

การพัฒนากระบวนการปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพสำหรับใช้ในยานพาหนะ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

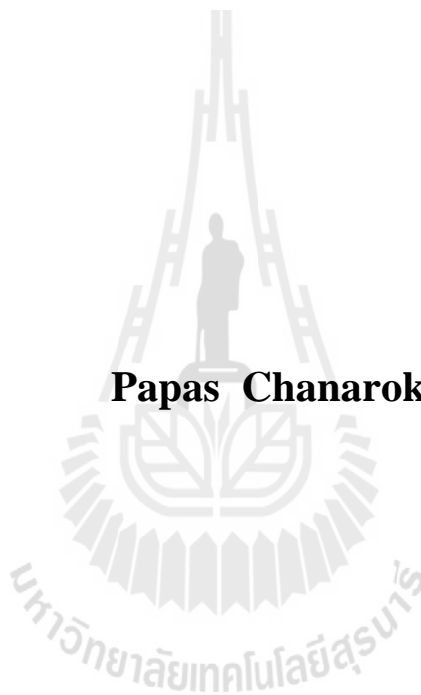
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2554

**PROCESS DEVELOPMENT OF BIOGAS  
UPGRADING FOR VEHICLES**

**Papas Chanaroke**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering**

**Suranaree University of Technology**

**Academic Year 2011**

## การพัฒนากระบวนการปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพสำหรับใช้ในยานพาหนะ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

---

(ผศ. ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล)

ประธานกรรมการ

---

(ผศ. ดร.วีรชัย อัจฉาญ)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

---

(ผศ. ดร.รัตนวรรณ เกียรติโกมล)

กรรมการ

---

(อ. ดร.สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์)

กรรมการ

---

(อ. ดร.สามารถ บุญอาจ)

กรรมการ

---

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

---

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ปกัส ชนะโรค : การพัฒนากระบวนการปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพสำหรับใช้ใน  
ยานพาหนะ (PROCESS DEVELOPMENT OF BIOGAS UPGRADING FOR  
VEHICLES) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิรัช อัจหาญ, 93 หน้า.

งานวิจัยเรื่องการพัฒนากระบวนการปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพสำหรับใช้ในยานพาหนะ  
นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะศึกษา และพัฒนากระบวนการปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพด้วยการดูดซับ  
ก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ซึ่งจะมีผลทำให้ค่าความร้อนและค่าดัชนีวอบบีของก๊าซชีวภาพเพิ่มสูงขึ้น  
โดยทำการศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ของกระบวนการดูดซับสลับความดันที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูด  
ซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ การทดลองแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ การศึกษาแบบเบดนิ่ง การทดลอง  
ระบบดูดซับสลับความดัน และการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ที่ใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิง

จากการทดลองแบบเบดนิ่งทำให้ทราบว่า ค่าความดัน อุณหภูมิ และปริมาณตัวดูดซับมีผล  
ต่อประสิทธิภาพการดูดซับของตัวดูดซับที่กำหนด โดยที่ความดันสูงและอุณหภูมิต่ำ การดูดซับจะ  
เกิดได้ดี ตลอดจนปริมาณตัวดูดซับที่มากกว่ายังสามารถดูดซับได้ดีกว่าด้วย โดยตัวดูดซับ Zeolite  
13X มีความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีกว่าถ่านดูดซับชนิดต่าง ๆ จากการ  
ทดลองระบบดูดซับสลับความดันซึ่งจะทำการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการดูดซับและประสิทธิภาพ  
การดูดซับที่สภาวะความดัน 7 บาร์ และควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 4 องศาเซลเซียส พบว่าตัวดูดซับ  
Zeolite 13X และถ่านดูดซับ CGC 12 สามารถเพิ่มสัดส่วนของก๊าซมีเทนจากร้อยละ 70 เป็นร้อยละ  
96 และร้อยละ 85 ได้ตามลำดับ นอกจากนี้การศึกษสมรรถนะของเครื่องยนต์ที่ใช้ก๊าซชีวภาพเป็น  
เชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันเชื้อเพลิงยังแสดงให้เห็นว่าแม้เครื่องยนต์จะมีประสิทธิภาพลดลง แต่ก๊าซ  
ชีวภาพที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพแล้วมีมาตรฐานสามารถนำมาใช้ทดแทนน้ำมันเชื้อเพลิงได้

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา 2554

ลายมือชื่อนักศึกษา \_\_\_\_\_

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา \_\_\_\_\_

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม \_\_\_\_\_

PAPAS CHANAROK : PROCESS DEVELOPMENT OF BIOGAS  
UPGRADING FOR VEHICLES. THESIS ADVISOR : ASST. PROF.  
WEERACHAI ARJHARN, Ph.D., 93 PP.

BIOGAS/BIOGAS UPGRADING/ADSORPTION/PRESSURE SWING  
ADSORPTION

The objective of this study was to develop a process of biogas upgrading by eliminating carbon dioxide presented in the biogas, which has effects on the increment of heating value and wobble index. The study was carried out by investigating factors of pressure swing adsorption process that affects the efficiency of carbon dioxide adsorption system. The experiment was divided into three parts, i.e. the study of fixed bed system, the study of pressure swing adsorption system and the study of engine performance using biogas as a fuel.

Results of the fixed bed system indicated that adsorbent types, adsorbent quantity, temperature and pressure had effects on the extent of adsorption. Higher pressure and lower temperature resulted in an increase in carbon dioxide adsorption. In addition, the increase of adsorbent quantity was found to increase the adsorption. Among the adsorbent types, the adsorption of Zeolite 13X was better than those of other activated carbons. For the pressure swing adsorption system, factors affecting the adsorption and adsorption efficiency at the pressure of 7 bar and temperature of 4°C was investigated. The adsorbent Zeolite 13X and CGC12 was able to increase the methane ratio in biogas from 70% to 96% and to 85%, respectively. The study of engine performance showed that even though the upgraded biogas caused a drop in

the engine efficiency compared with gasoline, it could completely replace the use of gasoline.



School of Mechanical Engineering

Academic Year 2011

Student's Signature \_\_\_\_\_

Advisor's Signature \_\_\_\_\_

Co-Advisor's Signature \_\_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการสำเร็จล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำรวมทั้งได้ให้ความช่วยเหลืออย่างดียิ่งทั้งด้านวิชาการและการดำเนินการวิจัยซึ่งได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิรัช อาจหาญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้โอกาสทางการศึกษา ให้คำแนะนำปรึกษาด้านวิชาการอันเป็นประโยชน์ยิ่งต่องานวิจัย รวมถึงได้ช่วยตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนทำให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น อีกทั้งยังเป็นกำลังใจและแบบอย่างที่ดีในการดำเนินชีวิตในหลาย ๆ ด้านให้กับผู้วิจัยเสมอมา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัตนวรรณ เกียรติโกมล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมที่ให้คำปรึกษาด้านวิชาการ ช่วยแก้ปัญหา ตลอดจนช่วยตรวจทาน และแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนทำให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย

บุคลากรศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีววลทุกท่าน ที่เป็นกำลังในการสนับสนุน ส่งเสริม ตลอดจนให้ความช่วยเหลือในหลาย ๆ ด้านจนทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์ได้

เจ้าหน้าที่ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เพื่อนบัณฑิตศึกษา รวมถึงมิตรสหายทั้งในอดีตและปัจจุบันที่คอยอำนวยความสะดวกช่วยเหลือถามไถ่ ให้กำลังใจในการทำวิจัยด้วยดีมาโดยตลอด

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณครูบาอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้ที่ดีแก่ผู้วิจัย และขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อณัฐดนัย – คุณแม่สีดา ชนะโรค รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ได้มอบความรัก ความอบอุ่น ความห่วงใย การอบรมเลี้ยงดู และการสนับสนุนทางการศึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด รวมทั้งเป็นกำลังใจที่ยิ่งใหญ่แก่ผู้วิจัยให้มีพลังเข้มแข็งพร้อมเผชิญกับปัญหาและอุปสรรคต่าง ๆ จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา

ปภัต ชนะโรค

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ซ
สารบัญรูป.....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฐ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 สมมติฐานของการวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
<b>2 แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>4</b>
2.1 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับก๊าซชีวภาพ.....	4
2.1.1 การส่งเสริมการผลิตก๊าซชีวภาพในประเทศไทย.....	5
2.1.2 องค์ประกอบและคุณสมบัติของก๊าซชีวภาพ.....	5
2.1.3 การนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์.....	6
2.1.4 คุณสมบัติของก๊าซชีวภาพเพื่อทดแทนก๊าซธรรมชาติ.....	7
2.2 การปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพ.....	9
2.2.1 กระบวนการดูดซับ.....	9
2.2.2 สมดุลดูดซับ.....	14
2.2.3 จลนศาสตร์ดูดซับ.....	19
2.2.4 บริเวณการเคลื่อนย้ายมวลสารสำหรับการดูดซับในหอดูดซับ.....	20



