การใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากกาแฟที่ใช้แล้วด้วยวิธีตกเคลือบด้วยไอเคมีในการดูดซับ
คาร์บอนไดออกไซด์

นายชัยวัฒน์ แพทย์กูล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2557
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Utilization of Activated Carbon prepared from Spent Coffee Grounds using Chemical Vapor Deposition for Carbon Dioxide Adsorption

Mr. Chaiwat Patkool

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering
Department of Environmental Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2014
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากกาแฟที่ใช้แล้วด้วยวิธีตกเคลือบด้วยไอเคมีในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์
โดย	นายชัยวัฒน์ แพทย์กูล
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.เรวดี อนุวัฒนา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.อรทัย ชวาลภาฤทธิ์)

....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ)

....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ดร.เรวดี อนุวัฒนา)

....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล)

....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรรณวดี สุวัฒิกะ)

ชัยวัฒน์ แพทย์กูล : การใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากกาแฟที่ใช้แล้วด้วยวิธีตกเคลือบด้วยไอเคมีในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ (Utilization of Activated Carbon prepared from Spent Coffee Grounds using Chemical Vapor Deposition for Carbon Dioxide Adsorption) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ดร.เรวดี อนุวัฒนา, 129 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี และการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สชีวภาพสังเคราะห์ ของคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากกากกาแฟ (CMS_{CF}) ซึ่งในกระบวนการผลิตนั้นจะนำกากกาแฟที่เหลือทิ้งมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์โดยใช้โพแตสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวกระตุ้น จากนั้นจึงนำถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟไปผ่านกระบวนการตกเคลือบด้วยไอเคมีจากแก๊สอะเซทีลีนเพื่อให้ได้เป็น CMS_{CF} เพื่อเปรียบเทียบกับคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟจากถ่านกัมมันต์ทางการค้า (CMS_{GAC}) คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟทางการค้า (CMS_{COM}) และถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่เอิบชุ่มด้วยไคโตซาน (CGAC) โดยจากผลศึกษาพบว่าตัวอย่างมีพื้นที่ผิวจำเพาะ เท่ากับ 453.0 604.0 558.6 531.3 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ มีค่าการดูดซับไอโอดีนเท่ากับ 239.5 325.3 295.4 และ 204.2 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ จากนั้นดำเนินการทดลองการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในเครื่องวิเคราะห์การดูดซับแบบคอลัมน์เดี่ยว ที่ความดัน 3 บรรยากาศ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลเข้าต่ออัตราการไหลออกของแก๊สเท่ากับ 1 ในแก๊สผสมสังเคราะห์ที่มีสัดส่วนของแก๊สไนโตรเจน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สมีเทนเท่ากับร้อยละ 20 30 และ 50 โดยปริมาตร ตามลำดับ พบว่า ค่าความบริสุทธิ์ของแก๊สในตัวอย่าง CMS_{CF} CMS_{GAC} CMS_{COM} และ CGAC มีปริมาณแก๊สมีเทนบริสุทธิ์ร้อยละ 95.20 93.16 98.26 และ 82.72 ตามลำดับ โดยตัวอย่างหมดประสิทธิภาพในการดูดซับที่เวลาเท่ากับ 120 114 140 และ 90 นาที ตามลำดับ ค่าการเลือกของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อแก๊สมีเทนในตัวอย่าง เท่ากับ 19.41 16.53 24.89 และ 1.54 ตามลำดับ และความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดของตัวอย่าง เท่ากับ 3.42 3.26 4.06 และ 2.58 โมลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

ภาควิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	ลายมือชื่อนิสิต	....
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก	....
ปีการศึกษา	2557	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม	....

5570162321 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING
KEYWORDS: CARBON DIOXIDE / ADSORPTION PROCESS / SPENT COFFEE GROUNDS / CARBON MOLECULAR SIEVE / CHEMICAL VAPOR DEPOSITION

CHAIWAT PATKOOL: Utilization of Activated Carbon prepared from Spent Coffee Grounds using Chemical Vapor Deposition for Carbon Dioxide Adsorption. ADVISOR: ASSOC. PROF. PETCHPORN CHAWAKITCHAREON, Ph.D., CO-ADVISOR: REWADEE ANUWATTANA, Ph.D., 129 pp.

Spent coffee grounds was used to be a precursor for the production of carbon molecular sieve (CMS_{CF}) to compare physical and chemical characteristics including CO_2 adsorption. The production of CMS_{CF} was carried out by using activated carbon activated with KOH was starting material. Then, activated carbon produced from coffee grounds (GK) was deposited by acetylene in chemical vapor deposition to compare with carbon molecular sieve prepared from commercial activated carbon (CMS_{GAC}), commercial carbon molecular sieve (CMS_{COM}), and commercial activated carbon impregnated with chitosan solution (CGAC). Analytical results show that the specific surface area of samples, such as CMS_{CF}, CMS_{GAC}, CMS_{COM}, and CGAC was 453.0, 604.0, 558.6, and 531.3 m^3/g, respectively. The iodine number of samples was 239.5, 325.3, 295.4, and 204.2 mg/g, respectively. Afterwards, the experiment of CO_2 adsorption in single adsorption column at 3 atm with the ratio of flow rate (inlet/outlet) of 1 at 25 °C in the mixed gas of 20% N_2, 30% CO_2, and 50% CH_4 was carried out. The purity of CH_4 in the samples was 95.20, 93.16, 98.26, and 82.72, respectively. The degeneration time in CO_2 adsorption of samples was 120, 114, 140, and 90 min, respectively. The selectivity of samples in the ratio between CO_2 and CH_4 was 19.41, 16.53, 24.89, and 1.54, respectively. Finally, the maximum CO_2 adsorption capacity of samples was 3.42, 3.26, 4.06, and 2.58 mol/kg, respectively.

Department:	Environmental Engineering	Student's Signature	....
		Advisor's Signature	....
Field of Study:	Environmental Engineering	Co-Advisor's Signature	....
Academic Year:	2014		

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีด้วยพระคุณของรองศาสตราจารย์ ดร.เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ดร. เรวดี อนุวัฒนา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้สละเวลาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และถ่ายทอดวิชาความรู้ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ทุกขั้นตอน ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณในความเมตตากรุณาของอาจารย์มา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณประธานการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.อรทัย ชวาลภาฤทธิ์ และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรรณวดี สุวัฒิกะ ที่ได้ให้เกียรติและสละเวลาเพื่อสอบวิทยานิพนธ์นี้ รวมถึงให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และฝ่ายเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมและทรัพยากร สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ที่ให้ความช่วยเหลือด้านทุนวิจัย ตลอดจนอำนวยความสะดวกในการทดลองและวิเคราะห์ตัวอย่าง

ขอขอบคุณ “ทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิต บัณฑิตวิทยาลัยแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย” และ “ทุนภาคีบัณฑิต สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย” ที่สนับสนุนทุนการทำวิจัยในครั้งนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ขอขอบคุณ ร้านกาแฟภิมรดา หลังอาคารยูเซ็นเตอร์ สามย่าน และร้านกาแฟคลองห้า จังหวัดปทุมธานี ที่ช่วยอนุเคราะห์กากกาแฟเพื่อนำมาทำการวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณ คุณสุรชัย จำจด วิทยากรตัวคูณ จาก ตำบลหนองโพรง อำเภอศรีมหาโพธิ จังหวัดปราจีนบุรี ที่ช่วยให้คำแนะนำและความรู้ในการเผาถ่านกากกาแฟ ในเตาเผาจากภูมิปัญญาชาวบ้านที่ผลิตจากถังน้ำมัน 200 ลิตร

ขอขอบคุณ พี่ๆ น้องๆ และเพื่อนๆ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ และกำลังใจตลอดระยะเวลาที่ทำวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และสมาชิกทุกคนในครอบครัวที่ช่วยสนับสนุนส่งเสริม และเป็นกำลังใจที่ดีที่สุดแก่ผู้วิจัย จนทำให้การศึกษาครั้งนี้ประสบผลสำเร็จได้ตามที่ตั้งใจ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .... จ

กิตติกรรมประกาศ .... ฉ

สารบัญ .... ช

สารบัญตาราง .... ฎ

สารบัญภาพ .... ฐ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 2

1.3 ขอบเขตการวิจัย 3

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 4

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 5

2.1 กาแฟ (Coffee) 5

2.1.1 ลักษณะทั่วไป 5

2.1.2 สายพันธุ์ของกาแฟ 6

2.1.3 ส่วนประกอบทางเคมีของกาแฟ 7

2.1.4 กากกาแฟ (Coffee Grounds) 8

2.2 แก๊สชีวภาพ (Biogas) 8

2.2.1 กระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ 9

2.2.2 องค์ประกอบและคุณสมบัติของแก๊สชีวภาพ 10

2.2.3 การนำแก๊สชีวภาพไปใช้ประโยชน์ 11

2.2.4 เทคโนโลยีในการปรับปรุงคุณภาพของแก๊สชีวภาพ 12

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

2.3 กระบวนการดูดซับหรือการดูดติดผิว (Adsorption Process) 19
2.3.1 ประเภทของตัวดูดซับ (Adsorbent) 20
2.3.2 กลไกในการดูดติดผิว (Adsorption Mechanism) 21
2.3.3 หลักการการดูดซับของตัวดูดซับ 22
2.3.4 การดูดติดผิวด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) 23
2.3.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิว 25
2.3.6 สมดุลและไอโซเทอมของการดูดซับ (Equilibrium and Isotherms Adsorption) 28
2.3.7 แรงที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับ (Adsorption Force) 31
2.3.8 การเสื่อมสภาพของตัวดูดซับ (Deactivation of Absorbent) 32
2.3.9 การปรับคืนสภาพของตัวดูดซับ (Regeneration of Adsorbent) 33
2.4 คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟ (Carbon Molecular sieve, CMS) 34
2.5 ไคโตซาน (Chitosan) 36
2.5.1 สมบัติของสารไคโตซาน 37
2.5.2 ขั้นตอนการเตรียมไคโตซาน 38
2.5.3 การเตรียมสารละลายไคโตซานเพื่อเอิบชุ่มตัวดูดซับในงานวิจัย 38
2.6 งานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง 38
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย 42
3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี 42
3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง 42
3.1.2 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง 44
3.1.3 ตัวแปรและพารามิเตอร์ในการวิจัย 45
3.2 วิธีดำเนินการวิจัย 46
3.2.1 การเตรียมตัวอย่างโดยวิธีต่างๆ 46

หน้า

3.2.2 การศึกษาองค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของกากกาแฟ ... 47

3.2.3 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากกากกาแฟและจากถ่านกัมมันต์ทางการค้าโดยวิธีตกเคลือบด้วยไอเคมี ... 47

3.2.4 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวอย่าง ... 48

3.2.5 การศึกษาปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกต่อขาเข้า ความบริสุทธิ์ของแก๊สมีเทนและประสิทธิภาพในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ (Out/in CO_2, Purity and CO_2 Removal) ... 49

3.2.6 การศึกษาค่าการเลือกในการดูดซับของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อแก๊สมีเทน และความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด (Selectivity and Maximum CO_2 adsorption) ... 50

3.3 สรุปแผนการดำเนินงานวิจัย ... 53

บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย ... 54

4.1 ตัวอย่างประเภทต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัย ... 54

4.2 ผลการศึกษาองค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของกากกาแฟ ... 55

4.3 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจาก กากกาแฟและถ่านกัมมันต์ทางการค้าโดยวิธีตกเคลือบด้วยไอเคมี ... 56

4.3.1 ผลของอัตราการไหลของอะเซทิลีนต่อสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียม CMS_{CF} ... 56

4.3.2 ผลของเวลาต่อสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียม CMS_{CF} ... 56

4.3.3 ผลของอุณหภูมิต่อสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียม CMS_{CF} ... 57

4.4 ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวอย่าง ... 59

4.4.1 พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน ขนาดรูพรุน และค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของตัวอย่าง ... 59

4.4.2 ลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง ... 60

4.4.3 ลักษณะโครงสร้างภายในของตัวอย่าง ... 63

4.4.4 ลักษณะโครงสร้างผลึกของตัวอย่าง ... 64

หน้า

4.4.5 ลักษณะโครงสร้างหมู่ฟังก์ชั่นของตัวอย่าง 65

4.5 การศึกษาปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกต่อขาเข้า ความบริสุทธิ์ของแก๊สมีเทน และประสิทธิภาพในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ 68

4.6 การศึกษาค่าการเลือกในการดูดซับของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อแก๊สมีเทน และความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด (Selectivity and maximum CO_2 adsorption) 72

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 76

5.1 สรุปผลการวิจัย 76

5.1.1 การศึกษาองค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของกากกาแฟ 76

5.1.2 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวอย่าง 76

5.1.3 การศึกษาการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สชีวภาพสังเคราะห์ 78

5.2 ข้อเสนอแนะ 79

รายการอ้างอิง 80

ภาคผนวก ก ผลการวิเคราะห์เพื่อหาค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของตัวอย่าง 88

ภาคผนวก ข ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างหมู่ฟังก์ชั่นของตัวอย่าง 96

ภาคผนวก ค ผลการศึกษาการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สชีวภาพสังเคราะห์ 101

ภาคผนวก ง เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย 124

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 129

Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดกาแฟ 7

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของแก๊สชีวภาพ 10

ตารางที่ 2.3 สมบัติของแก๊สชีวภาพเปรียบเทียบกับแก๊สธรรมชาติและแก๊สหุงต้ม 11

ตารางที่ 2.4 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในตัวดูดซับชนิดต่างๆ 16

ตารางที่ 2.5 เปรียบเทียบเทคโนโลยีต่างๆ ในการปรับปรุงคุณภาพของแก๊สชีวภาพ 19

ตารางที่ 2.6 ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี 22

ตารางที่ 2.7 การแบ่งประเภทของรูพรุนในตัวดูดซับจากขนาดของรูพรุน 26

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการวิจัย 45

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของกากกาแฟ 55

ตารางที่ 4.2 ผลวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของ CMS_{CF} ที่สภาวะต่างๆ 58

ตารางที่ 4.3 ผลวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของตัวอย่าง 59

ตารางที่ 4.4 ลักษณะโครงสร้างหมู่ฟังก์ชั่นบนพื้นผิวของตัวอย่าง 66

ตารางที่ 4.5 ค่าการเลือกในการดูดซับของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อแก๊สมีเทนในตัวอย่าง 72

ตารางที่ ก.1 ผลการวิเคราะห์ไอโอดีนนัมเบอร์ของตัวอย่าง 91

ตารางที่ ก.2 ผลการวิเคราะห์ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของตัวอย่างทั้งหมด 95

ตารางที่ ค.1 ผลการทดลองปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกต่อขาเข้าของตัวอย่าง 102

ตารางที่ ค.2 ผลของปริมาณมีเทนขาออกในตัวอย่าง 104

ตารางที่ ค.3 ผลของปริมาณแก๊สมีเทนขาออกต่อขาเข้า 106

ตารางที่ ค.4 ความบริสุทธิ์ของแก๊สมีเทนในตัวอย่าง 107

ตารางที่ ค.5 ผลการทดลองประสิทธิภาพการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวอย่าง 107

ตารางที่ ค.6 ค่าการเลือกในการดูดซับของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อแก๊สมีเทนในตัวอย่าง 115

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ค.7 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดของตัวอย่าง CMS_{CF} 116

ตารางที่ ค.8 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดของตัวอย่าง CMS_{COM} 117

ตารางที่ ค.9 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดของตัวอย่าง CMS_{GAC} 118

ตารางที่ ค.10 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดของตัวอย่าง CGAC 119

ตารางที่ ค.11 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดของตัวอย่าง 120

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 2.1 ส่วนประกอบของผลกาแฟ ... 6

ภาพที่ 2.2 การเก็บและทำความสะอาดตามลักษณะการนำแก๊สชีวภาพไปใช้ประโยชน์ ... 11

ภาพที่ 2.3 เทคโนโลยีในการสครับเบอร์ด้วยน้ำแบบหมุนเวียน ... 13

ภาพที่ 2.4 ระบบสครับเบอร์ด้วยเอมีนเพื่อกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ ... 13

ภาพที่ 2.5 เทคโนโลยีในการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แบบเมมเบรนเลือกผ่าน ... 14

ภาพที่ 2.6 เทคโนโลยีในการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แบบการดูดซับสลับความดัน ... 18

ภาพที่ 2.7 รูพรุนภายในของถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ... 19

ภาพที่ 2.8 โครงสรางทางเคมีของเมทธิลีนบลู ... 27

ภาพที่ 2.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์สำหรับสมการของแลงก์เมียร์ ... 29

ภาพที่ 2.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์สำหรับสมการของฟรุนดลิช ... 30

ภาพที่ 2.11 การเกิดแรงทางไฟฟ้าสถิตในการดูดซับ ... 31

ภาพที่ 2.12 ความสามารถในการทำงานของตัวดูดซับ ... 33

ภาพที่ 2.13 ประเภทของโมเลกุลาร์ซีฟ ... 35

ภาพที่ 2.14 แผนภาพอุปกรณ์ที่ใช้ในการตกเคลือบด้วยไอเคมี (CVD) ... 35

ภาพที่ 2.15 โครงสร้างทางเคมีของ (A) ไคติน และ (B) ไคโตซาน ... 36

ภาพที่ 2.16 ขั้นตอนทั่วไปของกระบวนการเตรียมไคโตซาน ... 38

ภาพที่ 3.1 กากกาแฟที่ผ่านกระบวนการอบแล้ว ... 46

ภาพที่ 3.2 เครื่องตกเคลือบด้วยไอเคมี (Chemical Vapor Deposition, CVD) ... 48

ภาพที่ 3.3 คอลัมน์เครื่องแยกแก๊สสลับความดันแบบสองคอลัมน์ ... 52

ภาพที่ 3.4 แผนการดำเนินงานวิจัย ... 53

ภาพที่ 4.1 ตัวอย่าง CMS_{CF} ... 54

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาพที่ 4.2 ตัวอย่าง CMS_{GAC} 54

ภาพที่ 4.3 ตัวอย่าง CMS_{COM} 55

ภาพที่ 4.4 ตัวอย่าง CGAC 55

ภาพที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของอะเซทิลีนในกระบวนการเตรียม CMS_{CF} ต่อ (ก) พื้นที่ผิวจำเพาะ และ (ข) ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ 56

ภาพที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในกระบวนการเตรียมเตรียม CMS_{CF} ต่อ (ก) พื้นที่ผิวจำเพาะ และ (ข) ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ 57

ภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในกระบวนการเตรียม CMS_{CF} ต่อ (ก) พื้นที่ผิวจำเพาะ และ (ข) ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ 57

ภาพที่ 4.8 ลักษณะพื้นผิวของ GAC (ก) กำลังขยาย 1,000 เท่า และ (ข) กำลังขยาย 2,000 เท่า... 61

ภาพที่ 4.9 ลักษณะพื้นผิวของ GK (ก) กำลังขยาย 1,000 เท่า และ (ข) กำลังขยาย 2,000 เท่า 61

ภาพที่ 4.10 ลักษณะพื้นผิวของ CMS_{CF} (ก) กำลังขยาย 1,000 เท่า และ (ข) กำลังขยาย 2,000 เท่า . 62

ภาพที่ 4.11 ลักษณะพื้นผิวของ CMS_{GAC} (ก) กำลังขยาย 1,000 เท่า และ (ข) กำลังขยาย 2,000 เท่า.. 62

ภาพที่ 4.12 ลักษณะพื้นผิวของ CMS_{COM} (ก) กำลังขยาย 1,000 เท่า และ (ข) กำลังขยาย 2,000 เท่า ... 62

ภาพที่ 4.13 ลักษณะโครงสร้างภายในของ CMS_{CF} กำลังขยาย (ก) 50,000 เท่า และ (ข) 100,000 เท่า.. 63

ภาพที่ 4.14 ลักษณะโครงสร้างภายในของ CMS_{GAC} กำลังขยาย (ก) 50,000 เท่า และ (ข) 100,000 เท่า... 63

ภาพที่ 4.15 ลักษณะโครงสร้างภายในของ CMS_{COM} กำลังขยาย (ก) 50,000 เท่า และ (ข) 100,000 เท่า.. 64

ภาพที่ 4.16 การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของตัวอย่างด้วยเครื่อง XRD 65

ภาพที่ 4.17 กราฟผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างและหมู่ฟังก์ชั่นด้วยเทคนิค FTIR ของตัวอย่าง (ก) CMS_{COM} (ข) CMS_{CF} (ค) GK (ง) CGAC (จ) CMS_{GAC} และ (ฉ) GAC 66

ภาพที่ 4.18 กราฟปริมาณของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกต่อขาเข้าของตัวอย่าง 68

ภาพที่ 4.19 กราฟปริมาณของมีเทนขาออกในตัวอย่าง CMS_{CF} 69

ภาพที่ 4.20 กราฟปริมาณของมีเทนขาออกในตัวอย่าง CMS_{GAC} 70

ภาพที่ 4.21 กราฟปริมาณของมีเทนขาออกในตัวอย่าง CMS_{COM}........ 70

ภาพที่ 4.22 กราฟปริมาณของมีเทนขาออกในตัวอย่าง CGAC 70

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาพที่ 4.23 ความบริสุทธิ์ของมีเทนในตัวอย่าง 71

ภาพที่ 4.24 กราฟประสิทธิภาพการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวอย่าง 71

ภาพที่ 4.25 กราฟเปรียบเทียบปริมาณการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนในตัวอย่าง 73

ภาพที่ 4.26 กราฟแสดงความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดของตัวอย่าง 74

ภาพที่ ก.2 กราฟความสัมพันธ์ของตัวอย่าง GK 93

ภาพที่ ก.1 กราฟความสัมพันธ์ของตัวอย่าง GAC 93

ภาพที่ ก.3 กราฟความสัมพันธ์ของตัวอย่าง CMS_{COM} 93

ภาพที่ ก.4 กราฟความสัมพันธ์ของตัวอย่าง CMS_{GAC} 93

ภาพที่ ก.5 กราฟความสัมพันธ์ของตัวอย่าง CGAC 93

ภาพที่ ก.6 กราฟความสัมพันธ์ของตัวอย่าง CMS_{CF1} 93

ภาพที่ ก.7 กราฟความสัมพันธ์ของตัวอย่าง CMS_{CF2} 93

ภาพที่ ก.8 กราฟความสัมพันธ์ของตัวอย่าง CMS_{CF3} 93

ภาพที่ ก.9 กราฟความสัมพันธ์ของตัวอย่าง CMS_{CF4} 94

ภาพที่ ก.10 กราฟความสัมพันธ์ของตัวอย่าง CMS_{CF5} 94

ภาพที่ ก.11 กราฟความสัมพันธ์ของตัวอย่าง CMS_{CF6} 94

ภาพที่ ก.12 กราฟความสัมพันธ์ของตัวอย่าง CMS_{CF7} 94

ภาพที่ ก.13 กราฟความสัมพันธ์ของตัวอย่าง CMS_{CF8} 94

ภาพที่ ก.14 กราฟความสัมพันธ์ของตัวอย่าง CMS_{CF9} 94

ภาพที่ ก.15 กราฟความสัมพันธ์ของตัวอย่าง CMS_{CF10} 94

ภาพที่ ก.16 กราฟความสัมพันธ์ของตัวอย่าง CMS_{CF11} 94

ภาพที่ ก.17 กราฟความสัมพันธ์ของตัวอย่าง CMS_{CF12} 95

ภาพที่ ข.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างหมู่ฟังก์ชั่นของ GAC 97

ภาพที่ ข.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างหมู่ฟังก์ชั่นของ CGAC 97

ภาพที่ ข.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างหมู่ฟังก์ชั่นของ (ก) ไคโตซาน (CS) (ข) CGAC และ (ค) GAC 98

ภาพที่ ข.4 ผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างหมู่ฟังก์ชั่นของ GK 98

ภาพที่ ข.5 ผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างหมู่ฟังก์ชั่นของ CMS_{CF} 99

ภาพที่ ข.6 กราฟรวมผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างหมู่ฟังก์ชั่นของตัวอย่าง 100

ภาพที่ ค.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันในระยะเวลาต่างๆ ของตัวอย่าง ในแก๊สผสมสังเคราะห์ 121

ภาพที่ ค.2 กราฟมาตรฐานในการวิเคราะห์แก๊สไนโตรเจน 122

ภาพที่ ค.3 กราฟมาตรฐานในการวิเคราะห์แก๊สมีเทน 122

ภาพที่ ค.4 กราฟมาตรฐานในการวิเคราะห์แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 123

ภาพที่ ง.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ... 125

ภาพที่ ง.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope, TEM) 125

ภาพที่ ง.3 เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction, XRD) 125

ภาพที่ ง.4 เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ (BET Surface Area Analyzer) 126

ภาพที่ ง.5 เครื่องวิเคราะห์หมู่โครงสร้าง (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR) 126

ภาพที่ ง.6 เตาเผาอุณหภูมิสูง (Pyrolysis Furnace) 126

ภาพที่ ง.7 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊ส (Gas Chromatography, GC) 127

ภาพที่ ง.8 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ (CHN/O Analyzer) 127

ภาพที่ ง.9 เครื่องปั้นเม็ด (Granulator) 127

ภาพที่ ง.10 เครื่องบดแบบลูกบอล (Ball Mill) 128

Chulalongkorn University

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากภาวะปัจจุบัน การดำรงชีวิตของมนุษย์จำเป็นต้องพึ่งพาการใช้พลังงานเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งประเทศไทยนั้นเป็นประเทศที่มีแหล่งพลังงานปิโตรเลียมสำรองน้อย และมีกำลังผลิตไม่เพียงพอต่อความต้องการในประเทศ จึงต้องมีการนำเข้าน้ำมันเชื้อเพลิงจากต่างประเทศ ก่อให้เกิดปัญหาความไม่มั่นคงทางพลังงาน ต้นทุนทางการค้าที่สูงขึ้น และปัญหาสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อประเทศอย่างมาก จึงจำเป็นต้องหาแหล่งพลังงานทางเลือกใหม่มาใช้เป็นพลังงานทดแทน ได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานน้ำ พลังงานลม พลังงานชีวมวล และพลังงานแก๊สชีวภาพ เป็นต้น

พลังงานจากแก๊สชีวภาพถือว่าเป็นพลังงานหมุนเวียนที่มีศักยภาพสูง เพราะประเทศไทยมีแหล่งวัตถุดิบที่เป็นทั้งน้ำเสียจากอุตสาหกรรม ของเหลือทิ้งทางการเกษตร มูลสัตว์จากฟาร์มปศุสัตว์และการเกษตรแปรรูปต่างๆ เป็นจำนวนมาก โดยแก๊สชีวภาพนั้น ประกอบด้วยแก๊สมีเทน ประมาณร้อยละ 50-75 แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ประมาณร้อยละ 36-39 และแก๊สอื่นๆ ได้แก่ ไฮโดรเจนและไฮโดรเจนซัลไฟด์อีกเล็กน้อย (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2555) ซึ่งการใช้แก๊สชีวภาพเพื่อเป็นพลังงานทดแทนในรูปความร้อนนั้น จำเป็นต้องนำแก๊สชีวภาพมาผ่านกระบวนการแยกแก๊สชนิดอื่นๆ ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟต์ เป็นต้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

การแยกแก๊สมีเทนออกจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อให้ได้แก๊สมีเทนที่มีความบริสุทธิ์สูงขึ้นก่อนนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงและป้องกันการกัดกร่อนอุปกรณ์บางชนิดจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จึงมีความสำคัญมาก โดยเทคโนโลยีที่ใช้ได้แก่ สเปรย์ทาวเวอร์ (Spray tower) เมมเบรน (Membrane) และสครับเบอร์ (Scrubber) ซึ่งมีค่าใช้จ่ายในการลงทุนและการดำเนินการสูง ต้องการผู้เชี่ยวชาญในการดำเนินระบบ และยังต้องการการบำรุงรักษาเครื่องมือเป็นอย่างมาก (พุฒิพงศ์ ตันติขจรโกศล, 2554)

อย่างไรก็ตามยังมีเทคโนโลยีหนึ่งที่ใช้มีค่าใช้จ่ายต่ำและดำเนินการง่ายกว่า ซึ่งเทคโนโลยีนั้นคือการกักเก็บไว้ด้วยตัวดูดซับ (Adsorbent) โดยการนำวัสดุดูดซับที่มีรูพรุนขนาดเล็กในระดับโมเลกุลมาใช้ เพื่อแก้ปัญหามลพิษทางอากาศก็เป็นอีกแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง โดยเฉพาะวัสดุพรุนที่มีการกระจายของขนาดรูพรุนที่แคบและเป็นระเบียบ ซึ่งสามารถใช้เป็นตัวดูดซับและเป็นตัวคัดขนาดของอนุภาคระดับโมเลกุลหรือคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟ (Carbon molecular sieves) ที่เป็นกลไกพื้นฐานของการดูดซับได้ (อรอนงค์ จุลพันธ์ และคณะ, 2554) อีกทั้งโมเลกุลาร์ซีฟยังสามารถฟื้นฟูสภาพเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ และนำคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการฟื้นฟูสภาพไปกำจัดด้วย

วิธีการที่เหมาะสมต่อไป ด้วยคุณสมบัติเหล่านี้จึงมีการนำคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟมาใช้ในการแยกแก๊ส Ar และ O_2 (David และคณะ, 2004) แยกแก๊ส CO_2 และ CH_4 (Son และคณะ, 2005) และแยกแก๊ส O_2, N_2, CO_2 และ CH_4 (Ahmad, 2009) เพื่อเพิ่มความบริสุทธิ์ของแก๊สที่ต้องการ

แต่เนื่องจากคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟทางการค้านั้นมีราคาสูง อีกทั้งส่วนใหญ่มีความจำเป็นต้องนำเข้าจากต่างประเทศเป็นหลัก เนื่องด้วยประเทศไทยยังขาดแคลนเทคโนโลยีที่ทันสมัยในการผลิตคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟในปริมาณมากๆ โดยทั่วไปการเตรียมคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟ เตรียมได้จากกระบวนการตกเคลือบด้วยไอเคมีและการเอิบชุ่มด้วยสารละลาย เป็นต้น จึงได้มีการศึกษาค้นคว้าเพื่อผลิตโมเลกุลาร์ซีฟจากวัสดุเหลือทิ้งทางเกษตรที่มีราคาถูก เช่น ซังข้าวโพด แกลบ เปลือกกล้วย เปลือกถั่วลิสง เส้นใยลูกปาล์ม กะลามะพร้าว ผักตบชวา ชานอ้อย และกากกาแฟ เป็นต้น ซึ่งถือเป็นการลดปริมาณของเสียจากการเกษตรที่ต้องนำไปกำจัดและเป็นการนำของเสียกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ อีกทั้งยังสามารถช่วยลดการนำเข้าสำหรับคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟทางการค้าได้อีกทาง (Son และคณะ, 2005)

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงมีแนวคิดที่จะนำกากกาแฟ (Spent coffee grounds) ซึ่งเป็นกากที่เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตกาแฟเพื่อใช้เตรียมเป็นคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟ เนื่องจากในปัจจุบันประเทศไทยมีแนวโน้มการบริโภคกาแฟที่มากขึ้นเรื่อยๆ จนไม่พอกับกำลังการผลิตในประเทศ (กรมการค้าภายใน, 2555) ดังนั้นปริมาณกากกาแฟก็ย่อมมีมากเช่นเดียวกัน โดยนำกากกาแฟที่เหลือทิ้งนี้มาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์โดยผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพ ให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพในการดูดซับมากยิ่งขึ้น จากนั้นดำเนินการเคลือบถ่านกัมมันต์ที่ได้ด้วยไอเคมีเพื่อเปลี่ยนถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟให้กลายเป็นคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟ โดยใช้เทคนิคการตกเคลือบด้วยไอเคมี (Chemical vapor deposition, CVD) ซึ่งจะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวให้แก่ตัวดูดซับ และเพิ่มความจำเพาะของตัวดูดซับต่อสารที่ต้องการดูดซับ (Atieh, 2011) ทำให้คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่ได้มีประสิทธิภาพสูงในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ อีกทั้งยังได้คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่มีค่าใช้จ่ายต่ำกว่าท้องตลาด โดยนำคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่พัฒนาได้ไปใช้แยกคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สชีวภาพสังเคราะห์ในระบบดูดซับแบบคอลัมน์เดี่ยวเพื่อทราบข้อมูล ในการออกแบบระบบดูดซับแบบสลับความดัน (Pressure swing adsorption, PSA) ในระดับอุตสาหกรรมต่อไป จึงเป็นแนวคิดในการศึกษาวิจัยครั้งนี้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวอย่าง คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากกากกาแฟโดยวิธีการตกเคลือบด้วยไอเคมี คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟทางการค้า คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟ

ที่เตรียมจากถ่านกัมมันต์ทางการค้าโดยวิธีการตกเคลือบด้วยไอเคมี และถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่ผ่านกระบวนการเอิบชุ่มด้วยไคโตซาน

1.2.2 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สชีวภาพสังเคราะห์ของคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากกากกาแฟโดยวิธีการตกเคลือบด้วยไอเคมี คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากถ่านกัมมันต์ทางการค้าโดยวิธีการตกเคลือบด้วยไอเคมี คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟทางการค้า และถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่ผ่านกระบวนการเอิบชุ่มด้วยไคโตซาน โดยทดสอบด้วยคอลัมน์ดูดซับแก๊สแบบคอลัมน์เดี่ยว

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 ดำเนินการวิจัย ณ ห้องปฏิบัติการวิจัย ฝ่ายเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมและทรัพยากร สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย และห้องปฏิบัติการวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.3.2 กากกาแฟชนิดอาราบิก้า 100% รวบรวมจากร้านกาแฟภิมรดา หลังอาคารยูเซ็นเตอร์ สามย่าน และร้านกาแฟคลองห้า จังหวัดปทุมธานี

1.3.3 ศึกษาองค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของกากกาแฟ

1.3.4 เตรียมถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟซึ่งกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เพื่อใช้ผลิตเป็นคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากกากกาแฟโดยวิธีตกเคลือบด้วยไอเคมี และเตรียมถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่ผ่านกระบวนกระบวนการเอิบชุ่มด้วยไคโตซาน

1.3.5 นำถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟซึ่งกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์มาตกเคลือบผิวด้วยไอเคมีที่สภาวะต่างๆ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากกากกาแฟโดยวิธีตกเคลือบด้วยไอเคมี และเตรียมคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากถ่านกัมมันต์ทางการค้าโดยวิธีตกเคลือบด้วยไอเคมีโดยเลือกใช้สภาวะที่เหมาะสม

1.3.6 ศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน ขนาดรูพรุน และค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากกากกาแฟโดยวิธีตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{CF}) คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากถ่านกัมมันต์ทางการค้าโดยวิธีตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{GAC}) คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟทางการค้า (CMS_{COM}) และถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่ผ่านกระบวนการเอิบชุ่มด้วยไคโตซาน (CGAC)

1.3.7 ศึกษาลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ในตัวอย่าง CMS_{CF} CMS_{GAC} และ CMS_{COM}

1.3.8 ศึกษาลักษณะโครงสร้างภายในด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope, TEM) ในตัวอย่าง CMS_{CF} CMS_{GAC} และ CMS_{COM}

1.3.9 ศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชั่น (X-Ray Diffraction, XRD) ในตัวอย่าง CMS_{CF} CMS_{GAC} CMS_{COM} และ CGAC

1.3.10 ศึกษาลักษณะโครงสร้างหมู่ฟังก์ชั่นบนพื้นผิว ด้วยเครื่องวิเคราะห์หมู่โครงสร้าง (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR) ในตัวอย่าง CMS_{CF} CMS_{GAC} และ CMS_{COM} และ CGAC

1.3.11 ศึกษาการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สชีวภาพสังเคราะห์ ได้แก่ ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกต่อขาเข้า ความบริสุทธิ์ของแก๊สมีเทน ประสิทธิภาพในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ค่าการเลือกในการดูดซับของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อแก๊สมีเทน และความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด ในตัวอย่าง CMS_{CF} CMS_{GAC} CMS_{COM} และ CGAC

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เพื่อเป็นการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตกาแฟ และเพิ่มมูลค่าโดยนำมาเป็นวัตถุดิบเริ่มต้นในการผลิตคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟด้วยวิธีตกเคลือบด้วยไอเคมี

1.4.2 ลดการนำเข้าคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟจากต่างประเทศ

1.4.3 เป็นทางเลือกหนึ่งในการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากอากาศเสีย หรือแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สชีวภาพ โดยอาจใช้กระบวนการดูดซับเพียงอย่างเดียว หรืออาจใช้ร่วมกับวิธีอื่นๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดแก๊สปนเปื้อนออกจากอากาศเสีย

1.4.4 เป็นข้อมูลพื้นฐานในการเดินระบบดูดซับแบบสลับความดัน แบบ 2 หรือ 4 คอลัมน์

1.4.5 ผลการศึกษาสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อเป็นแนวทางในการกำจัดหรือแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สชีวภาพหรือใช้ในงานวิจัยอื่นๆ ต่อไป

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

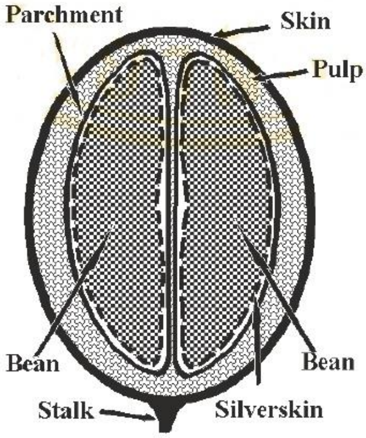
2.1 กาแฟ (Coffee)

กาแฟเป็นพืชที่อยู่ในตระกูล Rubiaceae มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า Coffee Arabica L. ซึ่งกาแฟนั้นเป็นไม้ยืนต้น ส่วนใหญ่มีถิ่นกำเนิดในเขตร้อนและกึ่งร้อนของทวีปแอฟริกาซึ่งเป็นที่รู้จักกันตั้งแต่ปี ค.ศ. 1820

2.1.1 ลักษณะทั่วไป

- ต้นกาแฟเป็นไม้พุ่มสูง 2-4 เมตร เป็นไม้ใบเดี่ยวเรียงตรงข้างภาพขอบขนาน กว้าง 8-12 เซนติเมตร ยาว 15-20 เซนติเมตร หูใบอยู่ระหว่างก้านใบ
- ดอกของกาแฟจะมีลักษณะเป็นช่อดอกที่ซอกใบ กลีบดอกสีขาวติดกันเป็นหลอด และดอกมีกลิ่นหอม
- ผลของกาแฟมีลักษณะเป็นรูปไข่แกมทรงกลม โดยเมื่อยังอ่อนจะมีสีขาว ซึ่งแต่ละผลของผลกาแฟจะให้เมล็ดสองเมล็ด เมื่อแก่จัดจะมีสีเข้มขึ้น และเมื่อสุกจะเปลี่ยนเป็นสีแดงเข้ม ซึ่งหากกะเทาะเปลือกของผลสุกออกจะได้เมล็ดกาแฟที่มีปลอกสีขาว (Parchment) หุ้มอยู่ เมื่อคัดออกจะเหลือเยื่อบางสีขาวที่เรียกว่า Silver skin หุ้มอยู่ภายในอีกชั้นหนึ่ง ซึ่งถ้าผ่านกระบวนการคัดอีกครั้งหนึ่งจะได้เมล็ดกาแฟที่ใช้บริโภคเรียกว่า กาแฟเขียว (Green bean) โดยส่วนประกอบของผลกาแฟ ดังภาพที่ 2.1
- ใบของกาแฟลักษณะเป็นใบเดี่ยว ก้านใบสั้น โคนใบและปลายใบเรียวแหลมตรงกลาง ใบกว้าง ผิวใบเรียบ นุ่มเป็นมัน ขอบใบหยักเป็นคลื่น ขนาดของใบขึ้นกับพันธุ์กาแฟ ใบจะเกิดที่ข้อเป็นคู่ตรงข้ามกัน ส่วนปากใบอยู่ด้านท้องใบ แต่ละใบจะมีปากใบประมาณ 3 ล้านถึง 6 ล้านรู ปากใบของกาแฟโรบัสต้ามีขนาดเล็กกว่าปากใบของกาแฟอาราบิก้า แต่มีจำนวนมากกว่า อายุใบประมาณ 250 วัน
- ลำต้นของกาแฟเป็นลำต้นเจริญเติบโตมาจากรากแก้ว มีลักษณะเป็นข้อและปล้อง ในขณะที่กาแฟต้นยังมีขนาดเล็กจะเห็นได้ชัด โดยใบจะอยู่ตามข้อของลำต้น เมื่อต้นโตขึ้นใบจะร่วงหล่นไป และโคนใบของกาแฟมีตา 2 ชนิด คือ ตาบนและตาล่าง ตาบนจะแตกกิ่งออกมาเป็นกิ่งแขนงที่ 1 (Primary Branch) เป็นกิ่งลักษณะเป็นกิ่งนอนขนานกับพื้นดินมีข้อและปล้อง แต่ละข้อของกิ่งแขนงนี้จะมีกลุ่มตาดอกที่จะติดดอกเป็นผลกาแฟต่อไป ส่วนตาล่างจะแตกออกเป็นกิ่งตั้ง

(Sucker) กิ่งตั้งจะตั้งตรงขึ้นไปเหมือนลำต้น ไม่ติดดอกผล แต่สามารถสร้างกิ่งแขนงที่สามารถให้ดอกและผล เรียกเป็นกิ่งแขนงที่ 1 เช่นกัน



ภาพที่ 2.1 ส่วนประกอบของผลกาแฟ
ที่มา: (Regional Office for Asia and the Pacific, 2005)

2.1.2 สายพันธุ์ของกาแฟ (ทิศา บุญเถื่อน, 2548)

กาแฟนั้นมีอยู่ 2 สายพันธุ์ใหญ่ๆ ที่นิยมปลูกกันมาก ได้แก่ พันธุ์อาราบิก้า (Coffee arabica) และพันธุ์โรบัสต้า (Coffee canephora var robusta) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.1.2.1 กาแฟพันธุ์อาราบิก้า (Coffee Arabica) เป็นพันธุ์ที่นิยมปลูกกันทั่วไป เนื่องจากเป็นพันธุ์ที่ให้ผลผลิตสูง มีปริมาณคาเฟอีนต่ำ และมีรสชาติหอมอร่อยจึงเป็นที่นิยมบริโภคมากกว่าพันธุ์อื่นๆ โดยมากนิยมนำมาทำเป็นกาแฟคั่วบดผล (Roast coffee) กาแฟพันธุ์อาราบิก้านี้ยังแบ่งออกเป็นอีกหลายชนิดซึ่งขึ้นอยู่กับพื้นที่ที่ปลูก เช่น เบอร์เบิ้น (Bourbon maragogype) ที่ปลูกบริเวณประเทศบราซิล และมอคค่า (Mocha) ที่ปลูกบริเวณคาบสมุทรอาราเบีย โคลัมเบีย และอเมริกากลาง

2.1.2.2 กาแฟพันธุ์โรบัสต้า (Coffee Canephora Var Robusta) เป็นพันธุ์ที่ถูกค้นพบเมื่อปลายศตวรรษที่ 19 มีถิ่นกำเนิดมาจากอเมริกากลาง มีคุณสมบัติทนทานต่อสภาพอากาศ โรคพืชและแมลงได้ดี มีปริมาณคาเฟอีนค่อนข้างสูงและคงกลิ่นไว้ได้นานกว่าสายพันธุ์อาราบิก้า จึงนิยมนำมาผลิตเป็นผงกาแฟสำเร็จรูป (Instant coffee) โดยกาแฟสายพันธุ์โรบัสต้านี้พบมากในแถบหมู่เกาะชวาและอินโดนีเซีย

ในประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกกาแฟค่อนข้างมาก โดยร้อยละ 97 ของการปลูกทั้งหมดในประเทศเป็นพันธุ์โรบัสต้าซึ่งปลูกบริเวณภาคใต้ ส่วนพันธุ์อาราบิก้าปลูกเป็นพื้นที่ร้อยละ 3 ของการปลูกทั้งหมดในประเทศซึ่งปลูกบริเวณภาคเหนือ

2.1.3 ส่วนประกอบทางเคมีของกาแฟ (ทิศา บุญเถื่อน, 2548)

ส่วนประกอบทางเคมีของกาแฟในทั้ง 2 สายพันธุ์ คือ อาราบิก้าและโรบัสต้า นั้นแบ่งเป็น

2.1.3.1 ส่วนเปลือก คือส่วนที่เป็น Parchment กับ Skin ในส่วนนี้กาแฟทั้ง 2 สายพันธุ์มีส่วนประกอบที่คล้ายกัน คือ ประกอบด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส เพคติน ลิกนิน และแว็กซ์ ซึ่งคล้ายกับเปลือกของพืชโดยทั่วไป

2.1.3.2 ส่วนเมล็ด คือส่วนที่นำไปบริโภคหรือที่เรียกว่า Bean จะมีปริมาณสารระเหยได้ (Volatile matter) คือสารกลุ่มอะโรมาติก (Aromatic compound) และกลุ่มเฮทเทอโรไซคลิก (Heterocyclic compound) โดยเฉพาะคาเฟอีน (Caffeine) และยังประกอบไปด้วยแร่ธาตุต่างๆ หลายชนิด เช่น โพแทสเซียม แมกนีเซียม และแมงกานีส นอกจากนี้ยังมีองค์ประกอบปลีกย่อยอีกมาก ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดกาแฟ

สาร	**ร้อยละโดยมวล**	
	อาราบิก้า	**โรบัสต้า**
คาร์โบไฮเดรต	55.0-65.5	40.0-55.5
กรดและฟีนอล	8.0-11.0	9.0-17.0
ไขมัน (แว็กซ์และน้ำมัน)	15.0-18.0	8.0-12.0
สารประกอบไนโตรเจน	1.0-2.0	1.0-2.0
แร่ธาตุ (โพแทสเซียม, แมกนีเซียม, แมงกานีส)	3.0-5.4	3.0-5.4
โปรตีน	8.5-12	8.5-12.0
คาเฟอีน	0.8-1.4	1.5-3.0

ที่มา: ทิศา บุญเถื่อน (2548)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.1.4 กากกาแฟ (Coffee Grounds)

กากกาแฟเป็นของเสียที่เกิดจากการผลิตกาแฟ โดยปกติแล้วการผลิตกาแฟจากเมล็ดกาแฟ 100 กิโลกรัมจะเหลือเป็นกากกาแฟหรือของเสียที่ต้องจัดการประมาณ 40-60 กิโลกรัม (ธนิษฐา ขันติสุข, 2548) ซึ่งในปัจจุบันมีการนำกากกาแฟไปใช้ประโยชน์หลายๆ ด้าน ดังนี้

- ใช้เป็นปุ๋ยสำหรับปลูกต้นไม้ กากกาแฟสามารถนำไปใช้ทำเป็นปุ๋ยในการปลูกต้นไม้ได้เป็นอย่างดี เนื่องจากเมื่อกากกาแฟผสมกับดิน กากกาแฟจะปล่อยสารอาหารลงสู่ดินซึ่งจะทำให้ต้นไม้เติบโตได้ดี
- ใช้กับสัตว์เลี้ยง นำกากกาแฟผสมกับน้ำแล้วนำไปขัดที่ผิวของสัตว์เลี้ยงจะทำให้ผิวและขนของสัตว์มีสุขภาพที่ดีและเงางามขึ้น
- ใช้กำจัดกลิ่นในตู้เย็น ซึ่งตู้เย็นที่มีกลิ่นไม่พึงประสงค์สามารถใช้กากกาแฟกำจัดกลิ่นเหล่านี้ได้ โดยนำกากกาแฟใส่ถ้วยแล้วนำไปวางในตู้เย็น จากนั้นกากกาแฟจะทำหน้าที่ในการดูดซับกลิ่นไม่พึงประสงค์ต่างๆ จากอาหารในตู้เย็น
- ป้องกันการขับถ่ายไม่เป็นที่ของสัตว์เลี้ยง สำหรับบริเวณหรือส่วนที่ไม่อยากให้เข้าไปขับถ่ายให้สกปรก สามารถใช้กากกาแฟและผิวส้มไปโรยรอบๆ บริเวณนั้น เพราะกลิ่นของกากกาแฟและผิวส้มเมื่อรวมกันจะเป็นกลิ่นที่ทำให้สัตว์ไม่ขับถ่ายหรือไม่อยากขับถ่าย
- ใช้สำหรับขัดผิว กากกาแฟสามารถนำไปขัดผิวได้ เพราะช่วยในการขจัดเซลล์ผิวที่ตายแล้วได้เป็นอย่างดี ทำให้ผิวดูเปล่งปลั่งขึ้น
- กำจัดกลิ่นในรองเท้า โดยนำกากกาแฟไปวางในรองเท้าเพื่อให้กากกาแฟดูดกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ออกจากรองเท้า หรือถ้าต้องการกำจัดกลิ่นที่เท้าก็สามารถใช้น้ำผสมกากกาแฟเพื่อล้างเท้าได้

