers, *Journal of Cultural Heritage* 21 (2016) 775-785.
- [63] C. Jiang, Y. Zhang, L. Ma, L. Zhou, H. He, Tailoring the properties of ground tire rubber/high-density polyethylene blends by combining surface devulcanization and in-situ grafting technology, *Materials Chemistry and Physics* 220 (2018) 161-170.
- [64] R. W, A. Zulkefly, S. Ramarad, M. Khalid, Devulcanization of Waste Tire Rubber Using Amine Based Solvents and Ultrasonic Energy, *MATEC Web of Conferences* 152 (2018) 01007.
- [65] B. Yoosuk, T. Wongsanga, P. Prasassarakich, CO₂ and H₂S binary sorption on polyamine modified fumed silica, *Fuel* 168 (2016) 47-53.

- [66] F. Liu, K. Huang, C.-J. Yoo, C. Okonkwo, D.-J. Tao, C.W. Jones, S. Dai, Facilely synthesized meso-macroporous polymer as support of poly(ethyleneimine) for highly efficient and selective capture of CO₂, *Chemical Engineering Journal* 314 (2017) 466-476.
- [67] W. Choi, J. Park, C. Kim, M. Choi, Structural effects of amine polymers on stability and energy efficiency of adsorbents in post-combustion CO₂ capture, *Chemical Engineering Journal* (2020) 127289.
- [68] X. Hu, L. Liu, X. Luo, G. Xiao, E. Shiko, R. Zhang, X. Fan, Y. Zhou, Y. Liu, Z. Zeng, C.e. Li, A review of N-functionalized solid adsorbents for post-combustion CO₂ capture, *Applied Energy* 260 (2020) 114244.
- [69] F. Chrisnardy, Y.K. Krisnandi, Adsorption of mesoporous carbon modified with triethylenetetramine as a function of carbon dioxide flow time, *Journal of Physics: Conference Series* 1442 (2020) 012061.
- [70] X. Zhou, H. Yi, X. Tang, H. Deng, H. Liu, Thermodynamics for the adsorption of SO₂, NO and CO₂ from flue gas on activated carbon fiber, *Chemical Engineering Journal* 200-202 (2012) 399-404.
- [71] F. Raganati, R. Chirone, P. Ammendola, CO₂ capture by temperature swing adsorption: working capacity as affected by temperature and CO₂ partial pressure, *Industrial & Engineering Chemistry Research* 59(8) (2020) 3593-3605.
- [72] P. Ammendola, F. Raganati, R. Chirone, F. Miccio, Fixed bed adsorption as affected by thermodynamics and kinetics: Yellow tuff for CO₂ capture, *Powder Technology* 373 (2020) 446-458.
- [73] Y. Wang, T. Guo, X. Hu, J. Hao, Q. Guo, Mechanism and kinetics of CO₂ adsorption for TEPA- impregnated hierarchical mesoporous carbon in the presence of water vapor, *Powder Technology* 368 (2020) 227-236.
- [74] Y. Liu, X. Yu, Carbon dioxide adsorption properties and adsorption/desorption kinetics of amine-functionalized KIT-6, *Applied Energy* 211 (2018) 1080-1088.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

การคำนวณสารเคมีในการเตรียมวัสดุอุดซัฟ

การคำนวณความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟิวริก 1 โมลาร์ (โมลต่อลิตร) จากกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 98 โดยปริมาตร

(ความหนาแน่น 1.83 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และมวลโมเลกุล 98.079 กรัมต่อโมล)

ตัวอย่างการคำนวณ ต้องการเตรียมความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟิวริก 1 โมลาร์ (โมลต่อลิตร) ปริมาตร 300 มิลลิลิตร

$$\begin{aligned} \text{จาก } M_{\text{H}_2\text{SO}_4} &= \frac{\text{mol H}_2\text{SO}_4 / \text{L solution}}{(98 \text{ L}_{\text{H}_2\text{SO}_4})(1.83 \text{ g}_{\text{H}_2\text{SO}_4})(1 \text{ cm}_{\text{H}_2\text{SO}_4})(1 \text{ mol}_{\text{H}_2\text{SO}_4})} \\ &= \frac{(100 \text{ L}_{\text{solution}})(1 \text{ cm}_{\text{H}_2\text{SO}_4})(10^{-3} \text{ L}_{\text{H}_2\text{SO}_4})(98.079 \text{ g}_{\text{H}_2\text{SO}_4})}{18.29 \text{ mol H}_2\text{SO}_4 / \text{L solution}} \\ &= 18.29 \text{ mol H}_2\text{SO}_4 / \text{L solution} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{และ } M_1 V_1 &= M_2 V_2 \\ (18.29 \text{ M}) V_1 &= (1 \text{ M}) (300 \text{ mL}) \\ V_1 &= 16.4 \text{ mL} \end{aligned}$$