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.5 การขยายขนาดของหอดูดซับ (Scale Up).....	21
2.2.6 กระบวนการดูดซับสลับความดัน.....	22
2.3 สมรรถนะของเครื่องยนต์.....	23
2.3.1 เครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพ.....	23
2.3.2 สมรรถนะของเครื่องยนต์.....	24
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	25
<b>3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....</b>	<b>27</b>
3.1 การพัฒนาเครื่องต้นแบบปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพด้วย การดูดซับสลับความดัน.....	27
3.2 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	30
3.2.1 ศึกษาและวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ ที่ใช้ในการวิจัย.....	30
3.2.2 ศึกษาสมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับเชิงพาณิชย์ ที่มีผลต่อการดูดซับ.....	31
3.2.3 การทดสอบระบบแบบเบดนิ่ง.....	33
3.2.4 การทดลองระบบดูดซับสลับความดัน.....	36
3.2.5 การทดลองหาสมรรถนะของเครื่องยนต์.....	37
3.2.6 การศึกษาต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ของการปรับปรุง คุณภาพก๊าซชีวภาพ.....	38
<b>4 ผลการศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูล.....</b>	<b>39</b>
4.1 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพก่อนการปรับปรุงคุณภาพ.....	39
4.2 ลักษณะทางกายภาพของตัวดูดซับเชิงพาณิชย์.....	39
4.3 ความสามารถของตัวดูดซับในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แบบเบดนิ่ง.....	41
4.3.1 ผลของความดันต่อประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ของตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ.....	41

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.2	ผลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ .....	46
4.3.3	ปริมาณตัวดูดซับที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ .....	49
4.3.4	ไอโซเทอมของการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ .....	53
4.3.5	จลนพลศาสตร์การดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ .....	54
4.4	ความสามารถของตัวดูดซับเชิงพาณิชย์ในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของระบบหอดูดซับสลับความดัน .....	55
4.4.1	ตัวแปรควบคุมต่าง ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับของกระบวนการดูดซับสลับความดัน .....	55
4.4.2	ประสิทธิภาพของชุดอุปกรณ์ดูดซับสลับความดัน .....	58
4.5	ผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องย่นต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงก๊าซมีเทนชีวภาพ .....	60
4.6	การศึกษาต้นทุนทางด้านเศรษฐศาสตร์ในการปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพ .....	62
5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	64
5.1	สรุปผลการวิจัย .....	64
5.2	ข้อจำกัดในงานวิจัย .....	65
5.3	ข้อเสนอแนะในการดำเนินการวิจัยต่อไป .....	65
	รายการอ้างอิง .....	66
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. เอกสารรับรองคุณภาพตัวดูดซับต่าง ๆ .....	69
	ภาคผนวก ข. ข้อมูลการทดลองในห้องปฏิบัติการ .....	73
	ภาคผนวก ค. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา .....	86
	ประวัติผู้เขียน .....	93

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ปริมาณการใช้พลังงานเชิงพาณิชย์ขั้นต้น.....	1
2.1 สมบัติของก๊าซชีวภาพเปรียบเทียบกับก๊าซธรรมชาติและก๊าซหุงต้ม.....	6
2.2 ปริมาณการทดแทนเปรียบเทียบระหว่างก๊าซชีวภาพกับเชื้อเพลิงต่าง ๆ.....	6
2.3 ลักษณะและคุณภาพของก๊าซธรรมชาติสำหรับยานยนต์ตามประกาศ กรมธุรกิจพลังงานพ.ศ.2552.....	8
2.4 เปรียบเทียบเทคโนโลยีต่างๆในการปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพ.....	9
3.1 คุณสมบัติของเครื่องปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัย.....	29
3.2 ลักษณะทั่วไปของตัวดูดซับ Molecular sieve Zeolite 13X.....	31
3.3 ลักษณะทั่วไปของถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการวิจัย.....	32
3.4 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองคุณสมบัติของการดูดซับ.....	34
3.5 แผนการทดสอบระบบแบบเบดนิ่งเพื่อศึกษาสภาวะการดูดซับของ ตัวดูดซับ.....	35
3.6 ตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์เมื่อใช้ก๊าซชีวภาพ เป็นเชื้อเพลิง.....	38
4.1 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่ใช้ในงานวิจัย.....	39
4.2 ลักษณะทางกายภาพของตัวดูดซับ Molecular Sieve และ Activated Carbon.....	40
4.3 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ.....	54
4.4 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของ Pseudo-Second Order.....	55
4.5 กระบวนการปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพด้วยการดูดซับสลับความดัน.....	59
4.6 ผลการทดสอบเครื่องปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพ.....	59
4.7 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์.....	60
4.8 การคำนวณต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์จากการผลิตไบโอมีเทน.....	63
ข1.1 ผลการทดลองความดันที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับ Molecular sieve Zeolite 13X.....	74

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข1.2 ผลการทดลองความดันที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยถ่านดูดซับ Activated Carbon CGC 11.....	75
ข1.3 ผลการทดลองความดันที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยถ่านดูดซับ Activated Carbon CGC 11A.....	76
ข1.4 ผลการทดลองความดันที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยถ่านดูดซับ Activated Carbon CGC 12.....	77
ข2 ผลการทดลองอุณหภูมิที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ.....	78
ข3 ผลการทดลองปริมาณตัวดูดซับที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ.....	79
ข4.1 ข้อมูลการทดลองค่าไอโซเทอมของตัวดูดซับ Molecular sieve Zeolite 13X.....	80
ข4.2 ข้อมูลการทดลองค่าไอโซเทอมของถ่านดูดซับ Activated Carbon CGC 11.....	80
ข4.3 ข้อมูลการทดลองค่าไอโซเทอมของถ่านดูดซับ Activated Carbon CGC 11A.....	81
ข4.4 ข้อมูลการทดลองค่าไอโซเทอมของถ่านดูดซับ Activated Carbon CGC 12.....	81
ข5.1 ผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ Honda GX 240 โดยใช้เชื้อเพลิง Gasoline 91.....	82
ข5.2 ผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ Honda GX 240 โดยใช้เชื้อเพลิง Bio methane 90%.....	83
ข5.3 ผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ Honda GX 240 โดยใช้เชื้อเพลิง Bio methane 65%.....	84

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	การเก็บและทำความสะอาดตามลักษณะการนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์..... 7
2.2	ความหนาแน่นชนิดต่าง ๆ ของตัวดูดซับ..... 11
2.3	ตัวดูดซับอนินทรีย์ธรรมชาติ..... 12
2.4	ตัวดูดซับอนินทรีย์สังเคราะห์..... 12
2.5	ถ่านดูดซับ..... 13
2.6	วัฏภาคการดูดซับ..... 14
2.7	แสดง Mass Transfer Zone..... 20
3.1	กระบวนการดูดซับสลับความดัน..... 27
3.2	หอดูดซับสลับความดัน..... 28
3.3	ชุดควบคุมอุณหภูมิ..... 28
3.4	หน่วยควบคุมความดัน..... 29
3.5	หน่วยควบคุมอัตราการไหล..... 29
3.6	เครื่องดูดซับสลับความดัน..... 30
3.7	เครื่องวิเคราะห์ห้องค์ประกอบก๊าซชีวภาพ..... 31
3.8	เครื่อง Accelerated Surface Area and Porosimetry..... 32
3.9	ระบบทดสอบความสามารถใน การดูดซับของตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ..... 33
3.10	เครื่องชั่งไฟฟ้าละเอียด 2 ตำแหน่ง..... 34
3.11	ระบบทดสอบการดูดซับสลับความดัน..... 36
3.12	ชุดอุปกรณ์ดูดซับสลับความดัน..... 37
3.13	ชุดอุปกรณ์ทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์..... 38
4.1	การดูดซับก๊าซไนโตรเจนของตัวดูดซับเชิงพาณิชย์..... 40
4.2	ร้อยละของการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย Molecular sieve Zeolite 13X ที่ความดัน 2-7 บาร์..... 41
4.3	ร้อยละของการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย

Activated Carbon CGC 11 ที่ความดัน 2-7 บาร์ ..... 42

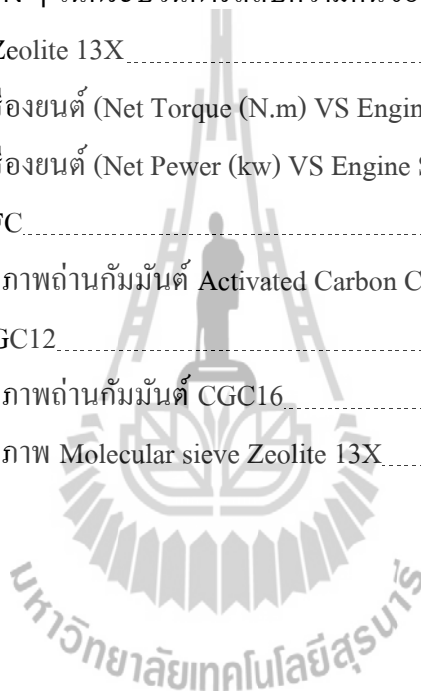
**สารบัญรูป (ต่อ)**

รูปที่	หน้า
4.4 ร้อยละของการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย Activated Carbon CGC 11A ที่ความดัน 2-7 บาร์.....	43
4.5 ร้อยละของการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย Activated Carbon CGC 12 ที่ความดัน 2-7 บาร์.....	44
4.6 ร้อยละของการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย Molecular sieve Zeolite 13X ที่อุณหภูมิต่างกัน.....	45
4.7 ร้อยละของการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย Activated Carbon CGC 11 ที่อุณหภูมิต่างกัน.....	46
4.8 ร้อยละของการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย Activated Carbon CGC 11A ที่อุณหภูมิต่างกัน.....	47
4.9 ร้อยละของการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย Activated Carbon CGC 12 ที่อุณหภูมิต่างกัน.....	48
4.10 ร้อยละของการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับ Molecular sieve Zeolite 13X ที่ปริมาณตัวดูดซับแตกต่างกัน.....	49
4.11 ร้อยละของการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยถ่านดูดซับ Activated Carbon CGC 11 ที่ปริมาณตัวดูดซับแตกต่างกัน.....	50
4.12 ร้อยละของการดูดซับก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ด้วยถ่านดูดซับ Activated Carbon CGC 11A ที่ปริมาณตัวดูดซับแตกต่างกัน.....	51
4.13 ร้อยละของการดูดซับก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ด้วยถ่านดูดซับ Activated Carbon CGC 12 ที่ปริมาณตัวดูดซับแตกต่างกัน.....	52
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซผสมกับ ปริมาณก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์บนตัวดูดซับต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ.....	53
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง $t/q_t$ (sec kg mg-1) กับ Time (sec) เมื่อการดูดซับเป็น Pseudo-Second Order.....	54
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละขององค์ประกอบในก๊าซผลิตภัณฑ์	