2.2 แก๊สชีวภาพ (Biogas)

แก๊สชีวภาพ (Biogas) คือ แก๊สที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายภายใต้บรรยากาศที่ปราศจากออกซิเจน (Anaearobic digestion) ซึ่งโดยทั่วไปจะหมายถึงแก๊สมีเทนที่เกิดจากการหมักสารอินทรีย์ ได้แก่ ของเสียจากมูลของสุกร โค ไก่ ของเสียจากอุตสาหกรรมทางการเกษตร และขยะ เช่น โรงงานผลิตแป้งสำปะหลัง โรงงานผลิตน้ำมันปาล์ม และโรงงานเอทานอล เป็นต้น โดยเมื่อเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพแบบไม่มีออกซิเจนก็จะสามารถเกิดแก๊สชีวภาพได้ (ฤกษ์ฤทธิ์ เคนหาราช, 2548)

แก๊สชีวภาพถูกค้นพบครั้งแรกในศตวรรษที่ 17 โดยพบว่าเมื่อกวนตะกอนในลำธารหรือทะเลสาป จะทำให้แก๊สที่เกิดจากการย่อยสลายของสารอินทรีย์ซึ่งสามารถติดไฟได้ลอยขึ้นมา จากนั้น

ในปี ค.ศ. 1859 มีการค้นพบว่าแก๊สที่เกิดจากขี้วัวนั้นมีแก๊สมีเทนปนอยู่ด้วย และได้มีการสร้างถังหมักแก๊สในสภาวะไร้อากาศ (Anaearobic digester) ขึ้นเป็นครั้งแรกที่ประเทศอินเดีย ต่อมาในปี ค.ศ. 1985 อังกฤษได้คิดค้นนวัตกรรมใหม่ขึ้นมาโดยใช้ถังสิ่งปฏิกูลผลิตแก๊สชีวภาพ แล้วใช้แก๊สชีวภาพที่ได้มาจุดไฟส่องสว่างตามท้องถนน จากนั้นในปี ค.ศ. 1907 จึงมีการออกสิทธิบัตรสำหรับการสร้างถังหมักชีวภาพในประเทศเยอรมนี ในปี ค.ศ. 1930 จากนั้นการหมักแก๊สในสภาวะไร้อากาศจึงได้เริ่มเป็นที่รู้จักในแวดวงนักวิชาการมากขึ้น ซึ่งได้มีการวิจัยค้นคว้าเกี่ยวกับจุลินทรีย์ที่เป็นตัวทำให้เกิดปฏิกิริยา โดยมีการศึกษาถึงสภาวะที่เอื้อต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์เหล่านี้ด้วย

องค์ประกอบส่วนใหญ่ของแก๊สชีวภาพประกอบด้วย แก๊สมีเทน (CH_4) ร้อยละ 50-70 และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ร้อยละ 30-40 ส่วนที่เหลือเป็นแก๊สชนิดต่างๆ ในปริมาณเล็กน้อย ได้แก่ ไฮโดรเจน (H_2) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ไนโตรเจน (N_2) และไอน้ำ (H_2O) เป็นต้น โดยมักนำแก๊สชีวภาพมาเปลี่ยนรูปให้เป็นพลังงานความร้อน เพื่อใช้ประกอบอาหาร ใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ต่างๆ และใช้ผลิตเป็นกระแสไฟฟ้า ซึ่งการใช้แก๊สชีวภาพทดแทนพลังงานหลักเป็นการบริหารจัดการของเสียที่ควรได้รับการสนับสนุน เนื่องจากเป็นการลดการเพิ่มของปริมาณแก๊สมีเทนในชั้นบรรยากาศซึ่งมีศักยภาพที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (Greenhouse effect) มากกว่าแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ถึง 23 เท่า (IPCC Second Assessment Report, 1995)

2.2.1 กระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ

ในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์เพื่อผลิตแก๊สมีเทน เมื่อของเสียอยู่ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่จำกัดอากาศ จุลินทรีย์ชนิดไม่ใช้อากาศ (Aearobic microorganism) ซึ่งมีอยู่ทั่วไปในธรรมชาติและในของเสียนั้น จะเจริญเติบโตได้ดีกว่าจุลินทรีย์ชนิดอื่นๆ กลายเป็นกลุ่มเด่น (Dominant speices) ซึ่งปล่อยเอนไซม์เพื่อก่อปฏิกิริยาเคมีให้เปลี่ยนสารอินทรีย์ไปเป็นแก๊สมีเทน โดยอาศัยกลไก 4 ขั้นตอน ซึ่งในแต่ละขั้นตอนจะอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ต่างชนิดกัน โดยในขั้นแรกแบคทีเรียจะย่อยสลายของเสียต่างๆ ซึ่งเป็นสารอินทรีย์โมเลกุลขนาดใหญ่ ให้มีขนาดเล็กลงให้อยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้ เช่น น้ำตาล กรดอะมิโน และกรดไขมัน จึงเรียกขั้นตอนนี้ว่าขั้นไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) จากนั้นจุลินทรีย์จะเปลี่ยนสารอินทรีย์ละลายน้ำได้จากขั้นตอนแรกให้กลายเป็นกรดอินทรีย์ระเหย (Volatile fatty acid) ขั้นตอนนี้เรียกว่าขั้นการหมัก (Fermentation) หลังจากได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นกรดอินทรีย์ระเหยแล้ว แบคทีเรียชนิดสร้างกรด (Acid forming bateria) จะทำการย่อยสลายกรดอินทรีย์ให้กลายเป็นกรดอะเซติก ไฮโดรเจน และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เรียกขั้นตอนนี้ว่าขั้นการสร้างกรดอะเซติก (Acetogenesis) และขั้นตอนสุดท้ายแบคทีเรียชนิดสร้างมีเทน (Methanogenesis bacteria) จะย่อยสลายกรดอะเซติกให้กลายเป็นแก๊สมีเทนและแก๊ส

คาร์บอนไดออกไซด์ในที่สุด ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อปริมาณการผลิตมีเทนในกระบวนการย่อยสลาย ได้แก่ อุณหภูมิ (Temperature) ความเป็นกรด-ด่าง (pH) และคุณสมบัติของสารอินทรีย์ตั้งต้นที่จะย่อยสลาย โดยทั่วไปอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายควรจะคงที่อยู่ที่ระดับประมาณ 35 องศาเซลเซียส โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิน 5 องศาเซลเซียส อาจส่งผลยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียจนอาจทำให้ระบบการผลิตแก๊สล้มเหลวได้

2.2.2 องค์ประกอบและคุณสมบัติของแก๊สชีวภาพ

แก๊สชีวภาพประกอบด้วยแก๊สมีเทนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นส่วนใหญ่ แต่อาจจะมีแก๊สไนโตรเจน ไฮโดรเจน และไฮโดรเจนซัลไฟด์เจือปนอยู่เล็กน้อย ซึ่งแก๊สที่เกิดจากกระบวนการหมักนี้จะมีองค์ประกอบที่แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบหรือชีวมวลที่ใช้ในการหมักและสภาวะของกระบวนการหมัก โดยทั่วไปมีองค์ประกอบของแก๊สชีวภาพแสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของแก๊สชีวภาพ

ชนิดของแก๊สในแก๊สชีวภาพ	ปริมาณของแก๊ส (ร้อยละ)
แก๊สมีเทน (CH_4)	50-70
แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)	30-50
แก๊สไฮโดรเจน (H_2)	0-8
แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S)	0-1

ที่มา: ปภัส ชนะโรค (2554)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

แก๊สชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงที่มีศักยภาพในการทดแทนเชื้อเพลิงจากแหล่งพลังงานอื่นได้โดยตรงเช่นเดียวกับแก๊สธรรมชาติ ซึ่งมีความสะดวกในการใช้งานมากกว่าการใช้ฟืนหรือถ่านไม้ อีกทั้งยังเป็นพลังงานที่สะอาด ปราศจากเขม่าและควัน และยังสามารถให้พลังงานแสงสว่างและให้พลังงานความร้อนได้ โดยแก๊สชีวภาพที่จะใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ดีจะต้องมีแก๊สมีเทนเป็นองค์ประกอบไม่น้อยกว่าร้อยละ 50 โดยมีสมบัติต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.3 ซึ่งข้อมูลของแก๊สชีวภาพในตารางนั้นได้จากแก๊สมีเทน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และอื่นๆ เท่ากับร้อยละ 60 38 และ 2 ตามลำดับ

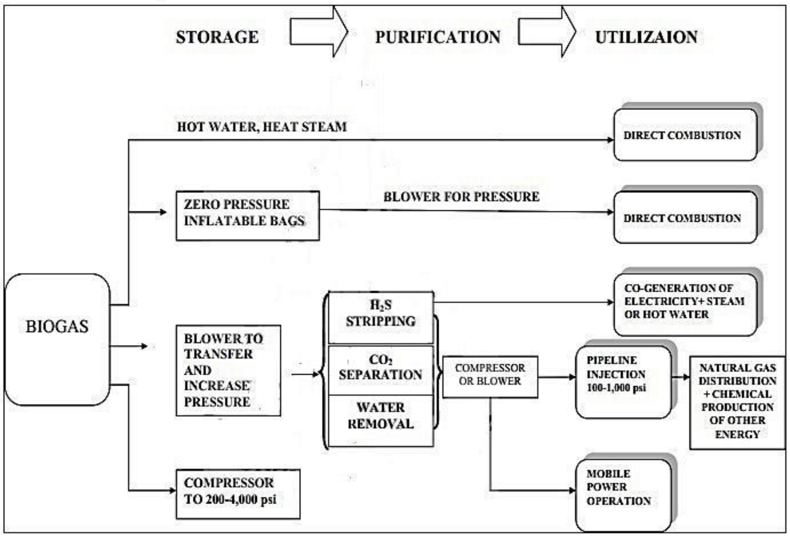
ตารางที่ 2.3 สมบัติของแก๊สชีวภาพเปรียบเทียบกับแก๊สธรรมชาติและแก๊สหุงต้ม

พารามิเตอร์	แก๊สธรรมชาติ	แก๊สหุงต้ม	แก๊สชีวภาพ
ค่าความร้อน (เมกกะจูล/ลบ.ม.)	36.14	16.10	21.48
ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)	0.82	0.51	1.21
ความเร็วในการเผาไหม้ (เมตรต่อวินาที)	0.39	0.70	0.25
ปริมาณอากาศต่อแก๊สตามทฤษฎี (ลบ.ม./ลบ.ม.)	9.53	3.83	5.71
ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด (ร้อยละโดยปริมาตร)	11.9	13.10	17.80
อุณหภูมิจุดน้ำค้าง (องศาเซลเซียส)	59	60	60-160

ที่มา: สถาบันวิจัยและพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (2538)

2.2.3 การนำแก๊สชีวภาพไปใช้ประโยชน์

การจะนำแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นไปใช้ประโยชน์ได้นั้นจำเป็นจะต้องมีการจัดการกับแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นก่อน จึงจะสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (Jewell และคณะ, 1982) ซึ่งระบบการจัดการแก๊สชีวภาพดังกล่าวประกอบด้วย การรวบรวมแก๊สชีวภาพ (Gas handling) การเก็บแก๊สชีวภาพ (Gas storage) การทำความสะอาดแก๊สชีวภาพ (Gas purification) และการนำแก๊สชีวภาพไปใช้ประโยชน์ (Gas ultilization) แนวทางหรือวิธีการของระบบการจัดการแก๊สชีวภาพเพื่อนำไปใช้ประโยชน์สามารถสรุปได้ดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 การเก็บและทำความสะอาดตามลักษณะการนำแก๊สชีวภาพไปใช้ประโยชน์

ที่มา: Jewell และคณะ (1982)

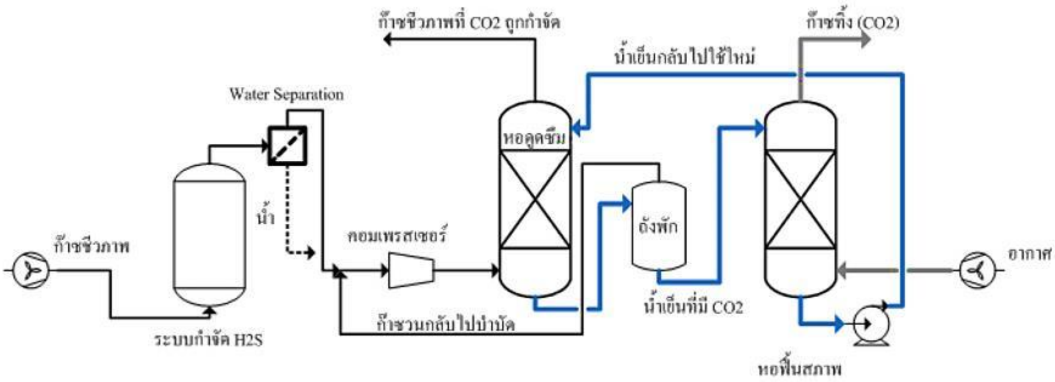
2.2.4 เทคโนโลยีในการปรับปรุงคุณภาพของแก๊สชีวภาพ

แก๊สชีวภาพถูกนำไปใช้ทดแทนพลังงานในด้านต่างๆ เช่น ผลิตกระแสไฟฟ้า หรือใช้เป็นเชื้อเพลิงความให้ความร้อนโดยตรง เมื่อพิจารณาจากองค์ประกอบของแก๊สชีวภาพแล้ว พบว่าสัดส่วนของแก๊สมีเทนในแก๊สชีวภาพนั้นมีปริมาณใกล้เคียงกับแก๊สมีเทนในแก๊สธรรมชาติ เป็นผลทำให้สามารถใช้แก๊สชีวภาพเป็นพลังงานทดแทนแก๊สธรรมชาติได้ แต่จำเป็นต้องมีปรับปรุงคุณภาพแก๊สชีวภาพเสียก่อน โดยแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สชีวภาพ ทำให้ความบริสุทธิ์ของแก๊สชีวภาพสูงขึ้นและป้องกันการกัดกร่อนในระบบ โดยปัจจุบันเทคโนโลยีสำหรับปรับปรุงคุณภาพของแก๊สชีวภาพมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ประกอบด้วย การสครับเบอร์ด้วยน้ำ การสครับเบอร์ด้วยเอมีน การใช้เมมเบรน และกระบวนการดูดซับ (สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย, 2553)

2.2.4.1 การสครับเบอร์ด้วยน้ำ (Water Scrubber Technology)

เป็นเทคโนโลยีในการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยการอัดแก๊สชีวภาพผ่านหอดูดซึมด้วยน้ำที่มีความดันสูงและอุณหภูมิต่ำ ในการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ใช้หลักความสามารถในการละลายที่ดีของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำที่มีความดันสูงและอุณหภูมิต่ำ ซึ่งมีเทคโนโลยี 2 แบบหลักๆ ได้แก่ ระบบที่ใช้น้ำครั้งเดียว และระบบที่มีการฟื้นสภาพน้ำและนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ องค์ประกอบของระบบจะมีหอดูดซึมและหอที่มีลักษณะเป็นชั้น (ในกรณีที่มีการไล่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากน้ำและวนน้ำกลับมาใช้ใหม่) ภายในหอจะมีตัวกลางพลาสติกเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการถ่ายเทมวล โดยแก๊สชีวภาพที่ผ่านกระบวนการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์แล้ว ละอองน้ำจะถูกอัดด้วยคอมเพรสเซอร์ให้มีความดันสูง ประมาณ 13 บาร์ จากนั้นแก๊สที่ความดันสูงจะเข้าหอดูดซึมทางด้านล่างและไหลสวนทางกับน้ำ โดยแก๊สที่ถูกกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์และมีความเข้มข้นของมีเทนสูงจะออกจากระบบทางข้างบน ส่วนน้ำที่มีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ละลายอยู่จะไหลออกจากด้านล่างและเข้าสู่ถังพักเพื่อลดความดัน โดยน้ำที่ผ่านกระบวนการไล่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกไปแล้ว จะวนกลับมาไปที่หอดูดซึมเพื่อละลายแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อีกครั้ง ซึ่งเทคโนโลยีแบบการสครับเบอร์ด้วยน้ำชนิดนำกลับมาใช้ใหม่ได้มีแผนภาพระบบ ดังแสดงในภาพที่ 2.3

กรณีระบบที่มีการใช้น้ำครั้งเดียว (Single pass) นั้นมีข้อดีคื จะมีประสิทธิภาพกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูง เนื่องจากน้ำที่ใช้ไม่มีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เจือปนอยู่ และสำหรับระบบที่มีการหมุนเวียนน้ำอาจจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดไม่ดีเท่าแบบแรก เนื่องจากในกระบวนการไล่คาร์บอนไดออกไซด์นั้นไม่สามารถไล่คาร์บอนไดออกไซด์ออกได้ทั้งหมด ดังนั้นความสามารถในการจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของระบบจึงต่ำลง แต่ระบบนี้มีข้อดีคือใช้น้ำในกระบวนการน้อยกว่าแบบแรกมาก

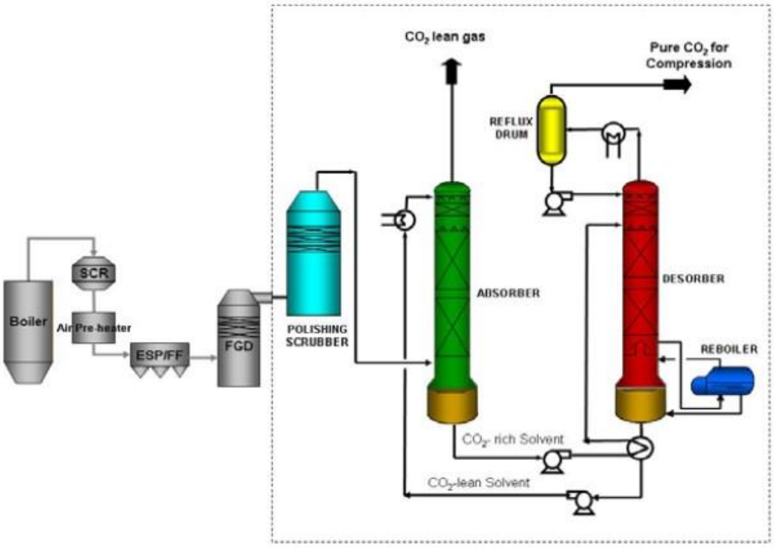


ภาพที่ 2.3 เทคโนโลยีในการสครับเบอร์ด้วยน้ำแบบหมุนเวียน

ที่มา: สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย (2553)

2.2.4.2 การสครับเบอร์ด้วยเอมีน (Amine Scrubber Technology)

การสครับเบอร์ด้วยเอมีนเป็นเทคโนโลยีหนึ่งในวิธีการแยกคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สชีวภาพ ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพที่อาศัยความแตกต่างของความสามารถในการละลายของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนในสารละลายด่างของเอมีนในหอดูดซึม โดยแก๊สชีวภาพจะไหลจากด้านล่างสวนทางกับสารละลายทำให้เกิดการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในสารละลาย โดยสารละลายที่ผ่านการดูดซับแล้วเข้าสู่หอฟื้นฟูสภาพด้วยความร้อนก่อนนำสารละลายมาใช้อีกครั้ง

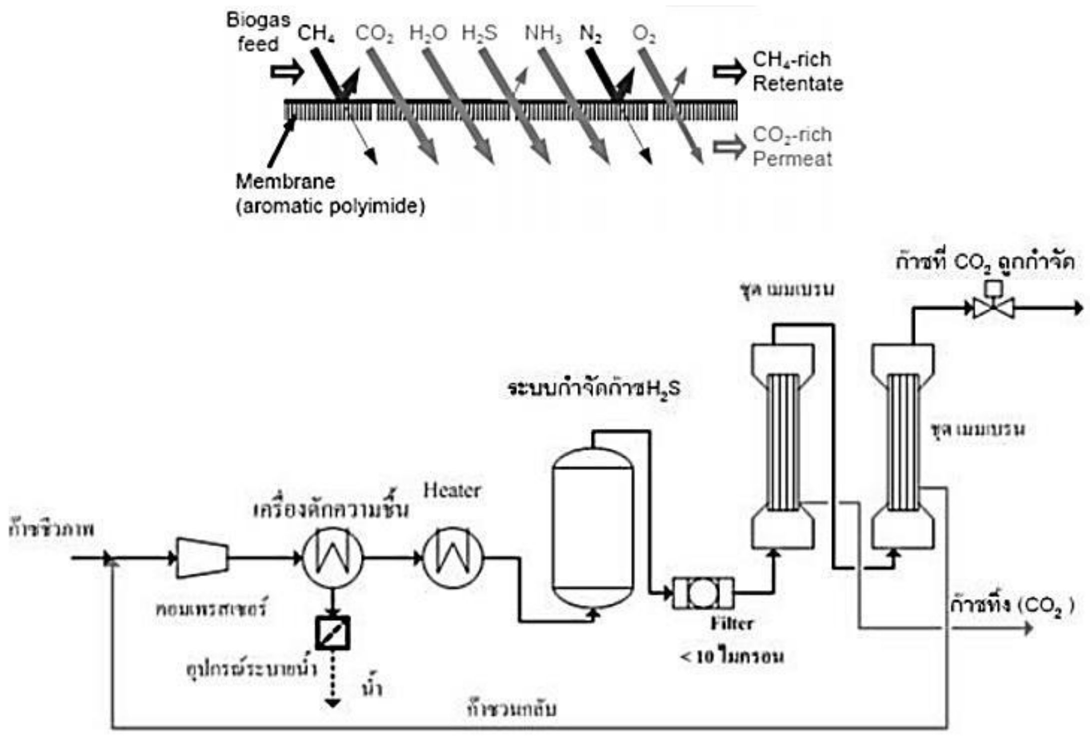


ภาพที่ 2.4 ระบบสครับเบอร์ด้วยเอมีนเพื่อกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์

ที่มา: Rochelle (2009)

2.2.4.3 การใช้เมมเบรน (Membrane Seperation Technology)

เป็นเทคโนโลยีในการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยการเลือกซึมผ่านและแพร่ผ่านเมมเบรน ที่ใช้เยื่อแผ่นทำจากโพลิไอมายด์เมมเบรนแบบหนาแน่น (Dense polyide membrane) ในการแยกสาร โดยอาศัยความแตกต่างระหว่างขนาดโมเลกุลหรือความจำเพาะต่อโมเลกุลของแก๊สแต่ละชนิดในการดึงดูดกัน ซึ่งดำเนินการภายใต้ความดันประมาณ 6-10 บาร์ ทั้งนี้ประสิทธิภาพในการแยกขึ้นอยู่กับชนิดของเมมเบรนโดยมีหลักการทั่วไปของเทคนิคการแยก คือ การเลือกซึมผ่าน (Selective permeation) ดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 เทคโนโลยีในการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แบบเมมเบรนเลือกผ่าน

ที่มา: สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย (2553)

2.2.4.4 กระบวนการดูดซับ (Adsorption process)

การกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์โดยกระบวนการดูดซับด้วยวัสดุ ดูดซับถือว่าเป็นวิธีที่นิยมทำกันอย่างกว้างขวาง ซึ่งถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุดูดซับประเภทหนึ่งที่มีข้อได้เปรียบหลายประการในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากมีความสามารถในการดูดซับที่สูงที่บรรยากาศปกติ

สามารถฟื้นฟูสภาพได้ง่าย ค่าใช้จ่ายต่ำ มีประสิทธิภาพสูง และทนต่อความชื้น โดยมีหลายงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับ ยกตัวอย่างดังนี้

Plaza และคณะ (2009) ได้นำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากชีวมวล (Biomass) ได้แก่ เมล็ดมะกอก มาผ่านกระบวนการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน แบ่งเป็นสองส่วน จากนั้นนำตัวอย่างแรกมากระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 800 องศาเซลเซียส และตัวอย่างที่สองนั้นนำมากระตุ้นด้วยแก๊สแอมโมเนียที่อุณหภูมิ 400 600 800 และ 900 องศาเซลเซียส ซึ่งตัวอย่างที่กระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 5.8 โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่กระตุ้นด้วยแก๊สแอมโมเนีย ที่อุณหภูมิ 400 600 800 และ 900 องศาเซลเซียส จะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 6.8 7.1 8.6 และ 7.3 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

Dantas และคณะ (2011) ได้ทำการลดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปลดปล่อยที่ปล่อง โดยใช้เทคโนโลยีการดักจับที่การเผาไหม้สุดท้าย (Post-combustion) เช่นการดูดซับ ซึ่งใช้แก๊สผสมระหว่างไนโตรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ อัตราส่วน 4:1 ดำเนินการโดยที่มีถ่านกัมมันต์ทางการค้าอยู่ภายในคอลัมน์ (NORIT R2030) ที่อุณหภูมิ 28 50 100 และ 150 องศาเซลเซียส เมื่อคำนวณโดยใช้สมการ พบว่าที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส ถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับแก๊สไนโตรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 0.272 และ 0.734 โมลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับแก๊สไนโตรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 0.178 และ 0.450 โมลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับแก๊สไนโตรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 0.097 และ 0.163 โมลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับแก๊สไนโตรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 0.054 และ 0.072 โมลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

นอกจากนี้ ยังมีอีกหลายงานวิจัยที่ใช้วิธีการดูดซับในตัวดูดซับชนิดต่างๆ เพื่อดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสรุปในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในตัวดูดซับชนิดต่างๆ

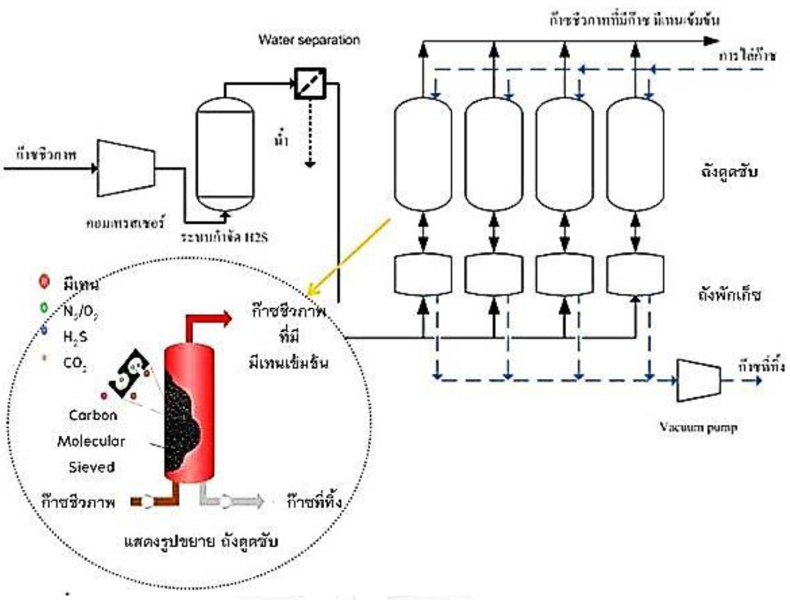
ตัวอย่าง	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความดัน (กิโลปาสคาส)	ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ (คาร์บอนไดออกไซด์ โมล/ตัวดูดซับ กก.)	ผู้วิจัย
AC (4% KOH)	30	30	0.55	Guo และคณะ (1995)
AC (EDAa + EtOH)	30	30	0.53	
AC (4%KOH + EDAa	30	30	0.64	
Activated carbon	30	30	0.35	
Molecular basket	75	100	2.95	
Magnesium hydroxide	200	103	3.00	Siriwardane และคณะ (2001)
Activated carbon	30	110	1.58	Maroto-Valer และคณะ
MCM-41 (DEA)	75	100	1.26	Franchi และคณะ (2005)
MCM-41 (50% PEI)	75	100	2.52	
PE- MCM-41 (DEA)	25	100	2.90	
PE-MCM-41 (DEA)	75	100	2.36	
Lithium zirconate	400	100	5.00	Grande และคณะ (2009)
Lithium	600	100	6.13	
Calcium oxide	600	100	17.30	
PE-MCM-41	25	100	0.50	Serna และ Sayari (2010)
MCM-41	25	100	0.62	
PE-MCM-41 (TRI)	25	100	2.85	
PE-MCM-41 (TRI)	75	100	1.80	
Magnesium oxide	100	100	2.27	Bhagiyalakshmi และคณะ (2011)
MWNT	60	101	1.30	Hsu และคณะ (2011)
MCM-48	25	100	0.03	Jang และ Park (2012)
MCM-48 (APTS)	25	100	0.64	
MCM-41 (50% PEI)	75	100	2.50	Xu และคณะ (2012)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

- **การดูดซับแบบสลับความดัน (Pressure swing adsorption, PSA)** เป็นกระบวนการแยกสารอย่างหนึ่งซึ่งนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ มากมายที่อาศัยหลักการของการดูดซับ ความสามารถในการแยกแก๊สบริสุทธิ์ออกจากแก๊สผสมของวัสดุดูดซับอยู่บนหลักการทางสมดุลและหลักการทางจลน์ศาสตร์ ซึ่งกระบวนการดูดซับแบบสลับความดันประกอบด้วยขั้นตอนหลักสองขั้นตอน คือ ขั้นตอนการดูดซับที่เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ถูกดูดซับได้ดีกว่าถูกดูดซับบนวัสดุดูดซับที่สภาวะความดันสูง โมเลกุลดังกล่าวจึงแยกออกจากเฟสแก๊สของสารผสมที่ป้อนเข้าไปอยู่บนพื้นผิวของวัสดุดูดซับที่เป็นเฟสของแข็ง และขั้นตอนการคืนสภาพวัสดุดูดซับ เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ถูกดูดซับคลายตัวออกจากวัสดุดูดซับที่สภาวะความดันต่ำ เป็นผลให้วัสดุดูดซับพร้อมสำหรับการดูดซับในรอบการดูดซับต่อไป (Cycle time)

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากจากขั้นตอนการดูดซับที่มีความบริสุทธิ์สูงกว่า เรียกว่า ราฟฟิเนต (Raffinate) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่สารที่ถูกซับได้มากกว่าถูกแยกออกไปแล้ว โดยสารที่คลายออกมาจากวัสดุดูดซับในขั้นตอนการคืนสภาพวัสดุดูดซับ เรียกว่าเอกซ์แทรค (Extract) ซึ่งประกอบไปด้วยโมเลกุลที่ถูกดูดซับไว้ในขั้นตอนการดูดซับ ซึ่งหลักการพื้นฐานของระบบ PSA คือ ขั้นตอนการคืนสภาพของตัวดูดซับ สารที่ถูกดูดซับจะถูกคลายซับโดยการลดความดันหรือโดยการเพิ่มอุณหภูมิ ซึ่งอาจใช้ร่วมกับการป้อนสารชะล้าง โดยสารชะล้างควรเป็นสารที่ไม่ถูกดูดซับบนวัสดุ การดำเนินการภายใต้อุณหภูมิคงที่ใช้ประโยชน์จากความแตกต่างของความสามารถในการดูดซับที่ความดันสูงในขั้นตอนการดูดซับ และการคืนสภาพตัวดูดซับภายใต้ความดันต่ำภายใต้ไอโซเทอมเดียวกัน ในการดำเนินการปกติจะทำการหยุดขั้นตอนการดูดซับของหอที่หนึ่งเมื่อสารที่ถูกดูดซับถึงจุดอิ่มตัวแล้ว (Breakthrough) และดำเนินการคืนสภาพในหอที่หนึ่ง พร้อมการหยุดขั้นตอนการคืนสภาพหอที่สองเมื่อตัวดูดซับคืนสภาพเต็มที่แล้ว จากนั้นจึงมีการอัดความดันเข้าสู่หอดูดซับอีกครั้งหนึ่ง เป็นหนึ่งรอบของการดูดซับ (Cycle time) โดยเวลาต่อหนึ่งรอบของการดูดซับอยู่ในช่วง 3-5 นาที ซึ่งในกระบวนการดูดซับแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นกระบวนการที่ย้อนกลับไม่ได้ ต้องดำเนินการคืนสภาพโดยใช้ความร้อนเท่านั้น ดังนั้นจึงต้องมีการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ก่อนเข้าหอดูดซับ เพื่อทำให้ได้ประสิทธิภาพในการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดและป้องกันปัญหาการกัดกร่อนของระบบ

ข้อได้เปรียบของกระบวนการดูดซับแบบสลับความดันเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการดูดซับแบบอื่นๆ ได้แก่ สามารถสลับความดันไปมาได้อย่างรวดเร็ว ทำให้กระบวนการดูดซับแบบสลับความดันมีรอบการดูดซับที่สั้นกว่า จึงมีกำลังการผลิตแก๊สชีวภาพสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการดูดซับแบบอื่นที่ใช้ปริมาณตัวดูดซับเท่ากัน ส่วนข้อจำกัดของกระบวนการดูดซับแบบสลับความดัน คือ หากตัวดูดซับติดแน่นกันจนเกินไปจะทำให้ค่าพลังงานต่อหน่วยผลิตภัณฑ์สูงขึ้น โดยกระบวนดูดซับแบบสลับความดันถูกแสดงดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 เทคโนโลยีในการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แบบการดูดซับสลับความดัน
ที่มา: สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย (2553)

ขั้นตอนพื้นฐานของกระบวนการดูดซับแบบสลับความดันมี 4 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

การเพิ่มความดัน (Pressurization) ในหอดูดซับ โดยการอัดแก๊สผสมเข้าไปในหอดูดซับ ซึ่งความดันจะเพิ่มขึ้น โดยในสภาวะความดันสูงจะทำให้ความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น

การดูดซับ (Adsorption) แก๊สผสมจะถูกป้อนที่ความดันสูงและปล่อยให้ผลิตภัณฑ์ไหลออกอีกทางด้านหนึ่ง ดังนั้นผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เอกซ์แทรคอยู่มาก

การเป่าไล่ (Blowdown) เป็นการปล่อยแก๊สที่อยู่ในหอดูดซับออกทางด้านเดียวกับที่ป้อนแก๊สผสมเข้าไป ซึ่งความดันภายในหอดูดซับจะลดลง ซึ่งจะทำให้ปริมาณการดูดซับที่เกินกว่าสมดุลออกจากตัวดูดซับมีค่าลดลง

การชะล้าง (Purge) เป็นการป้อนผลิตภัณฑ์ส่วนหนึ่งเข้าสู่หอดูดซับที่ความดันต่ำในลักษณะการไหลกลับ เพื่อไล่องค์ประกอบที่ยังคงเหลืออยู่บนผิวของตัวดูดซับออกไป ทำให้ตัวดูดซับอยู่ในสภาพที่พร้อมใช้งานต่อไป

ดังนั้นการปรับปรุงคุณภาพแก๊สชีวภาพจึงหมายถึงการกำจัดหรือแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อเพิ่มสัดส่วนของแก๊สมีเทนในองค์ประกอบของแก๊สชีวภาพ โดยเทคโนโลยีต่างๆ ที่ถูกใช้ดังแสดงข้างต้น ได้แก่ การสครับเบอร์ด้วยน้ำ การสครับเบอร์ด้วยเอมีน การใช้เมมเบรนและกระบวนการดูดซับนั้น มีข้อมูลต่างๆ ในเปรียบเทียบแต่ละเทคโนโลยี ดังแสดงในตารางที่ 2.5

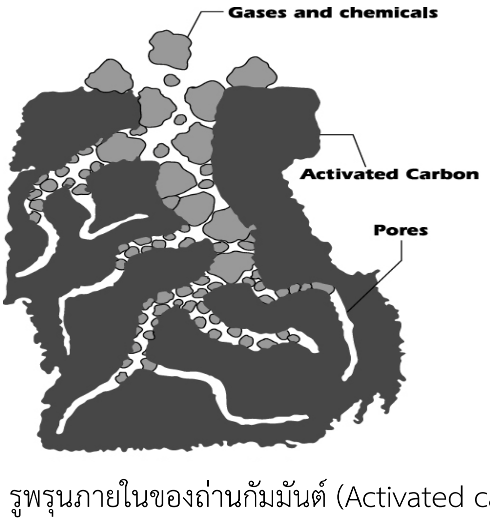
ตารางที่ 2.5 เปรียบเทียบเทคโนโลยีต่างๆ ในการปรับปรุงคุณภาพของแก๊สชีวภาพ

	สครับเบอร์ด้วยน้ำ	**สครับเบอร์ด้วยเอมีน**	**เมมเบรน**	**การดูดซับแบบสลับความดัน**
พลังงานที่ใช้ (กิโลวัตต์/ลบ.ม.)	0.3	0.67	ไม่แน่ชัด	0.27
การนำมีเทนกลับคืน (ร้อยละ)	98.5	99	90	83-99
การกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์	ทำได้	ปนเปื้อน	อาจทำได้	อาจทำได้
การกำจัดความชื้น	ทำได้	ปนเปื้อน	ทำไม่ได้	ปนเปื้อน
การกำจัดไอน้ำ	ทำไม่ได้	ทำได้	ทำไม่ได้	ทำได้
การกำจัดไนโตรเจนและออกซิเจน	ทำไม่ได้	ทำไม่ได้	ได้บางส่วน	อาจทำได้

ที่มา: Ruthven (1994)

2.3 กระบวนการดูดซับหรือการดูดติดผิว (Adsorption Process)

การดูดซับหรือการดูดติดผิว เป็นความสามารถของสารบางชนิดในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ซึ่งอยู่ในของเหลวหรือแก๊สให้มาเกาะจับและติดบนผิวของตัวกลาง ปรากฏการณ์เช่นนี้จัดเป็นการเคลื่อนย้ายสาร (Mass transfer) จากของเหลวหรือแก๊สมายังผิวของของแข็ง ดังภาพที่ 2.6 ซึ่งประกอบด้วยโมเลกุลหรือมลสารที่ต้องการกำจัด (Adsorbate) และส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของโมเลกุลหรือมลสารที่ต้องการกำจัด เรียกว่าตัวดูดซับ (Adsorbent) โดยตัวอย่างของการดูดติดผิว เช่น การดูดติดผิวของโมเลกุลสีย้อม การดูดติดผิวของโลหะหนัก และการดูดติดผิวของแก๊สบนถ่านกัมมันต์ เป็นต้น



ภาพที่ 2.7 รูพรุนภายในของถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)
ที่มา: Gordon และ Russell (1974)

การดูดติดผิวมีขั้นตอนที่เกิดตามเวลา แบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้ (มั่นสิน ตัณฑุลเวศน์, 2539)

- การขนส่งทั้งก้อน (Bulk transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โดยเป็นการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของแก๊สหรือสารที่ต้องการกำจัดเข้าหาตัวดูดซับ
- การแพร่ภายในรูพรุน (Pore diffusion) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลของแก๊สหรือสารที่ต้องการจะกำจัด เคลื่อนที่แพร่ผ่านชั้นฟิล์มที่ล้อมรอบผิวของตัวดูดซับอยู่ เพื่อผ่านเข้าไปยังรูพรุนภายในของตัวดูดซับ
- การเกาะติด (Attachment) ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนสุดท้ายที่โมเลกุลของแก๊สหรือสารที่ต้องการจะกำจัด ถูกดูดติดอยู่ในรูพรุนของตัวดูดซับนั้นๆ

2.3.1 ประเภทของตัวดูดซับ (Adsorbent) (เพ็ญลักษณ์ เทศสุวรรณ, 2547)

ตัวดูดซับแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ

2.3.1.1 สารอนินทรีย์ (Inorganic Adsorbent)

ตัวอย่างของตัวดูดซับประเภทนี้ เช่น ดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียม-ออกไซด์ ถ่านกระดูก และแอคติเวทเต็ดซิลิกา เป็นต้น ซึ่งตัวดูดซับประเภทนี้มักมีพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ในช่วงประมาณ 50-200 ตารางเมตรต่อกรัม แต่ตัวดูดซับสังเคราะห์นั้นอาจมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง โดยตัวดูดซับแบบสารอนินทรีย์นี้มีข้อเสีย คือ สามารถดูดซับโมเลกุลของสารได้น้อย ทำให้สามารถใช้ประโยชน์จากตัวดูดซับได้จำกัด

2.3.1.2 ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon)

ตัวดูดซับประเภทนี้อาจจัดว่าเป็นสารอนินทรีย์สังเคราะห์ก็ได้ แต่เป็นสารดูดติดผิวที่ดีกว่าสารอนินทรีย์ชนิดอื่นๆ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 600-1,000 ตารางเมตรต่อกรัม โดยถ่านกัมมันต์นั้นแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทหลักๆ คือ (สุพจน์ สมภพ, 2549)

1. ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (Powder Activated Carbon, PAC)

ตามมาตรฐานของสำนักผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม พ.ศ. 2532 ถ่านกัมมันต์ชนิดผงหมายถึง ปริมาณถ่านที่สามารถกร่อนผ่านตะแกรงขนาด 150 ไมโครเมตร ไม่น้อยกว่าร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก หรือมีเส้นผ่านศูนย์กลางของผงเล็กกว่า 0.21 มิลลิเมตร (70 เมช) ใช้สำหรับฟอกสีในของเหลวและดูดกลิ่นในสารละลายได้หลายชนิด

2. ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด (Granular Activated Carbon, GAC)

ตามมาตรฐานของสำนักผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม พ.ศ. 2532 ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด หมายถึง ปริมาณถ่านที่สามารถผ่านตระแกรงขนาด 150 ไมโครเมตร ไม่น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก หรือมีเส้นผ่านศูนย์กลางของเกล็ดอยู่ในช่วง 0.2-5.0 มิลลิเมตร ใช้สำหรับทำแก๊สให้บริสุทธิ์หรือการทำให้ตัวทำละลายที่ใช้แล้วบริสุทธิ์

2.3.1.3 สารอินทรีย์สังเคราะห์ (Synthesis Organic Resin)

ตัวอย่าง เช่น สารเรซินแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange resin) ที่สังเคราะห์ขึ้นมา เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ โดยสารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300-500 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งถือว่าต่ำเมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์ แต่อย่างไรก็ตามเรซินแลกเปลี่ยนไอออนมีข้อได้เปรียบกว่า คือ สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ (Regeneration) โดยใช้สารเคมีที่มีราคาถูก เช่น เกลือแกง (NaCl) เป็นต้น

2.3.2 กลไกในการดูดติดผิว (Adsorption Mechanism)

ประกอบด้วยกลไกหลักสองกลไกคือ การดูดติดผิวทางกายภาพ (Physisorption) และการดูดติดผิวทางเคมี (Chemisorption) โดยแต่ละกลไกมีข้อแตกต่าง ดังแสดงในตารางที่ 2.6

2.3.2.1 การดูดติดผิวทางกายภาพ (Physisorption)

การดูดซับประเภทนี้เกิดจากความแตกต่างของพลังงาน หรือ แรงดึงดูดทางไฟฟ้า (Electrical attractive force) ซึ่งเรียกว่าแรงแวนเดอร์วาลล์ (Van der waal’s force) ที่เป็นแรงดึงดูดทางไฟฟ้าอ่อนๆ โดยจะเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของมลสารที่จะกำจัดถูกทำให้เกาะติดแน่นอยู่กับโมเลกุลของตัวดูดซับ การดูดติดผิวทางกายภาพนี้เป็นการดูดติดผิวที่เกิดขึ้นหลายชั้น (Multilayer) ซ้อนทับกัน และเป็นปฏิกิริยาที่สามารถผันกลับได้ (Reversible)

2.3.2.2 การดูดติดผิวทางเคมี (Chemisorption)

การดูดติดผิวประเภทนี้ จะเป็นการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างมลสารที่ต้องการกำจัดกับตัวดูดซับแล้วเกิดสารประกอบเคมีชนิดใหม่ขึ้นที่ผิวสัมผัสของตัวดูดซับ โดยส่วนใหญ่จะเป็นการดึงดูดกันด้วยพันธะโควาเลนท์ การดูดติดผิวทางเคมีนี้จะเกิดการดูดติดผิวเพียงชั้นเดียว (Monolayer) และไม่สามารถผันกลับได้ (Irreversible)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 2.6 ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี

ตัวแปร	การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
ค่าความร้อนของการดูดซับ	น้อยกว่า 20 กิโลจูลต่อโมล	50-400 กิโลจูลต่อโมล
อุณหภูมิที่เกิดการดูดซับ	ต่ำ	สูง
แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล	แรงแวนเดอวาลส์	พันธะเคมี
การผันกลับของปฏิกิริยา	ผันกลับได้	ส่วนใหญ่ไม่ผันกลับ
การดูดซับของแก๊สบนตัวดูดซับ	เกิดได้เกือบทุกชนิด	เกิดเฉพาะบางระบบ
พลังงานก่อกัมมันต์	ไม่เกี่ยวข้อง	เกี่ยวข้อง
รูปแบบชั้นของการดูดซับ	ชั้นเดียวและหลายชั้น	ชั้นเดียว

ที่มา: เพ็ญลักษณ์ เทศสุวรรณ (2547)

2.3.3 หลักการการดูดซับของตัวดูดซับ (จตุพล ขุนพลกรัง, 2555)

หลักการในการดูดซับด้วยตัวดูดซับประกอบด้วยสองหลักการ ได้แก่ การดูดซับโดยใช้หลักการสมดุล และการดูดซับโดยใชหลักการจลน์ศาสตร์ ได้นี้

2.3.3.1 หลักการดูดซับโดยอาศัยหลักการสมดุล

ตัวดูดซับจะมีความสามารถในการดูดซับโมเลกุลของแก๊สชนิดต่างๆ ได้มากน้อยไม่เท่ากัน โมเลกุลของแก๊สที่ถูกดูดซับได้น้อยเป็นผลิตภัณฑ์ราฟฟิเนต ส่วนโมเลกุลของแก๊สที่ถูกดูดซับได้มากเป็นผลิตภัณฑ์เอกซ์แทรค ซึ่งตัวดูดซับที่ใช้หลักการสมดุลยังสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ ตัวดูดซับที่มีขั้วและตัวดูดซับที่ไม่มีขั้ว ตัวอย่างของตัวดูดซับที่มีขั้วสูง เช่น ซีโอไลต์และแอคติแวคอลูมิน่า ที่สามารถดูดซับน้ำซึ่งเป็นโมเลกุลที่มีขั้วได้ดี ในขณะที่ตัวดูดซับที่ไม่มีขั้ว เช่น ถ่านกัมมันต์และคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟจะดูดซับสารที่ไม่มีขั้วได้ดีกว่า

2.3.3.2 หลักการดูดซับโดยอาศัยหลักการจลน์ศาสตร์

โมเลกุลของแก๊สต่างๆ จะมีความเร็วในการแพร่เข้าไปในโพรงรูพรุนของวัสดุดูดซับได้ไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับขนาด รูปร่าง และโครงสร้างของโมเลกุล โดยโมเลกุลของแก๊สที่แพร่ได้ช้ากว่าจะเป็นผลิตภัณฑ์ราฟฟิเนต ส่วนโมเลกุลของแก๊สที่แพร่ได้เร็วกว่าจะเป็นผลิตภัณฑ์เอกซ์เทรค ซึ่งความสามารถในการแพร่ที่แตกต่างกันนี้มาจากปัจจัยด้านการกระจายตัวของขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ โดยขนาดรูพรุนของตัวดูดซับแบ่งออกเป็น รูพรุนขนาดเล็ก (Micropore) รูพรุนขนาดกลาง (Mesopore) และรูพรุนขนาดใหญ่ (Macropore) แสดงในตารางที่ 2.7 ซึ่งตัวดูดซับที่อาศัยหลักการดูดซับทางจลน์ศาสตร์ ได้แก่ คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟและซีโอไลต์ที่มีรูพรุนขนาดเล็ก เป็นต้น

2.3.4 การดูดติดผิวด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) (รุจิรา ปิ่นแก้ว, 2556)