เพราะฉะนั้น เมื่อต้องการเตรียมความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟิวริก 1 โมลาร์ (โมลต่อลิตร ปริมาตร 300 มิลลิลิตร จากกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 98 โดยปริมาตร ต้องเตรียมกรดความเข้มข้นปริมาตร 16.4 มิลลิลิตร และเติมน้ำจนครบ 300 มิลลิลิตร

ภาคผนวก ข

การคำนวณค่าความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

จากสมการ	$PV = nRT$
	$n = \frac{PV}{RT}$
เมื่อ	n คือ โมลของแก๊ส (mol)
	P คือ ความดันแก๊ส (atm)
	V คือ ปริมาตรของแก๊ส (L)
	R คือ ค่าคงที่ของแก๊สอุดมคติ ($0.0820 \text{ L atm K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$)
	T คือ อุณหภูมิของแก๊ส (K)

ตัวอย่างการการคำนวณ

การคำนวณค่าความจุคาร์บอนไดออกไซด์ที่ภาวะบรรยากาศและอุณหภูมิห้อง (1 atm และ 31 องศาเซลเซียส) โดย อัตราของแก๊สขาเข้าเป็น 70 มิลลิลิตรต่อนาที (0.07 L min^{-1}) ณ ช่วงเวลา 1 วินาที และน้ำหนักของวัสดุดูดซับ คือ 3 กรัม

$$n = \frac{(1 \text{ atm}) \left(\frac{12\%}{100} \right) \left(\frac{0.07 \text{ L}}{\text{min}} \right) \left(\frac{1 \text{ min}}{60} \right)}{\left(0.0820 \frac{\text{L atm}}{\text{K mol}} \right) (31 + 273 \text{ K})}$$

$$n = 0.00005616 \text{ mol}$$

โดย $n_{\text{CO}_2} = \frac{1 \text{ mol}}{44 \text{ g}}$

ดังนั้น $g_{\text{CO}_2} = (0.00005616 \text{ mol}) \left(\frac{44 \text{ g}}{1 \text{ mol}} \right)$

$$g_{\text{CO}_2} = 0.000247 \text{ g}$$

ดังนั้น ค่าความจุการดูดซับแก๊ส

$$= \frac{0.000247 \text{ gCO}_2}{3 \text{ gads}}$$

$$= (0.0000824 \frac{\text{gCO}_2}{\text{gads}}) \left(\frac{1000 \text{ mgCO}_2}{\text{gCO}_2} \right)$$

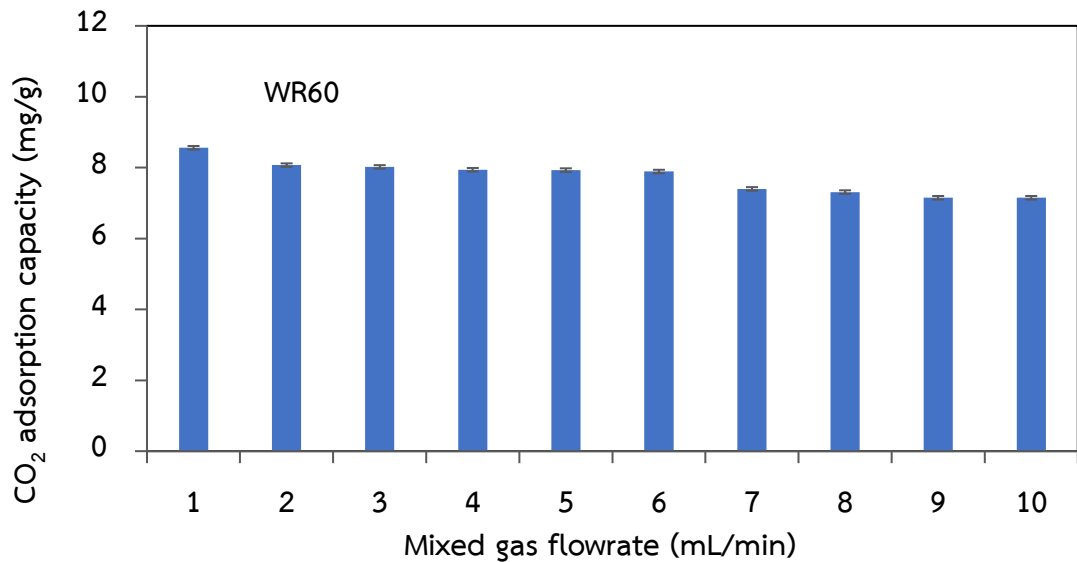
$$= 0.0824 \frac{\text{mgCO}_2}{\text{gads}}$$