กับเวลาในการดูดซับด้วยตัวดูดซับ Molecular sieve Zeolite 13X.....56

**สารบัญรูป (ต่อ)**

รูปที่	หน้า
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละขององค์ประกอบในก๊าซผลิตภัณฑ์ กับเวลาในการดูดซับด้วยถ่านดูดซับ Activated Carbon CGC 12.....	57
4.18 ตัวอย่างขั้นตอนต่าง ๆ ในกระบวนการสลับความดันของตัวดูดซับ Molecular sieve Zeolite 13X.....	59
4.19 สมรรถนะของเครื่องยนต์ (Net Torque (N.m) VS Engine Speed (rpm)).....	61
4.20 สมรรถนะของเครื่องยนต์ (Net Power (kw) VS Engine Speed (rpm)).....	61
4.21 เปรียบเทียบค่า SFC.....	62
ก1 เอกสารรับรองคุณภาพถ่านกัมมันต์ Activated Carbon CGC 11, CGC 11A และCGC12.....	70
ก2 เอกสารรับรองคุณภาพถ่านกัมมันต์ CGC16.....	71
ก3 เอกสารรับรองคุณภาพ Molecular sieve Zeolite 13X.....	72



## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$\Delta t_{pr,u}$	=	คาบของการเพิ่มความดันของหอดูดซับด้วยก๊าซผสมของวัฏจักรความดัน
$\Delta t_{pg,d}$	=	คาบของการปรับสภาพตัวดูดซับด้วยผลิตภัณฑ์ของวัฏจักรความดัน
$\Delta t_{pd,u}$	=	คาบของการลดความดันของหอดูดซับออกจากผลิตภัณฑ์ของวัฏจักรความดัน
$\Delta t_{dp,d}$	=	คาบของการลดความดันของหอดูดซับออกจากสารเจือปนของวัฏจักรความดัน
BET	=	Brunauer, Emmett and Teller
$c_0$	=	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายอินทรีย์
$C_e$	=	ความเข้มข้นของสารละลายอินทรีย์ที่สมดุลหลังการดูดซับ
$h$	=	ความสูงของเบคหนึ่ง
$K_{BET}$	=	ค่าคงที่สมดุลของบีอีที
$K_F$	=	ค่าคงที่สมดุลของฟรุนคลิช
$K_H$	=	ค่าคงที่สมดุลของเฮนรี
$K_{KC}$	=	ค่าคงที่ของโกเบิลคอรี่แกน
$K_L$	=	ค่าคงที่สมดุลของแลงมัวร์
$K_S$	=	ค่าคงที่สมดุลของชิปส์
$K_T$	=	ค่าคงที่สมดุลของทอธ
MTZ	=	Mass Transfer Zone
$n$	=	ดัชนีชี้กำลังของแบบจำลองเส้นโค้งสมดุลดูดซับ
$P$	=	ความดันของสารดูดซับ
$P^0$	=	ความดันไอของสารถูกดูดซับ
$P_i$	=	ความดันสมดุลของสารถูกดูดซับ
$P_r$	=	ความดันของสารถูกดูดซับสัมพันธ์กับความดันไอ ( $P/P^0$ )
$q$	=	ปริมาณการดูดซับสาร
$q_e$	=	ปริมาณการดูดซับสารที่สภาวะสมดุล
$q_t$	=	ปริมาณการดูดซับสารที่เวลา $t$
$R^2$	=	Correlation Coefficient



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากการเพิ่มขึ้นของประชากรในประเทศส่งผลให้ความต้องการพลังงานด้านต่าง ๆ เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งปัจจุบันแหล่งพลังงานหลักที่ใช้คือพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล (fossil fuel) ทั้งในรูปของน้ำมันเชื้อเพลิง ก๊าซธรรมชาติ และผลผลิตข้างเคียงอื่น ๆ ในปี 2553 ประเทศไทยมีการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นจากปี 2552 เป็นอัตราร้อยละ 5.3 คิดเป็นพลังงานทั้งสิ้นประมาณ 70 ล้านตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ ทั้งนี้เป็นการใช้พลังงานเชิงพาณิชย์ 57 ล้านตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ คิดเป็นร้อยละ 81 นอกจากนี้เป็นการใช้พลังงานหมุนเวียน 13 ล้านตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 19.1 (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2553)

นคร ทิพยาวงศ์ (2553) กล่าวว่าปัจจุบันประเทศไทยมีความต้องการเชื้อเพลิงเพื่อใช้ในการคมนาคมและการขนส่งมากที่สุด โดยเปรียบเทียบกับปริมาณการใช้เชื้อเพลิงทุกภาคส่วน จากข้อมูลสถิติพลังงานสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน จะพบว่าความต้องการพลังงานด้านการคมนาคมขนส่งในรูปของน้ำมันเชื้อเพลิงมีแนวโน้มลดลง ส่วนทางกับความต้องการเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติดังตารางที่ 1.1 เนื่องจากความผันผวนของราคาน้ำมัน และการประกาศลอยตัวของราคาก๊าซปิโตรเลียมเหลว ส่งผลให้ผู้เกี่ยวข้องทุกฝ่ายต้องรีบเร่งค้นหาหรือเพิ่มศักยภาพในการใช้พลังงานทดแทนที่มีอยู่เดิมเพื่อชดเชยพลังงานหลักที่นับวันจะมีปริมาณลดน้อยลง

ตารางที่ 1.1 ปริมาณการใช้พลังงานเชิงพาณิชย์ขั้นต้น (เทียบเท่าพันบาร์เรลน้ำมันดิบต่อวัน)

พลังงาน	2546	2547	2548	2549	2550	2551
น้ำมัน	624	705	689	673	662	659
ก๊าซธรรมชาติ	496	518	566	579	617	693
ลิกไนต์/ ถ่านหิน	89	213	232	252	284	288
พลังน้ำ/ไฟฟ้านำเข้า	101	32	33	44	41	33
รวม	1,346	1,469	1,520	1,547	1,605	1,673

หมายเหตุ : คัดแปลงจากสำนักงานนโยบายและแผนพลังงานกระทรวงพลังงาน

ก๊าซชีวภาพ (Biogas) คือ ก๊าซที่เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยแบคทีเรียชนิดไม่ใช้ออกซิเจนในสภาวะไร้อากาศ ซึ่งองค์ประกอบหลักของก๊าซชีวภาพ ได้แก่ ก๊าซมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) ร้อยละ 40-80 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) ร้อยละ 30-60 ก๊าซอื่น ๆ เช่น ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $\text{H}_2\text{S}$ ) และก๊าซไนโตรเจน ( $\text{N}_2$ ) ร้อยละ 3 ก๊าซชีวภาพจัดเป็นทางเลือกหนึ่งของแหล่งพลังงานหมุนเวียนในประเทศไทยที่มีศักยภาพสูงมากเนื่องจากมีแหล่งวัตถุดิบทั้งที่เป็นน้ำเสียจากอุตสาหกรรม ของเหลือทิ้งจากการเกษตร ของเหลือทิ้งจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์ และการเกษตรแปรรูปต่างๆเป็นจำนวนมาก

ปัจจุบันประเทศไทยมีการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานต่าง ๆ และมูลสัตว์ 2,064 ล้านลูกบาศก์เมตร (เทียบเท่าน้ำมันดิบ 1,011,000 ตัน/ปี) สามารถนำมาใช้ผลิตเป็นพลังงานทดแทนได้ในรูปต่าง ๆ เช่น ผลิตไฟฟ้า ความร้อน ฯลฯ แต่ในส่วนของก็นำก๊าซชีวภาพมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงทดแทนก๊าซธรรมชาติสำหรับยานพาหนะนั้นในประเทศไทยยังไม่ได้รับการส่งเสริม เนื่องจากก๊าซธรรมชาติที่ใช้สำหรับยานพาหนะนั้นเป็นเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพสูง คือมีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนไม่น้อยกว่าร้อยละ 65 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไม่เกินร้อยละ 18 และค่าดัชนีวอบบีมีค่าระหว่าง  $37\text{-}42 \text{ MJ/m}^3$  ตามประกาศของกรมธุรกิจพลังงาน ทั้งนี้ก๊าซชีวภาพที่ได้จากการหมักของเหลือทิ้งทางการเกษตรนั้นมีคุณภาพต่ำกว่าค่าที่ประกาศกำหนด จึงจำเป็นต้องปรับปรุงคุณภาพด้วยวิธีการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซอื่น ๆ ออกไป ซึ่งกระบวนการปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพนี้ยังเป็นเรื่องใหม่สำหรับประเทศไทย