ถ่านกัมมันต์ คือ วัตถุที่มีพื้นที่ผิวภายในและมีความพรุนสูง โดยเป็นการนำวัตถุดิบธรรมชาติที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบมาผ่านกระบวนการก่อกัมมันต์ ซึ่งทำให้วัตถุดิบนั้นมีโครงสร้างรูพรุนและมีพื้นที่ผิวภายในสูง โดยหากพิจารณาที่พื้นที่หน้าตัดของถ่านกัมมันต์จะมีลักษณะคล้ายรังผึ้ง โดยถ่านกัมมันต์จะมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักประมาณร้อยละ 87-90 และมีธาตุอื่นที่เป็นองค์ประกอบ คือ ไฮโดรเจน ออกซิเจน ซัลเฟอร์ และไนโตรเจน เป็นต้น โดยจะมีปริมาณมากน้อยเท่าใดนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณที่มีในวัตถุดิบและอาจเปลี่ยนแปลงได้อีกในขั้นตอนการผลิต ดังนั้นถ่านกัมมันต์จึงมีความสามารถในการดูดซับสารเคมีจากแก๊สและของเหลวได้ในปริมาณสูง ซึ่งถ่านกัมมันต์นั้นสามารถใช้ประโยชน์ได้หลายด้าน โดยอาจใช้ในกระบวนการทำสารเคมีให้บริสุทธิ์หรือในกระบวนการนำสารเคมีกลับมาใช้ใหม่ นอกจากนั้นถ่านกัมมันต์สามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาหรือตัวรองรับของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ จากคุณสมบัติที่เหมาะสมและมีราคาถูกทำให้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับที่นิยมใช้กันมาก ซึ่งถ่านกัมมันต์เป็นถ่านที่อยู่ในรูปคาร์บอนอสัณฐาน (Amorphous carbon) และถูกผลิตขึ้นโดยกระบวนการก่อกัมมันต์ (Activation) ซึ่งทำให้พื้นที่ผิวใน (Internal surface area) เพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากโครงสร้างที่เป็นรูพรุนจำนวนมาก จากคุณสมบัติเหล่านี้จึงทำให้ถ่านกัมมันต์แตกต่างกว่าถ่านชนิดอื่นๆ เช่น ถ่านลิกไนต์ ถ่านโค้ก ถ่านไม้ หรือถ่านแกรไฟต์ เป็นต้น ถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับสูง อันเนื่องมาจากพื้นที่ผิวมากและมีความสามารถในการดูดซับสูงโดยผิวโครงสร้างเป็นแบบรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก

2.3.4.1 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ (สุพจน์ สมภพ, 2549)

กระบวนการในการผลิตถ่านกัมมันต์นั้น อาจเรียกว่า กรรมวิธีก่อกัมมันต์ (Activation process) โดยทั่วไปแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอน คือ

1. กระบวนการไล่ความชื้นออกจากวัตถุดิบ (Dehydration)

โดยการอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 27-197 องศาเซลเซียส

2. กระบวนการคาร์บอนไนซ์ (Carbonization))

กระบวนการคาร์บอนไนซ์เซชั่น ถือว่าเป็นการไพโรไลซิส รูปแบบหนึ่งที่จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ในรูปของถ่านชาร์ (Char) ที่อยู่ในสถานะของแข็ง มากกว่าของเหลวที่เป็นน้ำมันทาร์ (Tar) และแก๊ส ซึ่งกระบวนการคาร์บอนไนซ์เป็นการเพิ่มปริมาณสัดส่วนของคาร์บอนให้สูงขึ้น โดยสามารถดำเนินการได้โดยให้ความร้อนหรือเผาในที่อับอากาศ (Pyrolysis) ที่อุณหภูมิประมาณ 200-500 องศาเซลเซียส ซึ่งกระบวนการคาร์บอนไนซ์เซชั่นเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในกระบวนผลิตถ่านกัมมันต์ เพราะเป็นขั้นตอนแรกเริ่มของการสร้างรูพรุน โดยทำให้เกิดการแตกตัวทาง

เคมีของสารที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน ไฮโดรเจน และอื่นๆ ให้ออกมาให้รูปของแก๊ส ซึ่งคาร์บอนอิสระที่มีอยู่ในตัวอย่างที่เผาจะรวมตัวกันอยู่ในรูปของถ่าน โดยถ่านชาร์ที่ได้หลังผ่านกระบวนการเผาแบบอับอากาศควรมีลักษณะดังต่อไปนี้

- ไม่มีฝุ่นผงและขี้เถ้า (Dust หรือ Ash)
- มีสีดำมันเงาตลอด (Uniformly black)
- เมื่อหักถ่านออก ปลายที่หักจะแหลมและผิวเป็นมันเงา

3. **กระบวนการกระตุ้น (Activation)** (เพ็ญลักษณ์ เทศสุวรรณ, 2547)

การกระตุ้นหรือการปรับสภาวะ คือ การทำให้ตัวดูดซับมีความสามารถในการดูดซับโมเลกุลของสารเพิ่มขึ้น อาจเนื่องจากการเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะและการทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะมีความสามารถในการดูดซับมีมากขึ้น โดยกระบวนการกระตุ้นนั้นมีความหมาย ดังต่อไปนี้

- เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับ โดยจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีทำให้โมเลกุลของสารบางชนิดหลุดออกไป และเกิดส่วนที่มีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้นมาแทนบนพื้นผิวของตัวดูดซับ
- เป็นการเพิ่มความว่องไวในการดูดซับให้พื้นผิวของตัวดูดซับ ซึ่งหมายถึงการทำให้อะตอมของคาร์บอนมีพลังงานศักย์สูงขึ้นและปรับเปลี่ยนโครงสร้างใหม่ให้มีความว่องไวในการดูดซับเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังกำจัดอินทรียวัตถุหรืออนินทรียวัตถุต่างๆ ซึ่งเป็นสารปนเปื้อนออกจากบริเวณที่ทำหน้าที่ในการดูดซับ

วิธีการกระตุ้นตัวดูดซับนั้นมีหลายวิธี ซึ่งประสิทธิภาพที่ได้จะขึ้นอยู่กับลักษณะและชนิดของวัสดุตั้งต้น รวมถึงวิธีการต่างๆ ในกระบวนการกระตุ้นด้วย โดยการกระตุ้นตัวดูดซับสามารถแบ่งตามกลไกที่เกิดขึ้นได้ 2 ประเภท ได้แก่

- **วิธีการกระตุ้นทางเคมี**

เป็นการผลิตตัวดูดซับโดยให้สารกระตุ้นทำปฏิกิริยาเคมีกับผิวคาร์บอนโดยใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งสารเคมีที่ถูกใช้ในกระบวนการ ได้แก่ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) เฟอริคคลอไรด์ ($FeCl_3$) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) กรดไนตริก (HNO_3) และกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) เป็นต้น ข้อดีของวิธีนี้ คือ ใช้อุณหภูมิในกระบวนการกระตุ้นไม่สูงเท่าการกระตุ้นทางกายภาพ แต่ตัวดูดซับมีสารเคมีตกค้างทำให้ต้องเสียเวลาและค่าใช้จ่ายในการล้างออก รวมทั้งเครื่องมือที่ใช้ต้องเป็นชนิดพิเศษที่สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ เพราะสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการกระตุ้นบางประเภทมีสมบัติกัดกร่อนเครื่องมือ

- **วิธีการกระตุ้นทางกายภาพ**

เป็นการผลิตตัวดูดซับที่ผิวคาร์บอนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น มีการจัดเรียงตัวใหม่ ซึ่งจะเป็นการเพิ่มความสามารถในการดูดติดผิวให้มีมากขึ้น โดยนิยมใช้แก๊สออกซิไดซ์ ได้แก่ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สออกซิเจน และไอน้ำอิ่มตัวยิ่งยวด เป็นต้น ร่วมกับกระบวนการใช้ความร้อน ซึ่งการกระตุ้นประเภทนี้ใช้อุณหภูมิสูงถึง 1,200 องศาเซลเซียส และพบว่าตัวดูดซับที่ได้มีประสิทธิภาพในการดูดซับต่ำกว่าการกระตุ้นทางเคมี โดยข้อดีของการกระตุ้นด้วยวิธีนี้คือ ไม่มีสารเคมีตกค้าง จึงสามารถดำเนินการผลิตได้ง่ายและรวดเร็ว

2.3.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิว (ชาริณี ม่วงคลองใหม่, 2551)

2.3.5.1 ลักษณะของตัวดูดซับ (Nature of Adsorbate)

เมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายมีค่าต่ำลง ความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับก็จะสูงขึ้น เนื่องจากในการดูดซับนั้น โมเลกุลของสิ่งที่ปนเปื้อนจะต้องถูกแยกออกจากเฟสของเหลวหรือแก๊ส ซึ่งโดยทั่วไปแล้วความสามารถในการละลายของสารประกอบอินทรีย์ในสารละลายจะลดลงเมื่อความยาวของโซ่โมเลกุลสารอินทรีย์มีความยาวเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ขนาดของโมเลกุลของตัวที่ถูกดูดซับ (Adsorbate) ก็มีผลต่ออัตราเร็วในการดูดซับเช่นเดียวกัน โดยขนาดของโมเลกุลของตัวที่ถูกดูดซับจะแปรผกผันกับอัตราเร็วในการดูดซับ

2.3.5.2 ขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ

ตัวดูดซับจะมีความสามารถในการดูดซับซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะ ซึ่งพื้นที่ผิวจำเพาะจะแปรผกผันกับขนาดของรูพรุน กล่าวคือ หากตัวดูดซับมีรูพรุนเฉลี่ยขนาดเล็กเป็นจำนวนมากก็จะทำให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่าตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ เพราะมีความพรุนมากกว่า (Plessis, 2008) โดยตัวดูดซับจะมีรูพรุนสามประเภทด้วยกัน ได้แก่ รูพรุนขนาดเล็ก (Micorpores) รูพรุนขนาดกลาง (Mesopores) และรูพรุนขนาดใหญ่ (Macropores) ซึ่งรูพรุนขนาดเล็กและขนาดกลางมีความสำคัญในการดูดซับมาก ในขณะที่รูพรุนขนาดใหญ่นั้นมีความสำคัญน้อยในกระบวนการดูดซับ เป็นเพียงทางส่งไปผ่านไปยังรูพรุนที่เล็กกว่า เนื่องจากรูพรุนขนาดใหญ่นั้นมีพื้นที่ผิวน้อยมากเมื่อเทียบกับรูพรุนชนิดอื่น ดังแสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 การแบ่งประเภทของรูพรุนในตัวดูดซับจากขนาดของรูพรุน

การแบ่งประเภท	**เส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน (นาโนเมตร)**	**ปริมาตรรูพรุน (ลบ.ซม./ก.)**	**พื้นที่ผิว (ตร.ม./ก.)**
รูพรุนขนาดเล็ก	น้อยกว่า 2.0	0.2–0.6	100.0
รูพรุนขนาดกลาง	2.0–50	0.1–0.5	20.0–100.0
รูพรุนขนาดใหญ่	มากกว่า 50.0	0.2–0.8	0.5

ที่มา: Sing (2009)

วิธีการที่ใช้ในการหาพื้นที่ของถ่านกัมมันต์มี 2 วิธีหลักๆ ที่มักวิเคราะห์ได้แก่

- การทดสอบการดูดซับไอโอดีน (Iodine Number)

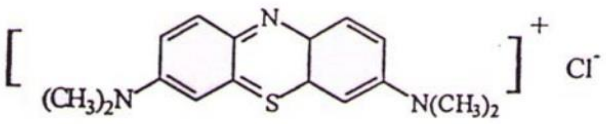
ใช้มาตรฐาน ASTM D4607-14 เป็นวิธีการทดสอบค่าการดูดซับซึ่งไอโอดีนนัมเบอร์เป็นค่าทดสอบที่สำคัญในการนำไปเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์จากท้องตลาด เนื่องจากสามารถดำเนินการได้เร็ว สามารถทำการทดสอบได้ทั้งกับถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดและชนิดผง ปกติถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดจะมีค่าการดูดซับไอโอดีนตั้งแต่ 500-1500 มิลลิกรัมต่อกรัม ก็สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ โดยไอโอดีนจะไปจับกับหมู่ฟังก์ชั่นที่เป็นพันธะแบบไม่อิ่มตัวบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) ดังนั้นค่าไอโอดีนนัมเบอร์จึงสามารถใช้ประมาณปริมาณพื้นที่ผิวเบื้องต้นในตัวอย่างได้ ซึ่งในบางกรณีที่พบว่าตัวอย่างที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากแต่มีไอโอดีนนัมเบอร์ต่ำ อาจเนื่องด้วยตัวดูดซับนั้นมีรูพรุนขนาดเล็กกว่า 1 นาโนเมตรเป็นหลัก ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าโมเลกุลของไอโอดีน ทำให้การแพร่ของไอโอดีนเข้าไปยังรูพรุนทำได้ยากขึ้น (กรรณิกา มีนสิรินันท์, 2542)

- **การทดสอบหาพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (Specific Surface Area)**

ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะเป็นค่ามาตรฐานในการทดสอบถ่านกัมมันต์อีกค่าหนึ่ง เนื่องจากสามารถทดสอบเปรียบเทียบได้กับถ่านกัมมันต์ทุกชนิด ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสที่มีในการรายงานคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ส่วนใหญ่จะใช้วิธีของ Brunauer Emmett and Teller (BET) โดยใช้แก๊สไนโตรเจนเป็นแก๊สในการดูดซับที่อุณหภูมิ 77 เคลวิน ซึ่งใช้เครื่องมือทดสอบพื้นที่ผิวเป็นเครื่องวิเคราะห์ โดยตามทฤษฎีนั้นจะคำนวณค่าพื้นที่ผิวจำเพาะมาจากจำนวนโมเลกุลของไนโตรเจนที่จับเต็มพื้นที่ผิวของตัวดูดซับในชั้นเดียว (Monolayer) ซึ่งปกติถ่านกัมมันต์สามารถมีพื้นที่ผิวจำเพาะตั้งแต่ 600-2,500 ตารางเมตรต่อกรัม โดยตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะมาก จะมีความสามารถในการดูดซับสิ่งปนเปื้อนต่างๆ สูงไปด้วย เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างสารกับพื้นผิวของตัวดูดซับมาก

- การดูดซับเมทิลีนบลู (Methylene Blue Adsorption)

คาการดูดซับเมทิลีนบลู จะบอกความสามรถในการดูดซับของถานกัมมันตไดโดยสำหรับโมเลกุลที่ถูกดูดซับนั้น จะมีขนาดใกลเคียงกับโมเลกุลของเมทิลีนบลู ซึ่งจะมีคาอยูในชวงของรูพรุนขนาดกลางหรือเมโซพอร คือจะมีขนาดใหญกวา 1.5 นาโนเมตร เนื่องจากเมทิลีนบลูมีขนาดรัศมีโมเลกุลเทากับ 1.6 นาโนเมตรอโดยค่าเมทิลีนบลูจะแสดงในหน่วยน้ำหนักของเมทิลีนบลูต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ (กรัม/100 กรัม) ซึ่งโครงสรางของโมเลกุลเมทิลีนบลู แสดงดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 โครงสรางทางเคมีของเมทธิลีนบลู
ที่มา Jankowska และคณะ (1991)

- โมลาสนัมเบอร์ (Molass Number)

เป็นค่าที่บอกถึงปริมาณของรูขนาดใหญ่ (Macropore) ซึ่งเป็นรูพรุนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 20 อังสตอม หรือมากกว่า 2 นาโนเมตร ที่มีอยู่ในถ่านกัมมันต์ โดยถ่านที่มีรูพรุนขนาดใหญ่จำนวนมาก (ค่าโมลาสนัมเบอร์สูง) จะสามารถดูดซับสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่อย่างโมเลกุลสี เช่น สีย้อมผ้า ได้ดีกว่าถ่านที่มีรูพรุนเล็ก (ค่าโมลาสนัมเบอร์ต่ำ)

2.3.5.3 อุณหภูมิ (Temperature)

กระบวนการดูดซับเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน (Exothermic) ซึ่งพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อัตราเร็วในการดูดซับจะสูงขึ้นแต่ความสามารถในการดูดซับจะลดลง ในทางตรงกันข้าม ถ้าอุณหภูมิลดลงอัตราเร็วในการดูดซับจะลดลงแต่ความสามารถในการดูดซับจะสูงขึ้น

2.5.5.4 ความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของพื้นผิวตัวดูดซับเป็นปัจจัยที่สำคัญของการดูดซับ เนื่องจากจะทำให้ไฮโดรเจนไอออนและไฮดรอกซิลไอออนสามารถดูดติดผิวได้อย่างแข็งแรง และความเป็นกรด-ด่างยังสามารถทำให้หมู่ฟังก์ชั่นที่พื้นผิวของตัวดูดซับมีความแตกต่างกัน โดยหมู่ฟังก์ชั่นบนพื้นผิวของตัวดูดซับจะมีความสามารถในการดูดซับมวลสารต่างๆ ที่แตกต่างกันอีกด้วย

2.3.5.5 ความปั่นป่วน (Mixing Speed)

อัตราเร็วในกระบวนการดูดซับของตัวดูดซับนั้นขึ้นอยู่กับการขนส่งโมเลกุล ซึ่งเป็นขั้นตอนที่สำคัญ ที่จะจำกัดอัตราเร็วในกระบวนการดูดซับของตัวดูดซับ โดยประกอบด้วยกลไก การแพร่ผ่านชั้นฟิล์มที่ผิวของตัวดูดซับ (Film Diffusion) และกลไกการแพร่เข้าโพรงรูพรุน (Pore Diffusion) ซึ่งระบบที่มีความปั่นป่วนต่ำนั้น ชั้นฟิล์มที่อยู่ล้อมรอบอยู่ที่ผิวตัวดูดซับจะมีความหนามาก และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปยังภายในรูพรุนของตัวดูดซับ ในกรณีนี้ การแพร่ผ่านฟิล์มของตัวดูดซับจะเป็นกลไกในการกำหนดอัตราเร็วการดูดซับ ในทางตรงกันข้าม ถ้าความปั่นป่วนของระบบสูง ความหนาของชั้นฟิล์มที่ผิวตัวดูดซับจะลดลงทำให้โมเลกุลที่ต้องการดูดซับเคลื่อนที่เข้าหาตัวดูดซับได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้นการแพร่เข้าโพรงรูพรุนจะเป็นกลไกกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

2.3.5.6 เวลาสัมผัส (Contact Time หรือ Detention Time)

เวลาสัมผัสเป็นปัจจัยที่มีผลมาก ต่อประสิทธิภาพในการดูดซับภายในคอลัมน์ดูดซับ โดยระยะเวลาสัมผัสที่ใช้จะต้องเหมาะสมที่จะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดดีที่สุด ทั้งนี้ขึ้นกับชนิดของตัวดูดซับ ซึ่งหากใช้ระยะว่าสัมผัสที่สูงจนเกินไป อาจจะทำให้สารปนเปื้อนหลุดออกจากคอลัมน์ดูดซับได้ โดยการที่จะทราบระยะเวลาที่เหมาะสมนั้นต้องทำการศึกษาในระดับปฏิบัติการก่อนนำไปใช้งานจริง

2.3.6 สมดุลและไอโซเทอมของการดูดซับ (Equilibrium and Isotherms Adsorption)

กระบวนการดูดซับเกิดขึ้นจากตัวถูกละลายเคลื่อนที่ออกจากสารละลาย และถูกดูดซับไว้ที่พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ โดยเป็นสภาวะสมดุลทางพลศาสตร์ระหว่างความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายกับความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ผิวหน้าของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล ซึ่งจะมีค่าเป็นปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับไว้บนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับหนึ่งหน่วยน้ำหนัก ที่ความดัน 760 มิลลิเมตรปรอท (mmHg) และอุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส โดยสามารถแสดงได้ด้วยการสร้างกราฟระหว่างปริมาตรของตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับไว้ หรือปริมาณความเข้มข้น เปรียบเทียบกับความดันย่อย (Partial pressure) ซึ่งความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่อุณหภูมิคงที่นั้น เรียกว่า กราฟไอโซเทอมของการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ (Adsorption Isotherms)

2.3.6.1 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherms)

สมมติฐานพื้นฐานของไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงก์เมียร์ คือ

1. เป็นการดูดซับติดผิวแบบชั้นเดียว (Monolayer)

2. โมเลกุลถูกดูดติดอยู่ที่บริเวณที่แน่นอนบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

3. พลังงานการดูดซับแต่ละบริเวณมีค่าเท่ากันเสมอ

4. พื้นที่ของบริเวณที่ดูดติดผิวมีจำนวนที่แน่นอนซึ่งถูกกำหนดโดยลักษณะของพื้นผิว

โดยสมการของแลงก์เมียร์ แสดงได้ดังสมการที่ 2.1

$$1/X = (1/X_m) + (1/C)(1/bX_m) \qquad \text{............... (2.1)}$$

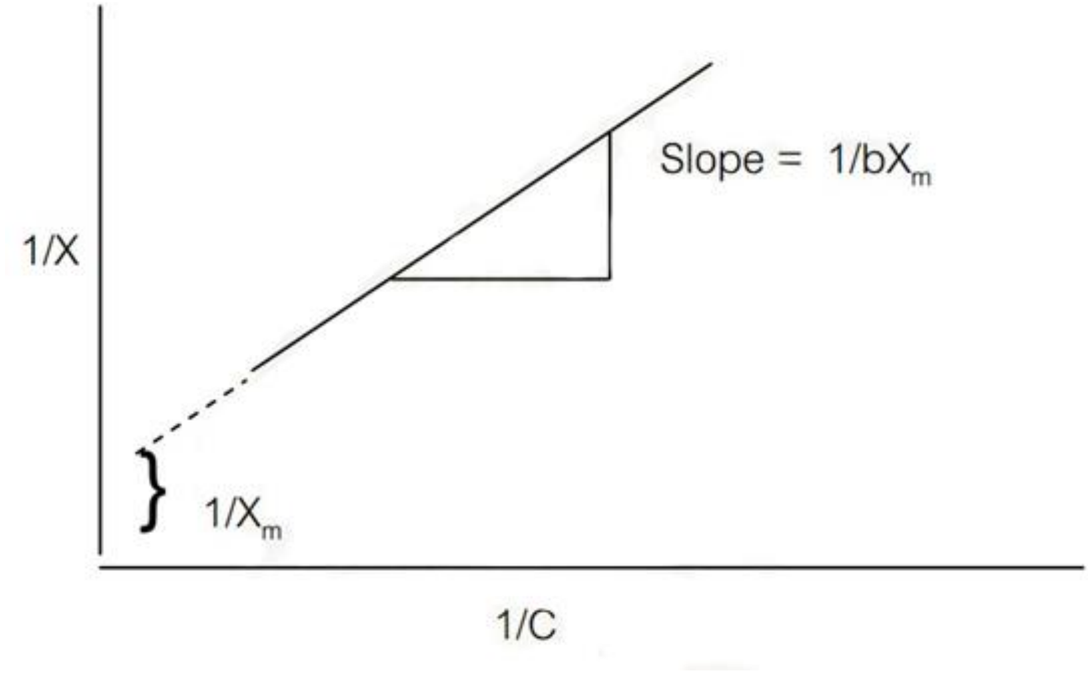
เมื่อ X คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ (โมลต่อกรัม หรือ มิลลิกรัมต่อกรัม)

C คือ ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในตัวดูดซับ (โมลต่อกรัม หรือ มิลลิกรัมต่อกรัม)

b คือ ค่าคงที่ในกระบวนดูดซับ

X_m คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม หรือโมลต่อกรัม)

ซึ่งเมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง 1/C และ 1/X จะได้กราฟที่เป็นเส้นตรง โดยมีจุดตัดแกน y เท่ากับ $1/X_m$ และความชันของกราฟ เท่ากับ $1/bX_m$ ดังแสดงในภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์สำหรับสมการของแลงก์เมียร์

ที่มา: Richard (1996)

2.3.6.2 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช (Freundlich Adsorption Isotherms)

ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช นิยมใช้กันแพร่หลายในการอธิบายการดูดซับในระบบของเหลว ซึ่งมีสมการแสดงได้ดังสมการที่ 2.2

$$\log(X/m) = \log K + 1/n \log C \qquad .... (2.2)$$

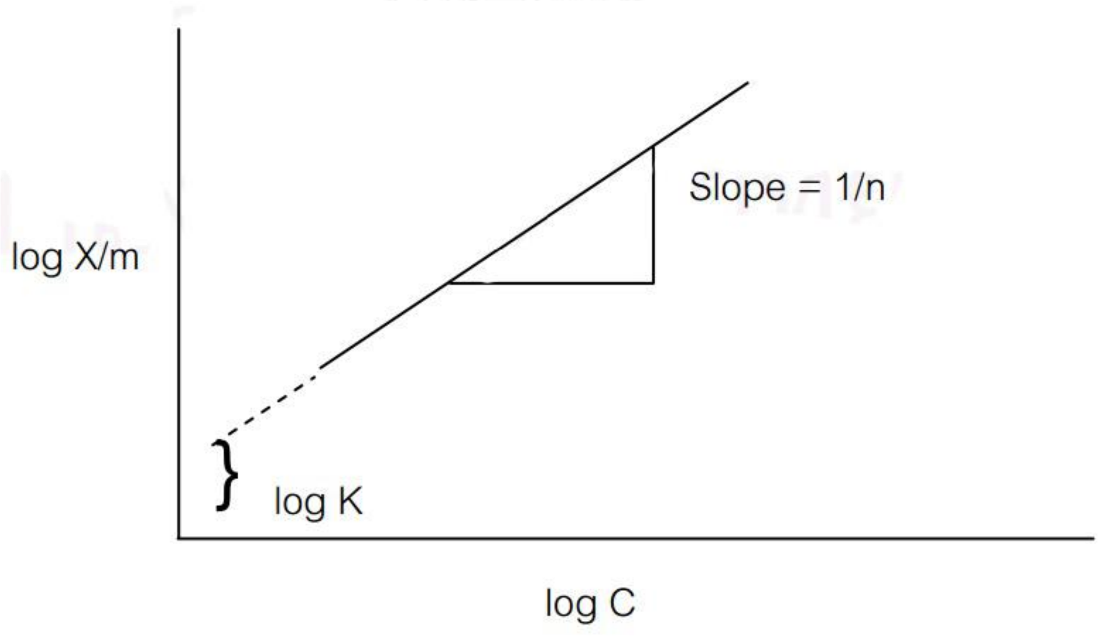
เมื่อ X คือ ปริมาณของตัวที่ถูกดูดซับในตัวดูดซับ (โมล หรือ มิลลิกรัม)

m คือ น้ำหนักของตัวดูดซับ (กรัม)

C คือ ความเข้มข้นของตัวที่ถูกดูดซับในตัวดูดซับ (โมลต่อลิตร หรือ มิลลิกรัมต่อลิตร)

1/n และ K คือ ค่าคงที่ในกระบวนการดูดซับ

เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง log C กับ log X/m จะได้กราฟเส้นตรง ที่มีจุดตัดแกน y เท่ากับ log K และความชัน เท่ากับ 1/n แสดงได้ดังภาพ 2.10



ภาพที่ 2.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์สำหรับสมการของฟรุนดลิช

ที่มา: Richard (1996)

2.3.7 แรงที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับ (Adsorption Force) (รุจิรา ปิ่นแก้ว, 2556)

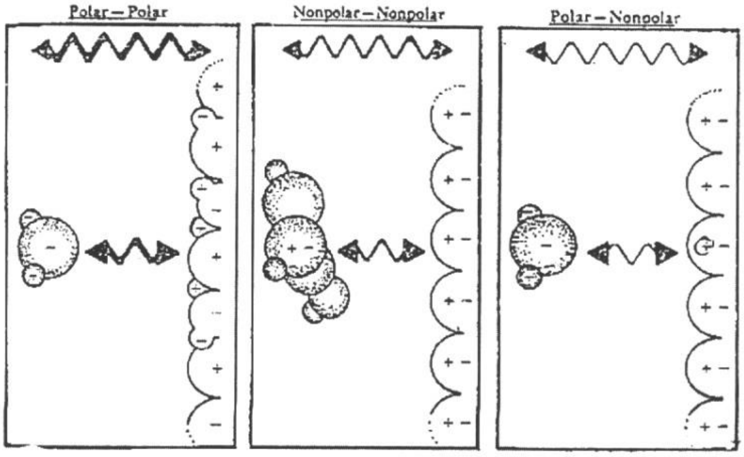
ในการดูดซับตัวของโมเลกุลต่างๆ บนตัวดูดซับจะเกิดการดูดซับด้วยแรงทางกายภาพ (Physical force) และแรงทางเคมี (Chemical force) ซึ่งแรงทางกายภาพนั้น ได้แก่ แรงวานเดอร์วาลล์ (Van der waal's force) หรือแรงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic force) บริเวณผิวรอบนอกของตัวดูดซับ ส่วนแรงทางเคมีนั้นเป็นผลเนื่องจากการปฏิสัมพันธ์ (Interaction) ในช่วงเวลาสั้นๆ รวมถึงการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนบริเวณพื้นผิวด้านใน ซึ่งจะเกิดกลไกต่างๆ ได้แก่ การแลกเปลี่ยนลิแกนด์ (Ligand exchange) พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) หรือพันธะโควาเลนท์ (Covalent bond)

1. แรงวานเดอร์วาลล์ (Van Der Waal's Force)

โดยโมเลกุลที่ไม่มีสภาพขั้วหรืออะตอมที่อยู่อย่างอิสระ อาจสามารถเกิดแรงดึงดูดกันอย่างอ่อนๆ ได้ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในอะตอมอย่างไม่เป็นระเบียบ โมเลกุลนั้นๆ ทำให้ความหนาแน่นของกลุ่มอิเล็กตรอนภายในแต่ละบริเวณของอะตอมหรือโมเลกุลมีไม่เท่ากัน จึงส่งผลทำให้เกิดสภาพขั้วชั่วคราวขึ้นและสามารถถูกดูดซับโดยตัวดูดซับได้ ซึ่งการดูดซับประเภทนี้มีพลังงานในการดูดซับต่ำ จึงเป็นการดูดติดกันด้วยแรงอ่อนๆ ดังนั้น การคายซับ (Desorption) จะสามารถกระทำได้ง่าย จึงถือว่าเป็นข้อดี เพราะสามารถฟื้นฟูตัวดูดซับได้ง่าย

2. แรงทางไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Force)

แรงทางไฟฟ้าสถิตย์ ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ที่สำคัญ ได้แก่ การจัดเรียงตัวของโมเลกุล การเหนี่ยวนำไฟฟ้า และการแพร่ (Dispersion) ดังแสดงในภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.11 การเกิดแรงทางไฟฟ้าสถิตในการดูดซับ

ที่มา: Brown และคณะ (2007)

แรงดึงดูดที่เกิดจากการจัดเรียงตัวของโมเลกุล เป็นการดูดซับระหว่างโมเลกุลที่มีขั้ว โดยเกิดจากการจัดเรียงโมเลกุล (Orientation effect) ที่มีขั้ว 2 โมเลกุล คือ โมเลกุลที่มีขั้วบวกและโมเลกุลที่มีขั้วลบ จึงทำให้เกิดการดูดซับระหว่างโมเลกุลที่มีประจุตรงข้ามกัน

หากอิเล็กตรอนในโมเลกุลกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ จะเป็นการดูดซับระหว่างโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว (Non-polar molecule) ที่เกิดจากผลของการกระจายตัว (Dispersion effect) ซึ่งเป็นผลจากการที่โมเลกุลไม่มีขั้วสามารถเปลี่ยนเป็นโมเลกุลที่มีขั้วชั่วคราวได้ เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปอยู่ด้านใดด้านหนึ่งมาก และเมื่อมีโมเลกุลที่ไม่มีขั้วที่มีลักษณะเช่นเดียวกันเข้ามาก็จะเกิดแรงดึงดูดซึ่งกันและกัน ซึ่งเป็นแรงที่อ่อน เช่น สารอินทรีย์และถ่านกัมมันต์ ทั้งนี้เนื่องจากสารอินทรีย์ส่วนใหญ่นั้นเป็นโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว

สำหรับแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำ เป็นการดูดซับระหว่างโมเลกุลที่ขั้วและไม่มีขั้ว เนื่องมาจากการเหนี่ยวนำ (Induction effect) โดยโมเลกุลที่มีขั้วเข้ามาอยู่ใกล้โมเลกุลที่ไม่มีขั้วแล้วเหนี่ยวนำให้เกิดประจุที่ตรงกันข้าม ซึ่งจะทำให้เกิดการดึงดูดซึ่งกันและกัน

3. แรงกระทำทางเคมี (Chemical Force)

แรงทางเคมีเป็นการยึดเหนี่ยวกันระหว่างไอออนกับตัวดูดซับ อาจเกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน โดยการที่โลหะหนักสามารถดูดซับไว้ที่ผิวของตัวดูดซับต่างๆ เช่น คอลลอยด์ดินนั้น เนื่องมาจากโลหะหนักเป็นธาตุทรานซิชันที่สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับหมู่ฟังก์ชัน (Functional group) ที่ผิวของตัวดูดซับได้ โดยแรงทางเคมีมีลักษณะดังนี้

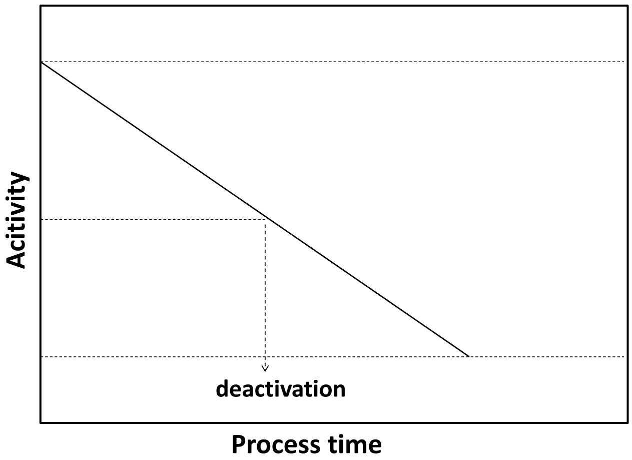
- เป็นพันธะเคมีที่เกิดจากการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน ให้อิเล็กตรอน หรือเกิดจากการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน โดยมีผลทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวมากกว่าแรงทางฟิสิกส์
- ไม่สามารถเปลี่ยนกลับไปกลับมาได้ (Irreversible) เพราะยึดเหนี่ยวด้วยแรงที่มากและมีการจับกันเป็นสารประกอบเคมี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.3.8 การเสื่อมสภาพของตัวดูดซับ (Deactivation of Absorbent)

อนุภาคตัวดูดซับจะถูกออกแบบมาจำเพาะกับการดูดซับ แต่เมื่อได้รับแรงกระแทกหรือแรงขัดสีที่เกิดขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์ อาจทำให้เกิดการหลุดออกขององค์ประกอบบางตัวของตัวดูดซับ ทำให้เกิดการสูญเสียคุณสมบัติเชิงกลของเม็ดอนุภาคนั้นๆ การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นมักเป็นสาเหตุสืบเนื่อง คืออาจเกิดการแตกหรือเกิดผงอนุภาคและนำไปสู่การอุดตันการไหล ซึ่งมีผลต่อการเพิ่มความดันในระบบหรือเกิดช่องการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งทำให้ระบบการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์เปลี่ยนรูปแบบไป นำไปสู่การสะสมความร้อนเฉพาะที่ ซึ่งเป็นผลร่วมของความร้อนและการเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยา (จตุพร วิทยาคุณ และ นุรักษ์ กฤษดารักษ์, 2547)

การเสื่อมสภาพของตัวดูดซับอาจมีผลมาจากหลายสาเหตุ เช่น เกิดจากผลเชิงกล (Mechanical) ผลเชิงความร้อน (Thermal) และผลเชิงเคมี (Chemical) ในทางปฏิบัตินั้นเป็นการยากที่จะแยกความแตกต่างของสาเหตุของการเสื่อมสภาพได้อย่างชัดเจน



ภาพที่ 2.12 ความสามารถในการทำงานของตัวดูดซับ
ที่มา: Richard (1996)

สำหรับกระบวนการดูดซับ จะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อสัมผัสกับสารถูกดูดซับที่เกิดขึ้นดังภาพที่ 2.11 เห็นได้ว่า ตัวดูดซับมีการสูญเสียความสามารถในการดูดซับ จนในที่สุดจะเข้าสู่สมดุลในระบบ เมื่อตัวดูดซับเกิดการเสื่อมสภาพ (Deactivation) ทำให้ความสามารถในการดูดซับหมดไป ซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากการอิ่มตัวหรือเกิดจากการเปลี่ยนสภาพ โดยการจะทำให้ตัวดูดซับกลับมาทำงานเหมือนเดิมต้องนำตัวดูดซับมาผ่านกระบวนการคืนสภาพ ซึ่งเป็นการเปลี่ยนรูปให้สารที่เสื่อมสภาพกลับมาอยู่ในสภาพที่สามารถดูดซับได้อีก

2.3.9 การปรับคืนสภาพของตัวดูดซับ (Regeneration of Adsorbent)

เมื่อตัวดูดซับถูกใช้งานเป็นระยะเวลานาน รูพรุนของตัวดูดซับจะถูกอุดตันด้วยโมเลกุลของสิ่งที่ถูกดูดซับ ทำให้หมดประสิทธิภาพในการดูดซับ เนื่องจากตัวดูดซับมีราคาสูง ดังนั้นเพื่อที่จะลดค่าใช้จ่ายในการกำจัด จะต้องนำตัวดูดซับที่หมดประสิทธิภาพ (Exhausted carbon) มาฟื้นฟูคุณภาพเพื่อนำกลับมาใช้งานได้อีก การฟื้นฟูคุณภาพทำได้โดยการนำตัวดูดซับไปกำจัดโมเลกุลของมลสารที่อุดอยู่ในรูพรุน ซึ่งอาจทำได้หลายวิธี เช่น วิธีทางเคมี โดยใช้สารอนินทรีย์เคมีทำการออกซิไดซ์มลสาร แต่วิธีนี้มีประสิทธิภาพน้อย มีอีกวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพดีกว่า ได้แก่ การนำตัวดูดซับไปเผาในเตา โดยควบคุมสภาวะการเผาไหม้โมเลกุลของสิ่งที่ถูกดูดซับ ให้ระเหยออกมาและ

ถูกเผาไหม้ไป ระบบการฟื้นฟูคุณภาพของตัวดูดซับจะประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังนี้ (เสริมพล รัตสุข และ ไชยยุทธ กลิ่นสุคนธ์, 2514)

ก. ถ่านกัมมันต์ที่หมดประสิทธิภาพแล้วจะรวมตัวกันเป็นน้ำข้น (Slurry) จะถูกสูบเข้ามาในระบบฟื้นฟูคุณภาพ

ข. ถ่านกัมมันต์จะถูกแยกออกจากน้ำแล้วจึงส่งเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิ 800-900 องศาเซลเซียส ควบคุมกระบวนการเผาไหม้ของสิ่งสกปรกในรูพรุนของถ่านให้ระเหยเป็นไอและถูกเผาสลายไป

ค. ถ่านกัมมันต์ที่ร้อนจัดจะถูกทำให้เย็นลง โดยการจุ่มลงในน้ำ

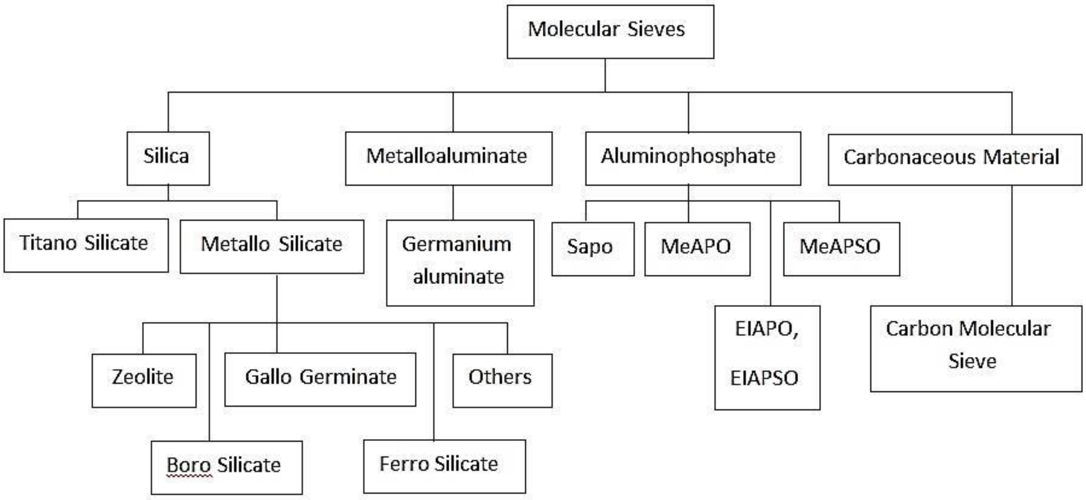
ง. ถ่านกัมมันต์ที่เย็นแล้วจะถูกนำกลับไปล้าง แยกเศษผงถ่านออกแล้วจึงสูบไปเก็บไว้หรือนำกลับไปใช้งาน ซึ่งกระบวนการฟื้นฟูคุณภาพนั้น จะใช้เวลาประมาณ 30 นาที และใช้พลังงานประมาณ 4,250 บีทียูต่อถ่านหนึ่งปอนด์ โดยจะมีถ่านจะสูญหายไปประมาณร้อยละ 2-10

2.4 คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟ (Carbon Molecular sieve, CMS)

โมเลกุลาร์ซีฟ (Molecular sieve, MS) หรือที่เรียกว่า ผลึกตะแกรงร่อนโมเลกุล โครงสร้างมีลักษณะเป็นรูพรุนที่ประกอบด้วยด้วยโพรง ช่องทาง และช่องเปิด โดยรูปร่างลักษณะและขนาดของโมเลกุลาร์ซีฟจะมีความแน่นอนตามแต่ชนิดของโมเลกุลาร์ซีฟนั้นๆ ซึ่งเป็นลักษณะพิเศษเฉพาะตัวที่เด่นชัดในการนำไปใช้ประโยชน์ เนื่องจากโมเลกุลาร์ซีฟมีสมบัติการเลือกทำปฏิกิริยาตามรูปร่างอันเป็นหลักการพื้นฐานของกระบวนการดูดซับโมเลกุล โดยโมเลกุลาร์ซีฟสามารถแบ่งออกได้หลายประเภทตามองค์ประกอบ อาทิเช่น ซิลิเกต อลูมิเนต โลหะซิลิเกต โลหะอลูมิเนต อลูมิโนฟอสเฟต โลหะอลูมิโนฟอสเฟต และคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟ ดังภาพที่ 2.12 ซึ่งโมเลกุลาร์ซีฟแต่ละชนิดมีความชอบน้ำ และความไม่ชอบน้ำแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับประจุที่อยู่ภายในโครงสร้าง ดังนั้นจึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการแยก หรือกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนได้ (Szotak, 1989)

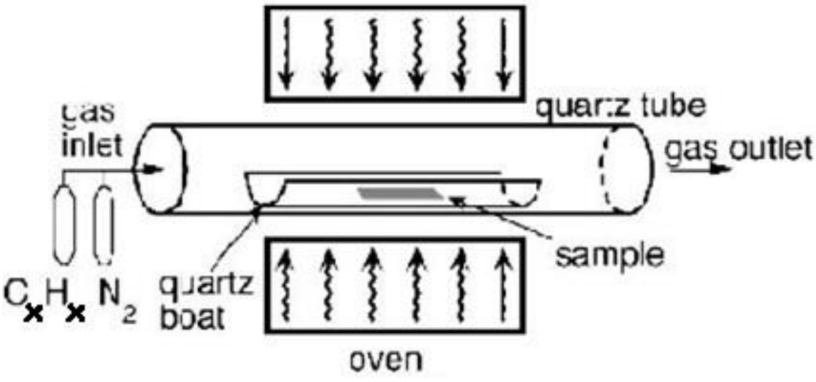
คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟ (Carbon molecular sieve) เป็นโมเลกุลาร์ซีฟชนิดหนึ่งที่ส่วนใหญ่มักจะถูกผลิตจากคาร์บอนซึ่งผลิตจากวัสดุเหลือทิ้งที่เป็นชีวมวล (Biomass) ได้แก่ เปลือกปาล์ม เปลือกมะพร้าว ไม้โอ๊ค เปลือกวอลนัท ไม้สน กะลามะพร้าว ซานอ้อย และกากกาแฟ เป็นต้น โดยทั่วไปมักเตรียมถ่านจากชีวมวลเพื่อผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดเล็ก โดยเพิ่มปริมาณรูพรุนขนาดเล็กได้ในกระบวนการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีทางเคมีหรือกายภาพ จากนั้นจึงนำมาผ่านกระบวนการเคลือบพื้นที่ผิวด้วยไอเคมีโดยเครื่องตกเคลือบด้วยไอเคมี (Chemical vapor deposition, CVD) ดังภาพที่ 2.13 หรือเอิบุชุ่มด้วยสารละลาย (Impregnated method) ซึ่งไอของคาร์บอนในกระบวนการเคลือบผิวถ่านกัมมันต์นั้น ได้จากแหล่งคาร์บอนต่างๆ ที่มีสถานะเป็นแก๊สได้แก่ เบนซีน มีเทน เมทิลเพนเทน และอะเซทิลีน เป็นต้น โดยการให้ความร้อนเพื่อแยก

โมเลกุลของแก๊สที่เป็นแหล่งคาร์บอนให้กลายเป็นอะตอมของคาร์บอนที่จะไปตกเคลือบยังพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ เพื่อเปลี่ยนแปลงรูปร่างและขนาดของรูพรุนของถ่านกัมมันต์ให้มีรูปร่างจำเพาะมากขึ้น (Mohamad Nor และคณะ, 2013) เพื่อให้เหมาะกับสภาพการนำไปใช้งาน ซึ่งข้อดีของคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟ คือ นอกจากจะมีความสามารถในการเลือกตัวดูดซับตามขนาดของตัวถูกดูดซับเช่นเดียวกับโมเลกุลาร์ซีฟประเภทอื่นๆ แล้ว คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟนั้นยังทนต่อความชื้น ความดัน และอุณหภูมิสูงได้มากกว่า คืนสภาพได้ง่าย อีกทั้งยังเป็นการนำชีวมวลที่ไม่ใช้แล้วมาใช้ให้เกิดประโยชน์อีกด้วย โดยมักมีการนำคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟนั้นมาใช้ในกระบวนการแยกแก๊สเพื่อทำให้แก๊สที่ต้องการมีความบริสุทธิ์มากขึ้น ได้แก่ ไนโตรเจน ออกซิเจน คาร์บอนไดออกไซด์ และมีเทน เป็นต้น (Adinata และคณะ, 2007)



ภาพที่ 2.13 ประเภทของโมเลกุลาร์ซีฟ

ที่มา: Szotak (1989)

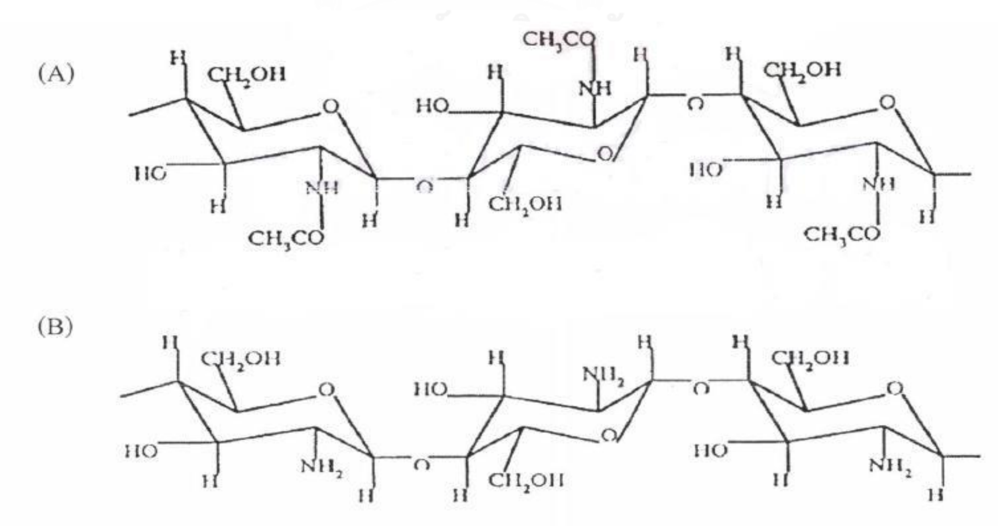


ภาพที่ 2.14 แผนภาพอุปกรณ์ที่ใช้ในการตกเคลือบด้วยไอเคมี (CVD)

ที่มา: Dupuis (2005)

2.5 ไคโตซาน (Chitosan) (Ravi Kumar, 2000)