ภาคผนวก ค
ผลวิเคราะห์ขนาดรูพรุนของผงยางเหลือทิ้ง

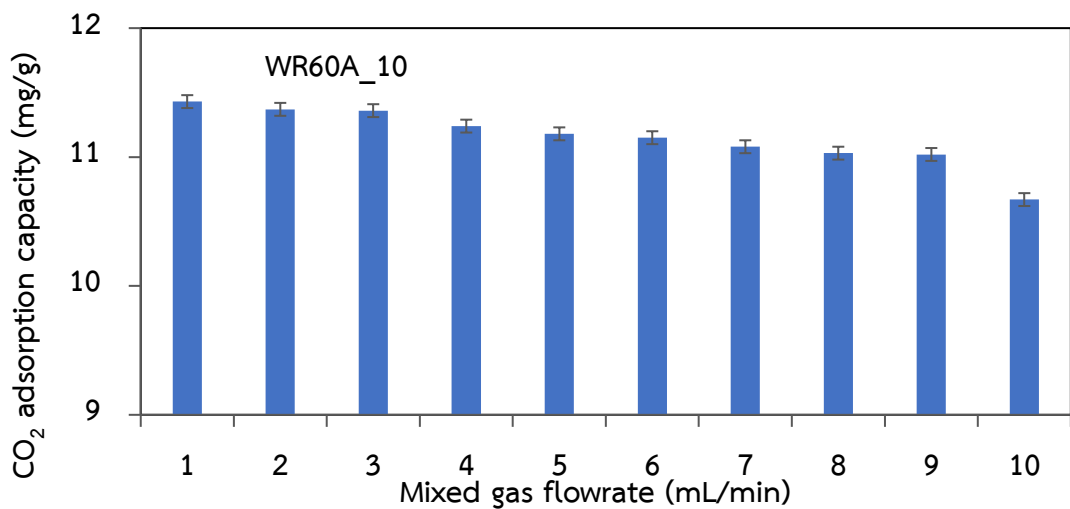
Sample code	Pore size (Å)
WR20	-
WR40	3.74
WR60	11.47
WR60A	11.90
WR60_2.5T	5.26
WR60_2.5P	15.26
WR60_5T	20.88
WR60_5P	17.53
WR60_10T	24.37
WR60_10P	17.91
WR60A_10T	7.72

ภาคผนวก ง

การฟื้นฟูสภาพวัสดุดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์



รูป ง.1 ค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของวัสดุดูดซับหลังการฟื้นฟูสภาพและนำกลับใช้ซ้ำ 10 ครั้ง ของ WR60



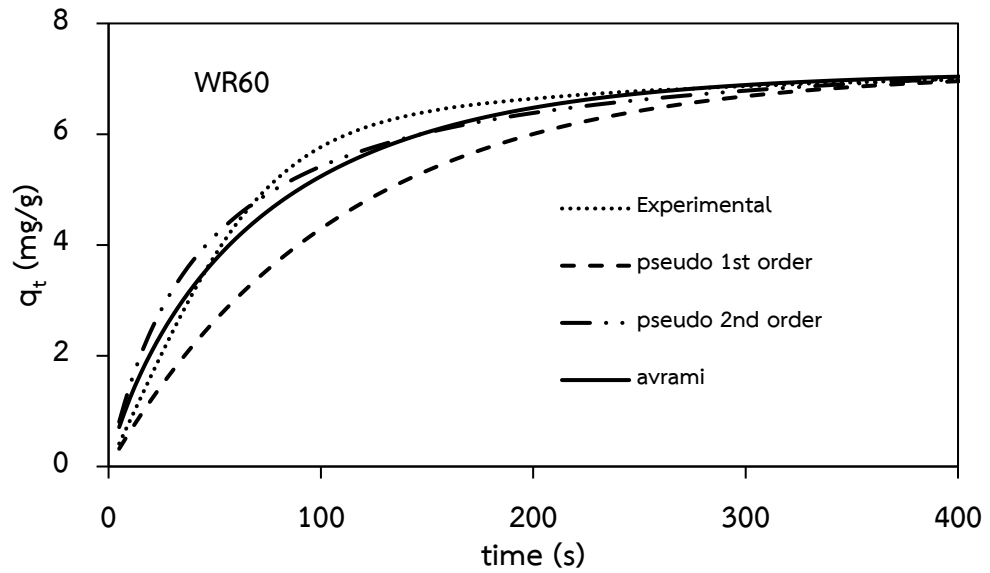
รูป ง.2 ค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของวัสดุดูดซับหลังการฟื้นฟูสภาพและนำกลับใช้ซ้ำ 10 ครั้ง ของ WR60A_10T

ภาคผนวก จ
การศึกษาร้อยละธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจนและซัลเฟอร์
ก่อนและหลังการฟื้นฟูสภาพ