การศึกษาในครั้งนี้จะเป็นการพัฒนาต้นแบบการปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพโดยเน้นที่การกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อให้ก๊าซชีวภาพที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพดังกล่าวนี้มีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้สำหรับยานพาหนะได้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

### 1.2.1 วัตถุประสงค์ทั่วไป

เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของก๊าซชีวภาพและความเป็นไปได้ในการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ เพื่อให้เหมาะสมกับยานยนต์ที่ใช้ก๊าซธรรมชาติ

### 1.2.2 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของเทคนิคในการปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพ

### 1.2.3 เพื่อพัฒนาต้นแบบชุดปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพด้วยวิธีการดูดซับสลับความดัน

### 1.2.4 เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของชุดปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพที่พัฒนาขึ้น

### 1.2.5 เพื่อศึกษาสมรรถนะของเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงก๊าซชีวภาพ

### 1.2.6 เพื่อศึกษาด้านทุนทางเศรษฐศาสตร์ในการปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพด้วยวิธีการดูดซับสลับความดัน

### 1.3 สมมติฐานของการวิจัย

- 1.3.1 ความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซชีวภาพก่อนการดูดซับมีค่าเท่ากันแต่ตัวดูดซับต่างกัน ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับแตกต่างกัน
- 1.3.2 ความดันในการดูดซับต่างกันทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับแตกต่างกัน
- 1.3.3 อุณหภูมิในการดูดซับต่างกันทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับแตกต่างกัน
- 1.3.4 ปริมาณของตัวดูดซับที่บรรจุในคอลัมน์มีปริมาณต่างกันทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับแตกต่างกัน
- 1.3.5 ภายหลังการปรับปรุงคุณภาพความเข้มข้นของก๊าซมีเทนต้องมีอัตราส่วนสูงขึ้น
- 1.3.6 ก๊าซชีวภาพที่ปรับปรุงแล้วมีคุณสมบัติใกล้เคียงก๊าซธรรมชาติ

### 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.4.1 ทำการวิจัยโดยใช้ระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่สามารถรองรับน้ำเสียได้ 10 ลบ.ม./วัน ของหน่วยปฏิบัติการวิศวกรรมพลังงานและสิ่งแวดล้อม
- 1.4.2 ก๊าซชีวภาพที่ใช้ในการวิจัยนี้ได้ผ่านกระบวนการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และความชื้นก่อนนำมาใช้ในการวิจัย
- 1.4.3 ระบบปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพที่ทำการพัฒนามีความสามารถในการปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพที่อัตรา 25 ลิตรต่อนาที
- 1.4.4 เครื่องยนต์ที่ใช้ในการทดสอบคือเครื่องยนต์เบนซิน Honda GX 240 8 แรงม้า

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ทราบถึงสถานะที่เหมาะสมของการปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพ
- 1.5.2 เป็นแนวทางในการนำก๊าซชีวภาพที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพแล้วไปใช้ทดแทนก๊าซเชื้อเพลิงได้จริงในระบบการคมนาคมขนส่ง

## บทที่ 2

### แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพ (Biogas) คือ ก๊าซที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายของสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะที่ปราศจากออกซิเจน (anaerobic digestion) ซึ่งโดยทั่วไปจะหมายถึงก๊าซมีเทนที่เกิดจากการหมักสารอินทรีย์ โดยกระบวนการนี้สามารถเกิดได้ทั้งในหลุมขยะ กองมูลสัตว์ และก้นบ่อแหล่งน้ำนิ่ง กล่าวคือเมื่อไรก็ตามที่มีสารอินทรีย์หมักหมมกันเป็นเวลานานก็สามารถเกิดก๊าซชีวภาพได้

องค์ประกอบส่วนใหญ่ของก๊าซชีวภาพประกอบด้วยก๊าซมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) ร้อยละ 50-70 และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) ร้อยละ 30-40 ส่วนที่เหลือเป็นก๊าซชนิดอื่น ๆ เช่น ไฮโดรเจน ( $\text{H}_2$ ) ออกซิเจน ( $\text{O}_2$ ) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $\text{H}_2\text{S}$ ) ไนโตรเจน ( $\text{N}$ ) และไอน้ำ กระบวนการนี้เป็นที่นิยมในการเปลี่ยนของเสียประเภทอินทรีย์ทั้งหลายไปเป็นกระแสไฟฟ้า นอกจากจะเป็นการกำจัดของเสียได้แล้วยังสามารถทำลายเชื้อโรคได้อีกด้วย การใช้ก๊าซชีวภาพทดแทนพลังงานหลักเป็นการบริหารจัดการของเสียที่ควรได้รับการสนับสนุน เนื่องจากไม่เป็นการเพิ่มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้กับชั้นบรรยากาศที่เป็นต้นเหตุทำให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก (greenhouse effect)

ก๊าซชีวภาพถูกค้นพบครั้งแรกในศตวรรษที่ 17 โดยเมื่อกวนตะกอนในลำธารหรือทะเลสาบจะทำให้ก๊าซที่เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ซึ่งสามารถติดไฟได้ลอยขึ้นมา จากนั้นในปี 1859 มีการค้นพบว่าก๊าซที่เกิดจากขี้วัวนั้นมีก๊าซมีเทนปะปนอยู่ด้วย ในปี ค.ศ. 1859 มีการสร้างถังหมักก๊าซในสภาวะไร้อากาศ (anaerobic digester) ขึ้นเป็นครั้งแรกในประเทศอินเดีย ต่อมาในปี ค.ศ. 1985 อังกฤษคิดค้นนวัตกรรมใหม่ขึ้นมาโดยใช้ถังตั้งปฏิกรณ์ผลิตก๊าซแล้วนำก๊าซที่ได้ไปจุดไฟส่องสว่างตามถนน จากนั้นในปี ค.ศ. 1907 จึงมีการออกสิทธิบัตรสำหรับถังหมักก๊าซชีวภาพในประเทศเยอรมนี ในทศวรรษที่ 1930 การหมักก๊าซในสภาวะไร้อากาศได้เริ่มเป็นที่รู้จักในแวดวงนักวิชาการกันมากขึ้นการวิจัยค้นคว้าเกี่ยวกับจุลินทรีย์ที่เป็นตัวทำให้เกิดปฏิกิริยาจึงเกิดขึ้นโดยมีการศึกษาถึงสภาวะที่เอื้อต่อการเติบโตของจุลินทรีย์เหล่านี้

การใช้ก๊าซชีวภาพที่ได้จากของเหลือทิ้งทางการเกษตร หรือเศษอาหารจากครัวเรือนจัดเป็นทางเลือกหนึ่งของการใช้พลังงานทดแทน ไม่ว่าจะเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าหรือการประกอบอาหาร อีกทั้งยังเป็นการลดภาระของโครงข่ายพลังงานของชาติด้วย สำหรับประเทศที่พัฒนาแล้วการนำเทคโนโลยีก๊าซชีวภาพไปใช้ยังเป็นการลดการปลดปล่อยมลภาวะต่าง ๆ รวมไปถึงก๊าซเรือนกระจก

สู่สิ่งแวดล้อมที่นับวันจะยิ่งเสื่อมโทรมลง นอกจากนี้ยังมีผลผลิตพลอยได้อื่น ๆ ที่สามารถนำไปใช้ได้ อีก เช่น ปุ๋ยอินทรีย์ หรือปุ๋ยน้ำ เป็นต้น

### 2.1.1 การส่งเสริมการผลิตก๊าซชีวภาพในประเทศไทย

ในระยะแรกการส่งเสริมเทคโนโลยีก๊าซชีวภาพจำกัดอยู่แค่ในระดับครัวเรือนหรือเกษตรกรรายย่อยเท่านั้น ต่อมาในปี พ.ศ. 2531 คณะทำงานในสังกัดมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ร่วมกับกรมส่งเสริมการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ โดยได้รับงบประมาณสนับสนุนจากองค์การ GTZ (Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit) ประเทศเยอรมนีจัดตั้ง “โครงการก๊าซชีวภาพไทย-เยอรมัน” ขึ้นเพื่อศึกษาถึงปัญหาในการใช้งานระบบก๊าซชีวภาพ พร้อมทั้งปรับปรุงและพัฒนาเทคโนโลยีก๊าซชีวภาพให้เหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้กับฟาร์มเลี้ยงสัตว์ในประเทศได้มากขึ้น