สารไคโตซานเป็นอนุพันธ์ของไคติน ซึ่งประกอบด้วยส่วนที่แตกต่างกันของ (1,4)-linked-2-acetamido-2-deoxy-β-D-glucopyranose (GlcNAc) และ 2-amino-2-β-D-glucopyranose (GlcN) โดยได้มาจากการทำปฏิกิริยาดีอะซิทิเลชัน (Deacetylation) ซึ่งเป็นการดึงหมู่อะซิทิลออกจากโมเลกุลของไคตินในสภาวะที่เป็นด่างเข้มข้น ผลจากการเกิดปฏิกิริยาดีอะซิทิเลชันจะทำให้หมู่อะซิทิลออกจากโมเลกุลของไคตินในสภาวะที่เป็นด่างเข้มข้น และทำให้หมู่อะซิทาไมด์ที่คาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่สองในวงแหวนไพราโนสของไคตินถูกเปลี่ยนเป็นกรดอะมิโน ซึ่งจะได้สารตัวใหม่ที่เรียกว่าสารไคโตซาน ดังแสดงในภาพที่ 2.14 โดยการดึงหรือตัดหมู่อะซิทิลออกจากไคตินนั้น สามารถดึงออกได้เพียงบางส่วนหรือเกือบทั้งหมด ซึ่งจะทำให้สมบัติบางประการของไคตินนั้นเปลี่ยนไป โดยพบว่าเมื่อดึงหมู่อะซิทิลของไคตินออกเกินร้อยละ 50 ขึ้นไป จะทำให้ได้สารที่มีสมบัติในการละลายในกรดอินทรีย์อ่อนๆ เช่น กรดน้ำส้มสายชูและกรดแลคติก เป็นต้น นอกจากนี้ประจุบวกบนหมู่อะมิโนที่แตกตัวจะให้ประจุบวกได้มาก ดังนั้นสารไคโตซานจึงมีสมบัติเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ชนิดประจุบวก (Cationic electrolyte) ทำให้สารที่มีประจุลบสามารถเข้ามาเกาะกับประจุบวกของสารไคโตซาน ซึ่งมีสมบัติที่ต่างไปจากสารเริ่มต้นหรือไคติน ดังนั้นสารไคโตซานมีความสำคัญมากกว่าไคติน เนื่องจากสามารถละลายได้ง่ายในกรดอ่อน จึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในทางอุตสาหกรรมได้มากกว่า อีกทั้งสารไคโตซานยังเป็นสารธรรมชาติที่ปลอดภัยและสามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ



ภาพที่ 2.15 โครงสร้างทางเคมีของ (A) ไคติน และ (B) ไคโตซาน

ที่มา: Ravi Kumar (2000)

2.5.1 สมบัติของสารไคโตซาน (Muzzarelli, 1977)

คุณสมบัติที่สำคัญของสารไคโตซาน มีดังต่อไปนี้

2.5.1.1 สมบัติการเป็นประจุบวกของสารไคโตซาน (Cationic Properties)

- มีสมบัติเป็นพอลิเมอร์ที่สูง
- มีความหนาแน่นทางประจุสูง
- มีความสามารถในการจับกันเป็นกลุ่ม (Flocculant) ที่ดี
- สามารถยึดจับกับประจุลบด้วยประจุบวกที่ผิวได้ดี
- สามารถจับกับไอออนของโลหะหนักได้เป็นอย่างดี

2.5.1.2 สมบัติทางชีวภาพ (Biological Properties)

สารไคโตซานสามารถนำมาประยุกต์ใช้ทางชีวภาพได้มากมาย เนื่องจากสารไคโตซานเป็นพอลิเมอร์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ มีสมบัติที่ไม่เป็นพิษ และสามารถย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradable) ได้ โดยมีการนำสารไคโตซานมาใช้ในการช่วยรักษาบาดแผล สามารถลดระดับคลอเรสเตอรอลในเลือด (Blood cholesterol) กระตุ้นระบบภูมิคุ้มกัน และสามารถใช้สารไคโตซานหุ้มเมล็ดเพื่อช่วยเพิ่มผลผลิตพืชได้

2.5.1.3 สมบัติทางเคมี (Chemical Properties)

สารไคโตซานเป็นสารพอลิเมอร์สายตรงที่มีมวลโมเลกุลสูง มีลักษณะเป็นของแข็ง มีรูปร่างที่ไม่แน่นอน ประกอบด้วยหมู่อะมิโนและหมู่ไฮดรอกซิลเป็นหลัก ซึ่งมีหมู่อะมิโนที่สามารถละลายในกรดเข้มข้น เช่น กรดไฮโดรคลอริก (HCl) และกรดไนตริก (HNO_3) เป็นต้น และการละลายของไคโตซานมีสมบัติที่สำคัญหลายอย่าง เช่น เมื่ออยู่ในรูปเอมีนอิสระจะไม่ละลายน้ำที่มีค่าความเป็นเป็นกรด

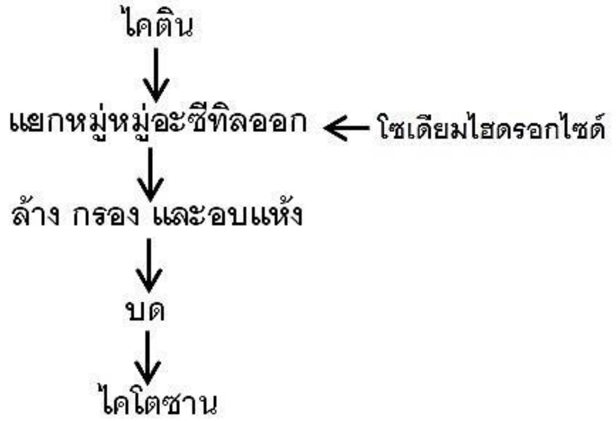
2.5.1.4 สมบัติทางด้านการละลาย (Chitosan Solution Properties)

สารไคโตซานมีสมบัติด้านการละลาย ดังต่อไปนี้

- สามารถละลายได้ในกรดอะซิติก (Acetic acid, CH_3COOH)
- ไม่สามารถละลายได้ที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง น้อยกว่า 6.5
- ความสามารถในการละลายของสารไคโตซานจะถูกจำกัดในกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4)
- สารไคโตซานส่วนใหญ่ไม่สามารถละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์

2.5.2 ขั้นตอนการเตรียมไคโตซาน

การเตรียมไคโตซาน มีขั้นตอนหลักอยู่เพียงขั้นตอนเดียว คือ ขั้นตอนการกำจัดหมู่อะซีทิล (Deacetylation) ในไคตินด้วยสารละลายด่างร้อน แสดงดังภาพ 2.15



ภาพที่ 2.16 ขั้นตอนทั่วไปของกระบวนการเตรียมไคโตซาน
ที่มา: Muzzarelli (1977)

2.5.3 การเตรียมสารละลายไคโตซานเพื่อเอิบชุ่มตัวดูดซับในงานวิจัย (Maghsoodloo และคณะ, 2011)

ในกระบวนการเตรียมสารละลายไคโตซาน จะดำเนินการโดย นำสารไคโตซานน้ำหนัก 0.1 กรัม ละลายในกรดอะซิติก (Acetic acid, CH_3COOH) ปริมาณ 100 มิลลิลิตร จากนั้นกวนทิ้งไว้ 4 ชั่วโมง จนไคโตซานละลายจนหมด ขั้นตอนสุดท้าย คือ ปรับปริมาตรของสารละลายไคโตซานเป็น 1000 มิลลิลิตร แล้วนำไปดำเนินการเอิบชุ่มในตัวอย่างที่ต้องการ

2.6 งานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง ประกอบด้วย

Vyas และคณะ (1992) นำถ่านหินบิทูมินัสมาเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟ โดยหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการดำเนินการสังเคราะห์ ซึ่งถ่านหินบิทูมินัสนั้นจะถูกนำมาย่อย บด และปั้นให้เป็นก้อนกลมด้วยสารละลายซัลเฟตเหลือทิ้ง (Sulfate pulp waste liquor, SPWL) หรือน้ำมันทาร์ของถ่าน (Coal-tar pitch, CTP) ที่เป็นตัวประสาน หลังจากนั้นจึงดำเนินการคาร์บอนไนซ์ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน ที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที เพื่อให้ได้ถ่านกัมมันต์ จากนั้นจึงดำเนินการตกเคลือบด้วยไอเคมี (Chemical vapor deposition, CVD) โดยใช้อะเซทิลีนและเบนซีนในการตกเคลือบด้วยไอเคมีที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

เวลาเท่ากับ 3 ถึง 10 นาที และ 10 ถึง 30 นาที ตามลำดับ ในการทดลองหาค่าการเลือกในการดูดซับของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อแก๊สมีเทน (Selectivity CO_2/CH_4) ในตัวอย่างที่ใช้ใช้อะเซทิลีนและเบนซีนในการตกเคลือบ พบว่ามีค่าการเลือกเท่ากับ 39.9 และ 5.5 ตามลำดับ

Adinata และคณะ (2007) ผลิตคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟจากเปลือกปาล์ม โดยนำเปลือกของปาล์มมาอบแห้ง และบดจนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1-2 มิลลิเมตร มาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ ซึ่งดำเนินการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน จากนั้นดำเนินการกระตุ้นโดยใช้โพแทสเซียมคาร์บอนเนต (K_2CO_3) เป็นตัวกระตุ้นในอัตราส่วนของถ่านต่อโพแทสเซียมคาร์บอนเนต เท่ากับ 1:1 โดยมวล ซึ่งเมื่อได้ถ่านกัมมันต์จากเปลือกปาล์มแล้ว ก็จะดำเนินการเตรียมคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟจากถ่านกัมมันต์ของเปลือกปาล์ม โดยใช้เบนซีนเป็นตัวตกเคลือบ (Depositing agent) ในเครื่องตกเคลือบด้วยไอเคมี (Chemical vapor deposition) ที่สภาวะต่างๆ กัน ได้แก่ อุณหภูมิในช่วง 600-1,000 องศาเซลเซียส เวลาในช่วง 5-60 นาที และอัตราการไหลของเบนซีน เท่ากับ 3-15 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งพบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟจากถ่านกัมมันต์ของเปลือกปาล์ม คือ ที่อุณหภูมิเท่ากับ 800 องศาเซลเซียส เวลา 20 นาที และอัตราการไหลของเบนซีน เท่ากับ 6 มิลลิลิตรต่อนาที ได้ค่าพื้นที่ผิวรวมจำเพาะเท่ากับ 1,065 ตารางเมตรต่อกรัม และมีค่าการเลือก (Selectivity) ในการดูดซับของของแก๊ส CO_2/CH_4 และ O_2/N_2 เท่ากับ 0.92 และ 0.73 ตามลำดับ

Ahmad (2009) ผลิตคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟจากเปลือกปาล์ม โดยนำเปลือกของปาล์มมาอบแห้ง และบดจนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1-2 มิลลิเมตร มาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ซึ่งดำเนินการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 830 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน จากนั้นดำเนินการกระตุ้นทางกายภาพด้วยไอน้ำ ในช่วงเวลา 30-420 นาที ซึ่งเมื่อได้ถ่านกัมมันต์จากเปลือกปาล์มแล้ว ก็จะดำเนินการเตรียมคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟจากถ่านกัมมันต์ของเปลือกปาล์ม โดยเบนซีนเป็นตัวตกเคลือบ (Depositing agent) ในเครื่องตกเคลือบด้วยไอเคมี (Chemical vapor deposition) ที่อัตราการไหลของเบนซีน เท่ากับ 150 มิลลิลิตรต่อนาที ในสภาวะต่างๆ กัน ได้แก่ อุณหภูมิในช่วง 600-800 องศาเซลเซียส และเวลา เท่ากับ 15-60 นาที ซึ่งพบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟจากถ่านกัมมันต์ของเปลือกปาล์ม คือ ที่อุณหภูมิเท่ากับ 800 องศาเซลเซียส และระยะเวลา เท่ากับ 30 นาที โดยได้ค่าการเลือก (Selectivity) ในการดูดซับของของแก๊ส CO_2/CH_4 และ O_2/N_2 เท่ากับ 16.0 และ 7.06 ตามลำดับ

ทศพล พิทักษ์ชน (2554) ได้นำถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มมาดำเนินการเอิบชุ่มด้วยสารละลายไคโตซานที่ความเข้มข้น 0.1-2.0 กรัมต่อลิตร มาดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สชีวภาพสังเคราะห์ของแก๊สมีเทนต่อคาร์บอนไดออกไซด์ เท่ากับร้อยละ 50:50 ที่ความดัน 4 บาร์ อัตราการไหลเข้าต่อไหลออก เท่ากับ 1.6 ที่รอบการดูดซับละ 2 นาที พบว่าที่ความเข้มข้นของสารละลาย

ไคโตซาน เท่ากับร้อยละ 2 กรัมต่อลิตร ถ่านกัมมันต์เอิบชุ่มด้วยไคโตซานจะสามารถแยกมีเทนได้มีความบริสุทธิ์มากกว่าร้อยละ 95 ที่รอบการดูดซับ 3 รอบ ในขณะที่ถ่านกัมมันต์ธรรมดาจะสามารถแยกมีเทนได้ความบริสุทธิ์มากกว่าร้อยละ 95 ที่รอบการดูดซับ เท่ากับ 1 รอบเท่านั้น

จรินทร์ เฟื่องชื่น (2554) ได้พัฒนาวัสดุดูดซับ เพื่อนำมาใช้ในการแยกแก๊สไฮโดรเจนออกจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อให้ได้แก๊สไฮโดรเจนที่มีความบริสุทธิ์มากยิ่งขึ้น โดยนำถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์ม มาผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยเทคนิคการเคลือบผิวด้วยสารละลายไคโตซานความเข้มข้น 0.1-2.0 กรัมต่อลิตร ซึ่งพบว่าการเคลือบผิวถ่านกัมมันต์ด้วยสารละลายไคโตซานส่งผลต่อพื้นที่ผิว การกระจายตัวของรูพรุน ปริมาณการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และความสามารถในการแยกไฮโดรเจน โดยพบว่าที่ความเข้มข้นของสารละลายไคโตซานเท่ากับ 0.12 กรัมไคโตซานบนถ่านกัมมันต์ จะสามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากกว่าถ่านกัมมันต์ที่ไม่ผ่านกระบวนการเอิบชุ่มด้วยไคโตซานถึงร้อยละ 11 ในขณะที่พื้นที่ผิวลดลงร้อยละ 3 เท่านั้น ซึ่งได้นำระบบดูดซับแบบสลับความดัน (Pressure swing adsorption) มาใช้ในกระบวนการดูดซับ ที่สภาวะความดันบรรยากาศ เท่ากับ 4 บาร์ อัตราการไหลเข้าต่อไหลออกเท่ากับ 1 เป็นเวลา 2 นาที พบว่าสามารถแยกไฮโดรเจนให้มีความบริสุทธิ์ได้มากกว่าร้อยละ 95 ที่รอบการดูดซับ เท่ากับ 8 รอบ ในขณะที่ถ่านกัมมันต์สามารถแยกไฮโดรเจนให้มีความบริสุทธิ์ได้มากกว่าร้อยละ 95 ที่รอบการดูดซับ เท่ากับ 3 รอบ เท่านั้น

Esquivel และ Jiménez (2012) ได้ศึกษาหมู่ฟังก์ชั่นของกาแฟและผลพลอยได้จากการผลิตกาแฟ หลังจากวิเคราะห์ด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (High performance liquid chromatography, HPLC) พบว่าเปลือกเมล็ดกาแฟสายพันธุ์อาราบิก้ามีสารประกอบโพลีฟีนอลเป็นองค์ประกอบในรูปของกรดคลอโรจีนิก (Chlorogenic acid) เป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้เมื่อวิเคราะห์เปลือกชั้นในของเมล็ดกาแฟ พบว่าประกอบด้วย อัลฟาเซลลูโลสร้อยละ 40-49 เฮมิเซลลูโลสร้อยละ 25-32 ลิกนินร้อยละ 33-35 และเถ้าร้อยละ 0.5-1

Plaza และคณะ (2012) ได้นำกากกาแฟที่ใช้แล้วมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ราคาต่ำ สำหรับดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งขั้นตอนการกระตุ้นนั้นจะเปรียบเทียบกันสองวิธีระหว่าง การกระตุ้นด้วยวิธีการกายภาพด้วยคาร์บอนไดออกไซด์และการกระตุ้นทางเคมีด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่อัตราส่วนต่างๆ ระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และถ่านโดยน้ำหนัก ซึ่งหลังจากการวิเคราะห์พบว่าที่อัตราส่วนโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่าน เท่ากับ 1:1 2:1 3:1 และ 4:1 มีพื้นที่ผิวจำเพาะ เท่ากับ 831 876 840 และ 925 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ ในขณะที่ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่กระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพมีพื้นที่ผิวจำเพาะ เท่ากับ 593 ตารางเมตรต่อกรัม และที่อัตราส่วนโพแทสเซียม-ไฮดรอกไซด์และถ่าน เท่ากับ 1:1 2:1 3:1 และ 4:1 พบว่าถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟมีค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ 25 องศาเซลเซียส เท่ากับ 2.8 3.0 3.0 และ 2.9 มิลลิโมลต่อกรัม

ในขณะที่ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่กระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพ มีความสามารถในการดูดซับ เท่ากับ 2.2 มิลลิโมลต่อกรัม และลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น

Huang และ Shen (2013) นำคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟทางการค้า (CMS-3) มาเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยนำมาเอิบชุ่มในสารละลายไคโตซาน เพื่อปรับปรุงหมู่ฟังก์ชั่นที่พื้นผิวของตัวอย่าง โดยนำไคโตซานน้ำหนัก เท่ากับ 2 และ 4 กรัม มาละลายในสารละลายกรดอะซิติกเข้มข้นร้อยละ 3 โดยมวล ได้เป็นตัวอย่าง C-Chi-2 และ C-Chi-4 ตามลำดับ พบว่าตัวอย่าง CMS-3 C-Chi-2 และ C-Chi-4 มีพื้นที่ผิวจำเพาะ เท่ากับ 1075 864 649 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งจะพบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวอย่างนั้นลดลงเมื่อเอิบชุ่มด้วยไคโตซาน เนื่องจากไคโตซานเข้าไปปิดกั้นช่องว่างขนาดเล็กในตัวอย่าง CMS-3 ทำให้ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง จากนั้นจึงนำตัวอย่าง C-Chi-2 และ C-Chi-4 มาผ่านกระบวนการแช่ตัวอย่าง (Soak) ด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เข้มข้น 1 โมลต่อลิตร เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ได้เป็นตัวอย่าง C-Chi-a-2 และ C-Chi-a-4 ซึ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะ เท่ากับ 858 และ 891 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ โดยพบทั้งสองตัวอย่างนั้นมีพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มมากขึ้น เนื่องด้วยหมู่ฟังก์ชั่นไฮดรอกซิล (-OH) ที่เพิ่มขึ้นมาหลังจากกระบวนการแช่ด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

Keramati และ Ghoreyshi (2014) นำถ่านกัมมันต์มาเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ โดยผ่านกระบวนการเอิบชุ่ม (Impregnation) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดแก๊สซับคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่างการเอิบชุ่มด้วยสารไคโตซานและไตรเอธทิลลีนเตตระอะมีน (Teriethylenetetraamine, TETA) ในตัวอย่างถ่านกัมมันต์ โดยพบว่า ทั้งไคโตซานและไตรเอธทิลลีนเตตระอะมีน สามารถช่วยเพิ่มหมู่ฟังก์ชั่นเอมีน ซึ่งมีความเป็นเบสอ่อน ทำให้สามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นกรดอ่อนได้ดียิ่งขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ปกติ

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาและเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี และการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวอย่าง คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากกากกาแฟโดยวิธีการตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{CF}) คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากถ่านกัมมันต์ทางการค้าโดยวิธีการตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{GAC}) คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟทางการค้า (CMS_{COM}) และถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่ผ่านกระบวนการเอิบชุ่มด้วยไคโตซาน (CGAC) เนื่องจากถ่านกัมมันต์ทางการค้า (GAC) ที่เอิบชุ่มด้วยสารละลายไคโตซานนั้น จะมีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีประสิทธิภาพสูง (Keramati และ Ghoreyshi, 2014) จึงถูกนำมาใช้เป็นตัวอย่างเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟและถ่านกัมมันต์ในแง่ของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากราคาของคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟทางการค้าที่ขายตามท้องตลาดนั้นมีราคาสูง จึงมีแนวคิดที่จะเตรียมคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟจากถ่านกัมมันต์ด้วยวัสดุเหลือทิ้ง เช่น กากกาแฟ โดยนำกากกาแฟมาผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ให้มีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก (Molina-Sabio และ Rodríguez-Reinoso, 2004) จนได้ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟ (GK) และพัฒนารูพรุนโดยกระบวนการตกเคลือบด้วยไอเคมีของอะเซทิลีน เพื่อปรับปรุงพื้นผิวและรูพรุนของตัวอย่างและนำมาใช้ในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สชีวภาพ โดยใช้แก๊สชีวภาพสังเคราะห์เป็นตัวแทน

3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. อุปกรณ์สำหรับการทดลอง
   - เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง (Analytical balance) รุ่น FX200i ยี่ห้อ A&D
   - เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH Meter) รุ่น EUTECH ยี่ห้อ pH510
   - ถ้วยเซรามิค (Crucible)
   - ตู้ดูดความชื้น (Desiccator) รุ่น BK(A) series ยี่ห้อ BOSSMEN
   - ตู้อบความร้อน (Hot Air Oven) รุ่น LDO-100E ยี่ห้อ Mammart
   - ชุดเครื่องกรอง (Filter)
   - ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask)
   - กระดาษกรองเบอร์ 42 (Filter paper No.42)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

- ผ้าขาวบาง (Filter cloth)

- ถุงเก็บแก๊ส (Gas bag)

2. เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง ดำเนินการวิเคราะห์ที่สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ยกเว้นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านและเครื่องวิเคราะห์หมู่โครงสร้าง ดำเนินการวิเคราะห์ที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ และศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ตามลำดับ

- เครื่องตกเคลือบด้วยไอเคมี (Chemical Vapor Deposition, CVD) ผลิตจากประเทศไทย (ภาพที่ 3.2)

- เครื่องวิเคราะห์การดูดซับแบบสลับความดัน (Pressure Swing Adsorption, PSA) ผลิตจากประเทศไทย (ภาพที่ 3.3)

- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) รุ่น JSM-6400 ยี่ห้อ JEOL ผลิตจากประเทศเยอรมัน (ภาพที่ ง.1)

- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscopy, TEM) รุ่น JEM-4000FX ยี่ห้อ JEOL ผลิตจากประเทศเยอรมัน (ภาพที่ ง.2)

- เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction Spectroscopy, XRD) รุ่น XRD 6000 ยี่ห้อ SHIMADZU ผลิตจากประเทศอเมริกา (ภาพที่ ง.3)

- เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุ (BET Surface Area Analyzer) รุ่น AUTOSORB 1 ยี่ห้อ QUANTACHROME ผลิตจากประเทศเยอรมัน (ภาพที่ ง.4)

- เครื่องวิเคราะห์หมู่โครงสร้าง (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR) รุ่น AIM8000 ยี่ห้อ SHIMADZU ผลิตจากประเทศอังกฤษ (ภาพที่ ง.5)

- เตาเผาอุณหภูมิสูง (Pyrolysis Furnace) รุ่น EF 11/8B ยี่ห้อ Lenton ผลิตจากประเทศเยอรมัน (ภาพที่ ง.6)

- เครื่องวิเคราะห์แก๊สโครมาโตกราฟ (Gas Chromatograph, GC) ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น GC2014 ผลิตจากประเทศอังกฤษ (ภาพที่ ง.7)

- เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ (Elemental Analyzer, EA) รุ่น PE 2400 ยี่ห้อ Perkin Elmer Series II ผลิตจากประเทศอเมริกา (ภาพที่ ง.8)

- เครื่องปั้นเม็ด (Granulator) ผลิตจากประเทศไทย (ภาพที่ ง.9)

- เครื่องบดตัวอย่าง (Ball mill) รุ่น PM100 ยี่ห้อ Retsch ผลิตจากประเทศเยอรมัน (ภาพที่ ง.10)

3.1.2 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. วัสดุที่ใช้ในการเตรียมสารดูดซับ คือ กากกาแฟที่ผ่านการอบแล้ว ดังภาพที่ 3.1

2. ไคโตซานสำหรับกระบวนการเอิบชุ่ม (Chitosan) ผลิตโดยบริษัท SIGMA ALDRICH

3. ถ่านกัมมันต์ทางการค้าแบบเกล็ด (Granular activated carbon, GAC) ผลิตโดยบริษัท METRA จำกัด

4. สารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้นกากกาแฟคือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium Hydroxide, KOH) บริสุทธิ์ร้อยละ 99.0 ผลิตโดยบริษัท CARLO ERBA GROUP จำกัด

5. คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟทางการค้า (Commercial Carbon Molecular Sieve, CMS_{COM}) รุ่น SHIRASAGI MSC 3K-172 ผลิตโดยบริษัท Japan EnviroChemicals จำกัด

6. สารเคมีสำหรับใช้วิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีน (Iodine number)

- ไอโดดีน (Iodine, I_2) บริสุทธิ์ร้อยละ 99.8 ผลิตโดยบริษัท Ajax Finechem จำกัด
- โซเดียมไทโอซัลเฟต (Sodium thiosulfate, $Na_2S_2O_3.5H_2O$) บริสุทธิ์ร้อยละ 99.8 ผลิตโดยบริษัท Ajax Finechem จำกัด
- โปตัสเซียมไอโอไดด์ (Potassium iodide, KI) บริสุทธิ์ร้อยละ 99.0 ผลิตโดยบริษัท Ajax Finechem จำกัด
- โปตัสเซียมไอโอเดต (Potassium iodate, KIO_3) บริสุทธิ์ร้อยละ 99.4 ผลิตโดยบริษัท Ajax Finechem จำกัด
- โซเดียมคาร์บอนเนต (Sodium carbonate, Na_2CO_3) บริสุทธิ์ร้อยละ 99.8 ผลิตโดยบริษัท Ajax Finechem จำกัด
- กรดไฮโดรคลอริก เข้มข้นร้อยละ 37 (Conc. hydrochloric acid, HCl) ผลิตโดยบริษัท Ajax Finechem จำกัด
- แป้ง (Starch) ผลิตโดยบริษัท Ajax Finechem จำกัด

7. แก๊สที่ใช้ในงานวิจัย

- แก๊สไนโตรเจน (Nitrogen Gas, N_2) บริสุทธิ์ร้อยละ 99.999 เกรด Ultra High Purity (UHP) ผลิตโดยบริษัท LABGAZ จำกัด
- แก๊สอะเซทิลีน (Acetylene, C_2H_2) บริสุทธิ์ร้อยละ 99.8 เกรด High Purity (HP) ผลิตโดยบริษัท LABGAZ จำกัด
- แก๊สชีวภาพสังเคราะห์ที่เป็นแก๊สผสมสังเคราะห์ ประกอบด้วยแก๊ส $N_2:CO_2:CH_4$ ที่อัตราส่วนร้อยละ เท่ากับ 20:30:50 ผลิตโดยบริษัท LABGAZ จำกัด

3.1.3 ตัวแปรและพารามิเตอร์ในการวิจัย แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการวิจัย

ตัวแปร	พารามิเตอร์
ตัวแปรอิสระ 1. ชนิดของตัวดูดซับแก๊ส	1. คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากกากกาแฟโดยวิธีการตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{CF}) 2. คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากถ่านกัมมันต์ทางการค้าโดยวิธีการตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{GAC}) 3. คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟทางการค้า* (CMS_{COM}) 4. ถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่ผ่านกระบวนการเอิบชุ่มด้วยไคโตซาน (CGAC)
ตัวแปรคงที่ 1. ชนิดของวัสดุ 2. คาร์บอนไนเซชั่น - อุณหภูมิ - เวลาในการคาร์บอนไนเซชั่น 3. การกระตุ้น - อุณหภูมิ - เวลาในการกระตุ้น - อัตราส่วนโดยน้ำหนักของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านกัมมันต์ 4. การตกเคลือบด้วยไอเคมี - อุณหภูมิ - อัตราการไหลของไนโตรเจน - อัตราการไหลของอะเซทิลีน - เวลาการตกเคลือบด้วยไอเคมี	 - กากกาแฟสายพันธุ์อะราบิกา 100 % - 400 องศาเซลเซียส - 1 ชั่วโมง - 600 องศาเซลเซียส - 1 ชั่วโมง - 2:1 - 600 700 800 และ 900 องศาเซลเซียส - 50 มิลลิลิตรต่อนาที - 5 10 15 และ 20 มิลลิลิตรต่อนาที - 15 30 45 และ 60 นาที
ตัวแปรตาม 1. การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ของ CMS_{CF} CMS_{GAC} CMS_{COM} และ CGAC	- ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกต่อขาเข้า - ความบริสุทธิ์ของแก๊สมีเทน - ประสิทธิภาพในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ - ค่าการเลือกในการดูดซับของคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทน - ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด

หมายเหตุ: * คือ ตัวอย่างทางการค้าที่ซื้อมาเพื่อใช้ในการดำเนินการทดลอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาพที่ 3.1 กากกาแฟที่ผ่านกระบวนการอบแล้ว

3.2 วิธีดำเนินการวิจัย

3.2.1 การเตรียมตัวอย่างโดยวิธีต่างๆ

1) การเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟโดยกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ตามวิธีการเตรียมตัวอย่างของ Plaza และคณะ (2012)

- นำกากกาแฟ 20 กรัมมาล้างด้วยน้ำกลั่น จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้น
- นำกากกาแฟที่ผ่านการอบแล้ว มาผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชั่น ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จนได้เป็นได้ถ่านจากกากกาแฟ
- ทิ้งให้เย็นในตู้ดูดความชื้น
- นำถ่านจากกากกาแฟ มาผสมกับโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในอัตราส่วนโดยน้ำหนักของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านจากกากกาแฟ เท่ากับ 2:1
- นำไปผ่านกระบวนการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- ล้างด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งน้ำที่ชะมีค่าความเป็นกรด-ด่าง เป็นกลาง
- อบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เก็บในภาชนะที่ปิดสนิท

2) การเตรียมถ่านกัมมันต์ทางการค้าโดยกระบวนการเอิบชุ่มด้วยไคโตซาน ตามวิธีการเตรียมตัวอย่างของ Maghsoodloo และคณะ (2011)

- นำถ่านกัมมันต์ทางการค้ามาอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- นำถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่ไล่ความชื้นแล้ว มาผ่านกระบวนการเอิบชุ่มด้วยสารละลายไคโตซานที่ความเข้มข้นของไคโตซานเท่ากับ 1 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตรของกรดอะซิติกเข้มข้น (Conc. Acetic acid) จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนได้สารละลายของไคโตซาน 1,000 มิลลิลิตร โดยในกระบวนการเอิบชุ่มนั้นจะใช้อัตราส่วนโดยมวลต่อปริมาตรของถ่านกัมมันต์ทางการค้าต่อสารละลายไคโตซาน เท่ากับ 1:1
- แช่และกวนถ่านกัมมันต์ทางการค้าในสารละลายไคโตซาน เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- กรองตัวอย่างเพื่อแยกถ่านกัมมันต์ทางการค้าออกจากสารละลายไคโตซาน จากนั้นจึงล้างตัวอย่างด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งน้ำที่ชะมีค่าความเป็นกรด-ด่าง เป็นกลาง
- นำถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่ผ่านกระบวนการเอิบชุ่มด้วยไคโตซาน (CGAC) มาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้นจากตัวอย่าง
- เก็บตัวอย่างถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่ผ่านกระบวนการเอิบชุ่มด้วยไคโตซาน (CGAC) ไว้ในภาชนะที่มีฝาปิดสนิท จากนั้นจึงเก็บไว้ในตู้ดูดความชื้น

3.2.2 การศึกษาองค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของกากกาแฟ

นำกากกาแฟที่อบแห้งแล้ว มาวิเคราะห์เพื่อหาองค์ประกอบทางกายภาพ (Proximate analysis) ได้แก่ ปริมาณสารระเหยได้ (Volatile matter) ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) ปริมาณความชื้น (Moisture) และมีปริมาณเถ้า (Ash) ตามวิธีของ ASTM D7582-12 และวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมี (Ultimate analysis) ได้แก่ คาร์บอน ออกซิเจน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน ตามวิธีของ ASTM D3176-09

3.2.3 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากกากกาแฟและจากถ่านกัมมันต์ทางการค้าโดยวิธีตกเคลือบด้วยไอเคมี (Vyas และคณะ, 1992)

- นำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากกาแฟที่เตรียมได้ (GK) มาผ่านเครื่องตกเคลือบด้วยไอเคมีในเครื่องตกเคลือบด้วยไอเคมี (Chemical Vapor Deposition, CVD) ดังภาพที่ 3.2 ที่อุณหภูมิ 600 700 800 และ 900 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน

- เมื่ออุณหภูมิถึงที่ต้องการ จึงเริ่มการให้อะเซทิลีนในระบบ ที่อัตราการไหล เท่ากับ 5 10 15 และ 20 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลา 15 30 45 และ 60 นาที เมื่อครบเวลาที่กำหนดจึงหยุดการให้อะเซทิลีน

- ปล่อยให้อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ค่อยๆ เย็นลง ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน

- เลือกสภาวะในการเตรียมคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากกากกาแฟโดยวิธีตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{CF}) ที่เหมาะสมที่สุด โดยพิจารณาจากพื้นที่ผิวจำเพาะและค่าไอโอดีนนัมเบอร์

- ดำเนินการข้างต้นโดยใช้สภาวะที่เหมาะสมที่ได้ กับถ่านกัมมันต์ทางการค้า (GAC) จนได้ตัวอย่างคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากถ่านกัมมันต์ทางการค้าโดยวิธีตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{GAC})

- เก็บตัวอย่าง CMS_{CF} และ CMS_{GAC} ไว้ในภาชนะที่มีฝาปิดสนิท จากนั้นจึงเก็บภาชนะตัวอย่างไว้ในตู้ดูดความชื้น

ภาพที่ 3.2 เครื่องตกเคลือบด้วยไอเคมี (Chemical Vapor Deposition, CVD)

3.2.4 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวอย่าง

ดำเนินการศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวอย่าง คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากกากกาแฟโดยวิธีการตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{CF}) คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากถ่านกัมมันต์ทางการค้าโดยวิธีการตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{GAC}) คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟทางการค้า (CMS_{COM}) และถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่ผ่านกระบวนการเอิบชุ่มด้วยไคโตซาน (CGAC)

1. พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน ขนาดรูพรุน และค่าไอโอดีนนัมเบอร์

นำตัวอย่าง CMS_{CF} CMS_{GAC} CMS_{COM} และ CGAC มาวิเคราะห์พื้นที่

ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุน ด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ (BET Surface area analyzer) และวิเคราะห์ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ ตามวิธีของ ASTM D4607-14 (2014)

2. ลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง

นำตัวอย่าง CMS_{CF} CMS_{GAC} และ CMS_{COM} มาตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM) ที่กำลังขยาย 1,000 และ 2,000 เท่า

3. ลักษณะโครงสร้างภายในของตัวอย่าง

นำตัวอย่าง CMS_{CF} CMS_{GAC} และ CMS_{COM} มาตรวจสอบโครงสร้างภายในของตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscopy, TEM) ที่กำลังขยาย 50,000 และ 100,000 เท่า

4. ลักษณะโครงสร้างผลึกของตัวอย่าง

นำตัวอย่าง CMS_{CF} CMS_{GAC} CMS_{COM} และ CGAC มาวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction spectroscopy, XRD)

5. ลักษณะโครงสร้างหมู่ฟังก์ชั่นของตัวอย่าง

นำตัวอย่าง CMS_{CF} CMS_{GAC} CMS_{COM} และ CGAC มาวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชั่นบนพื้นผิว ด้วยเครื่องวิเคราะห์หมู่โครงสร้าง (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)

ดำเนินการวิเคราะห์การดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สชีวภาพสังเคราะห์ที่ใช้เป็นตัวแทนของแก๊สชีวภาพตามธรรมชาติ ซึ่งแก๊สชีวภาพสังเคราะห์ประกอบด้วยแก๊ส N_2:CO_2:CH_4 ที่อัตราส่วนร้อยละ 20:30:50 โดยประกอบด้วยการวิเคราะห์ต่างๆ ได้แก่ ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกต่อขาเข้า ความบริสุทธิ์ของแก๊สมีเทน ประสิทธิภาพในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ค่าการเลือกในการดูดซับของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อแก๊สมีเทน และความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดในตัวอย่าง CMS_{CF} CMS_{GAC} CMS_{COM} และ CGAC ดังนี้

3.2.5 การศึกษาปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกต่อขาเข้า ความบริสุทธิ์ของแก๊สมีเทน และประสิทธิภาพในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ (Out/in CO_2, Purity and CO_2 Removal) (ภาวณี ตาลเถื่อน, 2555)

1. นำตัวอย่าง CMS_{CF} CMS_{GAC} CMS_{COM} และ CGAC ไปอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2. ทำการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ในเครื่องวิเคราะห์การดูดซับแบบสลับความดัน (PSA) โดยใส่ตัวอย่างลงในคอลัมน์แบบเดี่ยว

3. ป้อนแก๊สชีวภาพสังเคราะห์มาตรฐาน ซึ่งเป็นตัวแทนของแก๊สชีวภาพผ่านคอลัมน์ดูดซับ ดังภาพที่ 3.3 โดยชุดคอลัมน์ประกอบด้วยท่อสแตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ประมาณ 4.2 เซนติเมตร ยาวประมาณ 46 เซนติเมตร

4. ดำเนินการที่อุณหภูมิห้อง ความดัน 3 บรรยากาศ และอัตราการไหลเข้าต่ออัตราการไหลออกเท่ากับ 1 ที่ระยะเวลา เท่ากับ 5–150 นาที

5. เก็บแก๊สจากวาล์วขาออก มาวิเคราะห์ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊สโครมาโตกราฟ แล้วจึงคำนวณปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกต่อขาเข้าแก๊สที่เวลาต่างๆ โดยใช้สมการที่ 3.1 ในการคำนวณ

$$\text{ปริมาณแก๊สขาออกต่อขาเข้า} = \frac{(\text{ปริมาณแก๊สขาออก}) \times 100}{\text{ปริมาณแก๊สเริ่มต้น}} \quad \text{......... (3.1)}$$

6. ทำการศึกษาความความบริสุทธิ์ของแก๊สมีเทนจากสมการ 3.1

7. วิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาต่างๆ โดยใช้สมการที่ 3.2 ในการคำนวณ

$$\text{ประสิทธิภาพการดูดซับแก๊ส} = \frac{(\text{ปริมาณ } CO_2 \text{ เริ่มต้น - ปริมาณ } CO_2 \text{ ขาออก}) \times 100}{\text{ปริมาณแก๊ส } CO_2 \text{ เริ่มต้น}} \quad \text{............(3.2)}$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.2.6 การศึกษาค่าการเลือกในการดูดซับของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อแก๊สมีเทน และความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด (Selectivity and Maximum CO_2 adsorption)

1. นำตัวอย่าง CMS_{CF} CMS_{GAC} CMS_{COM} และ CGAC ไปอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2. ทำการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในเครื่องวิเคราะห์การดูดซับแบบสลับความดัน โดยใส่ตัวอย่างลงในคอลัมน์แบบเดี่ยว

3. ป้อนแก๊สชีวภาพสังเคราะห์มาตรฐานที่เป็นแก๊สผสมสังเคราะห์ประกอบด้วยแก๊ส N_2:CO_2:CH_4 ที่อัตราส่วนเท่ากับ 20:30:50 ผ่านคอลัมน์ดูดซับแบบเดี่ยว

4. ดำเนินการที่อุณหภูมิห้อง ที่ความดัน 3 บรรยากาศ และอัตราการไหลเข้าต่ออัตราการไหลออกเท่ากับ 1

5. เมื่อความดันในคอลัมน์เท่ากับ 3 บรรยากาศแล้ว หลังจากนั้นค้างแก๊สไว้ในคอลัมน์เป็นเวลา 10 นาที ได้เป็นหนึ่งรอบในการดูดซับ (Cycle time) ซึ่งเป็นเวลาที่วิเคราะห์ได้จากผลต่างของความดันที่ระยะเวลาต่างๆ ในคอลัมน์ (Pressure profile) ดังภาพ ค.5 จากนั้นจึงเก็บแก๊สจากวาล์วขาออกมาวิเคราะห์ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊สโครมาโตกราฟ

6. วิเคราะห์และคำนวณหาปริมาณแก๊สที่ถูกดูดซับในตัวอย่าง โดยใช้สมการที่ 3.3 ในการคำนวณหาปริมาณความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สมีเทนที่ถูกดูดซับในตัวอย่าง จากนั้นจึงคำนวณค่าการเลือกในการดูดซับของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อแก๊สมีเทน จากอัตราส่วนของปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อปริมาณของแก๊สมีเทนที่ถูกดูดซับในตัวอย่าง CMS_{CF} CMS_{GAC} CMS_{COM} และ CGAC โดยใช้สมการที่ 3.4

$$n = \frac{PV}{RT} \qquad (3.3)$$

โดยที่ P = ความดันในการป้อน (บรรยากาศ)

V = ปริมาตรของแก๊สในคอลัมน์ (ลิตร)

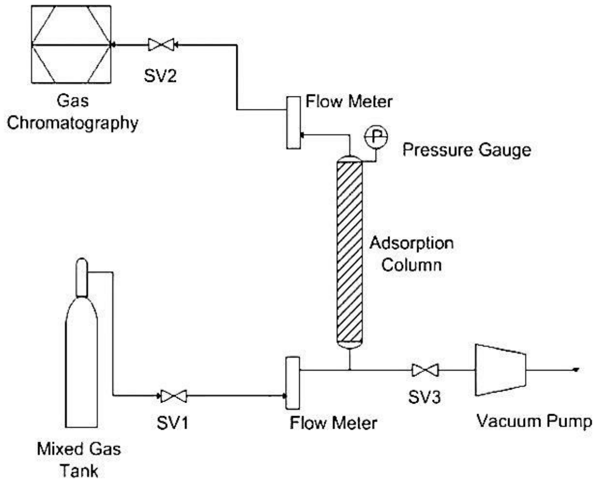
R = ค่าคงที่ของแก๊ส เท่ากับ 0.08206 ลิตร-บรรยากาศ/โมล-เคลวิน

T = อุณหภูมิในการทดลอง (เคลวิน)

n = จำนวนโมลแก๊สที่ถูกดูดซับ (โมล)

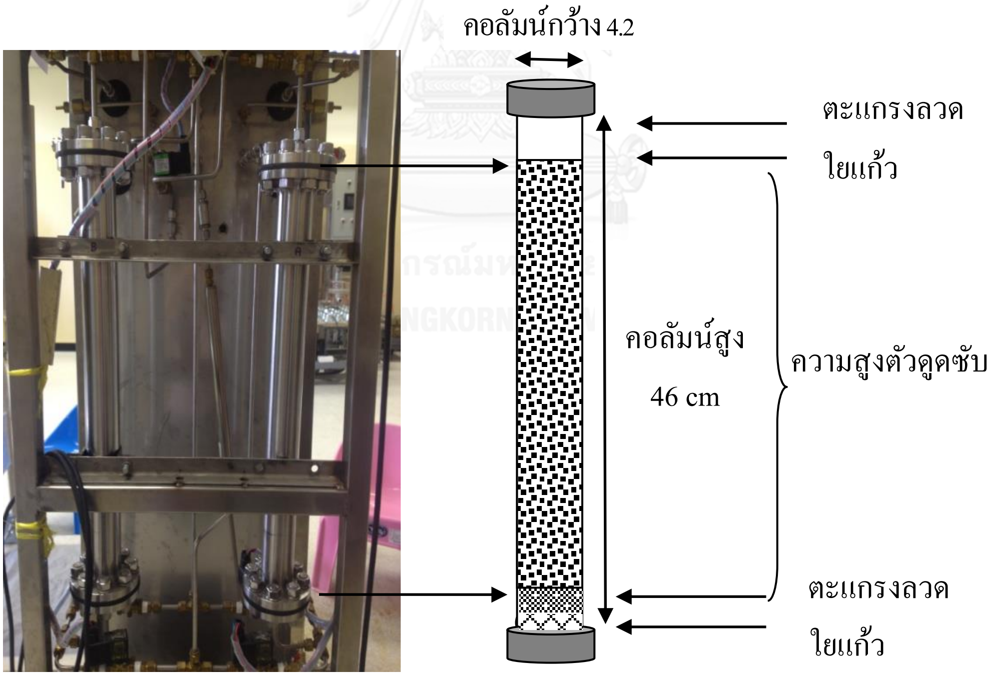
$$\text{ค่าการเลือกในการดูดซับ} = \frac{\text{ปริมาณของ } CO_2 \text{ ที่ถูกดูดซับในตัวอย่าง (โมล)}}{\text{ปริมาณของ } CH_4 \text{ ที่ถูกดูดซับในตัวอย่าง (โมล)}} \qquad (3.4)$$

7. ดำเนินการข้อ 1-5 ซ้ำ จนกระทั่งความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกคงที่ที่ความเข้มข้นเท่ากับแก๊สขาเข้า จากนั้นวิเคราะห์และคำนวณค่าปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้นและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกแบบสะสมหลังการดูดซับในแต่ละรอบของการดูดซับจากสมการที่ 3.3 เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับสูงสุด (Maximum mole adsorption)



(ก)

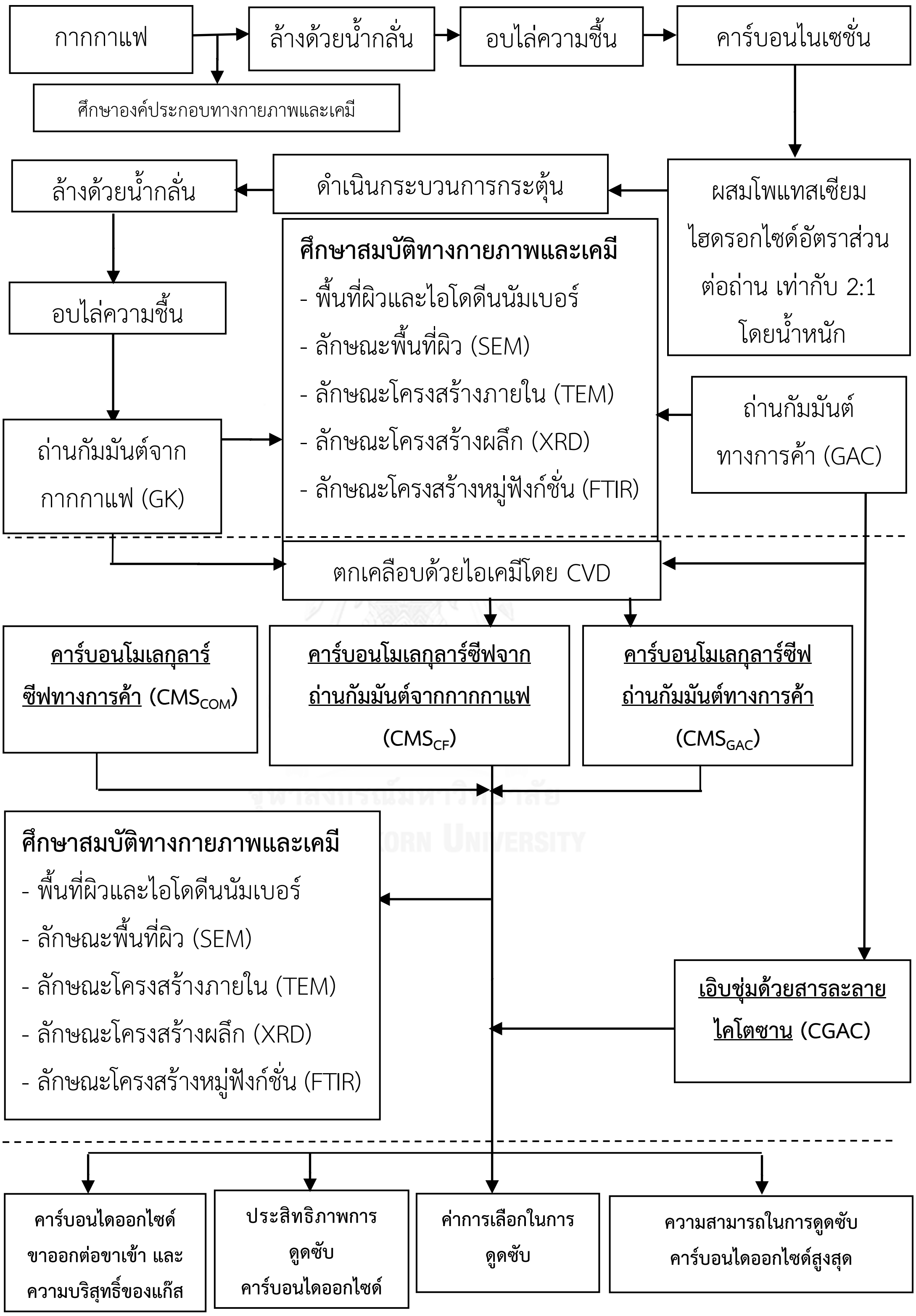
(ข)