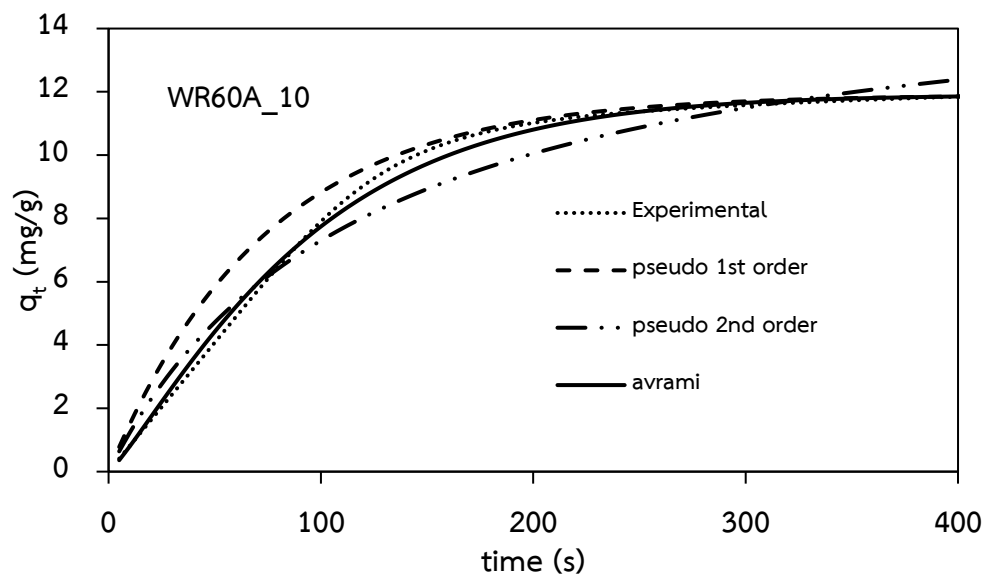
ตารางที่ จ.1 ร้อยละของธาตุคาร์บอน ไนโตรเจน ไฮโดรเจนและซัลเฟอร์ของ
 WR60_10T ก่อนและหลังจากการฟื้นฟูสภาพวัสดุชุดขับ

	Carbon (%)	Hydrogen (%)	Nitrogen (%)	Sulfur (%)
Before regeneration	79.97	8.10	3.33	2.72
After regeneration	76.41	7.86	3.26	2.78

ภาคผนวก จ
จลพจนศาสตร์การดูดซับ



รูปที่ จ.1 แบบจำลองจลพจนศาสตร์ของวัสดุดูดซับชนิด WR60



รูปที่ จ.2 แบบจำลองจลพจนศาสตร์ของวัสดุดูดซับชนิด WR60A_10T

ภาคผนวก ฉ

ตารางขนาดเมช

U.S. MESH	MICRONS	INCHES	MILLIMETERS
3	6730	0.2650	6.730
4	4760	0.1870	4.760
5	4000	0.1570	4.000
6	3360	0.1320	3.360
7	2830	0.1110	2.830
8	2380	0.0937	2.380
10	2000	0.0787	2.000
12	1680	0.0661	1.680
14	1410	0.0555	1.410
16	1190	0.0469	1.190
18	1000	0.0394	1.000
20	841	0.0331	0.841
25	707	0.0280	0.707
30	595	0.0232	0.595
35	500	0.0197	0.500
40	400	0.0165	0.400
45	354	0.0138	0.354
50	297	0.0117	0.297
60	250	0.0098	0.250
70	210	0.0083	0.210
80	177	0.0070	0.177
100	149	0.0059	0.149
120	125	0.0049	0.125
140	105	0.0041	0.105
170	88	0.0035	0.088
200	74	0.0029	0.074
230	63	0.0024	0.063
270	53	0.0021	0.053
325	44	0.0017	0.044
400	37	0.0015	0.037

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ณภัสรร์จิรา จารี
วัน เดือน ปี เกิด	5 กันยายน 2539
สถานที่เกิด	พระนครศรีอยุธยา ประเทศไทย
วุฒิการศึกษา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	56/ 35 ม.7 ต.คลองสวนพลู อ.พระนครศรีอยุธยา จ.พระนครศรีอยุธยา
ผลงานตีพิมพ์	Napatjira Jaree, Sirilux Poompradub. "SULFURIC ACID MODIFIED WASTE TIRE AS CARBON DIOXIDE ADSORBENT MATERIAL". The Proceeding of The 26th PPC Symposium on Petroleum, Petrochemicals, and The 11th Research Symposium on Petrochemical and Materials Technology. Thailand. 23 July, 2020.
รางวัลที่ได้รับ	"Best poster of SP session" in best poster of Petromat congress 2020, Chulalongkorn University