หน่วยบริการก๊าซชีวภาพสังกัดสถาบันวิจัยและพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ได้ถูกจัดตั้งขึ้นในปี พ.ศ. 2534 เพื่อดำเนินการส่งเสริมเทคโนโลยีก๊าซชีวภาพ ต่อเนื่องจากโครงการก๊าซชีวภาพไทย-เยอรมัน รวมทั้งดำเนินการศึกษาวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีให้สามารถประยุกต์ใช้ในฟาร์มเลี้ยงสัตว์ได้อย่างกว้างขวางมากยิ่งขึ้น ปลายปี พ.ศ. 2538 กองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานสำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ หรือ “สพช.” (ปัจจุบัน คือ สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน หรือ “สนพ.” กระทรวงพลังงาน) ได้ให้การสนับสนุนแก่หน่วยบริการก๊าซชีวภาพเพื่อดำเนินงาน “โครงการส่งเสริมการผลิตก๊าซชีวภาพในฟาร์มเลี้ยงสัตว์ระยะที่ 1” จนกระทั่งในปี พ.ศ. 2551 หน่วยบริการก๊าซชีวภาพได้รับการจัดตั้งเป็น “สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงาน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่” และต่อมาในปีพ.ศ. 2553 สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารีได้พระราชทานชื่อหน่วยงานใหม่เป็น “สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่” ซึ่งได้ดำเนินโครงการมาจวบจนปัจจุบัน

### 2.1.2 องค์ประกอบและคุณสมบัติของก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพประกอบด้วยองค์ประกอบของก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นส่วนใหญ่แต่อาจจะมีก๊าซไนโตรเจน ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เจือปนอยู่บ้างเล็กน้อย ซึ่งก๊าซที่เกิดจากการหมักนี้จะมียังมีองค์ประกอบที่แตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่ใช้ในการหมักและสถานะของกระบวนการหมัก โดยทั่วไปองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพมีดังต่อไปนี้

- ก๊าซมีเทนร้อยละ	50-70
- ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ	30-50
- ก๊าซไนโตรเจนร้อยละ	0-8
- ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ร้อยละ	0-1

ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงที่มีศักยภาพในการทดแทนเชื้อเพลิงจากแหล่งพลังงานอื่นได้โดยตรงเช่นเดียวกับก๊าซธรรมชาติซึ่งมีความสะดวกในการใช้งานมากกว่าการใช้ฟืนหรือถ่านไม้

อีกทั้งยังเป็นพลังงานที่สะอาดปราศจากเขม่าและควันด้วย ก๊าซชีวภาพยังสามารถให้พลังงานด้านแสงสว่างรวมทั้งให้พลังงานความร้อนได้ ซึ่งก๊าซชีวภาพที่สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงได้จะต้องมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบไม่น้อยกว่าร้อยละ 50

ตารางที่ 2.1 สมบัติของก๊าซชีวภาพเปรียบเทียบกับก๊าซธรรมชาติและก๊าซหุงต้ม

พารามิเตอร์	หน่วย	ก๊าซธรรมชาติ	ก๊าซหุงต้ม	ก๊าซชีวภาพ *
Calorific Value (Lower)	MJ/m <sup>3</sup>	36.14	16.10	21.48
Density	kg/m <sup>3</sup>	0.82	0.51	1.21
Max Ignition Velocity	m/s	0.39	0.70	0.25
Theory Air required	m <sup>3</sup> air/m <sup>3</sup> gas	9.53	3.83	5.71
Max CO <sub>2</sub> in Stack Gas	%Volume	11.9	13.10	17.80
Dew Point	°C	59	60	60-160

หมายเหตุ : \* ที่ 60% CH<sub>4</sub>, 38% CO<sub>2</sub>, 2% Other

### 2.1.3 การนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์

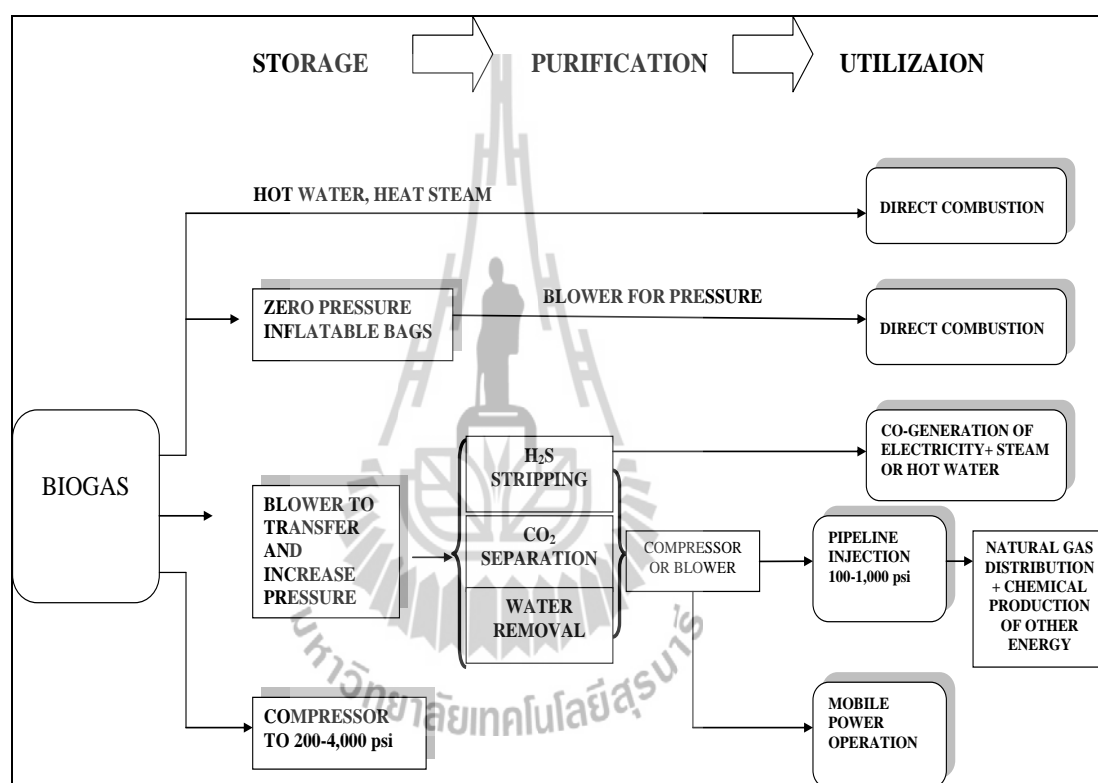
จากองค์ประกอบและคุณสมบัติของก๊าซชีวภาพดังที่กล่าวมาแล้วนั้นทำให้เห็นว่าก๊าซชีวภาพสามารถทดแทนเชื้อเพลิงหรือพลังงานต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ปริมาณการทดแทนเปรียบเทียบระหว่างก๊าซชีวภาพกับเชื้อเพลิงต่าง ๆ

รายการการทดแทน	อัตราทดแทน	หน่วย
ก๊าซ LPG	0.46	กิโลกรัม
ก๊าซธรรมชาติ	0.60	กิโลกรัม
ไฟฟ้า	1.2	กิโลวัตต์-ชั่วโมง
น้ำมันเตา	0.55	ลิตร
น้ำมันดีเซล	0.4	กิโลกรัม
น้ำมันเบนซิน	0.6	กิโลกรัม
ถ่านหิน	0.8	กิโลกรัม
ถ่านไม้	1.6	กิโลกรัม

หมายเหตุ : ก๊าซชีวภาพ 1 ลบ.ม. ที่มีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนร้อยละ 60 มีค่าความร้อนประมาณ 21 เมกะจูล/ลบ.ม. (สุวศา, 2535) (สถาบันวิจัยและพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2538)

การจะนำก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นไปใช้ประโยชน์ได้นั้นจำเป็นต้องมีการจัดการกับก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นก่อนจึงจะสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (Jewell et al., 1982) ซึ่งระบบการจัดการก๊าซชีวภาพดังกล่าวประกอบด้วย การรวบรวมก๊าซชีวภาพ (Gas Handling) การเก็บก๊าซชีวภาพ (Gas Storage) การทำความสะอาดก๊าซชีวภาพ (Gas Purification) และการนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์ (Gas Utilization) แนวทางหรือวิธีการของระบบการจัดการก๊าซชีวภาพเพื่อนำไปใช้ประโยชน์สามารถสรุปทางเลือกระบบการจัดการก๊าซชีวภาพได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การเก็บและทำความสะอาดตามลักษณะการนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์

(ดัดแปลงจาก : Jewell et al., 1982)

#### 2.1.4 คุณสมบัติของก๊าซชีวภาพเพื่อทดแทนก๊าซธรรมชาติในยานพาหนะ

ปัจจุบันประเทศไทยยังไม่มีข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของก๊าซชีวภาพเพื่อใช้ทดแทนก๊าซธรรมชาติในยานพาหนะ จึงต้องใช้มาตรฐานลักษณะและคุณภาพของก๊าซธรรมชาติสำหรับยานยนต์ตามประกาศกรมธุรกิจพลังงานปี พ.ศ. 2552 ดังตารางที่ 2.3 เพื่อเปรียบเทียบกับคุณสมบัติของก๊าซชีวภาพภายหลังการปรับปรุงคุณภาพ

ตารางที่ 2.3 ลักษณะและคุณภาพของก๊าซธรรมชาติสำหรับยานยนต์ตามประกาศกรมธุรกิจพลังงาน พ.ศ. 2552