(ค)

ภาพที่ 3.3 คอลัมน์เครื่องแยกแก๊สสลับความดันแบบสองคอลัมน์
(ก) แผนภาพของระบบดูดซับแบบคอลัมน์ (ข) ด้านหน้าของเครื่อง (ค) ด้านหลังของเครื่อง

3.3 สรุปแผนการดำเนินงานวิจัย ดังแสดงในภาพที่ 3.4



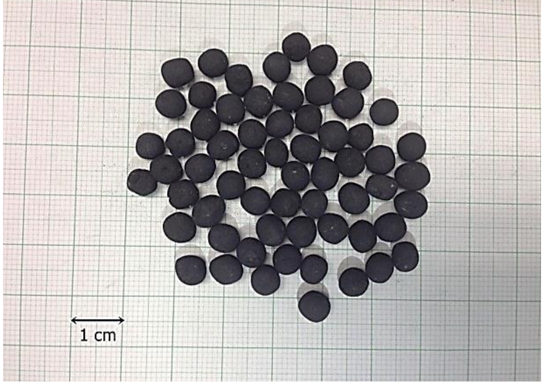
ภาพที่ 3.4 แผนการดำเนินงานวิจัย

บทที่ 4
ผลการดำเนินงานวิจัย

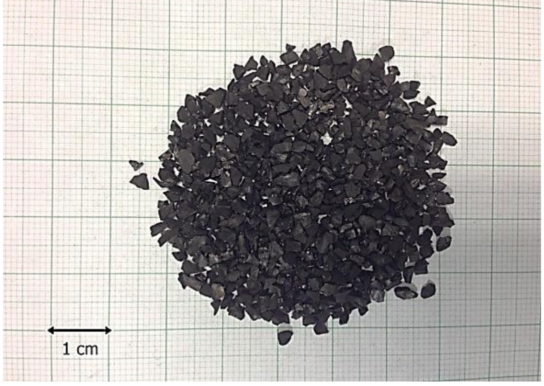
การวิจัยนี้เป็นการศึกษาและเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี และการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สชีวภาพสังเคราะห์ของตัวอย่าง คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากกากกาแฟโดยวิธีตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{CF}) คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากถ่านกัมมันต์ทางการค้าโดยวิธีตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{GAC}) คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟทางการค้า (CMS_{COM}) และถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่ผ่านกระบวนการเอิบชุ่มด้วยไคโตซาน (CGAC) โดยดำเนินการวิจัย ณ ห้องปฏิบัติการวิจัย ฝ่ายเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมและทรัพยากร สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย และห้องปฏิบัติการวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งผลการศึกษาวิจัยดังแสดงและอภิปรายได้ดังนี้

4.1 ตัวอย่างประเภทต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัย

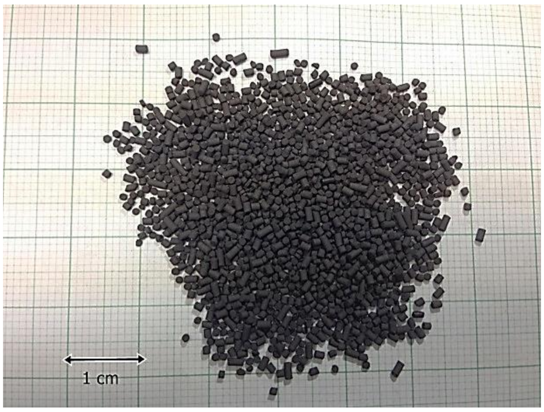
ตัวอย่างประเภทต่างๆ ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย ได้แก่ คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากกากกาแฟโดยวิธีตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{CF}) คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากถ่านกัมมันต์ทางการค้าโดยวิธีตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{GAC}) คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟทางการค้า (CMS_{COM}) และถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่ผ่านกระบวนการเอิบชุ่มด้วยไคโตซาน (CGAC) ดังแสดงในภาพที่ 4.1 ถึง 4.4 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นรูปร่างและขนาดของตัวอย่างชนิดต่างๆ ที่ถูกใช้ในการดำเนินการวิจัย โดยตัวอย่าง CMS_{CF} มีเส้นผ่านศูนย์กลาง เท่ากับ 0.3-0.4 มิลลิเมตร และตัวอย่าง CMS_{COM} มีเส้นผ่านศูนย์กลาง เท่ากับ 0.1-0.2 มิลลิเมตร ในขณะที่ตัวอย่าง CMS_{GAC} และ CGAC มีเส้นผ่านศูนย์กลาง เท่ากับ 0.2-0.3 มิลลิเมตร



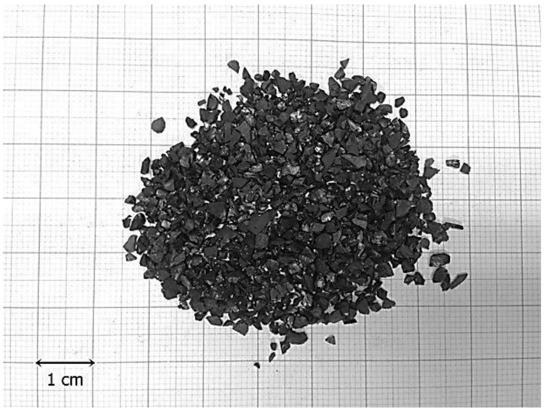
ภาพที่ 4.1 ตัวอย่าง CMS_{CF}



ภาพที่ 4.2 ตัวอย่าง CMS_{GAC}



ภาพที่ 4.3 ตัวอย่าง CMS_{COM}



ภาพที่ 4.4 ตัวอย่าง CGAC

4.2 ผลการศึกษาองค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของกากกาแฟ

นำตัวอย่างกากกาแฟที่อบแห้งเพื่อไล่ความชื้นแล้ว มาวิเคราะห์เพื่อหาองค์ประกอบทางกายภาพ (Proximate analysis) ตามวิธีของ ASTM D7582-12 (2012) และหาองค์ประกอบทางเคมี (Ultimate analysis) ตามวิธีของ ASTM D3176-09 (2009) ได้ผลวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของกากกาแฟ

องค์ประกอบทางกายภาพ (%)				องค์ประกอบทางเคมี (%)				
ปริมาณสารระเหยได้	ปริมาณคาร์บอนคงตัว	ปริมาณความชื้น	ปริมาณเถ้า	C	H	N	O	อื่นๆ
71.45	15.80	10.23	2.52	53.05	6.98	2.41	36.68	0.88

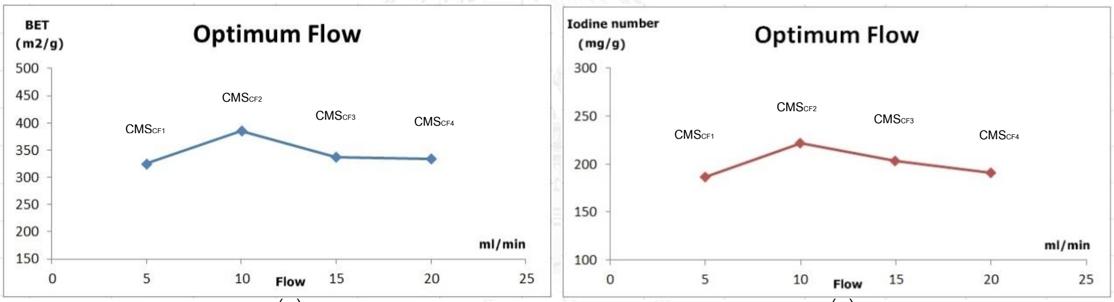
จากตารางที่ 4.1 พบว่า องค์ประกอบทางกายภาพของกากกาแฟนั้น มีปริมาณสารระเหยได้ (Volatile matter) ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) ปริมาณความชื้น (Moisture) และปริมาณเถ้า (Ash) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Werther และคณะ (2000) ที่ศึกษาเกี่ยวกับกากกาแฟ และพบว่า กากกาแฟนั้นมีปริมาณสารระเหยสูง จึงสามารถติดไฟได้ดีและสามารถนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงได้ นอกจากนี้ ปริมาณคาร์บอนคงตัวที่มีองค์ประกอบของธาตุคาร์บอนซึ่งจัดเป็นส่วนที่เสถียรที่สุดในกากกาแฟ ยังสามารถผลิตเนื้อของถ่าน (Yield) หลังจากกระบวนการผลิตถ่านมากขึ้นด้วย (Mohamad Nor และคณะ, 2013) นอกจากนี้ ปัจจัยด้านความชื้นในวัตถุดิบประเภทกากกาแฟยังมีผลกระทบต่อคุณภาพการเตรียมถ่านกัมมันต์ และปริมาณเถ้าที่วิเคราะห์ได้ บ่งบอกถึงปริมาณสารอนินทรีย์ที่อยู่ในกากกาแฟ ซึ่งในการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกากกาแฟ พบว่ากากกาแฟมีปริมาณคาร์บอนสูงที่สุด รองลงมาได้แก่ ออกซิเจน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน ตามลำดับ โดยมีธาตุอื่นๆ เป็นองค์ประกอบอยู่เพียงเล็กน้อย

4.3 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากกากกาแฟและถ่านกัมมันต์ทางการค้าโดยวิธีตกเคลือบด้วยไอเคมี

ศึกษาและเปรียบเทียบพื้นที่ผิวจำเพาะและค่าไอโอดีนนัมเบอร์ในตัวอย่างคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากกากกาแฟโดยวิธีตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{CF}) ที่ถูกเตรียมที่สภาวะต่างๆ ที่แตกต่างกัน ได้แก่ อัตราการไหลของอะเซทิลีน เวลา และอุณหภูมิ เพื่อให้ทราบสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียม CMS_{CF} ซึ่งข้อมูลต่างๆ ได้แสดงดังต่อไปนี้

4.3.1 ผลของอัตราการไหลของอะเซทิลีนต่อสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียม CMS_{CF}

จากการศึกษาผลของอัตราการไหลของแก๊สอะเซทิลีนในการเตรียม CMS_{CF} ที่เวลา 30 นาที อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของอะเซทิลีน เท่ากับ 5 10 15 และ 20 มิลลิลิตรต่อนาที ของตัวอย่าง CMS_{CF1} CMS_{CF2} CMS_{CF3} และ CMS_{CF4} ตามลำดับ ได้อัตราการไหลของอะเซทิลีนที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการ เท่ากับ 10 มิลลิลิตรต่อนาที ดังภาพที่ 4.5



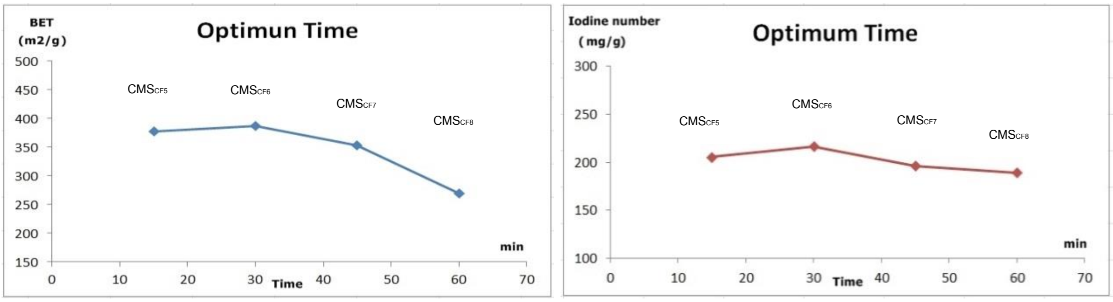
(ก) (ข)

ภาพที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของอะเซทิลีนในกระบวนการเตรียม CMS_{CF} ต่อ (ก) พื้นที่ผิวจำเพาะ และ (ข) ค่าไอโอดีนนัมเบอร์

4.3.2 ผลของเวลาต่อสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียม CMS_{CF}

จากการศึกษาผลของเวลาที่เหมาะสมในการเตรียม CMS_{CF} ที่อัตราการไหลที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 4.3.1 อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และเวลาเท่ากับ 15 30 45 และ 60 นาที ของตัวอย่าง CMS_{CF5} CMS_{CF6} CMS_{CF7} และ CMS_{CF8} ตามลำดับ ได้เวลาที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการ เท่ากับ 30 นาที ดังภาพที่ 4.6

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

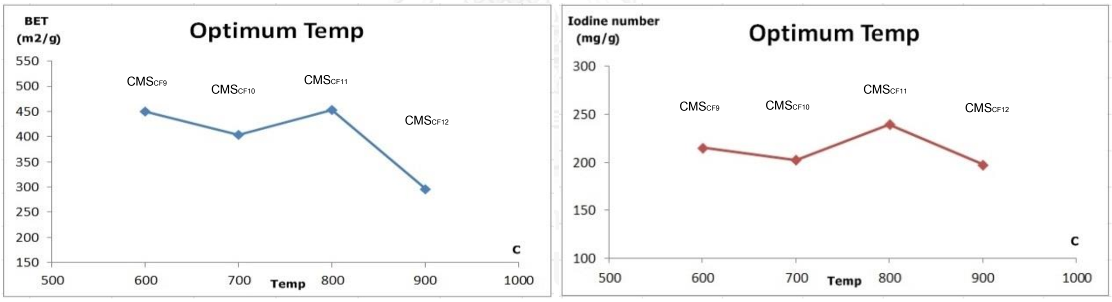


(ก) (ข)

ภาพที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในกระบวนการเตรียมเตรียม CMS_{CF} ต่อ (ก) พื้นที่ผิวจำเพาะ และ (ข) ค่าไอโอดีนนัมเบอร์

4.3.3 ผลของอุณหภูมิต่อสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียม CMS_{CF}

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเตรียม CMS_{CF} โดยใช้อัตราการไหลและเวลาที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 4.3.1 และ 4.3.2 ตามลำดับ และอุณหภูมิเท่ากับ 600 700 800 และ 900 องศาเซลเซียส ของตัวอย่าง CMS_{CF9} CMS_{CF10} CMS_{CF11} และ CMS_{CF12} ตามลำดับ ได้อุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการ เท่ากับ 800 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 4.7



(ก) (ข)

ภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในกระบวนการเตรียม CMS_{CF} ต่อ (ก) พื้นที่ผิวจำเพาะ และ (ข) ค่าไอโอดีนนัมเบอร์

จากข้อมูลการทดลองข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากกากกาแฟโดยวิธีตกเคลือบด้วยไอเคมี คือที่อัตราการไหลของอะเซทิลีนเท่ากับ 10 มิลลิลิตรต่อนาที เวลาเท่ากับ 30 นาที และอุณหภูมิเท่ากับ 800 องศาเซลเซียส โดยความร้อนจากกระบวนการจะแยกโมเลกุลของอะเซทิลีนที่เป็นแหล่งคาร์บอน ให้กลายเป็นอะตอมของคาร์บอนที่จะไปตกเคลือบยังพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ เพื่อเปลี่ยนแปลงรูปร่างและขนาดของรูพรุนของถ่านกัมมันต์ให้มีรูปร่างจำเพาะมากขึ้น (Mohamad Nor และคณะ, 2013) ซึ่งผลการวิเคราะห์

ทั้งหมดได้แสดงดังตารางที่ 4.2 โดยนำสภาวะที่เหมาะสมดังกล่าวมาใช้ในการเตรียมคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากถ่านกัมมันต์ทางการค้าโดยวิธีตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{GAC}) ด้วย

ตารางที่ 4.2 ผลวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของ CMS_{CF} ที่สภาวะต่างๆ

ชนิดตัวอย่าง	พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตร.ม./ก.)	ปริมาตรรูพรุน (ลบ.ซม./ก.)	ขนาดรูพรุน (นาโนเมตร)	ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ (มก./ก)
CMS_{CF1}	325.0	0.1991	2.451	186.4
CMS_{CF2}	384.8	0.2011	2.391	222.3
CMS_{CF3}	336.4	0.2319	2.410	203.4
CMS_{CF4}	333.6	0.2260	2.356	190.7
CMS_{CF5}	377.2	0.2228	2.363	205.5
CMS_{CF6}	387.5	0.2341	2.417	216.1
CMS_{CF7}	353.2	0.2096	2.374	195.8
CMS_{CF8}	268.9	0.1663	2.474	189.1
CMS_{CF9}	450.1	0.3133	2.784	215.2
CMS_{CF10}	403.8	0.2490	2.466	202.1
*CMS_{CF11}	453.0	0.2746	2.373	239.5
CMS_{CF12}	296.5	0.1804	2.434	197.5

*** ตัวอย่างที่ถูกเลือกมาเพื่อเป็นตัวแทนในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ**

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและค่าไอโอดีนนัมเบอร์ดังตารางที่ 4.2 พบว่าในกระบวนการตกเคลือบด้วยไอเคมีนั้น หากใช้เวลาและอัตราการไหลของอะเซทิลีนในกระบวนการตกเคลือบด้วยไอเคมีสูงเกินไป จะทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะของ CMS_{CF} ลดลง เนื่องจากเกิดส่วนเกินของคาร์บอนจากไอเคมีมาปิดปากรูพรุนไว้ (David และคณะ, 2004) และในกรณีที่ใช้อุณหภูมิในกระบวนการตกเคลือบด้วยไอเคมีสูงเกินไป จะทำให้ไอเคมีเกิดปฏิกิริยาเกาะติดกับพื้นที่ผิวได้เร็วกว่าการแพร่เข้าไปยังรูพรุนของตัวดูดซับ ซึ่งจะทำให้ไอเคมีส่วนใหญ่ติดอยู่ที่บริเวณพื้นที่ภายนอกทั้งหมดของรูพรุน ดังนั้นไอเคมีจึงไม่สามารถแพร่เข้าไปยังรูพรุนที่เหลือของตัวดูดซับได้ (Freitas และ Figueiredo, 2001) แต่ถ้าอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการตกเคลือบด้วยไอเคมีต่ำจนเกินไป จะทำให้ไอเคมีเกิดปฏิกิริยาเกาะติดกับพื้นที่ผิวได้ช้ากว่าการแพร่เข้าไปยังรูพรุนของตัวดูดซับ ซึ่งจะทำให้ไอเคมีเกาะติดกับพื้นที่ผิวภายในรูพรุน ทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะโดยรวมนั้นลดลง (Kawabuchi และคณะ, 1998) ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.2 ที่พบว่าตัวอย่าง CMS_{CF} ที่ตกเคลือบ

ด้วยไอเคมีที่อุณหภูมิสูงหรือต่ำจนเกินไป จะทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะและค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของตัวอย่างลดลง

4.4 ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวอย่าง

4.4.1 พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน ขนาดรูพรุน และค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของตัวอย่าง

วิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ โดยดำเนินการวิเคราะห์ที่สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย และทำการวิเคราะห์ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ตามวิธีการ ASTM D4607-14 (2014) ซึ่งมีดำเนินการแสดงดังภาคผนวก ก ในตัวอย่างถ่านกัมมันต์ทางการค้า (GAC) ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (GK) คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากกากกาแฟโดยวิธีตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{CF}) ที่สภาวะที่เหมาะสม คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากถ่านกัมมันต์ทางการค้าโดยวิธีตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{GAC}) คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟทางการค้า (CMS_{COM}) และถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่ผ่านกระบวนการเอิบชุ่มด้วยไคโตซาน (CGAC) โดยผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของตัวอย่าง

ชนิดตัวอย่าง	**พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตร.ม./ก.)**	**ปริมาตรรูพรุน (ลบ.ซม./ก.)**	**ขนาดรูพรุน (นาโนเมตร)**	**ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ (มก./ก)**
GAC	301.9	0.1589	2.278	137.2
GK	302.2	0.1792	2.424	154.5
*CMS_{CF}	453.0	0.2746	2.373	239.5
*CMS_{GAC}	604.0	0.3848	2.186	325.3
*CMS_{COM}	558.6	0.2529	2.360	295.4
*CGAC	531.3	0.2854	2.149	204.2

* **ตัวอย่างที่นำมาดำเนินการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ**

ข้อมูลจากตารางที่ 4.3 พบว่า พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน ขนาดรูพรุน และค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมกากกาแฟโดยวิธีตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{CF}) เท่ากับ 453.0 ตารางเมตรต่อกรัม 0.2736 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม 2.373 นาโนเมตร และ 239.5 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ในขณะที่พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน ขนาดรูพรุน และค่าไอโอดีนนัมเบอร์ ของถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (GK) ซึ่งเป็นตัวตั้งต้น

ของ CMS_{CF} ก่อนกระบวนการตกเคลือบด้วยไอเคมีนั้น เท่ากับ 303.2 ตารางเมตรต่อกรัม 0.1792 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม 2.424 นาโนเมตร และ 154.5 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

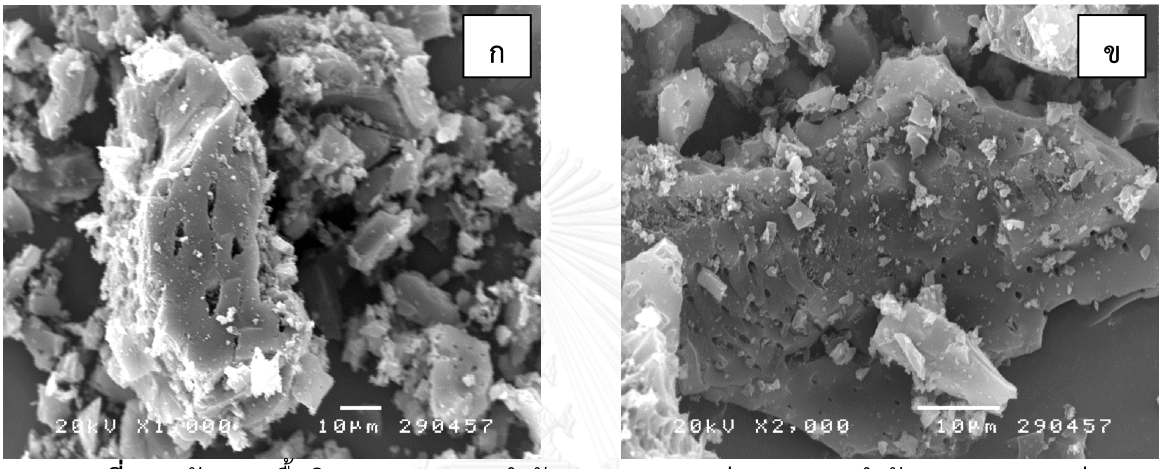
คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟจากถ่านกัมมันต์ทางการค้าโดยวิธีตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{GAC}) มีพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน ขนาดรูพรุน และค่าไอโอดีนนัมเบอร์ เท่ากับ 604.0 ตารางเมตรต่อกรัม 0.3848 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม 2.186 นาโนเมตร และ 325.3 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ในขณะที่พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน ขนาดรูพรุน และค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์ทางการค้า (GAC) ซึ่งเป็นตัวตั้งต้นของ CMS_{GAC} ในขั้นตอนก่อนกระบวนการตกเคลือบด้วยไอเคมีนั้น เท่ากับ 301.9 ตารางเมตรต่อกรัม 0.1589 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม 2.278 นาโนเมตร และ 137.2 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ จึงสามารถสรุปได้ว่า การตกเคลือบด้วยไอเคมีของอะเซทิลีน สามารถช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และค่าไอโอดีนนัมเนอร์ เนื่องจากรูพรุนขนาดใหญ่และขนาดกลางภายในตัวอย่างก่อนการตกเคลือบด้วยไอเคมี ถูกเปลี่ยนเป็นรูพรุนขนาดเล็ก ทำให้พื้นที่ผิวของตัวอย่างเพิ่มมากขึ้น (Adinata และคณะ, 2007) ซึ่งสอดคล้องกับขนาดรูพรุนที่ลดลงของ CMS_{CF} และ CMS_{GAC} หลังผ่านกระบวนการตกเคลือบโดยไอเคมี

ตัวอย่างถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่ผ่านกระบวนการเอิบชุ่มด้วยไคโตซาน (CGAC) มีพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน ขนาดรูพรุน และค่าไอโอดีนนัมเบอร์ เท่ากับ 531.3 ตารางเมตรต่อกรัม 0.2854 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม 2.149 นาโนเมตร และ 204.2 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ในขณะที่พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน ขนาดรูพรุน และค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์ทางการค้า (GAC) ซึ่งเป็นตัวตั้งต้นของตัวอย่าง CGAC มีค่าเท่ากับ 301.9 ตารางเมตรต่อกรัม 0.1589 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม 2.178 นาโนเมตร และ 137.2 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ จึงสามารถกล่าวได้ว่า การเอิบชุ่มด้วยสารละลายไคโตซานนั้น สามารถช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนรวมใน GAC ได้ เนื่องจากเกิดฟิล์มของไคโตซานเคลือบที่ผิวของ GAC ทำให้พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังช่วยเพิ่มหมู่ฟังก์ชั่นที่เป็นเบสบนพื้นผิวอีกด้วย (ชนิสา หงอสุวรรณ, 2548)

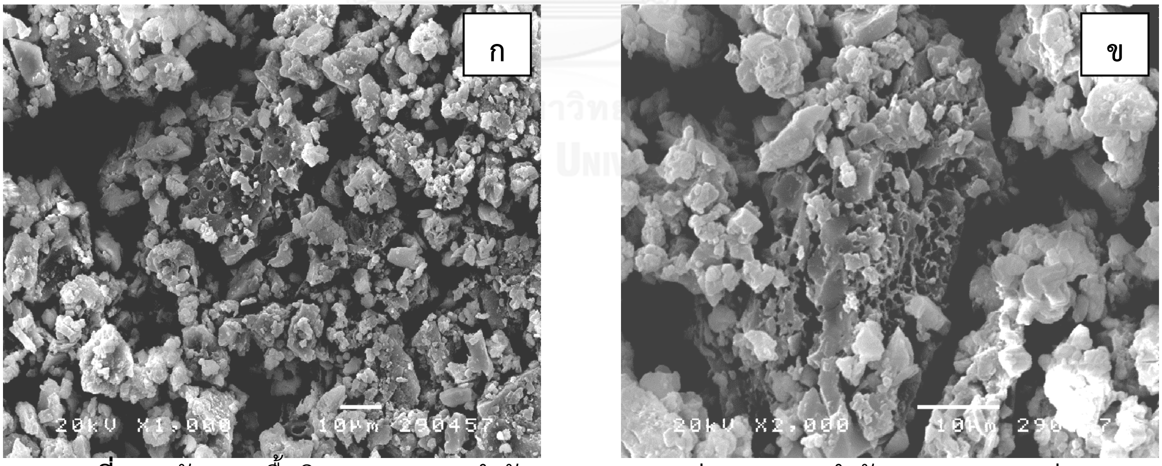
4.4.2 ลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง

จากการศึกษาลักษณะพื้นที่ผิวของตัวอย่าง ถ่านกัมมันต์ทางการค้า (GAC) ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกากกาแฟโดยการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (GK) คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากกากกาแฟโดยวิธีตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{CF}) คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากถ่านกัมมันต์ทางการค้าโดยวิธีตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{GAC}) และคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟทางการค้า (CMS_{COM}) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM) ที่กำลังขยาย 1,000 และ 2,000 เท่า แสดงดังภาพที่ 4.8 ถึง 4.12

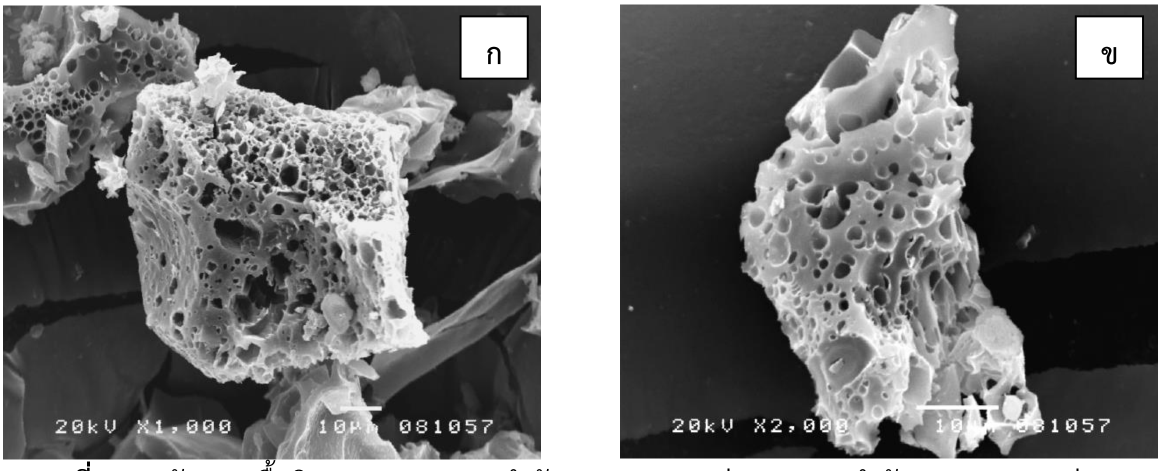
จากการศึกษาลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า CMS_{CF} มีรูพรุนจำนวนมากและสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจน โดยกระจายอยู่รอบบริเวณพื้นผิวมากกว่า GK ซึ่งเป็นตัวตั้งต้นก่อนกระบวนการตกเคลือบด้วยไอเคมีของ CMS_{CF} เช่นเดียวกับตัวอย่าง CMS_{GAC} ที่พบว่า สามารถสังเกตรูพรุนที่พื้นผิวว่ามีมากกว่า GAC ที่เป็นตัวตั้งต้นก่อนกระบวนการตกเคลือบด้วยไอเคมีอย่างเห็นได้ชัด และในตัวอย่าง CMS_{COM} นั้น พบรูพรุนบนพื้นที่ผิวซึ่งมีการกระจายตัวได้เล็กน้อยแต่ไม่ชัดเจน



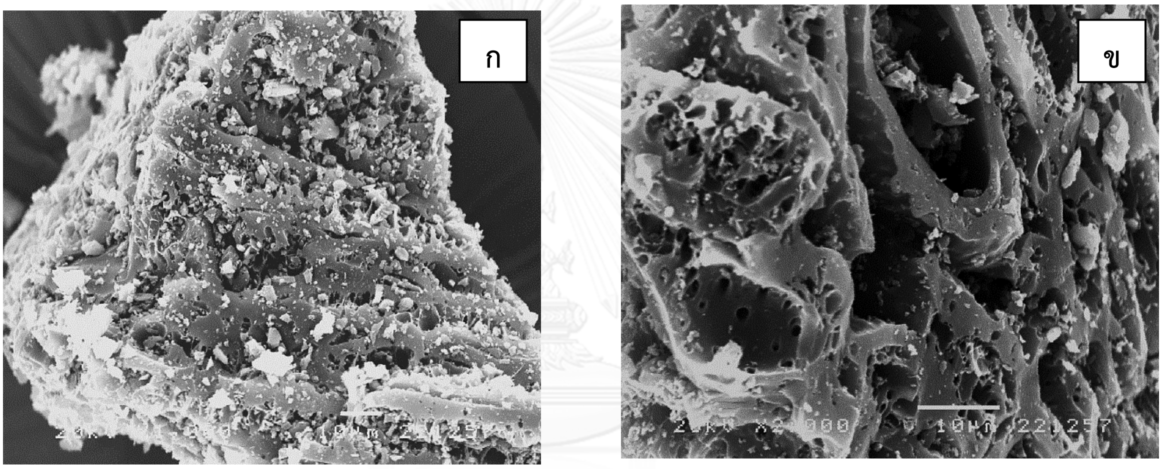
ภาพที่ 4.8 ลักษณะพื้นผิวของ GAC (ก) กำลังขยาย 1,000 เท่า และ (ข) กำลังขยาย 2,000 เท่า



ภาพที่ 4.9 ลักษณะพื้นผิวของ GK (ก) กำลังขยาย 1,000 เท่า และ (ข) กำลังขยาย 2,000 เท่า

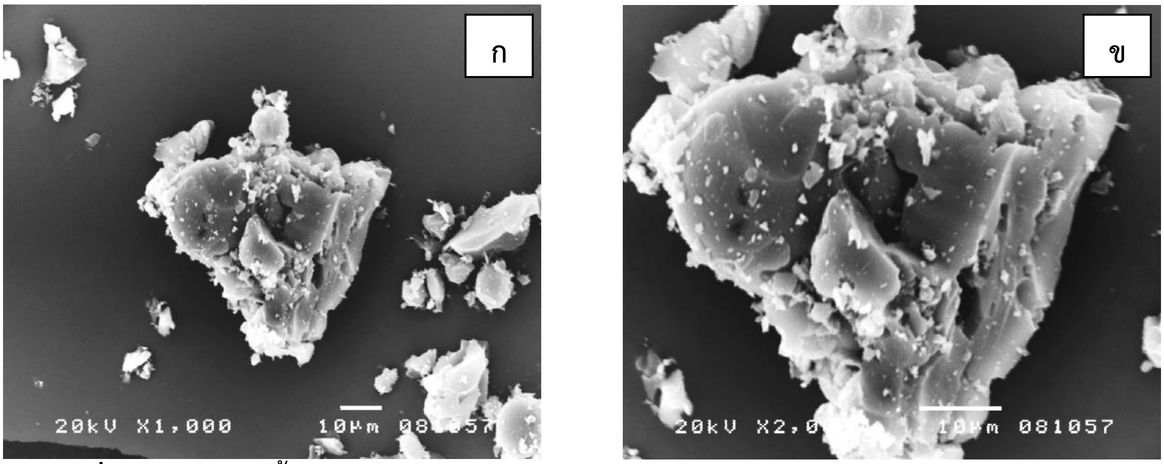


ภาพที่ 4.10 ลักษณะพื้นผิวของ CMS_{CF} (ก) กำลังขยาย 1,000 เท่า และ (ข) กำลังขยาย 2,000 เท่า



ภาพที่ 4.11 ลักษณะพื้นผิวของ CMS_{GAC} (ก) กำลังขยาย 1,000 เท่า และ (ข) กำลังขยาย 2,000 เท่า

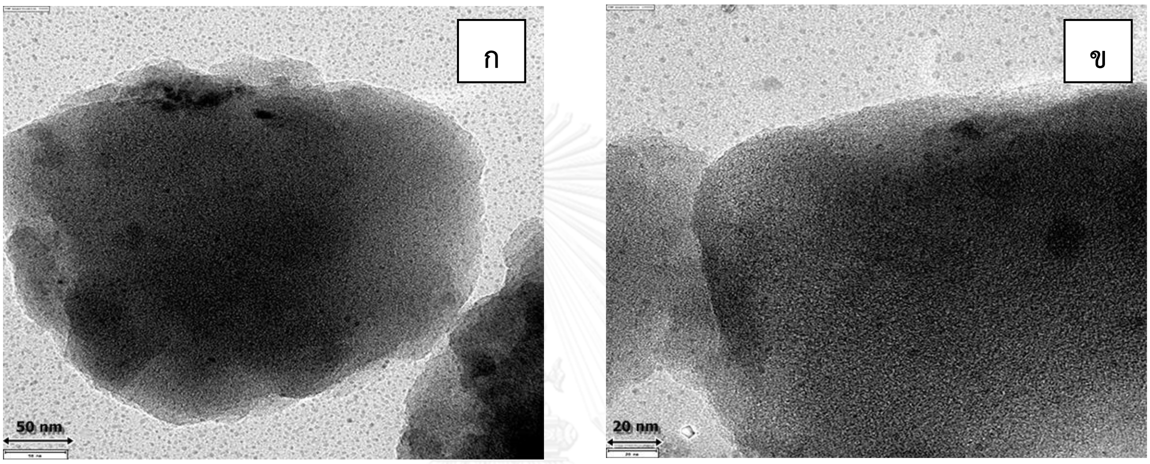
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



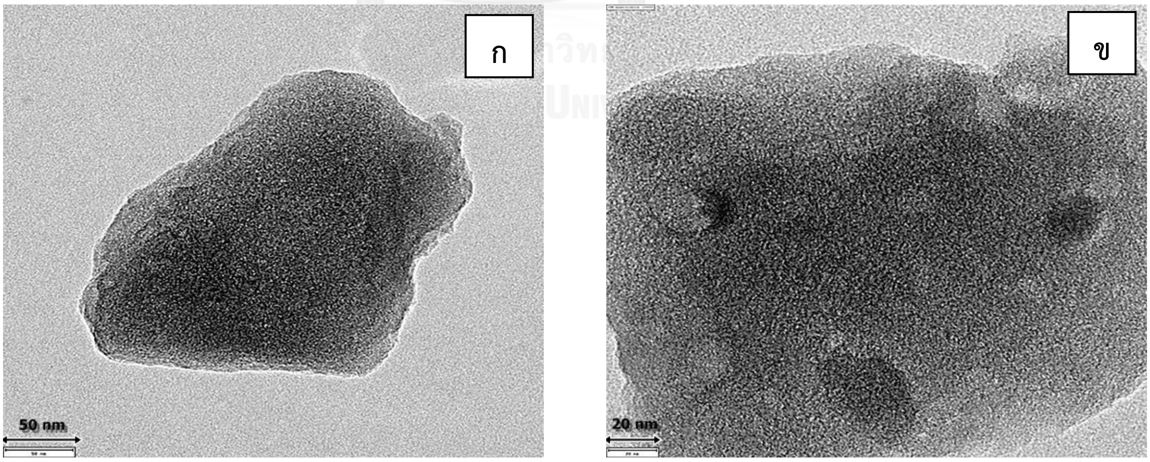
ภาพที่ 4.12 ลักษณะพื้นผิวของ CMS_{COM} (ก) กำลังขยาย 1,000 เท่า และ (ข) กำลังขยาย 2,000 เท่า

4.4.3 ลักษณะโครงสร้างภายในของตัวอย่าง

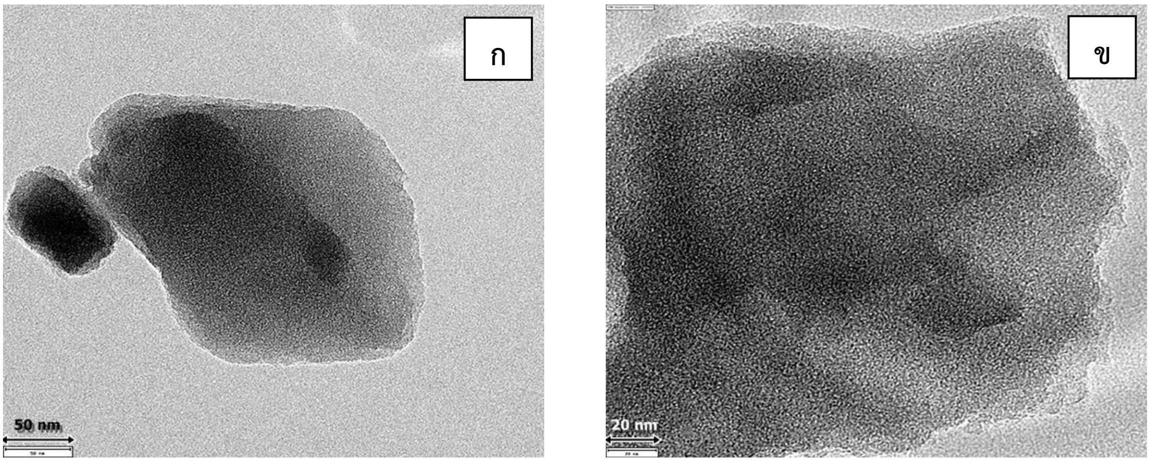
จากการศึกษาลักษณะโครงสร้างภายในของตัวอย่าง คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากกากกาแฟโดยวิธีตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{CF}) คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากถ่านกัมมันต์ทางการค้าโดยวิธีตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{GAC}) และคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟทางการค้า (CMS_{COM}) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscopy, TEM) ที่กำลังขยาย 50,000 และ 100,000 เท่า แสดงดังภาพที่ 4.13 ถึง 4.17



ภาพที่ 4.13 ลักษณะโครงสร้างภายในของ CMS_{CF} กำลังขยาย (ก) 50,000 เท่า และ (ข) 100,000 เท่า



ภาพที่ 4.14 ลักษณะโครงสร้างภายในของ CMS_{GAC} กำลังขยาย (ก) 50,000 เท่า และ (ข) 100,000 เท่า



ภาพที่ 4.15 ลักษณะโครงสร้างภายในของ CMS_{COM} กำลังขยาย (ก) 50,000 เท่า และ (ข) 100,000 เท่า

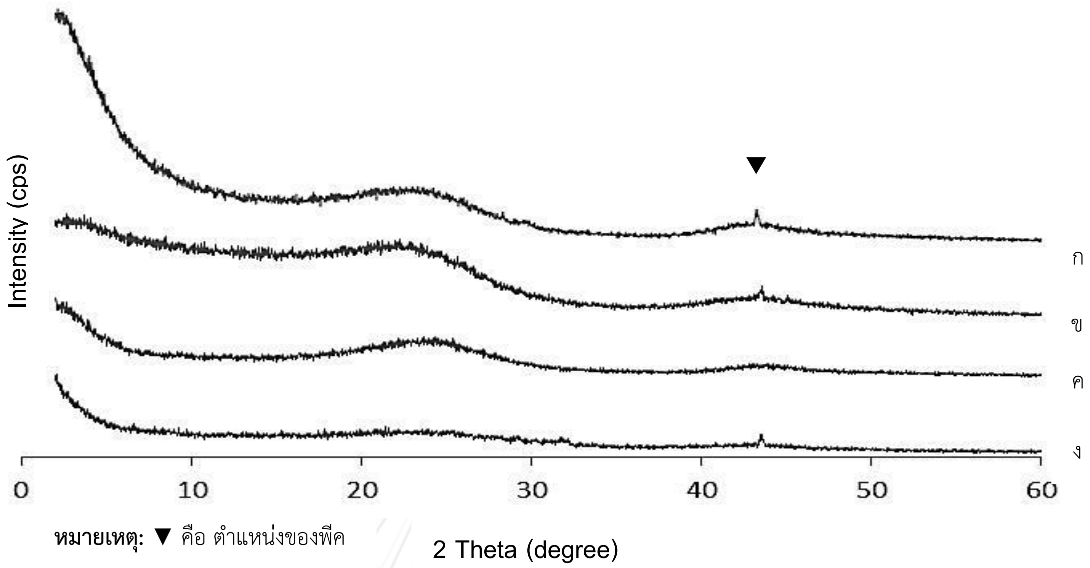
จากการศึกษาลักษณะโครงสร้างภายในของตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านพบว่า ไม่สามารถสังเกตเห็นช่องทางของรูพรุนภายในตัวอย่างได้อย่างชัดเจน แต่จากการวิเคราะห์ปริมาณรูพรุนรวมทำให้ทราบว่าตัวอย่างนั้นมีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมากกระจายอยู่ทั่วไปในชั้นและกลุ่มของคาร์บอน โดยตัวอย่างคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟเป็นตัวอย่างที่ไม่มีความเป็นผลึก (Amorphous) เพราะถูกผลิตมาจากวัตถุต่างๆ ที่เป็นแหล่งคาร์บอน เช่น ถ่านกัมมันต์ซึ่งไม่มีความเป็นผลึกเช่นกัน ดังนั้นเมื่อศึกษาโครงสร้างภายในด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านจึงแสดงส่วนทึบ เพราะรูพรุนในตัวอย่างไม่มีความเป็นระเบียบในลักษณะแนวตรงหรือทางขวาง ซึ่งตรงกับงานวิจัยของ Fu และคณะ (2014) ที่ได้ทำการศึกษาลักษณะโครงสร้างภายในของถ่านกัมมันต์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน และพบว่าภายในถ่านกัมมันต์มีช่องทางขนาดเล็กมากเชื่อมต่อกันในชั้นของถ่านอย่างไม่เป็นระเบียบ

4.4.4 ลักษณะโครงสร้างผลึกของตัวอย่าง

จากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction spectroscopy, XRD) ในตัวอย่าง คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากกากกาแฟโดยวิธีการตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{CF}) คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากถ่านกัมมันต์ทางการค้าโดยวิธีการตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{GAC}) คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟทางการค้า (CMS_{COM}) และถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่ผ่านกระบวนการเอิบชุ่มด้วยไคโตซาน (CGAC) แสดงดังภาพที่ 4.16 พบว่า CMS_{CF} และ CMS_{GAC} มีพีคที่ตำแหน่ง 2 Theta บริเวณเดียวกับ CMS_{COM} ที่มุม 2 Theta เท่ากับ 43.56 ในขณะที่ CGAC ซึ่งยังคงเป็นถ่านกัมมันต์อยู่นั้น ไม่มีพีคที่มุม 2 Theta ในตำแหน่งใดเลย เพราะถ่านกัมมันต์เป็นถ่านที่อยู่ในรูปคาร์บอนอสัณฐาน (Amorphous carbon) ซึ่งไม่มีความเป็น

Chulalongkorn University

ผลึก (Crystalinity) โดยมีอนุภาคเรียงตัวกันอย่างไม่มีระเบียบ จึงอาจสรุปได้ว่า CMS_{CF} CMS_{GAC} และ CMS_{COM} มีลักษณะของโครงสร้างผลึกที่ตรงกันที่ตำแหน่ง 2 Theta เท่ากับ 43.56 ซึ่งเป็นผลึกของแกรไฟต์แบบหกเหลี่ยม (Graphite) อยู่ภายในโครงสร้างเล็กน้อย



ภาพที่ 4.16 การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของตัวอย่างด้วยเครื่อง XRD
(ก) CMS_{GAC} (ข) CMS_{COM} (ค) CGAC (ง) CMS_{CF}

4.4.5 ลักษณะโครงสร้างหมู่ฟังก์ชั่นของตัวอย่าง

ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างหมู่ฟังก์ชั่นบนพื้นผิวของตัวอย่าง ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (GK) ถ่านกัมมันต์ทางการค้า (GAC) คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากกากกาแฟโดยวิธีการตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{CF}) คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากถ่านกัมมันต์ทางการค้าโดยวิธีการตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{GAC}) คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟทางการค้า (CMS_{COM}) และถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่เอิบชุ่มด้วยไคโตซาน (CGAC) ด้วยเครื่องวิเคราะห์หมู่โครงสร้าง (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR) แสดงดังภาพที่ 4.17 และตารางที่ 4.4

ก

ข

ค

ง

จ

ฉ

ภาพที่ 4.17 กราฟผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างและหมู่ฟังก์ชั่นด้วยเทคนิค FTIR ของตัวอย่าง (ก) CMS_{COM} (ข) CMS_{CF} (ค) GK (ง) CGAC (จ) CMS_{GAC} และ (ฉ) GAC

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4.4 ลักษณะโครงสร้างหมู่ฟังก์ชั่นบนพื้นผิวของตัวอย่าง

หมู่ฟังก์ชั่นที่พบ	GAC	GK	CMS_{CF}	CMS_{COM}	CMS_{GAC}	CGAC
แอลกอฮอล์หรือฟีนอล	/	/	/	/	ND	ND
อัลเคน	ND	/	/	ND	/	ND
อะโรมาติก	/	/	/	ND	/	ND
α, β-อัลดีไฮด์และคีโตนแบบไม่อิ่มตัว	ND	ND	ND	ND	ND	/
1-เอมีน	ND	/	ND	ND	ND	/
สารประกอบไนโตร	ND	/	ND	/	ND	/
1,2-เอมีนหรือเอไมด์	ND	/	ND	/	ND	ND
เอมีนที่เป็นสายยาว	ND	/	/	/	ND	ND
อัลคิลเฮไลด์	ND	/	ND	/	ND	ND
คาร์บอกซิล	/	/	/	/	/	ND

หมายเหตุ: / คือ พบหมู่ฟังก์ชั่น

ND คือ ไม่พบหมู่ฟังก์ชั่น

จากตารางที่ 4.4 พบว่า ตัวอย่าง GK และ CMS_{CF} นั้นมีหมู่ฟังก์ชั่นที่เหมือนกัน ได้แก่ แอลกอฮอล์หรือฟีนอล (–OH : 3640-3610 ซม$^{-1}$) อัลเคน (–CH : 3000-2850 ซม$^{-1}$) อะโรมาติก (–CC : 1600-1585 ซม$^{-1}$) เอมีนที่เป็นสายยาว (–CN : 1250-1020 ซม$^{-1}$) และกรดคาร์บอกซิล (-OH : 3200-2500 และ 950-910 ซม$^{-1}$) โดยหลังจากกระบวนการตกเคลือบด้วยไอเคมีเพื่อเตรียม CMS_{CF} นั้น จะทำให้หมู่ฟังก์ชั่น ได้แก่ 1-เอมีน (–NH : 1650-1580 ซม$^{-1}$) สารประกอบไนโตร (–NO : 1550-1475) 1,2-เอมีนหรือเอไมด์ (–NH : 3400-3250 ซม$^{-1}$) และอัลคิลเฮไลด์ (–CH หรือ $–CH_2X$: 1300-1150 ซม$^{-1}$) ของตัวอย่าง GK นั้นได้หายไป และใน CMS_{COM} นั้นจะพบหมู่ฟังก์ชั่น ได้แก่ แอลกอฮอล์หรือฟีนอล สารประกอบไนโตร 1,2-เอมีนหรือเอไมด์ เอมีนที่เป็นสายยาว อัลคิลเฮไลด์ และคาร์บอกซิล