รายการ	ข้อกำหนด	หน่วย	อัตราสูงสุด		วิธีทดสอบ <sup>1/</sup>
1	จุดน้ำค้าง ที่ความดัน 20,000 กิโลปาสกาล (Water Dew Point at pressure 20,000 kPa)	องศาเซลเซียส (°C)	ไม่สูงกว่า	9.2	ASTM D 1142
2	จุดน้ำค้างไฮโดรคาร์บอนที่ความดัน 4,500 kPa ซึ่งควบนั่นเป็นของเหลวไม่เกิน 1% (Hydrocarbon dew point at pressure 4,500 kPa less than 1% of a liquid Condensate is formsd)	องศาเซลเซียส (°C)	ไม่สูงกว่า	15.5	ASTM D 1945 และคำนวณด้วย Equation of state
3	ดัชนีวอบบี (Wobbe Index)	เมกกะจูล/ลูกบาศก์เมตร (MJ/m <sup>3</sup> )	ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า	37 และ 42	ASTM D 3588
4	ค่ามีเทน (Methane Number)	ร้อยละโดยปริมาตร (% vol)	ไม่ต่ำกว่า	65	ASTM D 1945 และคำนวณด้วยวิธี GRI method (Annex D ISO 15403-1)
5	ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen Sulfide)	มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เมตร (Mg/m <sup>3</sup> )	ไม่สูงกว่า	23	ASTM D 5504
6	ไฮโดรเจน (Hydrogen)	ร้อยละโดยปริมาตร (% vol)	ไม่สูงกว่า	0.1	ASTM D 1945
7	คาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide)	ร้อยละโดยปริมาตร (% vol)	ไม่สูงกว่า	18	ASTM D 1945
8	ออกซิเจน (Oxygen)	ร้อยละโดยปริมาตร (%vol)	ไม่สูงกว่า	1	ASTM D 1945
9	กำมะถัน (Sulphur)	ร้อยละโดยปริมาตร (ppm)	ไม่สูงกว่า	50	ASTM D 5504

หมายเหตุ : <sup>1/</sup> วิธีทดสอบอาจใช้วิธีอื่นเทียบเท่าก็ได้ แต่ในกรณีที่มีข้อโต้แย้งให้ใช้วิธีที่กำหนดในรายละเอียดแนบท้ายนี้



## 2.2 การปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพถูกนำไปใช้ทดแทนพลังงานในด้านต่าง ๆ เช่น ผลิตกระแสไฟฟ้า หรือใช้เป็นเชื้อเพลิงความร้อนโดยตรง เมื่อพิจารณาจากองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพแล้วพบว่าสัดส่วนของก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพมีปริมาณใกล้เคียงกับก๊าซมีเทนในก๊าซธรรมชาติ เป็นผลให้ก๊าซชีวภาพสามารถใช้ทดแทนเชื้อเพลิงสำหรับยานพาหนะได้ แนวคิดในการพัฒนาระบบปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพเพื่อใช้ในยานพาหนะจึงเกิดขึ้น ปัจจุบันเทคโนโลยีการปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพมีการพัฒนามาอย่างต่อเนื่องในต่างประเทศ เทคโนโลยีดังกล่าวมีดังนี้

- ก. การดูดซึมทางกายภาพ (physical absorption)
- ข. การดูดซึมทางเคมี (chemical absorption)
- ค. การดูดซับบนพื้นผิวของแข็ง (adsorption on solid surface)
- ง. การแยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน (membrane separation)

การจะนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์ได้นั้นจะต้องมีการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ก่อนในเบื้องต้น เนื่องจากก๊าซดังกล่าวมีคุณสมบัติเป็นกรดเมื่อสัมผัสกับความชื้นในอากาศ ดังนั้นการปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพจึงหมายถึงการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อเพิ่มสัดส่วนของก๊าซมีเทนในองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบเทคโนโลยีต่างๆในการปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพ

	Water Scrubbing	Amine Scrubbing	PSA	Membrane
Energy consumption (kWh/m <sup>3</sup> biogas)	0.3	0.67	0.27	N/A
CH <sub>4</sub> recovery	98.5%	99%	83-99%	90%
H <sub>2</sub> S co-removal	Yes	Contaminant	Possible	Possible
Liquid H <sub>2</sub> O co-removal	Yes	Contaminant	Contaminant	No
H <sub>2</sub> O vapour co-removal	No	Yes	Yes	No
N <sub>2</sub> and O <sub>2</sub> co-removal	No	No	Possible	Partial

### 2.2.1 กระบวนการดูดซับ (Adsorption)

กระบวนการดูดซับเป็นวิธีการแยกองค์ประกอบที่ต้องการออกจากสารละลายผสมของเหลวหรือก๊าซโดยให้สารละลายหรือก๊าซผสมไหลสัมผัสกับตัวดูดซับ โดยที่องค์ประกอบของสารผสมต่าง ๆ แต่ละชนิดในสารละลายจะมีความสามารถในการกระจายไปบนผิวและเกิดแรง

ดึงดูดกับตัวดูดซับได้ต่างกัน ดังนั้นปรากฏการณ์การดูดซับจึงขึ้นอยู่กับ ลักษณะโครงสร้างของตัวดูดซับเอง คุณสมบัติทางเคมีของตัวดูดซับและตัวถูกละลายนั้น จำนวนชั้นของโมเลกุลของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับบนพื้นผิว และขนาดของรูพรุนที่ทำหน้าที่ดูดซับได้ ดังนั้นจึงสามารถแยกองค์ประกอบ ที่ต้องการออกได้โดยการเลือกตัวดูดซับให้เหมาะกับองค์ประกอบนั้น ๆ

### 2.2.1.1 ประเภทของการดูดซับ

กระบวนการดูดซับเกิดได้จากแรงระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับโดยแรงดังกล่าวจำแนกออกได้เป็น 2 ชนิด คือแรงกายภาพ และแรงเคมี ดังนั้นการดูดซับจึงสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ประเภท คือ การดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี ตามชนิดของแรงที่ดูดซับโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับไว้บนผิวของตัวดูดซับ (เดชา นัตถศิริเวช, 2552)

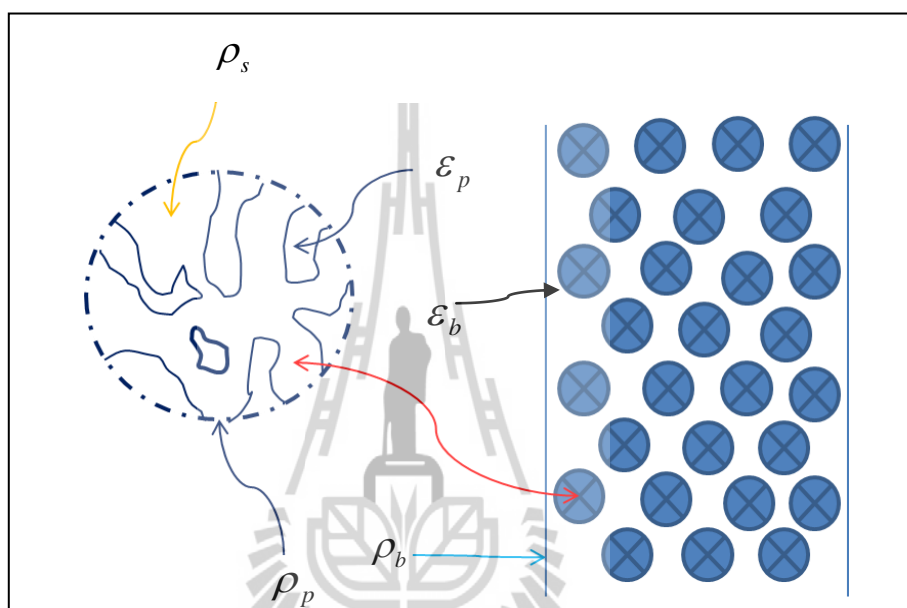
ก. การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption) เกิดได้จากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับกับองค์ประกอบที่ถูกดูดซับซึ่งมีค่ามากกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลขององค์ประกอบในสารละลาย เมื่อตัวดูดซับมีความพรุนสูงของเหลวหรือก๊าซที่ควบแน่นนั้นจะสามารถแทรกเข้าสู่ช่องว่างภายในของตัวดูดซับดังกล่าวได้แม้ว่าความดันของระบบจะต่ำกว่าความดันไอขององค์ประกอบนั้นก็ตาม ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิปกติโดยให้ความร้อนออกมาเล็กน้อยแต่จะมากกว่าความร้อนของการควบแน่นขึ้นอยู่กับความดันย่อยของสารที่ถูกดูดซับชนิดนั้น อีกทั้งยังสามารถดูดซับสารที่ถูกดูดซับไว้ได้ในปริมาณที่สูงมากต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ แต่เมื่อลดความดันของระบบลงหรือเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง ซึ่งจะทำให้สารที่ถูกดูดซับเคลื่อนที่ออกจากตัวดูดซับ ปรากฏการณ์ในช่วงนี้เรียกว่า “การคายซับ” ซึ่งเป็นวิธีการนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง

ข. การดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption) เกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิสูงซึ่งแตกต่างกับการดูดซับทางกายภาพ โดยที่ปฏิกิริยาเคมีจะเกิดขึ้นระหว่างตัวดูดซับกับองค์ประกอบที่ต้องการดูดซับและจะสร้างสารประกอบระหว่างตัวดูดซับขึ้นที่ผิวของตัวดูดซับซึ่งจะทำให้ปริมาณของตัวดูดซับลดลง แต่จะดูดซับตัวถูกละลายได้เพียงเล็กน้อยต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ โดยจะให้ความร้อนออกมาสูงมาก โดยที่การดูดซับทางเคมีไม่สามารถเกิดการคายซับได้เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวไม่ขึ้นกับความดันแต่จะขึ้นกับอุณหภูมิเพียงอย่างเดียว ซึ่งจะพบว่าสารผสมบางชนิดที่อุณหภูมิปกติไม่สามารถเกิดการดูดซับทางเคมีได้ แต่เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิที่เหมาะสมให้กับระบบก็สามารถจะเกิดการดูดซับทางเคมีได้เช่นกัน

### 2.2.1.2 ตัวดูดซับ

การดูดซับทางกายภาพเป็นการสะสมของสารที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ ดังนั้นตัวดูดซับที่ดีต้องมีพื้นผิวจำเพาะมาก ๆ เพื่อให้สามารถดูดซับสารที่ถูกดูดซับได้ปริมาณมาก กล่าวคือตัวดูดซับที่ดีจะต้องมีรูพรุนหรือมีโพรงภายในมาก ๆ เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะให้มาก

ขึ้น โดยมีขนาดของเม็ดตัวดูดซับเท่าเดิม ซึ่งโดยทั่วไปแล้วหน่วยดูดซับจะมีลักษณะเป็นทรงกระบอกแนวตั้ง ภายในบรรจุเม็ดตัวดูดซับที่เหมาะสมกับสารถูกดูดซับแต่ละชนิด ดังนั้นความหนาแน่นของระบบสามารถจำแนกออกได้เป็น ความหนาแน่นของตัวดูดซับ (Solid density,  $\rho_s$ ) ความหนาแน่นของเม็ดตัวดูดซับ (Adsorbent density,  $\rho_p$ ) และความหนาแน่นของชั้นตัวดูดซับ (Bulk density,  $\rho_b$ ) ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ความหนาแน่นชนิดต่างๆของตัวดูดซับ

### 2.2.1.3 ตัวดูดซับเชิงพาณิชย์

การแยกสารประกอบชนิดใดชนิดหนึ่งออกจากของผสมเอกพันธ์ด้วยการดูดซับ ตัวดูดซับในหน่วยดูดซับจะต้องมีคุณสมบัติดูดซับสารประกอบชนิดนั้นเป็นสิ่งสำคัญ ซึ่งได้แก่ ปริมาณสมดุลดูดซับสารประกอบนั้นจำเพาะ อัตราการดูดซับสารประกอบดังกล่าว และการเลือกดูดซับสารประกอบชนิดนั้น ส่วนสมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับ ได้แก่ พื้นผิวจำเพาะของตัวดูดซับ ขนาดโพรงเฉลี่ยของตัวดูดซับ ความพรุนของตัวดูดซับ ความหนาแน่นของตัวดูดซับ และความหนาแน่นของชั้นเม็ดดูดซับที่บรรจุในหน่วยดูดซับนั้นเป็นปัจจัยเสริมของระบบดูดซับ

ก. ตัวดูดซับอนินทรีย์ธรรมชาติ คือ ตัวดูดซับอนินทรีย์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น ดินเหนียวดูดซับ (Activated clay) เป็นของแข็งผสมที่ประกอบด้วยสารประกอบออกไซด์ของซิลิกอน ( $\text{SiO}_2$ ) สารประกอบออกไซด์ของอะลูมิเนียม ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และสารประกอบ

ออกไซด์ของเหล็ก ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) เป็นองค์ประกอบที่สำคัญ และอาจมีสารประกอบโลหะออกไซด์ของโลหะอื่น ๆ เป็นต้น



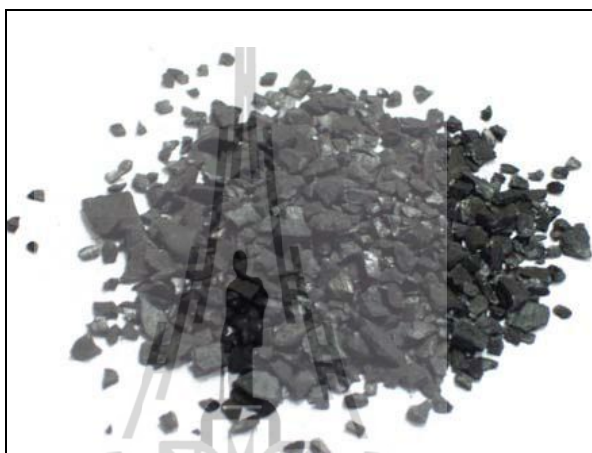
รูปที่ 2.3 ตัวดูดซับอนินทรีย์ธรรมชาติ

ข. ตัวดูดซับอนินทรีย์สังเคราะห์ คือ ตัวดูดซับอนินทรีย์ที่สังเคราะห์ขึ้น เพื่อเลียนแบบสารประกอบที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ ได้แก่ ผลึกซิลิกาดูดความชื้น (Silica gel) ผลึกอลูมินาดูดความชื้น (Activated alumina) และผลึกคัดโมเลกุล (Zeolite molecular sieves) ซึ่งเป็นผลึกของสารประกอบออกไซด์ของซิลิกอน ผลึกสารประกอบออกไซด์ของอะลูมิเนียม และสารประกอบออกไซด์ร่วมของซิลิกอนและอะลูมิเนียม ตามลำดับ



รูปที่ 2.4 ตัวดูดซับอนินทรีย์สังเคราะห์

ค. ถ่านดูดซับ คือ ตัวดูดซับที่สังเคราะห์จากวัสดุอินทรีย์ต่าง ๆ ซึ่งจำแนกได้ตามขนาดปากโพรงของเม็ดถ่านดูดซับออกเป็นถ่านดูดซับทั่วไป (Activated carbon) และถ่านคัดโมเลกุล (Molecular sieve carbon) ถ่านดูดซับทั่วไปจะมีโพรงขนาดต่าง ๆ มากมาย โพรงดังกล่าวมีขนาดใหญ่กว่า 1 นาโนเมตร ส่วนถ่านคัดโมเลกุลมีขนาดปากโพรงเล็กกว่า 1 นาโนเมตร ถ่านดูดซับมีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบสำคัญ ถ่านดูดซับพาณิชย์ต่าง ๆ จึงผลิตจากวัสดุสารประกอบอินทรีย์หรือสารชีวมวลชนิดต่าง ๆ เช่น ถ่านหิน เศษไม้ และกะลามะพร้าว เป็นต้น



รูปที่ 2.5 ถ่านดูดซับ

#### 2.2.1.4 ผลึกคัดโมเลกุล

ผลึกคัดโมเลกุลได้จากผลึกของสารประกอบออกไซด์ร่วมระหว่างอะตอมซิลิคอนกับอะตอมอะลูมิเนียม โดยอะตอมทั้งสองจะสร้างพันธะเคมีกับอะตอมออกซิเจนได้จำนวน 4 อะตอมเท่ากันเกิดเป็นรูปผลึกทรงสี่หน้า (tetrahedron) ที่มีอะตอมซิลิคอนหรืออะตอมอะลูมิเนียมเป็นจุดศูนย์กลาง โดยที่โพรงของผลึกคัดโมเลกุลดังกล่าวเกิดขึ้นจากการจัดเรียงอะตอมออกซิเจนของผลึกนั้นเป็นวงที่มีจำนวนออกซิเจน 4 5 6 8 10 หรือ 12 อะตอม ลักษณะใดลักษณะหนึ่งหรือหลายลักษณะผสมกัน โพรงของผลึกจึงมักมีขนาด 0.3 ถึง 1.0 นาโนเมตร

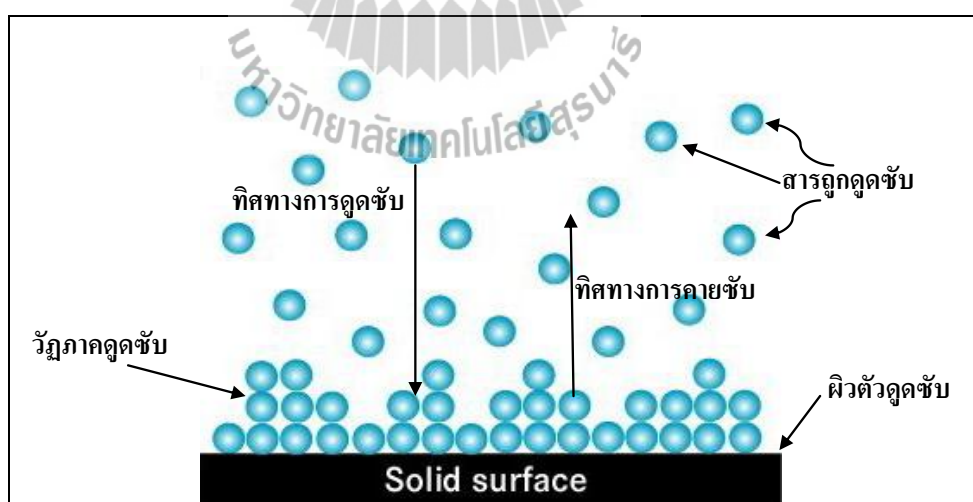
#### 2.2.1.5 ถ่านดูดซับ

ถ่านดูดซับเป็นตัวดูดซับที่มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก ถ่านดูดซับทั้งชนิดเม็ดและชนิดผงมักมีพื้นที่จำเพาะมากกว่า 1000 ตารางเมตรต่อกรัมถ่านดูดซับ โพรงแต่ละโพรงของถ่านดูดซับทั้งสองมักมีขนาดแตกต่างกันตลอดทางความลึกของโพรง จึงได้แบ่งขนาดโพรงของถ่านดูดซับออกเป็น 3 กลุ่มดังนี้