ในส่วนของตัวอย่าง GAC นั้น มีหมู่ฟังก์ชั่นได้แก่ แอลกอฮอล์หรือฟีนอล อะโรมาติก และคาร์บอกซิล แต่หลังจากกระบวนการเอิบชุ่มด้วยสารละลายไคโตซาน พบว่าหมู่ฟังก์ชั่นดังกล่าวของ GAC ไม่ปรากฏบนพื้นผิวบนตัวอย่าง CGAC แต่ปรากฏหมู่ฟังก์ชั่น α, β-อัลดีไฮด์และคีโตนแบบไม่อิ่มตัว 1-เอมีน และสารประกอบไนโตรเพิ่มขึ้นมา ซึ่งหมู่ฟังก์ชั่นเหล่านี้ได้ปรากฏ ในไคโตซานเช่นกัน ดังภาพที่ ข.3 โดยทั่วไปนั้นถ่านกัมมันต์จะมีหมู่ฟังก์ชั่นของกรดคาร์บอกซิล และแอลกอฮอล์หรือฟีนอล (รุจิรา ปิ่นแก้ว, 2556) แต่หลังจากผ่านกระบวนการเอิบชุ่มด้วยสารละลาย ไคโตซานที่มีฤทธิ์เป็นเบสจึงทำให้หมู่ฟังก์ชั่นกรดคาร์บอกซิลหายไป และเมื่อนำตัวอย่าง GAC มาผ่านกระบวนการตกเคลือบด้วยไอเคมีเพื่อเตรียมเป็นคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากถ่านกัมมันต์ทางการค้าโดยวิธีการตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{GAC}) พบว่า หมู่แอลกอฮอล์และฟีนอลที่ตำแหน่ง 3638 ซม$^{-1}$ ของ GAC นั้นหายไป แต่มีหมู่อัลเคน ที่ตำแหน่ง 1397 ซม$^{-1}$ เพิ่มขึ้นมา

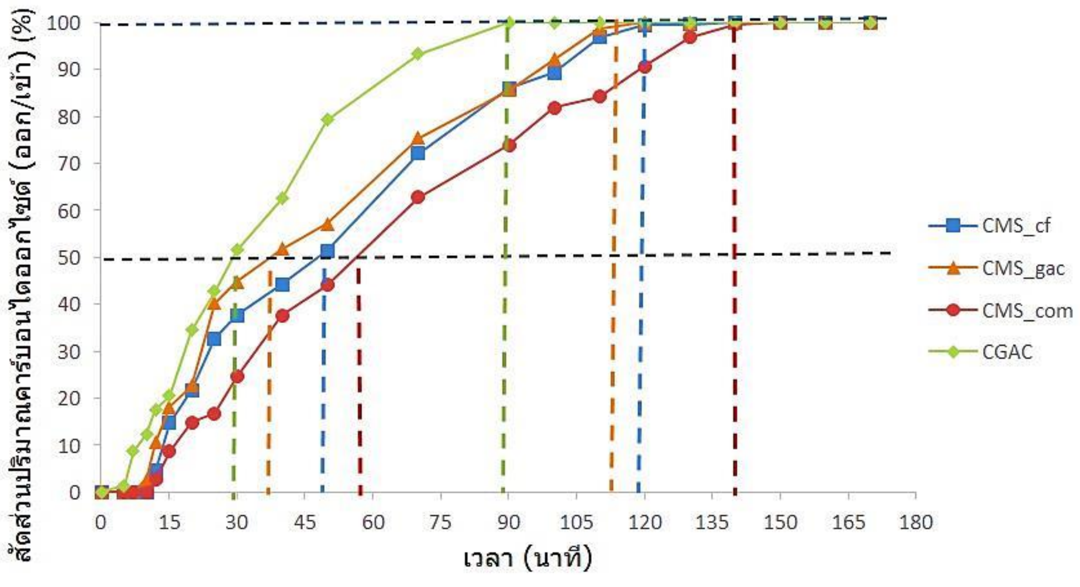
จากการศึกษาพบว่า กระบวนการเอิบชุ่มด้วยไคโตซานสามารถช่วยเพิ่มหมู่ฟังก์ชั่นจำพวก α, β-อัลดีไฮด์แบบไม่อิ่มตัว คีโตน 1-เอมีน และสารประกอบไนโตร ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชั่นที่ปรากฏอย่างเด่นชัดบนไคโตซาน และในกระบวนการตกเคลือบด้วยไอเคมีของอะเซทิลีนนั้น จะทำให้หมู่ฟังก์ชั่นบางประเภทหายไป อาจเนื่องด้วยไอเคมีของอะเซทิลีนเข้าไปทำปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชั่นเหล่านั้น หรือเกิดการเคลือบของไอเคมีที่ผิวของตัวอย่าง (Bikshapathi และคณะ, 2011)

4.5 การศึกษาปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกต่อขาเข้า ความบริสุทธิ์ของแก๊สมีเทน และประสิทธิภาพในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

4.5.1 ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกต่อขาเข้า

ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกต่อขาเข้าของแก๊สในตัวอย่าง คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากกากกาแฟโดยวิธีการตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{CF}) คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากถ่านกัมมันต์ทางการค้าโดยวิธีการตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{GAC}) คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟทางการค้า (CMS_{COM}) และถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่ผ่านกระบวนการเอิบชุ่มด้วยไคโตซาน (CGAC) ได้แสดงดังภาพที่ 4.18 พบว่าสัดส่วนปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกต่อขาเข้าของตัวอย่าง CMS_{CF} CMS_{GAC} CMS_{COM} และ CGAC เกินระดับที่กำหนด (ร้อยละ 50 ของปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า) ที่ระยะเวลาเท่ากับ 47 40 57 และ 30 นาที ตามลำดับ โดยตัวอย่างที่มีสัดส่วนปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่า จะมีความบริสุทธิ์ของแก๊สมีเทนหลังกระบวนการดูดซับในคอลัมน์ต่ำกว่าตัวอย่างอื่นๆ เนื่องจากแก๊สขาออกมีสัดส่วนของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งพบว่าหากดำเนินการดูดซับแก๊สชีวภาพสังเคราะห์ต่อไป จะทำให้สัดส่วนปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ จนเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ หรือความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกเท่ากับขาเข้า ที่เวลาเท่ากับ 117 110 138 และ 88 นาที ตามลำดับ ดังนั้นควรจะต้องมีการฟื้นฟูประสิทธิภาพของตัวดูดซับ (Regeneration) ก่อนดำเนินการดูดซับอีกครั้งที่จุดที่รับได้ เพื่อให้ได้ความบริสุทธิ์ของแก๊สมีเทนที่สูง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

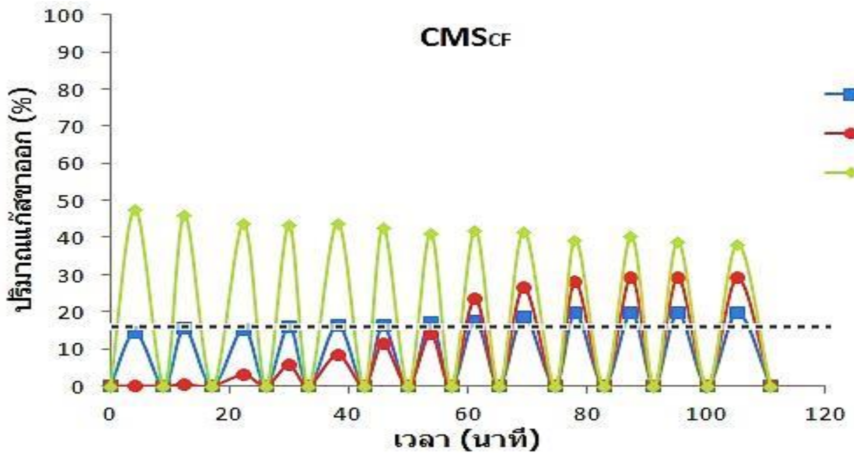


ภาพที่ 4.18 กราฟปริมาณของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกต่อขาเข้าของตัวอย่าง

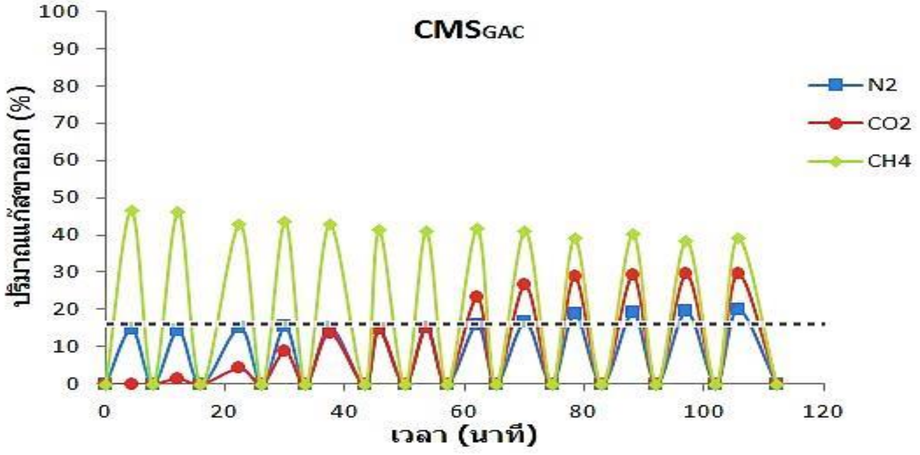
4.5.2 ความบริสุทธิ์ของแก๊สมีเทน

ผลการศึกษาความบริสุทธิ์ของแก๊สมีเทนหลังกระบวนการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ในแก๊สชีวภาพสังเคราะห์ของตัวอย่าง คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากกากกาแฟโดยวิธีการตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{CF}) คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากถ่านกัมมันต์ทางการค้าโดยวิธีการตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{GAC}) คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟทางการค้า (CMS_{COM}) และถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่ผ่านกระบวนการเอิบชุ่มด้วยไคโตซาน (CGAC) ในเครื่องวิเคราะห์การดูดซับสลับความดันแบบคอลัมน์เดี่ยว ซึ่งได้เวลาในแต่ละรอบการดูดซับจากความสัมพันธ์ระหว่างความดันในระยะเวลาต่างๆ (Pressure profile) เท่ากับ 10 นาที โดยได้ผลการทดลองปริมาณของแก๊สขาออกดังภาพที่ 4.19 ถึง 4.22 ตามลำดับ ซึ่งปริมาณของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สขาออกจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบของการดูดซับ จนถึงจุดที่รับได้ที่ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกเท่ากับร้อยละ 50 ของความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า จะทำให้ได้ข้อมูลจำนวนรอบของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวอย่างก่อนที่จะฟื้นฟูประสิทธิภาพ เท่ากับ 7 7 8 และ 4 รอบ ตามลำดับ

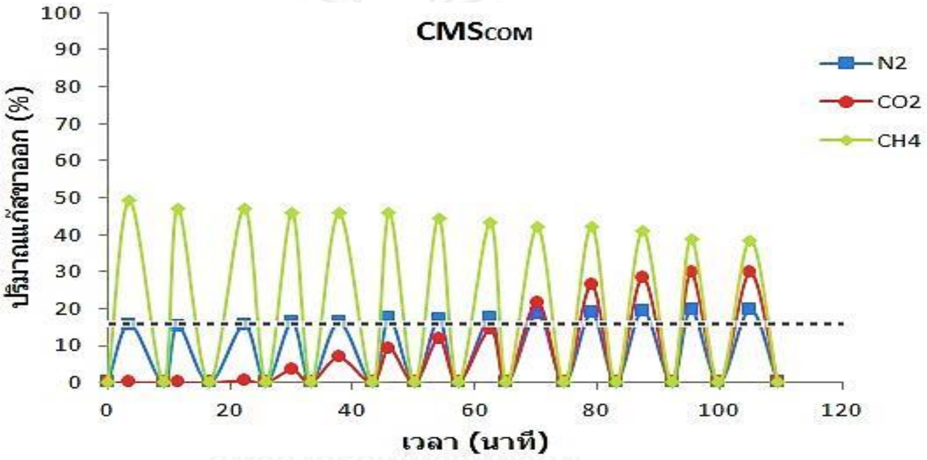
เมื่อคำนวณหาความบริสุทธิ์ของแก๊สมีเทนจากปริมาณร้อยละของแก๊สมีเทนขาออกต่อขาเข้า (C/C_0) พบว่า ตัวอย่าง CMS_{COM} มีความบริสุทธิ์ของแก๊สมีเทนหลังกระบวนการดูดซับสูงที่สุด ในบรรดาตัวอย่างทั้งหมด รองลงมาได้ตัวอย่าง CMS_{CF} CMS_{GAC} และ CGAC ตามลำดับ โดยมีความบริสุทธิ์ของมีเทนหรือร้อยละของปริมาณมีเทนขาออกต่อขาเข้า เท่ากับร้อยละ 98.26 95.20 93.16 และ 82.72 ตามลำดับ และพบว่าความบริสุทธิ์ของแก๊สมีเทนจะค่อยๆ ลดลงตามระยะเวลาที่ดำเนินการ ดังภาพที่ 4.23 ดังนั้นจึงควรมีการฟื้นฟูประสิทธิภาพของตัวดูดซับ (Regeneration) โดยพิจารณาจากปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่รับได้ของตัวอย่าง



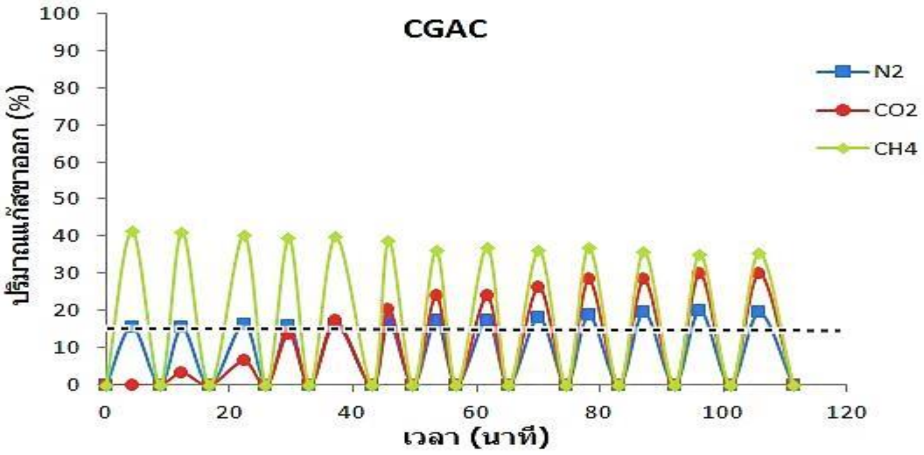
ภาพที่ 4.19 กราฟปริมาณของมีเทนขาออกในตัวอย่าง CMS_{CF}



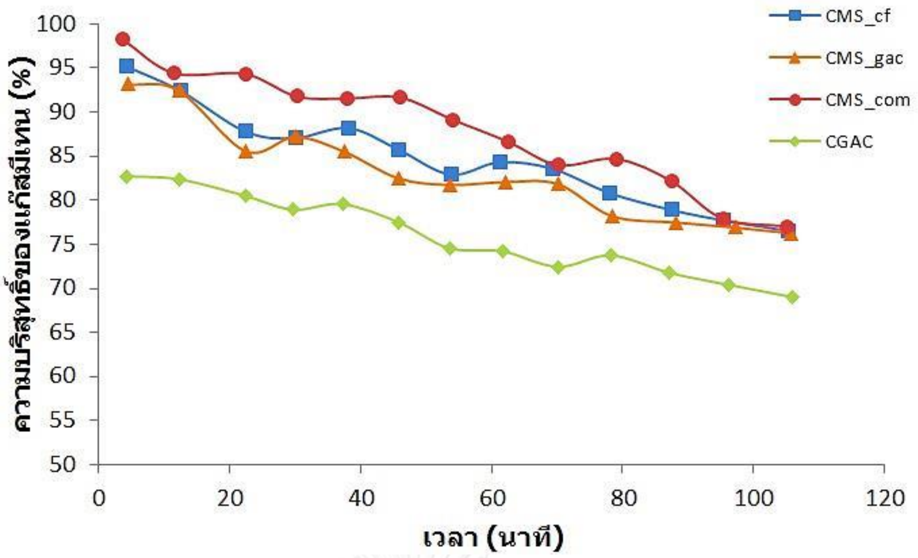
ภาพที่ 4.20 กราฟปริมาณของมีเทนขาออกในตัวอย่าง CMS_{GAC}



ภาพที่ 4.21 กราฟปริมาณของมีเทนขาออกในตัวอย่าง CMS_{COM}



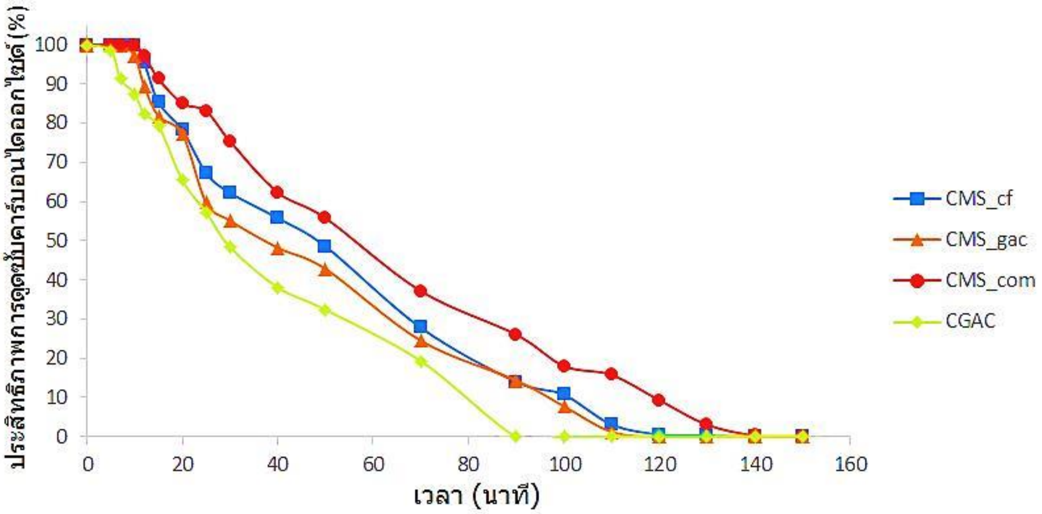
ภาพที่ 4.22 กราฟปริมาณของมีเทนขาออกในตัวอย่าง CGAC



ภาพที่ 4.23 ความบริสุทธิ์ของมีเทนในตัวอย่าง

4.5.3 ประสิทธิภาพในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

ผลของการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวอย่างคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟจากกากกาแฟโดยวิธีการตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{CF}) คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟจากถ่านกัมมันต์ทางการค้าโดยวิธีการตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{GAC}) คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟทางการค้า (CMS_{COM}) และถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่ผ่านกระบวนการเอิบชุ่มด้วยไคโตซาน (CGAC) ที่ระยะเวลาต่างๆ ในเครื่องวิเคราะห์การดูดซับแบบคอลัมน์เดี่ยว ได้ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.23 โดยพบว่า CMS_{CF} CMS_{GAC} CMS_{COM} และ CGAC จะไม่สามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์อีก หรือหมดประสิทธิภาพในการดูดซับที่เวลาเท่ากับ 120 114 140 และ 90 นาที ตามลำดับ



ภาพที่ 4.24 กราฟประสิทธิภาพการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวอย่าง

4.6 การศึกษาค่าการเลือกในการดูดซับของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อแก๊สมีเทน และความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด (Selectivity and maximum CO_2 adsorption)

จากการทดลองและคำนวณหาค่าการเลือกในการดูดซับของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อแก๊สมีเทน (Selectivity) ในตัวอย่าง คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากกากกาแฟโดยวิธีการตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{CF}) คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากถ่านกัมมันต์ทางการค้าโดยวิธีการตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{GAC}) คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟทางการค้า (CMS_{COM}) และถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่ผ่านกระบวนการเอิบชุ่มด้วยไคโตซาน (CGAC) โดยดำเนินการเพียงหนึ่งรอบการดูดซับรอบละ 10 นาที ซึ่งมีค่าการเลือกในการดูดซับของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อแก๊สมีเทนของตัวอย่าง (Selectivity) ดังแสดงในตารางที่ 4.5

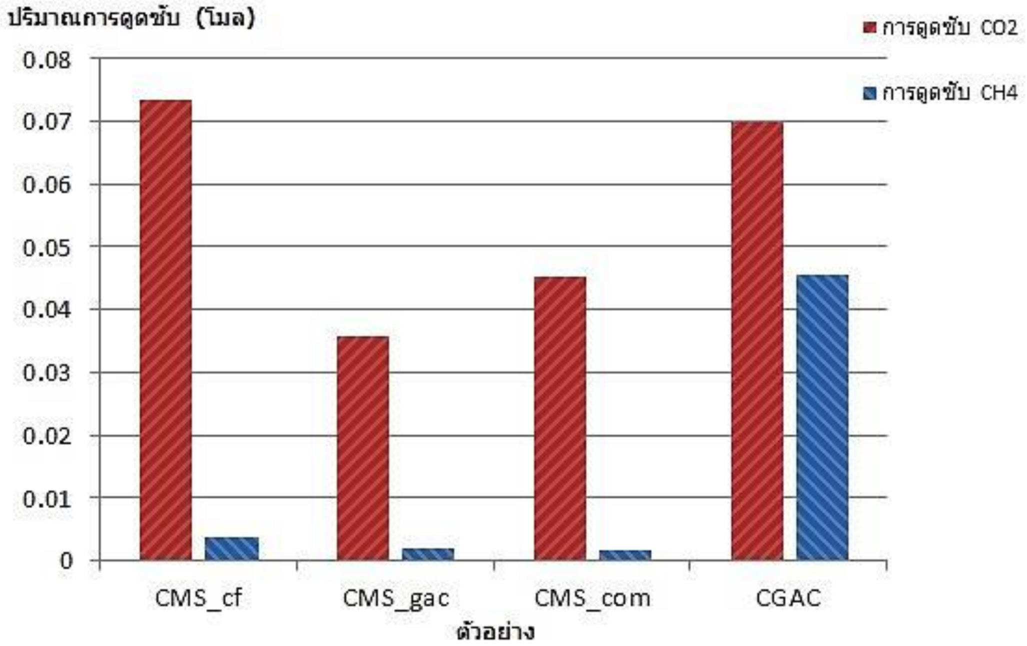
ตารางที่ 4.5 ค่าการเลือกในการดูดซับของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อแก๊สมีเทนในตัวอย่าง

ตัวอย่าง	**การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ (โมล)**	**การดูดซับมีเทน (โมล)**	**ค่าการเลือก (โมลของคาร์บอนไดออกไซด์ต่อโมลของมีเทน)**
CMS_{CF}	0.0736	0.00379	19.41
CMS_{GAC}	0.0357	0.00216	16.53
CMS_{COM}	0.0453	0.00182	24.89
CGAC	0.0699	0.04550	1.54

จากตารางที่ 4.5 พบว่า ค่าการเลือกในการดูดซับของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อแก๊สมีเทน (Selectivity) ในตัวอย่าง CMS_{COM} มีค่าสูงที่สุด เท่ากับ 24.89 โดยมีค่ามากกว่าในตัวอย่าง CMS_{CF} CMS_{GAC} และ CGAC ซึ่งเท่ากับ 19.41 16.53 และ 1.54 ตามลำดับ ทำให้ทราบว่าตัวอย่าง CMS_{COM} CMS_{CF} และ CMS_{GAC} สามารถใช้ในการแยกคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สชีวภาพได้ดี ตามลำดับ ในขณะที่ตัวอย่าง CGAC นั้นไม่เหมาะสมมากนัก เนื่องจากตัวอย่าง CGAC นั้น ดูดซับมีเทนเข้าไปด้วย ดังนั้นความบริสุทธิ์ของมีเทนในแก๊สขาออกจะน้อยลง โดยจากการเปรียบเทียบค่าการเลือกในการดูดซับของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สมีเทน ดังภาพที่ 4.25 ของตัวอย่างคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากถ่านกัมมันต์ทางการค้าโดยวิธีการตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{GAC}) กับถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่ผ่านกระบวนการเอิบชุ่มด้วยไคโตซาน (CGAC) ซึ่งตัวอย่างทั้งสองตัวอย่าง ถูกเตรียมจากถ่านกัมมันต์ทางการค้า (GAC) โดยกระบวนการที่แตกต่างกัน ซึ่งพบว่ากระบวนการตกเคลือบด้วยไอเคมีโดยอะเซทิลีน สามารถปรับปรุงค่าการเลือกในการดูดซับของตัวดูดซับได้มากกว่ากระบวนการเอิบชุ่มด้วยไคโตซาน เนื่องจากเกิดการกระจายตัวของรูพรุนที่แคบลง ทำให้ตัวดูดซับสามารถแยก

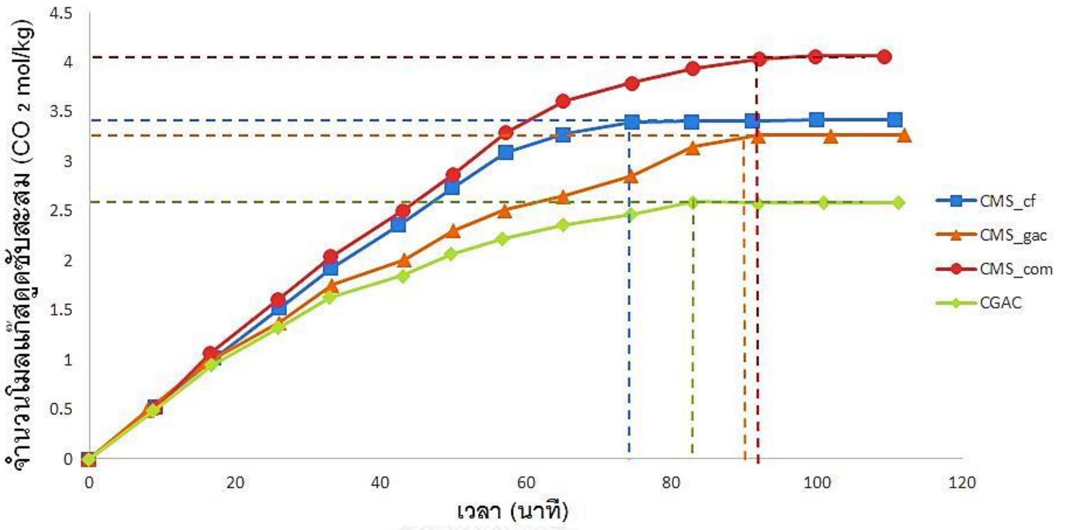
โมเลกุลของแก๊สที่ถูกดูดซับได้ โดยอาศัยความแตกต่างระหว่างขนาดและรูปร่างของโมเลกุลแก๊สกับปากของรูพรุน (Pore mouth) ที่มีความจำเพาะต่อขนาดของโมเลกุล ซึ่งเป็นหลักการพื้นฐานของการดูดซับ ดังนั้นคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟจึงแสดงลักษณะเฉพาะตัวในด้านการดูดซับต่อแก๊สชนิดหนึ่งมากกว่าอีกชนิดอย่างเห็นได้ชัด (Wahby และคณะ, 2012) โดยการที่จะได้ปากรูพรุนที่มีจำเพาะนั้นจำเป็นต้องมีการควบคุมสภาวะในการดำเนินกระบวนการตกเคลือบด้วยไอเคมีที่เหมาะสม อีกทั้งยังขึ้นอยู่กับธรรมชาติของวัตถุดิบตั้งต้นที่นำมาใช้ในกระบวนการอีกด้วย

เมื่อเปรียบเทียบค่าการเลือกในการดูดซับของตัวอย่าง CMS_{CF} และ CMS_{GAC} ซึ่งเป็นโมเลกุลาร์ซีฟทั้งสองตัวอย่าง พบว่า CMS_{CF} มีค่าการเลือกในการดูดซับสูงกว่า CMS_{GAC} เนื่องจากในตัวอย่าง CMS_{CF} มีหมู่ฟังก์ชั่นแอลกอฮอล์หรือฟีนอล (–OH) และเอมีน (-NH) ที่ได้จากกระบวนการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในขั้นตอนการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างหมู่ฟังก์ชั่น (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR) บนพื้นผิวของตัวอย่างทั้งสอง โดยหมู่ฟังก์ชั่นดังกล่าวมีสมบัติเป็นเบส จึงช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งมีสมบัติเป็นกรดอ่อนได้ดี (Maghsoodloo และคณะ, 2011) โดยโครงสร้างของรูพรุน เช่น การกระจายตัวของขนาดรูพรุน พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดของรูพรุน ที่แตกต่างกันในตัวอย่างคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟแต่ละชนิดนั้น ยังขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบ ที่นำมาใช้ในกระบวนการเตรียมเป็นคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟ รวมถึงขั้นตอนในการเตรียม เช่น ขั้นตอนการกระตุ้นและขั้นตอนการตกเคลือบด้วยไอเคมีอีกด้วย (Wahby และคณะ, 2012)



ภาพที่ 4.25 กราฟเปรียบเทียบปริมาณการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนในตัวอย่าง

คำนวณความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด (Maximum adsorption capacity) ในสัดส่วนของปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับสะสมที่ช่วงเวลาต่างๆ ต่อมวลของตัวอย่าง ได้แก่ คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากกากกาแฟโดยวิธีการตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{CF}) คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากถ่านกัมมันต์ทางการค้าโดยวิธีการตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{GAC}) คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟทางการค้า (CMS_{COM}) และถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่ผ่านกระบวนการเอิบชุ่มด้วยไคโตซาน (CGAC) ซึ่งได้ผลการทดลองดังภาพที่ 4.26



ภาพที่ 4.26 กราฟแสดงความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดของตัวอย่าง

จากกราฟความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดของตัวอย่าง ดังภาพที่ 4.26 พบว่า CMS_{COM} มีปริมาณการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด (Maximum adsorption capacity) สูงที่สุดในบรรดาตัวอย่างทั้งหมด เท่ากับ 4.06 โมลต่อกิโลกรัม (ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ) ในขณะที่ CMS_{CF} CMS_{GAC} และ CGAC มีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด เท่ากับ 3.42 3.26 และ 2.58 โมลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

จากผลการทดลองหาความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดของ CMS_{GAC} และ CGAC พบว่ากระบวนการตกเคลือบไอเคมีด้วยอะเซทิลีนนั้น จะทำให้ถ่านกัมมันต์ทางการค้ามีความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่ากระบวนการเอิบชุ่มด้วยไคโตซาน เนื่องจากกระบวนการตกเคลือบด้วยไอเคมีจะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะและค่าไอโอดีนนัมเบอร์ได้มากกว่ากระบวนการเอิบชุ่มด้วยไคโตซาน เพราะรูพรุนขนาดใหญ่และรูพรุนขนาดกลางของตัวอย่าง จะถูกเปลี่ยนเป็นรูพรุนขนาดเล็กทำให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากขึ้น (Adinata และคณะ, 2007) อีกทั้งเพราะตัวอย่างมีความจำเพาะต่อแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าแก๊สอื่น ทำให้ตัวดูดซับไม่เสียพื้นที่สำหรับการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ไปกับการดูดซับแก๊สอื่น ซึ่งสอดคล้องกับ

การศึกษาหาค่าการเลือกในการดูดซับของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อแก๊สมีเทน (Selectivity) ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะมีผลต่อจำนวนรอบในการดูดซับและความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด

สำหรับในตัวอย่าง CMS_{CF} นั้นจะมีความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่า CMS_{GAC} แม้จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะและค่าไอโอดีนนัมเบอร์ต่ำกว่า เนื่องจากตัวตั้งต้นของ CMS_{CF} นั้นคือถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกากกาแฟที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (GK) ในขณะที่ตัวตั้งต้นของ CMS_{GAC} นั้นคือถ่านกัมมันต์ทางการค้า (GAC) ดังนั้นบนพื้นผิวของ CMS_{CF} จึงมีหมู่ฟังก์ชั่นหลายชนิดโดยเฉพาะหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) และหมู่เอมีน (-NH) ดังแสดงในตารางที่ 4.4 ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชั่นเป็นเบส จึงสามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นกรดอ่อนได้ดี ในขณะที่ GAC นั้นมีหมู่ฟังก์ชั่นที่พื้นผิวน้อยจึงมีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต่ำกว่า ซึ่งเป็นไปตามงานวิจัยของ Maghsoodloo และคณะ (2011) ที่ได้ดำเนินการทดลองนำสารละลายไคโตซานมาเอิบชุ่มถ่านกัมมันต์ทางการค้าแบบเกล็ดเพื่อเพิ่มหมู่ฟังก์ชั่นที่เป็นเบสบนพื้นผิว แล้วพบว่าตัวดูดซับที่ได้มีความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิกเพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด และได้สรุปว่าหมู่ฟังก์ชั่นที่เป็นเบสสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับกรดต่างๆ รวมถึงแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นกรดอ่อนได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี และการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สชีวภาพสังเคราะห์ในตัวอย่าง คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากกากกาแฟโดยวิธีตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{CF}) คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากถ่านกัมมันต์ทางการค้าโดยวิธีตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{GAC}) คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟทางการค้า (CMS_{COM}) และถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่ผ่านกระบวนการเอิบชุ่มด้วยไคโตซาน (CGAC) ซึ่งจากการทดลองสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1.1 การศึกษาองค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของกากกาแฟ

องค์ประกอบของกากกาแฟนั้นมีปริมาณสารระเหยได้สูงที่สุด โดยมีปริมาณคาร์บอนคงตัว ปริมาณความชื้น และมีปริมาณเถ้าในสัดส่วนที่ลดลงตามลำดับ นอกจากนี้จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของกากกาแฟ พบว่ากากกาแฟนั้นมีปริมาณคาร์บอนสูงที่สุด รองลงมาได้แก่ ออกซิเจน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน ตามลำดับ โดยมีธาตุอื่นๆ เป็นองค์ประกอบเล็กน้อย

5.1.2 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวอย่าง

1. พื้นที่ผิวจำเพาะและค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของตัวอย่างนั้น จะเพิ่มขึ้นเมื่อผ่านกระบวนการตกเคลือบด้วยไอเคมีของอะเซทิลีน ได้แก่ตัวอย่าง คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากกากกาแฟโดยวิธีตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{CF}) และคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากถ่านกัมมันต์ทางการค้าโดยวิธีตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{GAC}) นอกจากนี้ พื้นที่ผิวจำเพาะและไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์ทางการค้า (GAC) ยังเพิ่มขึ้นเมื่อผ่านกระบวนการเอิบชุ่มด้วยไคโตซาน ได้แก่ตัวอย่างถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่ผ่านกระบวนการเอิบชุ่มด้วยไคโตซาน (CGAC)

2. ลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากกากกาแฟโดยวิธีตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{CF}) มีรูพรุนจำนวนมากและสามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจน กระจายอยู่รอบบริเวณพื้นผิวมากกว่าถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (GK) ซึ่งเป็นตัวตั้งต้นก่อนการกระบวนการตกเคลือบด้วยไอเคมีของ CMS_{CF} ส่วนลักษณะพื้นผิวและการกระจายตัวของรูพรุนของคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟ

ที่เตรียมจากถ่านกัมมันต์ทางการค้าโดยวิธีตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{GAC}) และถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่ผ่านกระบวนการเอิบชุ่มด้วยไคโตซาน (CGAC) นั้น ไม่แตกต่างจากถ่านกัมมันต์ทางการค้า (GAC) อย่างชัดเจน

3. ลักษณะโครงสร้างภายในของตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน พบว่า ในตัวอย่างแต่ละชนิดนั้นไม่สามารถสังเกตเห็นช่องทางของรูพรุนภายในตัวอย่างได้อย่างชัดเจน แต่จากการวิเคราะห์ปริมาณรูพรุนรวมทำให้ทราบว่าตัวอย่างนั้นมีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมากกระจายอยู่ทั่วไปอย่างไม่เป็นระเบียบในชั้นและกลุ่มของคาร์บอน

4. ลักษณะโครงสร้างผลึกของตัวอย่าง คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากกากกาแฟโดยวิธีตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{CF}) คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากถ่านกัมมันต์ทางการค้าโดยวิธีตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{GAC}) และคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟทางการค้า (CMS_{COM}) นั้น มีลักษณะโครงสร้างผลึกของแกรไฟต์แบบหกเหลี่ยมอยู่เล็กน้อย ตรงกันที่ตำแหน่งพีคของ 2 Theta เท่ากับ 43.56 ในขณะที่ถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่ผ่านกระบวนการเอิบชุ่มด้วยไคโตซาน (CGAC) ไม่มีพีคที่มุม 2 Theta ตำแหน่งใดเลย

5. ลักษณะโครงสร้างหมู่ฟังก์ชั่นของตัวอย่าง พบว่า ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (GK) และคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากกากกาแฟโดยวิธีตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{CF}) มีหมู่ฟังก์ชั่นหลักที่เหมือนกัน ได้แก่ หมู่แอลกอฮอล์หรือฟีนอล หมู่เอลเคน และหมู่อะโรมาติก ซึ่งในตัวอย่าง ถ่านกัมมันต์ทางการค้า (GAC) และคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากถ่านกัมมันต์ทางการค้าโดยวิธีตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{GAC}) นั้น มีหมู่ฟังก์ชั่นที่เหมือนกัน ได้แก่ หมู่เอลเคนและหมู่อะโรมาติก โดยกระบวนการตกเคลือบด้วยไอเคมีของอะเซทิลีนจะทำให้หมู่ฟังก์ชั่นแอลกอฮอล์หรือฟีนอล 1-เอมีน สารประกอบไนโตร 1,2-เอมีนหรือเอไมด์ และอัลคิลเฮไลด์หายไป ในขณะที่กระบวนการเอิบชุ่มด้วยไคโตซานนั้น จะช่วยเพิ่มหมู่ฟังก์ชั่น α, β-อัลดีไฮด์แบบไม่อิ่มตัว คีโตน 1-เอมีน และสารประกอบไนโตร ซึ่งหมู่ฟังก์ชั่นดังกล่าวเป็นหมู่ฟังก์ชั่นที่ปรากฏอย่างเด่นชัดบนไคโตซาน

5.1.3 การศึกษาการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สชีวภาพสังเคราะห์

1. การศึกษาปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกต่อขาเข้า พบว่า คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟทางการค้า (CMS_{COM}) มีสัดส่วนปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกต่อขาเข้าที่เพิ่มขึ้นช้าที่สุด รองลงมาได้แก่ ตัวอย่างคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากกากกาแฟโดยวิธีตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{CF}) คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากถ่านกัมมันต์ทางการค้าโดยวิธีตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{GAC}) และถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่ผ่านกระบวนการเอิบชุ่มด้วยไคโตซาน (CGAC) ตามลำดับ

2. การศึกษาความบริสุทธิ์ของแก๊สมีเทน พบว่า คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟทางการค้า (CMS_{COM}) มีความบริสุทธิ์ของแก๊สมีเทนสูงที่สุด รองลงมาได้แก่ ตัวอย่างคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากกากกาแฟโดยวิธีตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{CF}) คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากถ่านกัมมันต์ทางการค้าโดยวิธีตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{GAC}) และถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่ผ่านกระบวนการเอิบชุ่มด้วยไคโตซาน (CGAC) ตามลำดับ

3. การศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่า คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟทางการค้า (CMS_{COM}) มีประสิทธิภาพในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงที่สุด รองลงมาได้แก่ ตัวอย่าง คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากกากกาแฟโดยวิธีตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{CF}) คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากถ่านกัมมันต์ทางการค้าโดยวิธีตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{GAC}) และถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่ผ่านกระบวนการเอิบชุ่มด้วยไคโตซาน (CGAC) ตามลำดับ

4. การศึกษาค่าการเลือกในการดูดซับของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อแก๊สมีเทน พบว่า คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟทางการค้า (CMS_{COM}) มีค่าการเลือกในการดูดซับของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อแก๊สมีเทนสูงที่สุด รองลงมาได้แก่ตัวอย่าง คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากกากกาแฟโดยวิธีตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{CF}) คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากถ่านกัมมันต์ทางการค้าโดยวิธีตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{GAC}) และถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่ผ่านกระบวนการเอิบชุ่มด้วยไคโตซาน (CGAC) ตามลำดับ

5. การศึกษาความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด พบว่าตัวอย่างคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟทางการค้า (CMS_{COM}) มีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดมากที่สุด รองลงมาได้แก่ตัวอย่าง คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากกากกาแฟโดยวิธีตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{CF}) คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากถ่านกัมมันต์ทางการค้าโดยวิธีตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{GAC}) และถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่ผ่านกระบวนการเอิบชุ่มด้วยไคโตซาน (CGAC) ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ควรมีการพัฒนาต่อยอดเพื่อสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ดียิ่งขึ้นและเพื่อเป็นการจัดการของเสียที่เกิดขึ้นโดยการนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ แนวทางในการพัฒนาการศึกษาค้นคว้ามีดังนี้

1. ควรมีการทดลองปรับเปลี่ยนวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการผลิตตัวดูดซับ เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรชนิดอื่นๆ ที่มีปริมาณมากในประเทศ เช่น ซังข้าวโพด เปลือกกล้วย เปลือกถั่วลิสง แกลบ เส้นใยลูกปาล์ม กะลามะพร้าว ผักตบชวา และชานอ้อย เป็นต้น เพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการจัดการของเสีย โดยนำมาผลิตเป็นตัวดูดซับจากชีวมวลแทนที่ตัวดูดซับทางการค้าที่มีราคาสูง
2. ควรทดลองปรับเปลี่ยนสารเคมีที่ใช้เป็นตัวกระตุ้นในกระบวนการเตรียมถ่านกัมมันต์ เช่น ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เฟอริคคลอไรด์ ($FeCl_3$) กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) และกรดไนตริก (HNO_3) เป็นต้น รวมถึงสภาวะต่างๆ ในกระบวนการผลิตที่เหมาะสม ได้แก่ อุณหภูมิ เวลา และอัตราส่วนของสารเคมีที่ใช้กระตุ้นต่อถ่านชีวมวล เพื่อให้ได้ตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้น และเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับ
3. ควรมีการทดลองนำตัวอย่างคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมได้ มาดำเนินการเอิบชุ่มด้วยสารเคมีบางชนิดที่มีหมู่ฟังก์ชั่นที่เป็นเบส เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เช่น ไคโตซาน โซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และลิเทียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น
4. ควรทดลองเพิ่มจำนวนคอลัมน์ดูดซับ เมื่อใช้ในการดำเนินการดูดซับหรือแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สชีวภาพสังเคราะห์ เช่น 2 หรือ 4 คอลัมน์ เป็นต้น เมื่อใช้กระบวนการดูดซับจริง โดยใช้ผลการทดลองที่ได้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการออกแบบระบบ
5. ควรมีการนำตัวอย่างคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่พัฒนาขึ้น มาทดลองประยุกต์ใช้กับแก๊สชีวภาพจากระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน เพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สชีวภาพในระบบจริง

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กรมการค้าภายใน. ความต้องการใช้เมล็ดกาแฟของไทยในปี 2555. [ออนไลน์]. 2555.แหล่งที่มา: http://www.oae.go.th/ewt_news.php?nid=13333&filename=index [2555, มีนาคม 1].

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. สถิติพลังงานประเทศไทย. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: ศูนย์สารสนเทศข้อมูลพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน; 2555.

กรรณิกา มีนสิรินันท์. 2542. การตกสะสมของซิงก์ในถ่านกัมมันต์จากแอนทราไซต์และกะลาปาล์มน้ำมันกระตุ้นด้วยซิงก์คลอไรด์. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ หลักสูตรปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จตุพร วิทยาคุณ และ นุรักษ์ กฤษดารักษ์. การเร่งปฏิกิริยาพื้นฐานและการประยุกต์. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์; 2547.

จตุพล ขุนพลกรัง. 2555. การออกแบบรอบการทำงานของกระบวนการดูดซับแบบสลับความดันเพื่อเพิ่มความบริสุทธิ์ และอัตราการคืนกลับของผลิตภัณฑ์มีเทน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

จรินทร์ เฟื่องชื่น. 2554. การเคลือบไคโตซานบนถ่านกัมมันต์สำหรับการปรับปรุงแก๊สไบโอไฮโดรเจนให้มีความบริสุทธิ์. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

ชนิสา หงอสุวรรณ. 2548. การดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟและสีย้อมเบสิคโดยใช้กากตะกอนของเสีย. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ชาริณี ม่วงคลองใหม่. 2551. การกำจัดสีเบสิคโดยเส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ทศพล พิทักษ์ชน. 2554. การศึกษาสมดุลและจลนศาสตร์การดูดซับของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน และไนโตรเจนบนถ่านกัมมันต์ที่เคลือบด้วยไคโตซาน.

ทิศา บุญเถื่อน. 2548. การสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมี. โครงการวิจัยทางเคมี สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ธนิษฐา ขันติสุข. 2548. การปรับปรุงกากกาแฟเหลือทิ้งเป็นถ่านกัมมันต์โดยการกระตุ้นทางเคมีด้วยซิงค์คลอไรด์และโพแทสเซียมคาร์บอเนต. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการบริหารสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล.

ปภัส ชนะโรค. 2554. การพัฒนากระบวนการปรับปรุงคุณภาพแก๊สชีวภาพสำหรับใช้ในยานพาหนะ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสุรนารี.

พุฒิพงศ์ ตันติขจรโกศล. 2554. การดูดกลืนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สธรรมชาติสังเคราะห์โดยเมมเบรนคอนแทคเตอร์แบบเส้นใยกลวง. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

เพ็ญลักษณ์ เทศสุวรรณ. 2547. ประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากขี้แป้งของโรงงานน้ำยางข้นในการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาวณี ตาลเถื่อน. 2555. ผลของประจุบวกบนซีโอไลต์ A ต่อประสิทธิภาพการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร.

มั่นสิน ตัณฑุลเวศน์. วิศวกรรมประปา. เล่มที่ 2. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2539.

รุจิรา ปิ่นแก้ว. 2556. การผลิตและการเตรียมถ่านกัมมันต์จากซังข้าวโพดเพื่อใช้ในการดูดซับมีเทน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์.

ฤกษ์ฤทธิ์ เคนหาราช. การผลิตพลังงานจากชีวมวล การผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำเสียโรงเลี้ยงสัตว์. [ออนไลน์]. 2548. แหล่งที่มา: www.eppo.go.th/tank/001-biomass.pdf [2558, มีนาคม 11].

สถาบันวิจัยและพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2538. ข้อเสนอโครงการส่งเสริมแก๊สชีวภาพจากมูลสัตว์เพื่อเป็นพลังงานทดแทนและปรับปรุงสิ่งแวดล้อมส่วนที่ 1 ฟาร์มขนาดกลางและขนาดใหญ่. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย กรมโรงงานอุตสาหกรรม. คู่มือการปฏิบัติงานเกี่ยวกับการออกแบบการผลิต การควบคุมคุณภาพ และการใช้แก๊สชีวภาพ (Biogas) สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรมโรงงานอุตสาหกรรม; 2553.

สุพจน์ สมภพ. 2549. ประสิทธิภาพการดูดซับนิกเกิล โครเมียม และเหล็ก โดยกากกาแฟและถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากกาแฟ. โครงการวิจัยทางเคมี สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม.

เสริมพล รัตสุข และ ไชยยุทธ กลิ่นสุคนธ์. การกำจัดน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและแหล่งชุมชน. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย; 2514.

อรอนงค์ จุลพันธ์ ธงไทย วิฑูรย์ และ เมตตา เจริญพานิช. 2554. การผลิตวัสดุดูดซับชนิดซิลิกาเมโซพอร์จากกากของเสียจากธรรมชาติ. วิศวกรรมสาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน

ภาษาอังกฤษ

Adinata, D., Wan Daud, W. M. A. and Aroua, M. K. 2007. Production of carbon molecular sieves from palm shell based activated carbon by pore sizes modification with benzene for methane selective separation. Fuel Processing Technology. 88: 599-605.

Ahmad, M. A. 2009. Preparation of carbon molecular sieves from palm shell: effect of benzene deposition conditions. Adsorption. 15: 489-495.

ASTM International. Standard Practice for Ultimate Analysis of Coal and Coke; 2009. ASTM D3176-09.

ASTM International. Standard Test Methods for Proximate Analysis of Coal and Coke by Macro Thermogravimetric Analysis; 2012. ASTM D7582-12.

ASTM International. Standard Test Method for Determination of Iodine Number of Activated Carbon; 2014. ASTM D4607-14.

Atieh, M. A. 2011. Removal of Chromium (VI) from polluted water using carbon nanotubes supported with activated carbon. Procedia Environmental Sciences. 4: 281-293.

Bhagiyalakshmi, M., Hemalatha, P., Palanichamy, M. and Jang, H. T. 2011. Adsorption, regeneration and interaction of CO_2 with a polythiophene–carbon mesocomposite. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 374: 48-53.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Bikshapathi, M., Sharma, A., Sharma, A. and Verma, N. 2011. Preparation of carbon molecular sieves from carbon micro and nanofibers for sequestration of CO_2. Chemical Engineering Research and Design. 89: 1737-1746.

Brown, Theodore, E., LeMay, H., Eugene, Bursten and Bruce, E. The Central Science 10th Edition. New York: Pearson; 2007.

Dantas, T. L. P., Luna, F. M. T., Silva Jr, I. J., de Azevedo, D. C. S., Grande, C. A., Rodrigues, A. E. and Moreira, R. F. P. M. 2011. Carbon dioxide–nitrogen separation through adsorption on activated carbon in a fixed bed. Chemical Engineering Journal. 169: 11-19.

David, E., Talaie, A., Stanciu, V. and Nicolae, A. C. 2004. Synthesis of carbon molecular sieves by benzene pyrolysis over microporous carbon materials. Journal of Materials Processing Technology. 157–158: 290-296.

Dupuis, A.-C. 2005. The catalyst in the CCVD of carbon nanotubes—a review. Progress in Materials Science. 50: 929-961.

Esquivel, P. and Jiménez, V. M. 2012. Functional properties of coffee and coffee by-products. Food Research International. 46: 488-495.

Franchi, R., Harlick, P. J. E. and Sayari, A. 2005. A high capacity, water tolerant adsorbent for CO_2: diethanolamine supported on pore-expanded MCM-41. *In:* ABDELHAMID, S. & MIETEK, J. (eds.) *Studies in Surface Science and Catalysis.* Elsevier. 2005.

Freitas, M. M. A. and Figueiredo, J. L. 2001. Preparation of carbon molecular sieves for gas separations by modification of the pore sizes of activated carbons. Fuel. 80: 1-6.

Fu, K., Yue, Q., Gao, B., Sun, Y., Wang, Y., Li, Q., Zhao, P. and Chen, S. 2014. Physicochemical and adsorptive properties of activated carbons from Arundo donax Linn utilizing different iron salts as activating agents. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers. 45: 3007-3015.

Gordon, L. C. and Russell, L. C. New concepts in water purification. Germany: Van Nostrand Reinhold; 1974.

Chulalongkorn University

Grande, C. A., Ribeiro, R. P. L., Oliveira, E. L. G. and Rodrigues, A. E. 2009. Electric swing adsorption as emerging CO_2 capture technique. Energy Procedia. 1: 1219-1225.

Guo, T., Nikolaev, P., Thess, A., Colbert, D. T. and Smalley, R. E. 1995. Catalytic growth of single-walled manotubes by laser vaporization. Chemical Physics Letters. 243: 49-54.

Hsu, H. W., Chiao, C. H., Chen, J. L., Lan, C. R. and Chen, S. 2011. Development of carbon dioxide capture and storage technology - Taiwan power company perspective. Sustain Environ. 21: 1-8.

Huang, C.-C. and Shen, S.-C. 2013. Adsorption of CO_2 on chitosan modified CMK-3 at ambient temperature. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers. 44: 89-94.

IPCC Second Assessment Report. A REPORT OF THE INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. [Online]. 1995. Available from: http://www.ipcc.ch/ publications_and_data/publications_and_datareports.shtml#.T3R6g9nUHcc [2013, January 12].

Jang, D.-I. and Park, S.-J. 2012. Influence of nickel oxide on carbon dioxide adsorption behaviors of activated carbons. Fuel. 102: 439-444.

Jankowska, H., Swiatkowski, A. and Choma, J. Active carbon. Poland: Ellis Horwood; 1991.

Jewell, Adam, Eckstrom, Fanfoni and Kabrick. 1982. The feasibility of biogas production on farms. Department of Agricultural Engineering, Cornell University: 95-116.

Kawabuchi, Y., Oka, H., Kawano, S., Mochida, I. and Yoshizawa, N. 1998. The modification of pore size in activated carbon fibers by chemical vapor deposition and its effects on molecular sieve selectivity. Carbon. 36: 377-382.

Keramati, M. and Ghoreyshi, A. A. 2014. Improving CO_2 adsorption onto activated carbon through functionalization by chitosan and triethylenetetramine. Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures. 57: 161-168.

Chulalongkorn University

Maghsoodloo, S., Noroozi, B., Haghi, A. K. and Sorial, G. A. 2011. Consequence of chitosan treating on the adsorption of humic acid by granular activated carbon. Journal of Hazardous Materials. 191: 380-387.

Maroto-Valer, M. M., Dranca, I., Lupascu, T. and Nastas, R. 2004. Effect of adsorbate polarity on thermodesorption profiles from oxidized and metal-impregnated activated carbons. Carbon. 42: 2655-2659.

Mohamad Nor, N., Lau, L. C., Lee, K. T. and Mohamed, A. R. 2013. Synthesis of activated carbon from lignocellulosic biomass and its applications in air pollution control—a review. Journal of Environmental Chemical Engineering. 1: 658-666.

Molina-Sabio, M. and Rodríguez-Reinoso, F. 2004. Role of chemical activation in the development of carbon porosity. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 241: 15-25.

Muzzarelli, R. A. A. 1977. CHAPTER 1 - ENZYMIC SYNTHESIS OF CHITIN AND CHITOSAN. *In:* MUZZARELLI, R. A. A. (ed.) *Chitin.* Pergamon. 1977.

Plaza, M. G., González, A. S., Pevida, C., Pis, J. J. and Rubiera, F. 2012. Valorisation of spent coffee grounds as CO_2 adsorbents for postcombustion capture applications. Applied Energy. 99: 272-279.

Plaza, M. G., Pevida, C., Arias, B., Fermoso, J., Casal, M. D., Martín, C. F., Rubiera, F. and Pis, J. J. 2009. Development of low-cost biomass-based adsorbents for postcombustion CO_2 capture. Fuel. 88: 2442-2447.

Plessis, M. d. 2008. Nanoporous silicon explosive devices. Materials Science and Engineering: B. 147: 226-229.

Ravi Kumar, M. N. V. 2000. A review of chitin and chitosan applications. Reactive and Functional Polymers. 46: 1-27.

Regional Office for Asia and the Pacific. Arabica coffee manual for Myanmar. [Online]. 2005. 2558, March 1. Available from: http://www.fao.org/docrep/008/ae938e/ae938e00.htm.

Richard, I. M. Principles of adsorption and reaction on solid surfaces. New York: John Wiley&sons, INC; 1996.

Rochelle, G. T. 2009. Amine Scrubbing for CO_2 Capture. Science. 325: 1652-1654.

Ruthven, D. M. Pressure Swing Adsorption. 1st ed. Fredericton : University of New Brunswick; 1994.

Serna, G. R. and Sayari, A. 2010. Modeling adsorption of CO_2 on amine-functionalized mesoporous silica. 2: Kinetics and breakthrough curves. Chemical Engineering Journal. 161: 182-190.

Sing, K. S. W. 2009. Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity (Provisional). Pure and Applied Chemistry. 54: 2201-2218.

Siriwardane, R. V., Shen, M.-S., Fisher, E. P. and Poston, J. A. 2001. Adsorption of CO_2 on Molecular Sieves and Activated Carbon. Energy & Fuels. 15: 279-284.

Son, S.-J., Choi, J.-S., Choo, K.-Y., Song, S.-D., Vijayalakshmi, S. and Kim, T.-H. 2005. Development of carbon dioxide adsorbents using carbon materials prepared from coconut shell. Korean Journal of Chemical Engineering. 22: 291-297.

Szotak, R. Molecular sieves principles of synthesis and identification. New York: Van Nostrand Reinhold; 1989.

Vyas, S. N., patwardhan, S. R. and gangadhar, B. 1992. Carbon molecular sieves from bituminous coal by controlled coke deposition. Carbon. 30: 605-612.

Wahby, A., Silvestre-Albero, J., Sepúlveda-Escribano, A. and Rodríguez-Reinoso, F. 2012. CO_2 adsorption on carbon molecular sieves. Microporous and Mesoporous Materials. 164: 280-287.

Werther, J., Saenger, M., Hartge, E. U., Ogada, T. and Siagi, Z. 2000. Combustion of agricultural residues. Progress in Energy and Combustion Science. 26: 1-27.

Xu, A., Li, H., Yuan, W. Z., Geng, B., Zhang, S., Zhang, H., Wang, L. and Zhang, Y. 2012. Radical homopolymerization of tetrafluoroethylene initiated by perfluorodiacyl peroxide in supercritical carbon dioxide: Reaction mechanism and initiation kinetics. European Polymer Journal. 48: 1431-1438.

ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ก

ผลการวิเคราะห์เพื่อหาค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของตัวอย่าง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ขั้นตอนการวิเคราะห์หาค่าการดูดซับไอโอดีน ASTM D4607-14 (2014)

1. อบตัวอย่างที่อุณหภูมิ 110-120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วปล่อยทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น
2. ชั่งน้ำหนักตัวอย่าง โดยบันทึกน้ำหนักที่แน่นอนของตัวอย่างให้ละเอียดถึงทศนิยม 4 ตำแหน่ง ใส่ในขวดรูปกรวยขนาด 250 มิลลิลิตร ที่มีฝาปิด
3. เติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยปริมาตร จำนวน 5 มิลลิลิตร จากนั้นปิดจุกเขย่าให้เข้ากัน เพื่อให้ผงถ่านกัมมันต์ทุกส่วนชุ่มด้วยสารละลาย และเปิดจุกต้มในตู้ดูดควันให้เดือดเป็นเวลา 30 วินาที เพื่อกำจัดเถ้าและซัลเฟอร์ออกจากผิวถ่านกัมมันต์ ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
4. ปิเปตสารละลายไอโอดีนที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอนแล้ว ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ปิดจุกอย่างรวดเร็วแล้วเขย่าแรงๆ เป็นเวลา 30 วินาที
5. กรองแยกถ่านกัมมันต์จากสารละลายด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 โดยทิ้งสารละลายในช่วงแรกจนกระทั่งกระดาษกรองอิ่มตัวด้วยสารละลาย จากนั้นปิเปตสารละลายมา 20 มิลลิลิตรใส่ในขวดรูปชมพู่
6. ไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอนแล้ว จนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนจากสีน้ำตาลเป็นสีชาอ่อน โดยเติมน้ำแป้งเป็นอินดิเคเตอร์ ประมาณ 2-3 หยด ไทเทรตต่อจนสารละลายเปลี่ยนเป็นไม่มีสี บันทึกปริมาตรของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตที่ใช้
7. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1 ถึงข้อ 6 โดยเปลี่ยนน้ำหนักของตัวอย่าง โดยใช้น้ำหนัก เท่ากับ 1 2 และ 2.5 กรัม เพื่อให้ได้ค่าความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลาย (C) ซึ่งให้ค่าความเข้มข้นที่สมดุลของตัวอย่างอยู่ในช่วง 0.008 ถึง 0.04 นอร์มอล

สูตรการคำนวณความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลายไอโอดีนได้จากสมการที่ ก.1

$$C = \frac{N_2 \times S}{50} \qquad \text{.......................................} \ (\text{ก}.1)$$

สูตรการคำนวณปริมาณไอโอดีนที่ถูกดูดซับต่อกรัมของถ่านตัวอย่างได้จากสมการที่ ก.2

$$\frac{X}{M} = \frac{A - (2.2 \times B \times S)}{W} \qquad \text{.......................................} \ (\text{ก}.2)$$

เมื่อ X/M = ปริมาณไอโอดีนที่ถูกดูดซับต่อกรัมของถ่านตัวอย่าง (มิลลิกรัม/กรัม)

N_1 = ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต (นอร์มอล)

N_2 = ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน (นอร์มอล)

A = น้ำหนักทั้งหมดของไอโอดีนในสารละลายเริ่มต้น ($N_2 \times 12693.0$) (มิลลิกรัม)

B = น้ำหนักของไอโอดีนที่ทำปฏิกิริยาสมมูลกับสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต 1 มิลลิลิตร ($N_1 \times 126.39$) (มิลลิกรัม)

C = คำนวณความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลายไอโอดีน (นอร์มอล)

W = น้ำหนักของถ่านที่ใช้ (กรัม)

S = ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตที่ใช้ (มิลลิลิตร)

นำค่า X/M ที่ได้ทั้งสามค่ามาสร้างกราฟระหว่างแกนนอน (C) กับแกนตั้ง (X/M) ในสเกลลอการิทึม (logarithm) จะได้กราฟความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง โดยสามารถอ่านค่าไอโอดีนนัมเบอร์ได้จากการนำจุดตัดแกนตั้งไปคำนวณหาค่าไอโอดีนนัมเบอร์

ผลการวิเคราะห์ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ (Iodine number) ของตัวอย่าง ถ่านกัมมันต์ทางการค้า (GAC) ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (GK) คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากกากกาแฟโดยวิธีตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{CF}) คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากถ่านกัมมันต์ทางการค้าโดยวิธีตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{GAC}) คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟทางการค้า (CMS_{COM}) และถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่ผ่านกระบวนการเอิบชุ่มด้วยไคโตซาน (CGAC) ได้แสดงดังตาราง ก.1 โดยความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต (N_1) และสารละลายไอโอดีน (N_2) ที่ใช้ในการวิเคราะห์ เท่ากับ 0.098 และ 0.088 นอร์มอล ตามลำดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

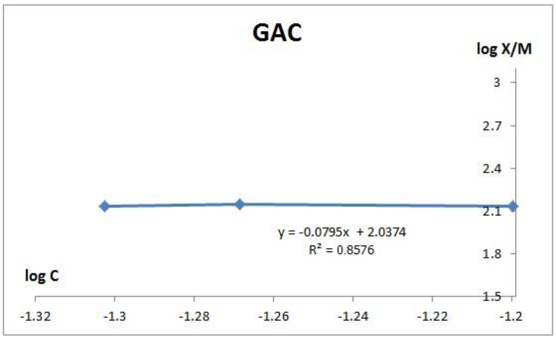
ตารางที่ ก.1 ผลการวิเคราะห์ไอโอดีนนัมเบอร์ของตัวอย่าง

ตัวอย่าง	น้ำหนัก (กรัม)	ไทแทรนท์ที่ใช้ (มล.)	C	X/M (มก./ก.)	log C	log X/M
GAC	1	35.9	0.063	135.1	-1.19	2.13
	2	30.6	0.053	139.5	-1.26	2.14
	2.5	28.3	0.049	137	-1.30	2.13
GK	1	35.4	0.062	149.2	-1.20	2.17
	2	29.6	0.052	153.4	-1.28	2.18
	2.5	26.1	0.045	160.9	-1.33	2.20
CMS_{COM}	1	29.5	0.052	310.1	-1.28	2.49
	2	19.7	0.035	288.7	-1.45	2.46
	2.5	14.6	0.026	287.4	-1.59	2.45
CMS_{GAC}	1	29.3	0.052	316.2	-1.28	2.49
	2	16.9	0.029	327.9	-1.52	2.51
	2.5	10.5	0.018	331.8	-1.73	2.52
CGAC	1	33.5	0.059	199.92	-1.22	2.30
	2	26.1	0.046	201.17	-1.33	2.30
	2.5	21.5	0.038	211.53	-1.42	2.32
CMS1	1	33.5	0.059	199.92	-1.22	2.30
	2	26.1	0.046	201.17	-1.33	2.30
	2.5	22.4	0.039	201.92	-1.40	2.30
CMS2	1	33.2	0.058	207.18	-1.23	2.31
	2	26.0	0.046	203.4	-1.34	2.30
	2.5	22.1	0.039	205.35	-1.41	2.31
CMS3	1	33.7	0.059	195.43	-1.22	2.29
	2	27.0	0.047	189.49	-1.32	2.27
	2.5	22.3	0.039	202.5	-1.40	2.30
CMS4	1	33.6	0.059	197.11	-1.22	2.29
	2	26.5	0.048	195.43	-1.33	2.29
	2.5	22.7	0.039	198.25	-1.39	2.29
CMS5	1	34.0	0.059	187.72	-1.22	2.27
	2	27.3	0.048	185.28	-1.31	2.26

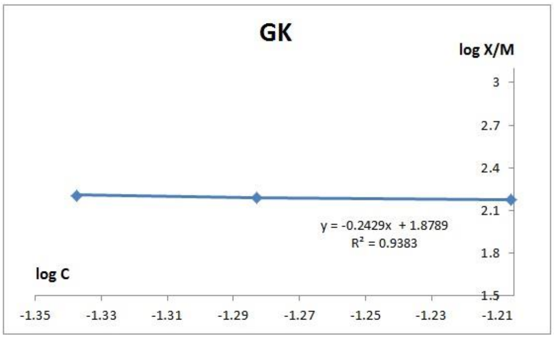
ตารางที่ ก.1 ผลการวิเคราะห์ไอโอดีนนัมเบอร์ของตัวอย่าง (ต่อ)

ตัวอย่าง	น้ำหนัก (กรัม)	ไทแทรนท์ที่ใช้ (มล.)	C	X/M (มก./ก.)	log C	log X/M
CMS6	1	33.2	0.058	207.78	-1.23	2.31
	2	25.7	0.045	206.39	-1.34	2.31
	2.5	22.2	0.039	203.45	-1.40	2.30
CMS7	1	33.4	0.058	203.21	-1.23	2.30
	2	26.0	0.045	202.7	-1.33	2.30
	2.5	22.1	0.038	204.44	-1.40	2.31
CMS8	1	33.5	0.058	199.76	-1.22	2.30
	2	26.2	0.046	200.41	-1.33	2.30
	2.5	22.4	0.039	201.37	-1.40	2.30
CMS9	1	34.1	0.059	184.31	-1.22	2.26
	2	27.3	0.047	185.44	-1.31	2.26
	2.5	23.7	0.041	187.56	-1.38	2.27
CMS10	1	33.4	0.058	202.43	-1.23	2.30
	2	26.2	0.046	199.77	-1.33	2.30
	2.5	22.3	0.039	202.75	-1.40	2.30
CMS11	1	33.3	0.058	204.67	-1.23	2.31
	2	26.1	0.045	201.41	-1.33	2.30
	2.5	22.2	0.039	203.34	-1.40	2.31
CMS12	1	33.5	0.058	201.11	-1.22	2.31
	2	26.4	0.046	197.69	-1.33	2.29
	2.5	22.3	0.039	202.21	-1.40	2.30

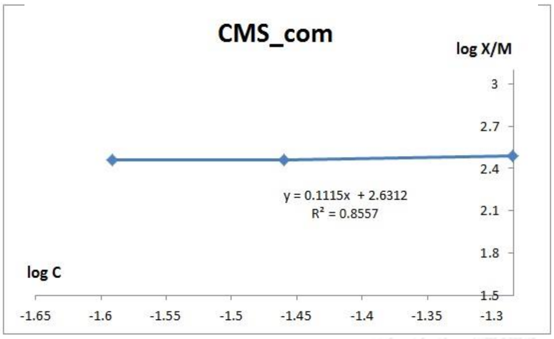
โดยกราฟเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแกนนอน (C) กับแกนตั้ง (X/M) ในสเกลลอการิทึม (logarithm) เพื่อใช้ในการหาค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของแต่ละตัวอย่าง ได้แสดงดังภาพที่ ก.1–ก.17 และตารางที่ ก.2



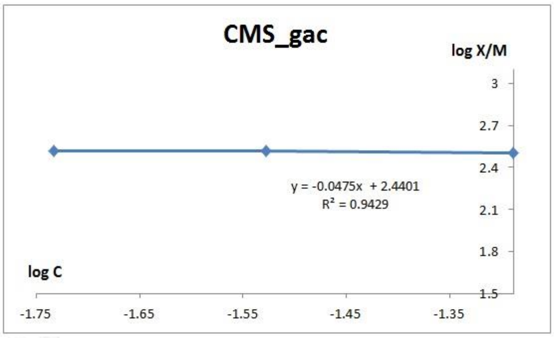
ภาพที่ ก.1 กราฟความสัมพันธ์ของตัวอย่าง GAC



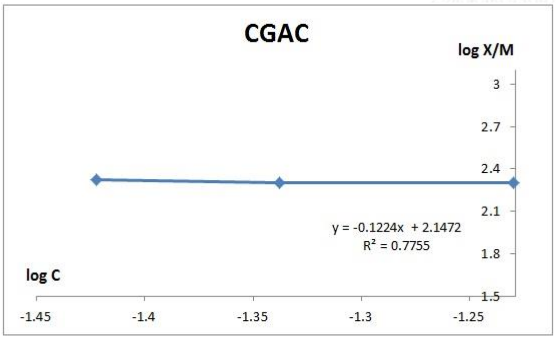
ภาพที่ ก.2 กราฟความสัมพันธ์ของตัวอย่าง GK



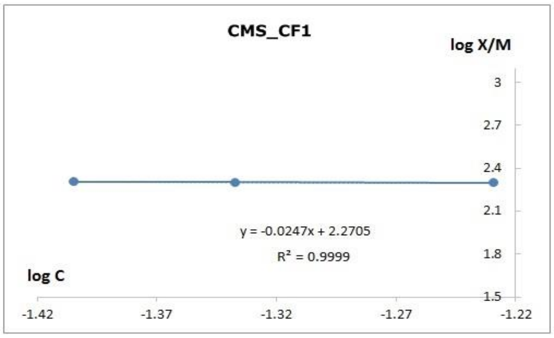
ภาพที่ ก.3 กราฟความสัมพันธ์ของตัวอย่าง CMS_{COM}



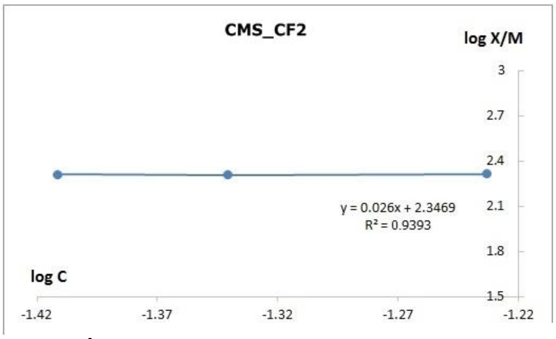
ภาพที่ ก.4 กราฟความสัมพันธ์ของตัวอย่าง CMS_{GAC}



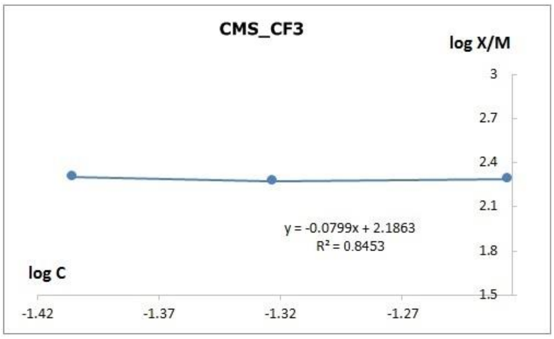
ภาพที่ ก.5 กราฟความสัมพันธ์ของตัวอย่าง CGAC



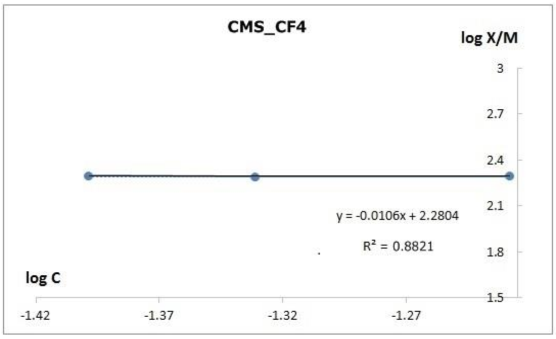
ภาพที่ ก.6 กราฟความสัมพันธ์ของตัวอย่าง CMS_{CF1}



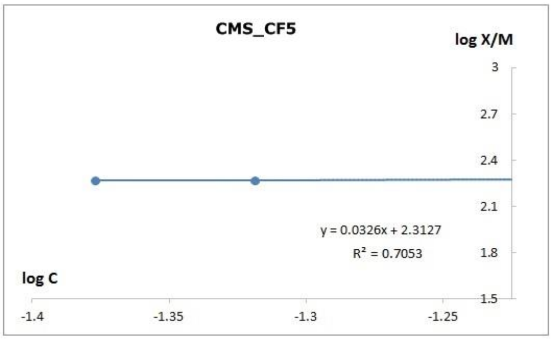
ภาพที่ ก.7 กราฟความสัมพันธ์ของตัวอย่าง CMS_{CF2}



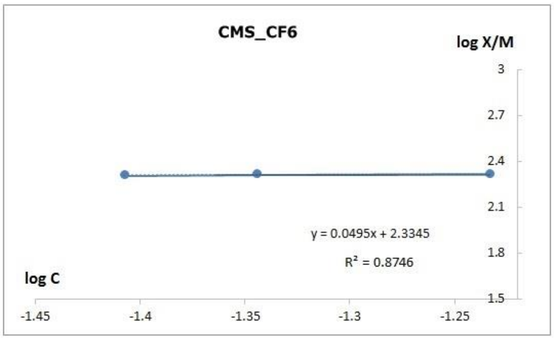
ภาพที่ ก.8 กราฟความสัมพันธ์ของตัวอย่าง CMS_{CF3}



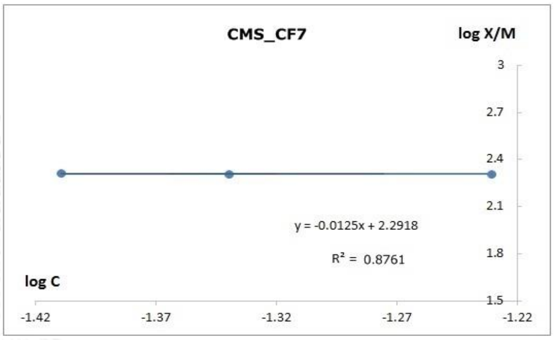
ภาพที่ ก.9 กราฟความสัมพันธ์ของตัวอย่าง CMS_{CF4}



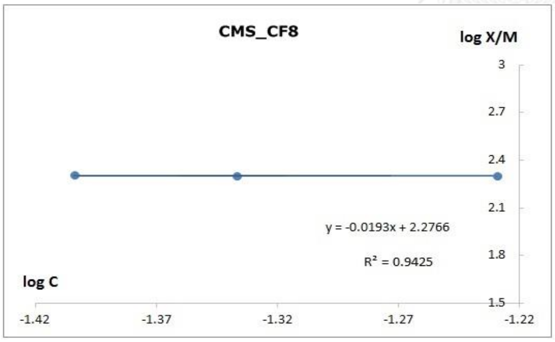
ภาพที่ ก.10 กราฟความสัมพันธ์ของตัวอย่าง CMS_{CF5}



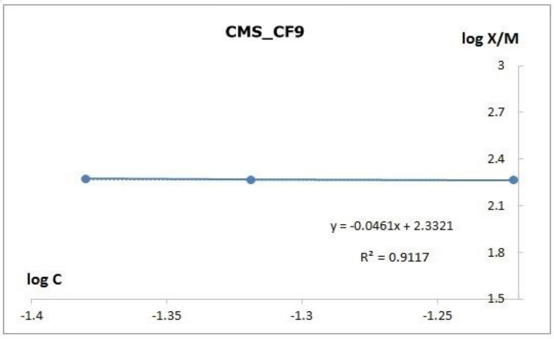
ภาพที่ ก.11 กราฟความสัมพันธ์ของตัวอย่าง CMS_{CF6}



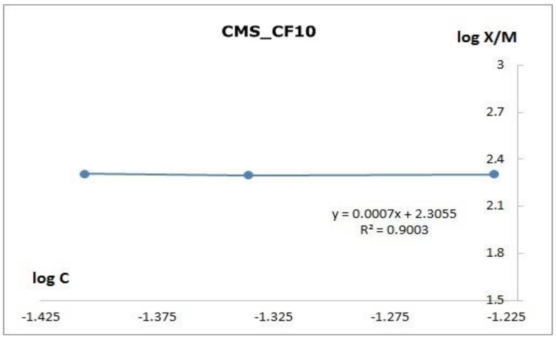
ภาพที่ ก.12 กราฟความสัมพันธ์ของตัวอย่าง CMS_{CF7}



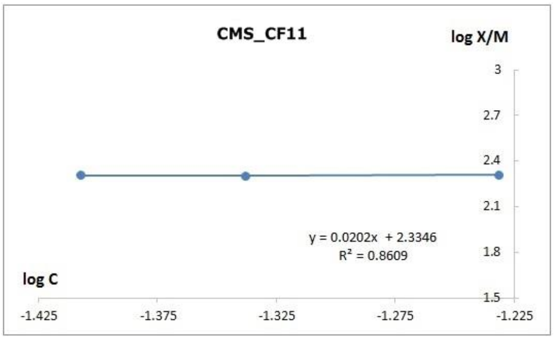
ภาพที่ ก.13 กราฟความสัมพันธ์ของตัวอย่าง CMS_{CF8}



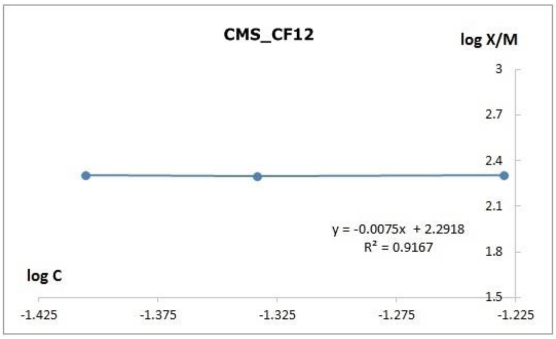
ภาพที่ ก.14 กราฟความสัมพันธ์ของตัวอย่าง CMS_{CF9}



ภาพที่ ก.15 กราฟความสัมพันธ์ของตัวอย่าง CMS_{CF10}



ภาพที่ ก.16 กราฟความสัมพันธ์ของตัวอย่าง CMS_{CF11}



ภาพที่ ก.17 กราฟความสัมพันธ์ของตัวอย่าง CMS_{CF12}

ผลการวิเคราะห์ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของตัวอย่างทั้งหมดดังแสดงในตารางที่ ก.2

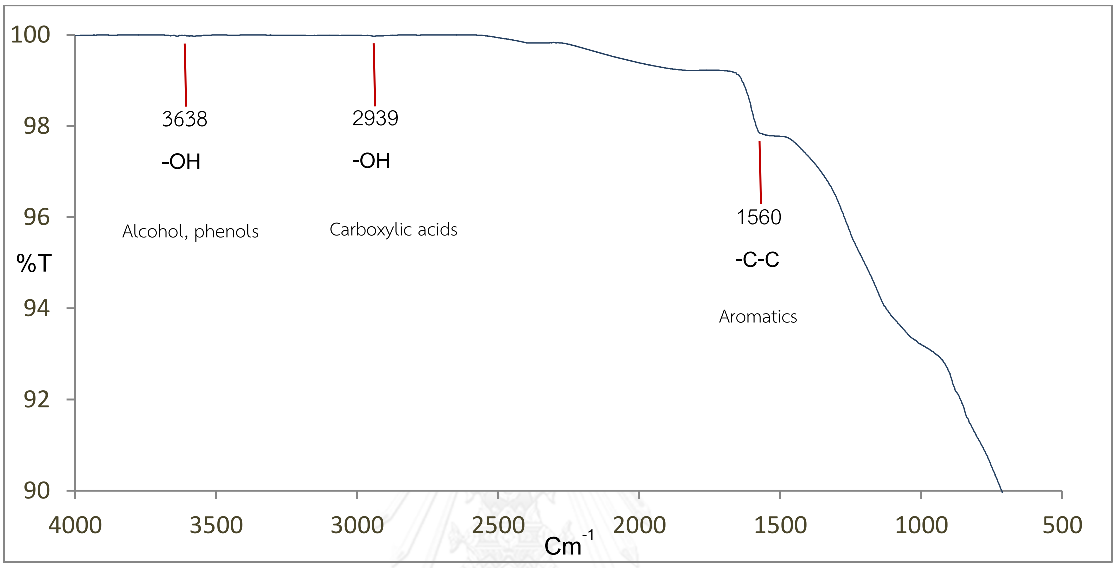
ตารางที่ ก.2 ผลการวิเคราะห์ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของตัวอย่างทั้งหมด

จำนวนตัวอย่าง	ชนิดตัวอย่าง	จุดตัดแกนตั้ง (log X/M)	ค่า R^2	ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ (X/M) (มก./ก)
1	GAC	2.0374	0.8576	137.2
2	GK	1.8789	0.9383	154.5
3	CMS_{COM}	2.6312	0.8557	295.4
4	CMS_{GAC}	2.4401	0.9429	325.3
5	CGAC	2.1472	0.7755	204.2
6	CMS_{CF1}	2.2705	0.9999	186.4
7	CMS_{CF2}	2.3469	0.9393	222.3
8	CMS_{CF3}	2.1863	0.8453	203.4
9	CMS_{CF4}	2.2804	0.8821	190.7
10	CMS_{CF5}	2.3127	0.7053	205.5
11	CMS_{CF6}	2.3345	0.8746	216.1
12	CMS_{CF7}	2.2918	0.8761	195.8
13	CMS_{CF8}	2.2766	0.9425	189.1
14	CMS_{CF9}	2.3321	0.9117	215.2
15	CMS_{CF10}	2.3055	0.9003	202.1
16	CMS_{CF11}	2.3346	0.8609	239.5
17	CMS_{CF12}	2.2918	0.9167	197.5

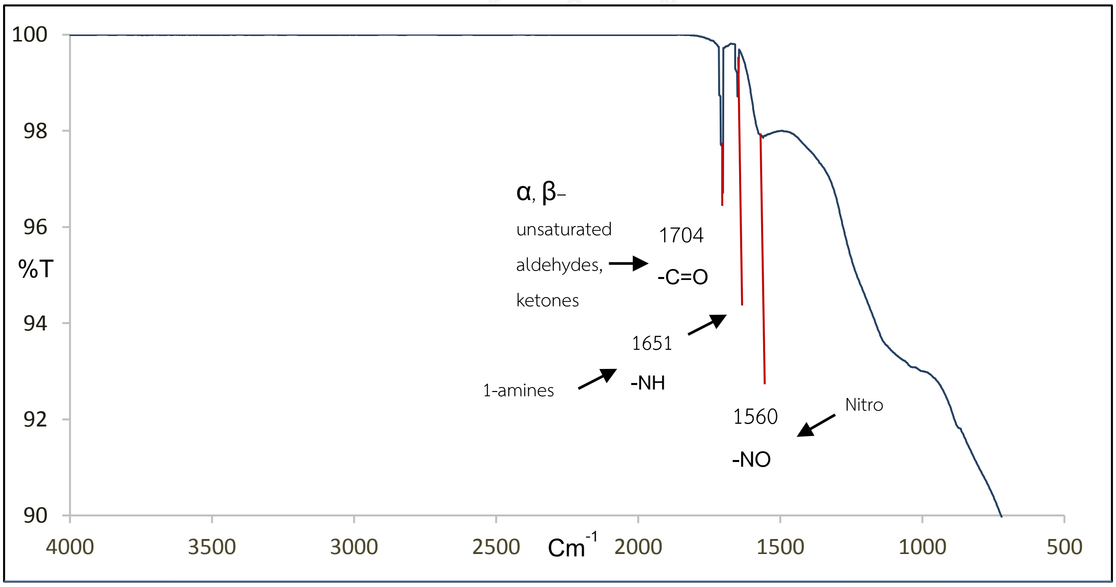
ภาคผนวก ข
ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างหมู่ฟังก์ชั่นของตัวอย่าง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

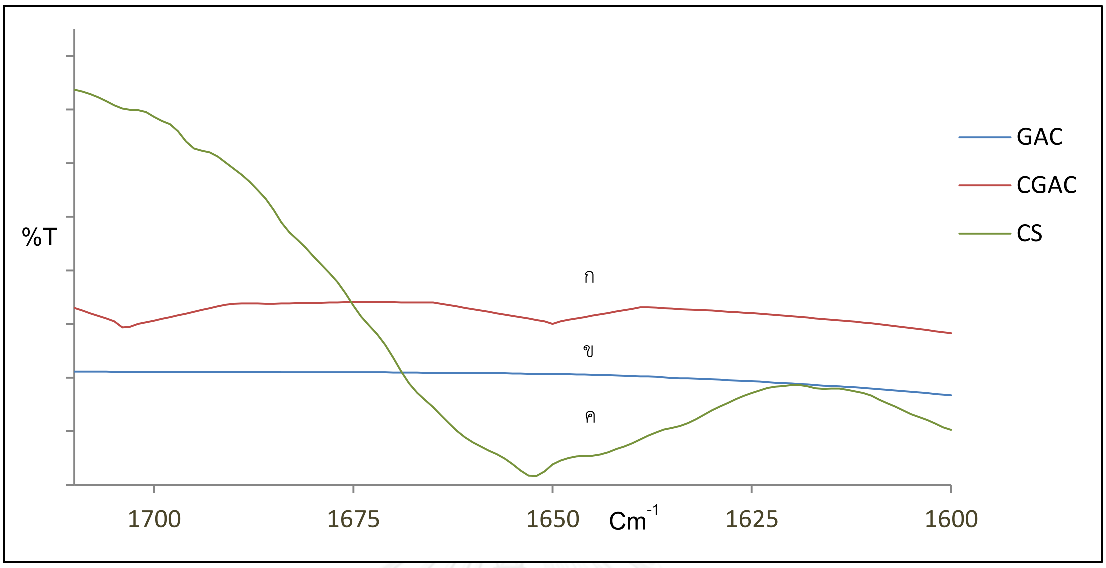
ผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างหมู่ฟังก์ชั่น (FTIR) ของตัวอย่าง ถ่านกัมมันต์ทางการค้า (GAC) ถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่เอิบชุ่มด้วยไคโตซาน (CGAC) ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟ (GK) คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟจากกากกาแฟ (CMS_{CF}) คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟจากถ่านกัมมันต์ทางการค้า (CMS_{GAC}) และคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟทางการค้า (CMS_{COM}) ได้แสดงดังภาพที่ ข.1-ข.8



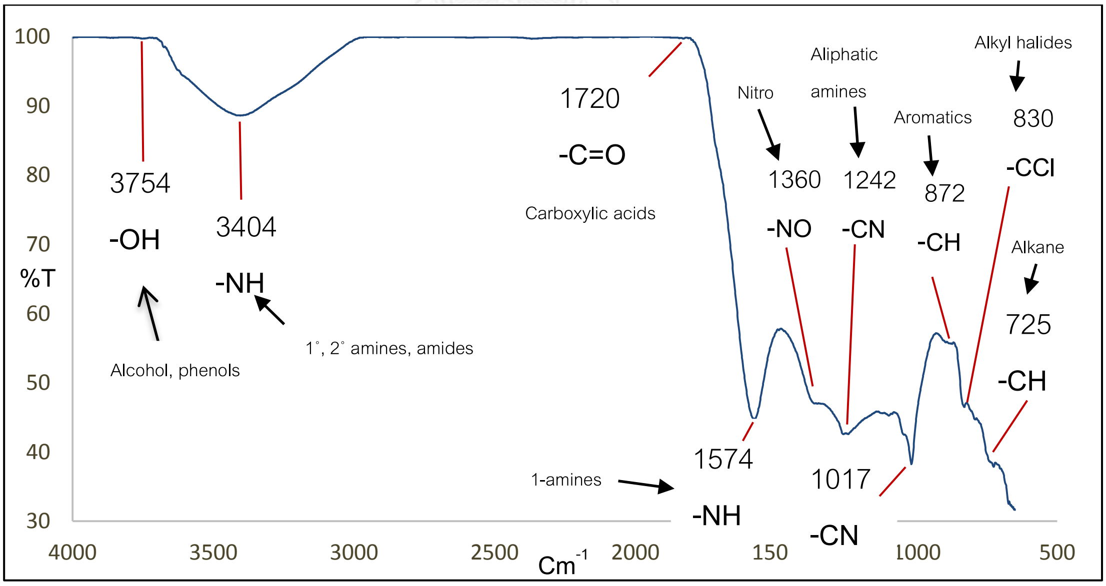
ภาพที่ ข.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างหมู่ฟังก์ชั่นของ GAC



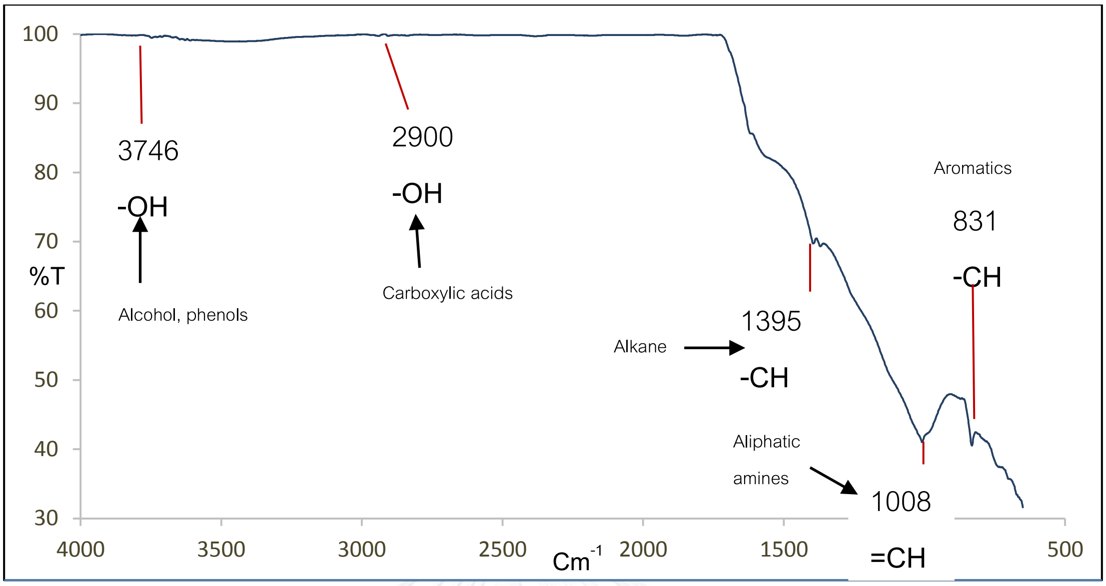
ภาพที่ ข.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างหมู่ฟังก์ชั่นของ CGAC



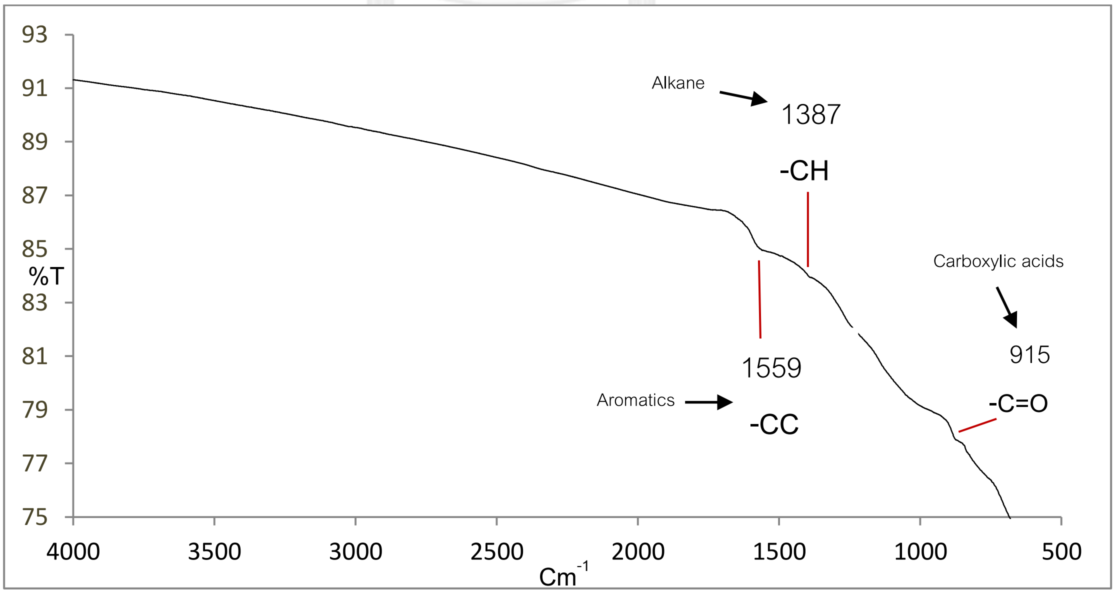
ภาพที่ ข.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างหมู่ฟังก์ชั่นของ (ก) ไคโตซาน (CS) (ข) CGAC และ (ค) GAC



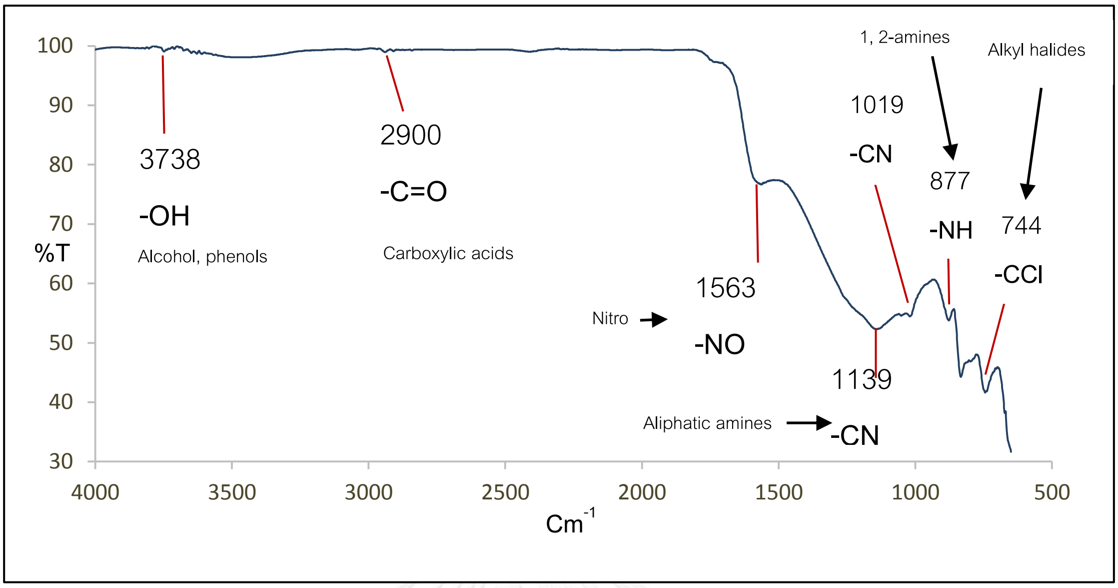
ภาพที่ ข.4 ผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างหมู่ฟังก์ชั่นของ GK



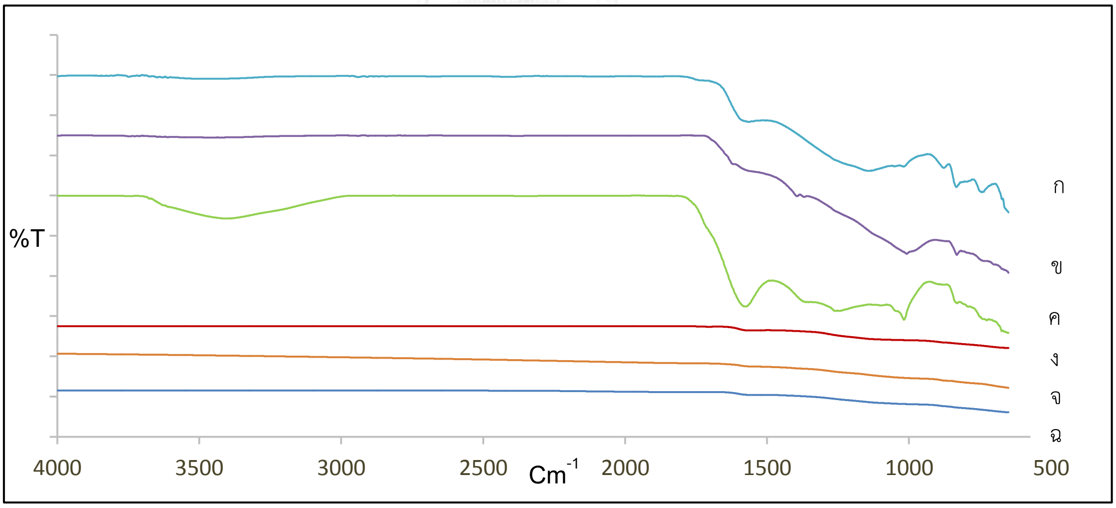
ภาพที่ ข.5 ผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างหมู่ฟังก์ชั่นของ CMS_{CF}



ภาพที่ ข.6 ผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างหมู่ฟังก์ชั่นของ COM_{GAC}



ภาพที่ ข.7 ผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างหมู่ฟังก์ชั่นของ CMS_{COM}



ภาพที่ ข.6 กราฟรวมผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างหมู่ฟังก์ชั่นของตัวอย่าง

(ก) CMS_{COM} (ข) CMS_{CF} (ค) GK (ง) CGAC (จ) CMS_{GAC} และ (ฉ) GAC

ภาคผนวก ค

ผลการศึกษาการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สชีวภาพสังเคราะห์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากการศึกษาปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกต่อขาเข้า ความบริสุทธิ์ของแก๊สมีเทน ประสิทธิภาพในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ค่าการเลือกในการดูดซับของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อแก๊สมีเทน และความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด ในตัวอย่างคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟจากกากกาแฟโดยวิธีการตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{CF}) คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟจากถ่านกัมมันต์ทางการค้าโดยวิธีการตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{GAC}) คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟทางการค้า (CMS_{COM}) และถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่ผ่านกระบวนการเอิบชุ่มด้วยไคโตซาน (CGAC) โดยใช้แก๊สชีวภาพสังเคราะห์ที่ประกอบ N_2:CO_2:CH_4 ที่อัตราส่วนเท่ากับ 20:30:50 ได้ผลการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

1. ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกต่อขาเข้า

ตารางที่ ค.1 ผลการทดลองปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกต่อขาเข้าของตัวอย่าง

เวลา (นาที)	ตัวอย่าง					
	CMS_{CF}			CMS_{COM}		
	C_1	C_1/C_0	C_1/C_0 (%)	C_1	C_1/C_0	C_1/C_0 (%)
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	1.37	0.05	4.57	0.80	0.03	2.67
15	4.41	0.15	14.69	2.60	0.09	8.66
20	6.53	0.22	21.78	4.47	0.15	14.89
25	9.81	0.33	32.71	5.06	0.17	16.87
30	11.32	0.38	37.74	7.38	0.25	24.59
40	13.26	0.44	44.19	11.29	0.38	37.63
50	15.42	0.51	51.40	13.25	0.44	44.18
70	21.65	0.72	72.17	18.85	0.63	62.83
90	25.80	0.86	86.00	22.18	0.74	73.94
100	26.78	0.89	89.27	24.59	0.82	81.95
110	29.06	0.97	96.88	25.27	0.84	84.22
120	29.83	0.99	99.43	27.20	0.91	90.67
130	29.90	1.00	99.68	29.08	0.97	96.93
140	30.00	1.00	100.00	29.90	1.00	99.67
150	30.00	1.00	100.00	30.00	1.00	100.00

ตารางที่ ค.1 ผลการทดลองปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกต่อขาเข้าของตัวอย่าง (ต่อ)

เวลา (นาที)	ตัวอย่าง					
	CMS_{GAC}			CGAC		
	C_1	C_1/C_0	C_1/C_0 (%)	C_1	C_1/C_0	C_1/C_0 (%)
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.00	0.44	0.01	1.46
7	0.00	0.00	0.00	2.60	0.09	8.66
10	0.83	0.03	2.77	3.74	0.12	12.45
12	3.17	0.11	10.57	5.30	0.18	17.66
15	5.45	0.18	18.18	6.17	0.21	20.56
20	6.81	0.23	22.69	10.36	0.35	34.53
25	12.08	0.40	40.27	12.81	0.43	42.71
30	13.46	0.45	44.86	15.48	0.52	51.60
40	15.53	0.52	51.77	18.77	0.63	62.55
50	17.15	0.57	57.15	23.77	0.79	79.24
70	22.65	0.75	75.49	27.99	0.93	93.28
90	25.69	0.86	85.63	30.00	1.00	100.00
100	27.66	0.92	92.2	30.00	1.00	100.00
110	29.63	0.99	98.76	30.00	1.00	100.00
120	30.00	1.00	100.00	30.00	1.00	100.00
130	30.00	1.00	100.00	30.00	1.00	100.00
140	30.00	1.00	100.00	30.00	1.00	100.00
150	30.00	1.00	100.00	30.00	1.00	100.00

หมายเหตุ: C_0 หมายถึง ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้น (ร้อยละ)

C_1 หมายถึง ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์สุดท้าย (ร้อยละ)

2. ความบริสุทธิ์ของแก๊สมีเทน

ตารางที่ ค.2 ผลของปริมาณมีเทนขาออกในตัวอย่าง

รอบ	ตัวอย่าง							
	CMS_{CF}				CMS_{GAC}			
	เวลา (นาที)	N_2	CO_2	CH_4	เวลา (นาที)	N_2	CO_2	CH_4
	0	0	0	0	0	0	0	0
1	4.17	14.28	0.000	47.60	4.32	14.6	0.000	46.58
	9.02	0	0	0.00	7.89	0	0	0.00
2	12.45	15.48	0.35	46.20	12.13	14.35	1.47	46.23
	17.12	0	0	0.00	15.98	0	0	0.00
3	22.37	15.31	2.98	43.90	22.42	15.12	4.21	42.78
	26.09	0	0	0.00	26.12	0	0	0.00
4	29.97	16.05	5.49	43.53	30.01	15.34	8.78	43.59
	33.25	0	0	0.00	33.42	0	0	0.00
5	38.14	16.4	8.32	44.10	37.5	15.2	13.72	42.75
	42.56	0	0	0.00	43.28	0	0	0.00
6	45.76	16.142	11.32	42.87	45.7	14.58	14.62	41.25
	49.96	0	0	0.00	50.02	0	0	0.00
7	53.75	17.21	13.86	41.46	53.6	15.03	14.92	40.87
	57.23	0	0	0.00	57.07	0	0	0.00
8	61.22	17.54	23.44	42.16	62.11	15.86	23.19	41.03
	65.21	0	0	0.00	65.23	0	0	0.00
9	69.38	18.67	26.45	41.78	70.13	16.51	26.49	40.92
	74.59	0	0	0.00	74.58	0	0	0.00
10	78.02	19.624	28.01	40.41	78.4	18.71	28.71	39.10
	82.82	0	0	0.00	82.98	0	0	0.00
11	87.41	19.65	29.32	39.46	88.13	18.97	29	38.74
	91.22	0	0	0.00	92.09	0	0	0.00
12	95.23	19.65	29.22	38.87	97.1	19.45	29.41	38.46
	100.12	0	0	0.00	102.02	0	0	0.00
13	105.23	19.65	29.12	38.27	105.69	20	29.58	38.13
	110.77	0	0	0.00	112.18	0	0	0.00

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ค.2 ผลของปริมาณมีเทนขาออกในตัวอย่าง (ต่อ)

รอบ	ตัวอย่าง							
	CMS_{COM}				CGAC			
	เวลา (นาที)	N_2	CO_2	CH_4	เวลา (นาที)	N_2	CO_2	CH_4
	0	0	0	0	0	0	0	0
1	3.58	15.72	0.000	49.13	4.21	15.53	0.000	41.36
	9.12	0	0	0.00	8.74	0	0	0.00
2	11.47	15.35	0.00	47.21	12.31	15.3	3.28	41.19
	16.57	0	0	0.00	16.78	0	0	0.00
3	22.31	15.47	0.58	47.17	22.31	16.32	6.38	40.26
	25.89	0	0	0.00	25.97	0	0	0.00
4	30.12	16.32	3.47	45.90	29.61	15.97	13.72	39.47
	33.21	0	0	0.00	33.01	0	0	0.00
5	37.79	16.2	6.75	45.77	37.22	16.19	17.12	39.78
	43.24	0	0	0.00	43.11	0	0	0.00
6	46.01	17.45	9.23	45.83	45.8	16.72	20.11	38.75
	50.12	0	0	0.00	49.75	0	0	0.00
7	54.07	16.98	11.87	44.57	53.47	17.34	23.86	37.29
	57.23	0	0	0.00	56.78	0	0	0.00
8	62.53	17.48	14.43	43.32	61.71	17.4	23.77	37.10
	65.2	0	0	0.00	65.21	0	0	0.00
9	70.19	18.55	21.71	42.00	70.1	18.16	26.34	36.23
	74.59	0	0	0.00	74.53	0	0	0.00
10	79.02	18.77	26.45	42.35	78.21	18.71	28.22	36.87
	83	0	0	0.00	83.04	0	0	0.00
11	87.43	19.45	28.44	41.10	87.14	19.56	28.38	35.89
	92.14	0	0	0.00	92.03	0	0	0.00
12	95.3	19.77	29.77	38.96	96.19	20	29.92	35.21
	99.85	0	0	0.00	101.08	0	0	0.00
13	104.95	19.82	29.66	38.52	105.77	19.43	30	34.53
	109.45	0	0	0.00	111.28	0	0	0.00

ตารางที่ ค.3 ผลของปริมาณแก๊สมีเทนขาออกต่อขาเข้า

ตัวอย่าง							
CMS_CF		CMS_GAC		CMS_COM		CGAC	
เวลา (นาที)	C/C0 (%)	เวลา (นาที)	C/C0 (%)	เวลา (นาที)	C/C0 (%)	เวลา (นาที)	C/C0 (%)
4.17	95.2	4.32	93.16	3.58	98.26	4.21	82.72
12.45	92.4	12.13	92.46	11.47	94.42	12.31	82.38
22.37	87.8	22.42	85.56	22.31	94.34	22.31	80.52
29.97	87.06	30.01	87.18	30.12	91.8	29.61	78.94
38.14	88.2	37.5	85.5	37.79	91.54	37.22	79.56
45.76	85.74	45.7	82.5	46.01	91.66	45.8	77.5
53.75	82.92	53.6	81.74	54.07	89.14	53.47	74.58
61.22	84.32	62.11	82.06	62.53	86.64	61.71	74.2
69.38	83.56	70.13	81.84	70.19	84	70.1	72.46
78.02	80.82	78.4	78.2	79.02	84.7	78.21	73.74
87.41	78.92	88.13	77.48	87.43	82.2	87.14	71.78
95.23	77.74	97.1	76.92	95.3	77.92	96.19	70.42
105.23	76.54	105.69	76.26	104.95	77.04	105.77	69.06

หมายเหตุ: C คือ ปริมาณแก๊สมีเทนขาออกที่วิเคราะห์ได้ และ C_0 คือ ปริมาณแก๊สมีเทนเริ่มต้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ความบริสุทธิ์ของแก๊สมีเทนในตัวอย่าง คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟจากกากกาแฟโดยวิธีการตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{CF}) คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟจากถ่านกัมมันต์ทางการค้าโดยวิธีการตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{GAC}) คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟทางการค้า (CMS_{COM}) และถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่ผ่านกระบวนการเอิบชุ่มด้วยไคโตซาน (CGAC) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ ค.1 โดยเก็บแก๊สจากวาล์วขาออกมาวิเคราะห์ปริมาณแก๊สมีเทนขาออกด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊สโครมาโตกราฟ แล้วจึงคำนวณปริมาณมีเทนขาออกต่อขาเข้าที่รอบการดูดซับแรก เท่ากับ 10 นาที เพื่อหาความบริสุทธิ์ของแก๊สมีเทน แสดงดังตารางที่ ค.4

$$\text{ความบริสุทธิ์ของแก๊สมีเทน} = \frac{(\text{ปริมาณมีเทนขาออก}) \times 100}{\text{ปริมาณมีเทนเริ่มต้น}} \quad \text{......... (ค.1)}$$

ตารางที่ ค.4 ความบริสุทธิ์ของแก๊สมีเทนในตัวอย่าง

ตัวอย่าง	ปริมาณมีเทนเริ่มต้น (ร้อยละ)	ปริมาณมีเทนขาออก (ร้อยละ)	ปริมาณมีเทนเริ่มต้น/ปริมาณมีเทนขาออก	ความบริสุทธิ์ (ร้อยละ)
CMS_{CF}	50.00	47.60	0.9520	95.20
CMS_{GAC}	50.00	46.58	0.9246	93.16
CMS_{COM}	50.00	49.13	0.9826	98.26
CGAC	50.00	41.36	0.8272	82.72

3. ประสิทธิภาพการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 Removal)

ตารางที่ ค.5 ผลการทดลองประสิทธิภาพการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวอย่าง

เวลา (นาที)	ประสิทธิภาพการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ (%)			
	CMS_{CF}	CMS_{COM}	CGAC	CMS_{GAC}
0	100.00	100.00	100.00	100
5	100.00	100.00	98.54	100
7	100.00	100.00	91.34	100
10	100.00	100.00	87.55	97.23
12	95.43	97.33	82.34	89.43
15	85.31	91.34	79.44	81.82
20	78.22	85.11	65.47	77.31
25	67.29	83.13	57.29	59.73
30	62.26	75.41	48.40	55.14
40	55.80	62.37	38.11	48.23
50	48.60	55.82	32.42	42.85
70	27.83	37.17	19.32	24.51
90	14.00	26.06	0.32	14.37
100	10.73	18.05	0.00	7.80
110	3.12	15.78	0.00	1.24
120	0.57	9.33	0.00	0.00
130	0.32	3.07	0.00	0.00
140	0.00	0.33	0.00	0.00
150	0.00	0.00	0.00	0.00

4. ค่าการเลือกในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อแก๊สมีเทน

การคำนวณหาค่าการเลือกในการดูดซับของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อแก๊สมีเทน (Selectivity) ในตัวอย่าง คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากกากกาแฟโดยวิธีการตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{CF}) คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากถ่านกัมมันต์ทางการค้าโดยวิธีการตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{GAC}) คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟทางการค้า (CMS_{COM}) และถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่ผ่านกระบวนการเอิบชุ่มด้วยไคโตซาน (CGAC) ที่รอบการดูดซับแรก เท่ากับ 10 นาที

<u>คำนวณ Selectivity (CO_2/CH_4) ในตัวอย่าง</u>

Feed CO_2 30%, N_2 20%, CH_4 50% } อัตราการไหลรวม 1 ลิตรต่อนาที →

- flow CO_2; 0.3 x1L/min= 0.3 L/min
- flow N_2; 0.2x1L/min = 0.2 L/min
- flow CH_4; 0.5x1L/min = 0.5 L/min

ดำเนินการเพียงหนึ่งรอบการดูดซับ ความดัน 1 บรรยากาศ และที่อุณหภูมิห้อง

> **โดยที่ :**
> n_{feed} คือ ความเข้มข้น (โมล) ขาเข้า
> n_e คือ ความเข้มข้น (โมล) ที่สมดุล
> n_{ads} คือ ความเข้มข้น (โมล) ที่ถูกดูดซับในตัวดูดซับ

4.1 คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟจากกากกาแฟ (CMS_{CF})

- CO_2

1 นาทีมีปริมาณ CO_2 เท่ากับ 0.3 ลิตร

2.033 นาทีจะมีปริมาณ CO_2 เท่ากับ $\frac{0.3\ X\ 2.033}{1}$ = 0.61 ลิตร

จาก
$$n_{feed} = \frac{P_{ads}\int V_t\,dt}{RT}$$
$$= \frac{3\ bar\ x\ 0.61}{0.082(atm.L.mol^{-1}K^{-1})(303K)}$$
$$n_{feed} = 0.0736 \text{ โมล}$$

....

ถ้าร้อยละ 30 มีปริมาณ CO_2 ขาออก เท่ากับ 0.61 ลิตร

ร้อยละ 0 จะมีปริมาณ CO_2 ขาออก $\frac{0.61\ X\ 0}{30}$ = 0 ลิตร

จาก
$$n_e = \frac{P_e V_{outlet}}{RT}$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

$$= \frac{2.5\ bar\ (0L)}{0.082(atm.L.mol^{-1}K^{-1})(303K)}$$

$n_e = 0$ โมล

$$n_{ads} = n_{feed} - n_e$$

= 0.0736 โมล ____________________ (ค.2)

- CH_4

1 นาทีมีปริมาณ CH_4 เท่ากับ 0.5 ลิตร

2.033 นาทีมีปริมาณ CH_4 เท่ากับ $\frac{0.5\ X\ 2.033}{1}$ = 1.0165 ลิตร

จาก $$n_{feed} = \frac{P_{ads}\int V_t\, dt}{RT}$$

$$= \frac{3\ bar\ x\ 1.0165}{0.082(atm.L.mol^{-1}K^{-1})(303K)}$$

$n_{feed} = 0.1227$ โมล

....

ถ้าร้อยละ 50 มีปริมาณ CH_4 ขาออกเท่ากับ 1.0165 L

ร้อยละ 47.60 จะมีปริมาณ CH_4 ขาออก $\frac{47.60\ X\ 1.0165}{50}$ = 0.843 L

จาก $$n_e = \frac{P_e V_{outlet}}{RT}$$

$$= \frac{2.5\ bar\ (0.843\ L)}{0.082(atm.L.mol^{-1}K^{-1})(303K)}$$

$n_e = 0.0848$ โมล

$$n_{ads} = n_{feed} - n_e$$

= 0.00379 โมล ____________________ (ค.3)

<u>CMS</u>$_{CF}$**: Selectivity (โมล CO_2/ โมล CH_4)** = สมการที่ ค.2 หารด้วยสมการที่ ค.3

$$= \frac{0.0736}{0.00379}$$

= 19.41

4.2 คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟจากถ่านกัมมันต์ทางการค้า (CMS_{GAC})

- CO_2

1 นาทีมีปริมาณ CO_2 เท่ากับ 0.3 ลิตร

0.98 นาทีจะมีปริมาณ CO_2 เท่ากับ $\frac{0.3\ X\ 0.98}{1}$ = 0.295 ลิตร

จาก $$n_{feed} = \frac{P_{ads}\int V_t\,dt}{RT}$$

$$= \frac{3\ bar\ x\ 0.295}{0.082(atm.L.mol^{-1}K^{-1})(303K)}$$

$$n_{feed} = 0.0357 \text{ โมล}$$

....

ถ้าร้อยละ 30 มีปริมาณ CO_2 ขาออก เท่ากับ 0.295 ลิตร

ร้อยละ 0 จะมีปริมาณ CO_2 ขาออก $\frac{0.295\ X\ 0}{30}$ = 0 ลิตร

จาก $$n_e = \frac{P_e V_{outlet}}{RT}$$

$$= \frac{2.8\ bar\ (0L)}{0.082(atm.L.mol^{-1}K^{-1})(303K)}$$

$$n_e = 0 \text{ โมล}$$

$$n_{ads} = n_{feed} - n_e$$

= 0.0357 โมล ____________________ (ค.4)

- CH_4

1 นาทีมีปริมาณ CH_4 เท่ากับ 0.5 ลิตร

1.18 นาทีจะมีปริมาณ CH_4 เท่ากับ $\frac{0.5\ X\ 1.18}{1}$ = 0.59 ลิตร

จาก $$n_{feed} = \frac{P_{ads}\int V_t\,dt}{RT}$$

$$= \frac{3\ bar\ x\ 0.59}{0.082(atm.L.mol^{-1}K^{-1})(303K)}$$

$$n_{feed} = 0.0713 \text{ โมล}$$

ถ้าร้อยละ 50 มีปริมาณ CH_4 ขาออก เท่ากับ 0.59 ลิตร

ร้อยละ 46.58 จะมีปริมาณ CH_4 ขาออก $\frac{0.59\ X\ 46.58}{50}$ = 0.59 ลิตร

จาก $$n_e = \frac{P_e V_{outlet}}{RT}$$

$$= \frac{2.8\ bar\ (\ 0.59\ L)}{0.082(atm.L.mol^{-1}K^{-1})(303K)}$$

$$n_e = 0.0691 \text{ โมล}$$

$$n_{ads} = n_{feed} - n_e$$

= 0.00216 โมล ______________________ (ค.5)

<u>CMS</u>$_{GAC}$: **Selectivity (โมล CO_2/ โมล CH_4)** = สมการที่ ค.4 หารด้วยสมการที ค.5

$$= \frac{0.0357}{0.00216}$$

= 16.53

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.3 คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟทางการค้า (CMS_{COM})

- CO_2

1 นาทีมีปริมาณ CO_2 เท่ากับ 0.3 ลิตร

1.25 นาทีมีปริมาณ CO_2 เท่ากับ $\frac{\mathbf{1.25\ X\ 0.3}}{\mathbf{1}}$ = 0.375 ลิตร

จาก
$$n_{feed} = \frac{P_{ads}\int V_t\,dt}{RT}$$
$$= \frac{3\ bar\ x\ 0.375}{0.082(atm.L.mol^{-1}K^{-1})(303K)}$$

$$n_{feed} = 0.0453 \text{ โมล}$$

....

ถ้าร้อยละ 30 มีปริมาณ CO_2 ขาออก เท่ากับ 0.375 ลิตร

ร้อยละ 0 จะมีปริมาณ CO_2 ขาออก $\frac{\mathbf{0.375\ X\ 0}}{\mathbf{30}}$ = 0 ลิตร

จาก
$$n_e = \frac{P_e V_{outlet}}{RT}$$
$$= \frac{1.4\ bar\ (0\ L)}{0.082(atm.L.mol^{-1}K^{-1})(303K)}$$

$$n_e = 0 \text{ โมล}$$

$$n_{ads} = n_{feed} - n_e$$

= 0.0453 โมล ______________________ (ค.6)

- CH_4

1 นาทีมีปริมาณ CH_4 เท่ากับ 0.5 ลิตร

1.25 นาทีจะมีปริมาณ CH_4 เท่ากับ $\frac{\mathbf{0.5\ X\ 1.25}}{\mathbf{1}}$ = 0.625 ลิตร

จาก
$$n_{feed} = \frac{P_{ads}\int V_t\,dt}{RT}$$
$$= \frac{3\ bar\ x\ 0.625}{0.082(atm.L.mol^{-1}K^{-1})(303K)}$$

$$n_{feed} = 0.0754 \text{ โมล}$$

....

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ถ้าร้อยละ 50 มีปริมาณ CH_4 ขาออกเท่ากับ 1.0165 ลิตร

ร้อยละ 50 จะมีปริมาณ CH_4 ขาออก $\frac{50\ X\ 1.0165}{50}$ = 1.0165 ลิตร

จาก $$n_e = \frac{P_e V_{outlet}}{RT}$$

$$= \frac{1.4\ bar\ (1.0165\ L)}{0.082(atm.L.mol^{-1}K^{-1})(303K)}$$

$$n_e = 0.0572 \text{ โมล}$$

$$n_{ads} = n_{feed} - n_e$$

= 0.00182 โมล ____________________ (ค.7)

<u>CMS</u>$_{COM}$: Selectivity (โมล CO_2/ โมล CH_4) = สมการที่ ค.6 หารด้วยสมการที่ ค.7

$$= \frac{0.0453}{0.00182}$$

= 24.89

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.4 ถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่เอิบชุมด้วยไคโตซาน (CGAC)

- CO_2

1 นาทีมีปริมาณ CO_2 เท่ากับ 0.3 ลิตร

1.93 นาทีจะมีปริมาณ CO_2 เท่ากับ $\frac{0.3\ X\ 1.93}{1}$ = 0.579 ลิตร

จาก

$$n_{feed} = \frac{P_{ads}\int V_t\,dt}{RT}$$

$$= \frac{3\ bar\ x\ 0.579}{0.082(atm.L.mol^{-1}K^{-1})(303K)}$$

$$n_{feed} = 0.0699 \text{ โมล}$$

....

ถ้าร้อยละ 30 มีปริมาณ CO_2 ขาออก เท่ากับ 0.579 ลิตร

ร้อยละ 0 จะมีปริมาณ CO_2 ขาออก $\frac{0.579\ X\ 0}{30}$ = 0 ลิตร

จาก

$$n_e = \frac{P_e V_{outlet}}{RT}$$

$$= \frac{2.6\ bar\ (0L)}{0.082(atm.L.mol^{-1}K^{-1})(303K)}$$

$$n_e = 0 \text{ โมล}$$

$$n_{ads} = n_{feed} - n_e$$

= 0.0699 โมล ____________________ (ค.8)

- CH_4

1 นาทีมีปริมาณ CH_4 เท่ากับ 0.5 ลิตร

1.93 นาทีจะมีปริมาณ CH_4 เท่ากับ $\frac{0.5\ X\ 1.93}{1}$ = 0.965 ลิตร

จาก

$$n_{feed} = \frac{P_{ads}\int V_t\,dt}{RT}$$

$$= \frac{3\ bar\ x\ 0.965}{0.082(atm.L.mol^{-1}K^{-1})(303K)}$$

$$n_{feed} = 0.1165 \text{ โมล}$$

ถ้าร้อยละ 50 มีปริมาณ CH_4 ขาออก เท่ากับ 0.965 ลิตร

ร้อยละ 41.36 จะมีปริมาณ CH_4 ขาออก $\frac{0.965\ X\ 41.36}{50}$ = 0.679 ลิตร

จาก
$$n_e = \frac{P_e V_{outlet}}{RT}$$
$$= \frac{2.6\ bar\ (0.679\ L)}{0.082(atm.L.mol^{-1}K^{-1})(303K)}$$
$$n_e = 0.0710 \text{ โมล}$$

$$n_{ads} = n_{feed} - n_e$$

= 0.0455 โมล (ค.9)

CGAC: Selectivity (โมล CO_2/ โมล CH_4) = สมการที่ ค.8 หารด้วยสมการที่ ค.9

$$= \frac{0.0699}{0.0455}$$

= 1.54

โดยค่าที่ได้จากการคำนวณต่างๆ ในตัวอย่าง คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากกากกาแฟโดยวิธีการตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{CF}) คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากถ่านกัมมันต์ทางการค้าโดยวิธีการตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{GAC}) คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟทางการค้า (CMS_{COM}) และถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่ผ่านกระบวนการเอิบชุ่มด้วยไคโตซาน (CGAC) ถูกแสดงดังตารางที่ ค.6

ตารางที่ ค.6 ค่าการเลือกในการดูดซับของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อแก๊สมีเทนในตัวอย่าง

ตัวอย่าง	การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ (โมล)	การดูดซับมีเทน (โมล)	โมลของคาร์บอนไดออกไซด์ต่อโมลของมีเทน
CMS_{CF}	0.0736	0.00379	19.41
CMS_{GAC}	0.0357	0.00216	16.53
CMS_{COM}	0.0453	0.00182	24.89
CGAC	0.0699	0.04550	1.54

5. ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด

ตารางที่ ค.7 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดของตัวอย่าง CMS_{CF}

CMS_{CF} (150 กรัม)									
รอบ	เวลาอัด (นาที)	ปริมาณ CO_2 ขาเข้า (ลิตร)	%CO_2 ขาออก	N_{feed} (โมล)	ปริมาณ CO_2 ขาออก (ลิตร)	N_{eq} (โมล)	N_{ads} (โมล)	N_{ads} จำเพาะ (โมล/กก.)	N_{ads} จำเพาะสะสม (โมล/กก.)
0	0.00	0.000	0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00
1	2.15	0.645	0.00	0.079	0.000	0.000	0.079	0.528	0.53
2	2.03	0.609	0.35	0.075	0.007	0.001	0.074	0.494	1.02
3	2.23	0.669	2.98	0.082	0.066	0.007	0.075	0.502	1.52
4	1.93	0.579	5.49	0.071	0.106	0.011	0.060	0.402	1.93
5	2.31	0.693	8.32	0.085	0.192	0.020	0.065	0.436	2.36
6	2.25	0.675	11.32	0.083	0.255	0.026	0.057	0.379	2.74
7	2.32	0.696	13.86	0.085	0.322	0.033	0.053	0.350	3.09
8	2.14	0.642	23.4	0.079	0.501	0.051	0.028	0.184	3.27
9	1.89	0.567	26.45	0.070	0.500	0.051	0.018	0.123	3.40
10	2.02	0.606	28.01	0.074	0.566	0.058	0.017	0.110	3.40
11	1.98	0.594	29.32	0.073	0.581	0.059	0.014	0.090	3.41
12	2.00	0.600	29.22	0.074	0.584	0.060	0.014	0.093	3.42
13	2.23	0.669	29.12	0.082	0.649	0.066	0.016	0.035	3.42

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ค.8 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดของตัวอย่าง CMS_{COM}

CMS_{COM} (150 กรัม)									
รอบ	เวลาอัด (นาที)	ปริมาณ CO_2 ขาเข้า (ลิตร)	$\%CO_2$ ขาออก	N_{feed} (โมล)	ปริมาณ CO_2 ขาออก (ลิตร)	N_{eq} (โมล)	N_{ads} (โมล)	N_{ads} จำเพาะ (โมล/กก.)	N_{ads} จำเพาะสะสม (โมล/กก.)
0	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00
1	2.08	2.08	0.624	0.077	0.000	0.000	0.077	0.511	0.51
2	2.27	2.27	0.681	0.084	0.000	0.000	0.084	0.557	1.07
3	2.23	2.23	0.669	0.082	0.013	0.001	0.081	0.539	1.61
4	1.98	1.98	0.594	0.073	0.090	0.007	0.066	0.439	2.05
5	2.31	2.31	0.693	0.085	0.156	0.016	0.069	0.461	2.51
6	2.00	2.00	0.600	0.074	0.185	0.019	0.055	0.365	2.87
7	2.53	2.53	0.759	0.093	0.300	0.031	0.062	0.416	3.29
8	2.17	2.17	0.651	0.080	0.313	0.032	0.048	0.319	3.61
9	1.89	1.89	0.567	0.070	0.410	0.042	0.028	0.184	3.79
10	2.22	2.22	0.666	0.082	0.587	0.060	0.022	0.145	3.94
11	1.89	1.89	0.567	0.070	0.538	0.055	0.015	0.098	4.03
12	2.10	2.10	0.63	0.077	0.625	0.064	0.013	0.039	4.06
13	2.17	2.17	0.651	0.080	0.644	0.066	0.014	0.014	4.06

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ค.9 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดของตัวอย่าง CMS_{GAC}

CMS_{GAC} (170 กรัม)									
รอบ	เวลาอัด (นาที)	ปริมาณ CO_2 ขาเข้า (ลิตร)	$\%CO_2$ ขาออก	N_{feed} (โมล)	ปริมาณ CO_2 ขาออก (ลิตร)	N_{eq} (โมล)	N_{ads} (โมล)	N_{ads} จำเพาะ (โมล/กก.)	N_{ads} จำเพาะสะสม (โมล/กก.)
0	0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00
1	2.26	0.678	0.000	0.083	0.000	0.000	0.083	0.490	0.49
2	2.31	0.693	1.47	0.085	0.034	0.003	0.082	0.480	0.97
3	2.12	0.636	4.21	0.078	0.089	0.009	0.069	0.406	1.38
4	2.32	0.696	8.78	0.085	0.204	0.021	0.065	0.380	1.76
5	1.89	0.567	13.72	0.070	0.259	0.027	0.043	0.253	2.01
6	2.30	0.69	14.62	0.085	0.336	0.034	0.050	0.296	2.30
7	2.11	0.633	20.12	0.078	0.425	0.043	0.034	0.202	2.51
8	1.87	0.561	23.19	0.069	0.434	0.044	0.025	0.144	2.65
9	1.89	0.567	26.49	0.070	0.501	0.051	0.018	0.108	2.85
10	2.55	0.765	28.71	0.094	0.732	0.075	0.019	0.112	3.14
11	1.79	0.537	29.00	0.066	0.519	0.053	0.013	0.0754	3.26
12	2.12	0.636	29.41	0.078	0.623	0.064	0.014	0.0841	3.26
13	2.19	0.657	29.58	0.081	0.648	0.066	0.014	0.0346	3.26

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ค.10 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดของตัวอย่าง CGAC

CGAC (170 กรัม)									
รอบ	เวลาอัด (นาที)	ปริมาณ CO_2 ขาเข้า (ลิตร)	$\%CO_2$ ขาออก	N_{feed} (โมล)	ปริมาณ CO_2 ขาออก (ลิตร)	N_{eq} (โมล)	N_{ads} (โมล)	N_{ads} จำเพาะ (โมล/กก.)	N_{ads} จำเพาะสะสม (โมล/กก.)
0	0	0.000	0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00
1	2.26	0.678	0.00	0.083	0.000	0.000	0.083	0.490	0.49
2	2.31	0.693	3.28	0.085	0.076	0.008	0.077	0.455	0.94
3	2.12	0.636	6.38	0.078	0.135	0.014	0.064	0.378	1.32
4	2.32	0.696	13.72	0.085	0.318	0.033	0.053	0.311	1.63
5	1.89	0.567	17.12	0.070	0.324	0.033	0.037	0.215	1.85
6	2.3	0.69	20.11	0.085	0.463	0.047	0.037	0.220	2.07
7	2.11	0.633	23.86	0.078	0.503	0.052	0.026	0.154	2.22
8	1.87	0.561	23.77	0.069	0.444	0.045	0.023	0.138	2.36
9	1.89	0.567	26.34	0.070	0.498	0.051	0.019	0.110	2.47
10	2.55	0.765	28.22	0.094	0.720	0.074	0.020	0.099	2.59
11	1.79	0.537	28.38	0.066	0.508	0.052	0.014	0.002	2.58
12	2.12	0.636	29.92	0.078	0.634	0.065	0.013	0.003	2.58
13	2.19	0.657	30.00	0.081	0.657	0.067	0.013	0.002	2.58

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

โดยที่ N_{feed} หมายถึง ปริมาณของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใส่เข้าไปในคอลัมน์ดูดซับ (โมล)

N_{eq} หมายถึง ปริมาณของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่คงเหลือหลังจากผ่านคอลัมน์ดูดซับ (โมล)

N_{ads} หมายถึง ปริมาณของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกซับโดยตัวดูดซับ ซึ่งอยู่ภายในคอลัมน์ดูดซับ (โมล)

โดยสามารถคำนวณปริมาณจำนวนโมล N_{feed} N_{eq} และ N_{ads} ได้จากสมการที่ ค.10 ดังนี้

$$n = \frac{PV}{RT} \qquad \text{(ค.10)}$$

โดยที่ P = ความดันในการป้อน (บรรยากาศ)

V = ปริมาตรของแก๊สในคอลัมน์ (ลิตร)

R = ค่าคงที่ของแก๊ส เท่ากับ 0.08206 ลิตร-บรรยากาศ/โมล-เคลวิน

T = อุณหภูมิในการทดลอง (เคลวิน)

n = จำนวนโมลแก๊สที่ถูกดูดซับ (โมล)

ผลการวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดในตัวอย่าง คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟจากกากกาแฟโดยวิธีการตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{CF}) คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟจากถ่านกัมมันต์ทางการค้าโดยวิธีการตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{GAC}) คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟทางการค้า (CMS_{COM}) และถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่ผ่านกระบวนการเอิบชุ่มด้วยไคโตซาน (CGAC) ได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ ค.11

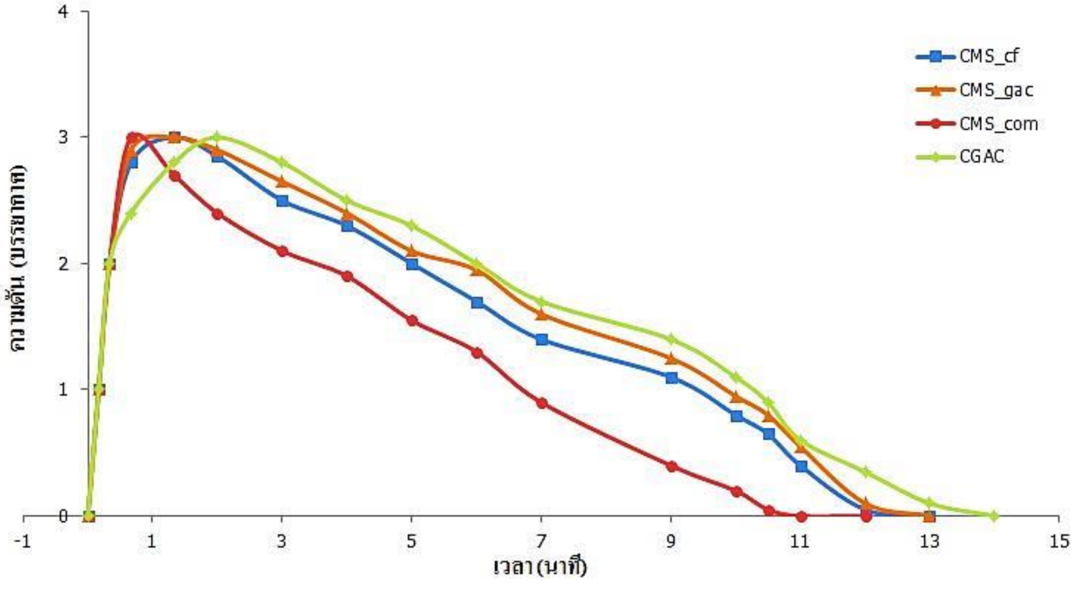
ตารางที่ ค.11 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดของตัวอย่าง

ตัวอย่าง	**ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด (โมล)**
CMS_{CF}	3.42
CMS_{GAC}	3.26
CMS_{COM}	4.06
CGAC	2.58

6. ความสัมพันธ์ระหว่างความดันในระยะเวลาต่างๆ ของตัวอย่าง

ผลการศึกษาของเวลาในรอบของการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในตัวอย่าง คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากกากกาแฟโดยวิธีการตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{CF}) คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟที่เตรียมจากถ่านกัมมันต์ทางการค้าโดยวิธีการตกเคลือบด้วยไอเคมี (CMS_{GAC}) คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟทางการค้า (CMS_{COM}) และถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่ผ่านกระบวนการเอิบชุ่มด้วยไคโตซาน (CGAC) ในเครื่องวิเคราะห์การดูดซับแบบคอลัมน์เดี่ยว ซึ่งหนึ่งรอบการดูดซับนั้นใช้เวลาเท่ากับ 10 นาที

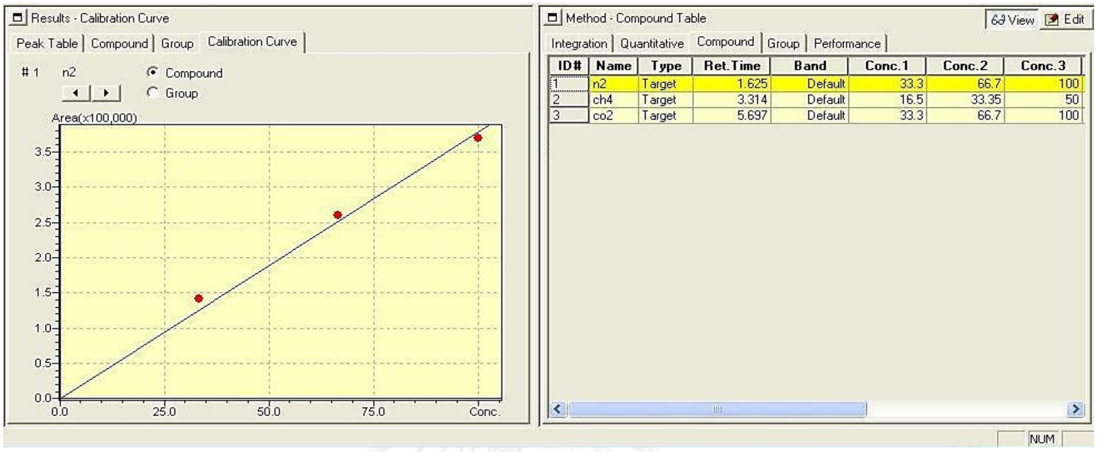
โดยเวลาในแต่ละรอบการดูดซับของตัวอย่างแต่ละชนิดได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความดันในระยะเวลาต่างๆ (Pressure profile) ในแก๊สผสมสังเคราะห์ระหว่าง N_2:CO_2:CH_4 ที่อัตราส่วนเท่ากับ 20:30:50 โดยปริมาตร พบว่าตัวอย่าง CMS_{COM} มีระยะเวลาครบรอบประมาณ 10.6 นาที ในขณะที่ตัวอย่างอื่นๆ ได้แก่ CMS_{CF} CMS_{GAC} และ CGAC มีระยะเวลาครบรอบอยู่ในช่วง 10-13 นาที ดังนั้นจึงกำหนดเวลาในหนึ่งรอบการดูดซับ เท่ากับ 10 นาที เพื่อจะยังคงมีแก๊สในคอลัมน์ดูดซับเพียงพอที่จะเก็บไปวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สได้ ซึ่งกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันในระยะเวลาต่างๆ ในแก๊สผสมสังเคราะห์ แสดงดังภาพที่ ค.1



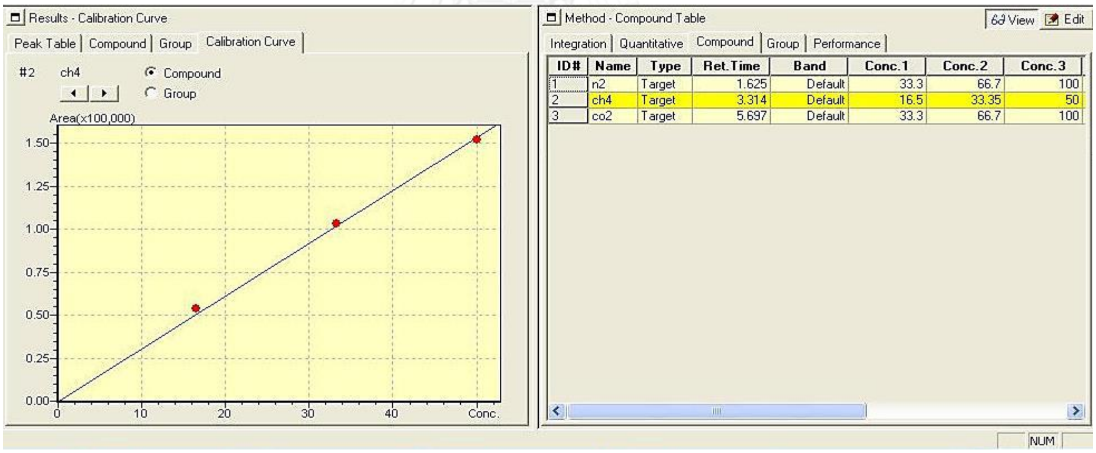
ภาพที่ ค.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันในระยะเวลาต่างๆ ของตัวอย่าง ในแก๊สผสมสังเคราะห์

7. กราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์แก๊สในเครื่องโครมาโตกราฟ

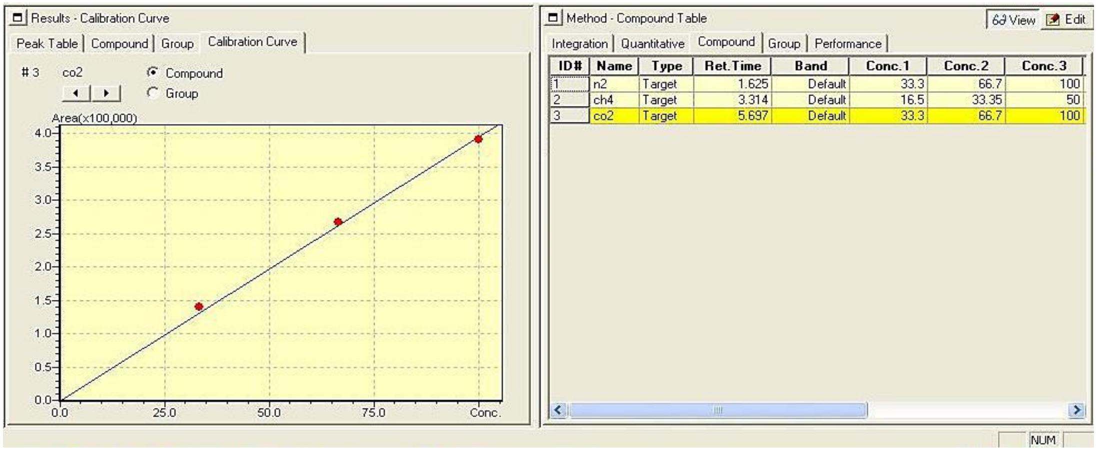
กราฟมาตรฐาน (Calibration curve) ในการวิเคราะห์แก๊สไนโตรเจน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สมีเทน แสดงดังภาพที่ ค.2-ค.4



ภาพที่ ค.2 กราฟมาตรฐานในการวิเคราะห์แก๊สไนโตรเจน



ภาพที่ ค.3 กราฟมาตรฐานในการวิเคราะห์แก๊สมีเทน



ภาพที่ ค.4 กราฟมาตรฐานในการวิเคราะห์แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ง

เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

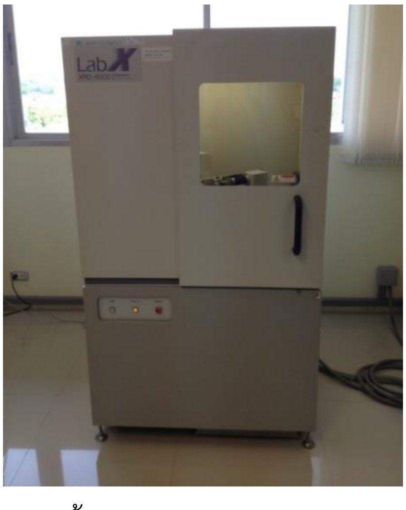
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาพที่ ง.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

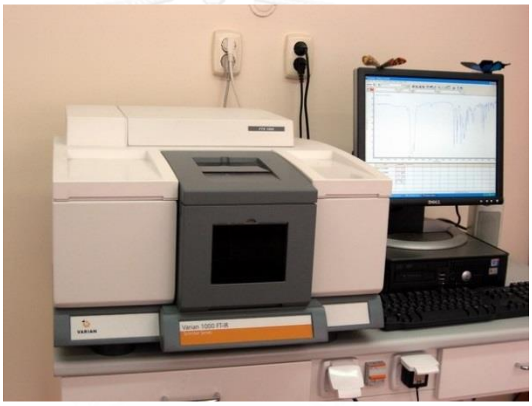
ภาพที่ ง.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope, TEM)

CHULALONGKORN UNIVERSITY



ภาพที่ ง.3 เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction, XRD)

ภาพที่ ง.4 เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ (BET Surface Area Analyzer)



ภาพที่ ง.5 เครื่องวิเคราะห์หมู่โครงสร้าง (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาพที่ ง.6 เตาเผาอุณหภูมิสูง (Pyrolysis Furnace)

ภาพที่ ง.7 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊ส (Gas Chromatography, GC)

ภาพที่ ง.8 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ (CHN/O Analyzer)

ภาพที่ ง.9 เครื่องปั้นเม็ด (Granulator)

ภาพที่ ง.10 เครื่องบดแบบลูกบอล (Ball Mill)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายชัยวัฒน์ แพทย์กูล เกิดเมื่อวันที่ 24 กรกฎาคม พ.ศ. 2532 ที่จังหวัดเพชรบูรณ์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีสาขาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม เกียรตินิยมอันดับ 1 จากคณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ในปีการศึกษา 2554 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2555

การตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติ

[1] Chaiwat Patkool, Petchporn Chawakitchareon and Rewadee Anuwattana. 2014. “Enhancement of Efficiency of Activated Carbon Impregnated Chitosan for Carbon Dioxide Adsorption”. Environmental Engineering Research. Vol 19(3). Page 289-292.

การบรรยายในงานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

[1] Chaiwat Patkool, Petchporn Chawakitchareon and Rewadee Anuwattana. “Enhancement of Efficiency of Activated Carbon Impregnated Chitosan for Carbon Dioxide Adsorption”. The Proceedings of 3rd International Conference on Environmental Engineering, Science and Management, The Twin Towers Hotel, Bangkok, Thailand. 26-27 March, 2014.

[2] Chaiwat Patkool, Petchporn Chawakitchareon and Rewadee Anuwattana. “Utilization of Activated Carbon Prepared from Coffee Grounds using Chemical Vapor Deposition for Carbon Dioxide Adsorption”. The Proceedings of 21st Thailand-Korea Conference on Environmental Engineering, Chiang Mai University, Chiang Mai, Thailand. 2-6 February, 2015.