- ก. โพรงเล็ก เป็นโพรงที่มีขนาดเล็กกว่า 2 นาโนเมตร
- ข. โพรงกลาง เป็นโพรงที่มีขนาดระหว่าง 2 ถึง 50 นาโนเมตร
- ค. โพรงใหญ่ เป็นโพรงที่มีขนาดใหญ่กว่า 50 นาโนเมตร

### 2.2.2 สมดุลดูดซับ

เมื่อกระบวนการดูดซับเกิดขึ้น วัฏภาคดูดซับ (adsorbed phase) จะเกิดขึ้นบนผิวของตัวดูดซับดังแสดงในรูปที่ 2.6 สารถูกดูดซับที่อยู่ในวัฏภาคของไหล (fluid phase) ซึ่งอาจมีสถานะเป็นของเหลวหรือก๊าซที่สามารถเคลื่อนที่ได้โดยอิสระจะถูกถ่ายโอนไปยังวัฏภาคดูดซับในสถานะที่ควบคุมไว้ เช่น อุณหภูมิที่กำหนดไว้ให้คงที่ เป็นต้น เมื่ออัตราการถ่ายโอนสารถูกดูดซับจากวัฏภาคของไหลไปยังวัฏภาคดูดซับเท่ากับอัตราการถ่ายโอนสารถูกดูดซับจากวัฏภาคดูดซับไปยังวัฏภาคของไหล นั่นคืออัตราการดูดซับสุทธิเป็นศูนย์ แม้ว่าสารถูกดูดซับจะยังคงถ่ายโอนกันระหว่างวัฏภาคของไหลกับวัฏภาคดูดซับ แต่ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในวัฏภาคของไหลและปริมาณดูดซับจำเพาะในวัฏภาคดูดซับจะไม่เปลี่ยนแปลงอีกในสถานะที่ควบคุมไว้ ดังนั้นการดูดซับสารถูกดูดซับดังกล่าวจึงเข้าสู่สมดุล (equilibrium) ของการถ่ายโอนมวลสารแล้ว สมดุลดูดซับ (Adsorption equilibrium) เป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการแยกของสารผสมเนื้อเดียว (homogeneous mixture) สมดุลดูดซับไม่เพียงแยกสารถูกดูดซับออกจากของผสมเนื้อเดียวสมดุลดูดซับยังมีอิทธิพลต่อการเคลื่อนที่ของสารถูกดูดซับอีกด้วย



รูปที่ 2.6 วัฏภาคการดูดซับ (เดชา ฉัตรศิริเวช, 2552)

ชนิดสมดุลดูดซับจะแปรผันตามชนิดของตัวดูดซับ ชนิดของสารถูกดูดซับ ความเข้มข้นหรือความดันของสารถูกดูดซับ และอุณหภูมิของระบบดูดซับ สมดุลดูดซับจำเพาะของสาร

ถูกดูดซับชนิดใด ๆ ด้วยตัวดูดซับชนิดหนึ่งที่กำหนดไว้ จึงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสมดุลดูดซับสารถูกดูดซับจำเพาะ ( $q_s$ ) ของตัวดูดซับที่เลือกไว้ ความเข้มข้นสมดุล ( $C_s$ ) ของสารถูกดูดซับชนิดนั้น และอุณหภูมิสมดุล ( $T$ ) ของระบบดูดซับนั้น ดังนั้นแบบจำลองสมดุลการดูดซับจึงสามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ประเภทตามชนิดตัวแปรที่ควบคุมให้คงที่

ก. แบบจำลองสมดุลดูดซับอุณหภูมิคงที่ (adsorption isotherm)

ข. แบบจำลองสมดุลดูดซับความดันคงที่ (adsorption isobar)

ค. แบบจำลองดูดซับปริมาณสมดุลดูดซับจำเพาะคงที่ (adsorption isostere)

กระบวนการดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนชนิดหนึ่ง แต่ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการดูดซับนี้โดยทั่วไปแล้วจะมีค่าน้อยกว่าค่าความร้อนของปฏิกิริยาเคมีมาก ๆ สามารถระบายออกจากระบบดูดซับได้โดยง่ายจึงนิยมวัดสมดุลดูดซับ โดยกำหนดให้อุณหภูมิมีค่าคงที่ที่กำหนดไว้

### 2.2.2.1 แบบจำลองสมดุลดูดซับสารชนิดเดียว

จากลักษณะทางกายภาพของสารดูดซับ คือมีโพรงขนาดเล็กมากภายในตัวดูดซับ ทำให้พื้นที่ผิวภายในโพรงดูดซับมีมากกว่าพื้นที่ผิวภายนอกมาก ๆ การดูดซับจึงเกิดขึ้นบนผิวโพรงของเม็ดตัวดูดซับเป็นหลัก นอกจากนี้สารถูกดูดซับที่อยู่ในสถานะก๊าซหรือไอ ควรมีขนาดโมเลกุลเล็กกว่าขนาดโพรงของเม็ดตัวดูดซับดังกล่าวเพื่อให้สารถูกดูดซับสามารถเคลื่อนที่เข้าสู่โพรง หรือออกจากโพรงได้อย่างสะดวก นั่นคือวิธภาคดูดซับของการดูดซับก๊าซหรือไอมักจะเกิดขึ้นบนพื้นผิวของโพรงที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดโมเลกุลของสารถูกดูดซับ

#### 1) แบบจำลองสมดุลดูดซับของเฮนรี

สมดุลดูดซับที่มีปริมาณดูดซับสารดูดซับจำเพาะ ( $q_s$ ) เพียงเล็กน้อยสมดุลของการดูดซับลักษณะนี้มักเกิดขึ้นกับระบบดูดซับที่มีปริมาณสารถูกดูดซับน้อย ๆ ซึ่งปริมาณสมดุลดูดซับสารถูกดูดซับจำเพาะจะแปรผันตามความดันสมดุล ( $P_s$ ) ของสารถูกดูดซับ ณ อุณหภูมิของระบบดูดซับ ( $T$ ) ที่กำหนด

$$q = K_H P \quad (2.1)$$

เมื่อ  $q$  คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับ (mg/kg)

$K_H$  คือ Distribution Coefficient หรือ Henry's Law Constants

$P$  คือ ความดันย่อยของสารถูกดูดซับ

ค่าคงที่สมดุลดูดซับของเฮนรี ( $K_H$ ) นี้เป็นพารามิเตอร์กำหนดลักษณะเฉพาะของระบบการดูดซับ

## 2) แบบจำลองสมดุลดูดซับของแลงมัวร์

แลงมัวร์เสนอแนวความคิดการเกิดสมดุลดูดซับก๊าซหรือไอ ในลักษณะของการเลียนแบบการเกิดสมดุลปฏิกิริยาเคมีที่มีสารตั้งต้นสองชนิด ดังนั้นอัตราการดูดซับจึงขึ้นกับความดันของสารถูกดูดซับกับสัดส่วนพื้นผิวว่างของตัวดูดซับ ส่วนอัตราการคายสารถูกดูดซับจะขึ้นกับปริมาณดูดซับสารถูกดูดซับจำเพาะ เมื่อการดูดซับเกิดขึ้นเต็มพื้นผิวของตัวดูดซับในระบบแล้ว อุณหภูมิที่กำหนดลักษณะดังกล่าวเรียกว่า “การดูดซับอิ่มตัว” แบบจำลองของแลงมัวร์ประกอบด้วยพารามิเตอร์ของระบบสมดุลดูดซับ 2 ตัว คือ ค่าคงที่สมดุลดูดซับของแลงมัวร์ ( $K_L$ ) และ ปริมาณสมดุลดูดซับของสารถูกดูดซับจำเพาะสูงสุด ( $q_{\max}$ ) ดังนี้

$$q = \frac{q_{\max} K_L P}{1 + K_L P} \quad (2.2)$$

แทน  $q_{\max} K_L$  ด้วย A  
และ แทน  $K_L$  ด้วย B  
จะได้

$$q = \frac{AP}{1 + BP} \quad (2.3)$$

เมื่อ  $q$  คือ ปริมาณตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับ (mg/kg)  
 $P$  คือ ความดันย่อยของสารถูกดูดซับ  
 $A, B$  คือ ค่าคงที่

สามารถจัดใหม่ได้เป็น

$$\frac{P}{q} = \frac{1}{A} + \frac{BP}{A} \quad (2.4)$$

เมื่อ  $A/B$  คือความสามารถของตัวดูดซับในการดูดซับตัวถูกละลายแต่ละชนิด

## 3) แบบจำลองสมดุลดูดซับของบีอีที



สมการดูดซับของบีอีทีถูกพัฒนาจากแบบจำลองสมการดูดซับของแลงมัวร์ โดย สตีเฟน บรุนเนอร์ (Stephen Brunauer) พอล ฮิวจ์ เอ็มเมตต์ (Paul Hugh Emmett) และเอคเวิร์ต เทลเลอร์ (Edward Teller) โดยสมการดูดซับของบีอีทีนี้เป็นแบบจำลองสมการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer) ให้การดูดซับสารถูกดูดซับชนิดใดชนิดหนึ่งสามารถเกิดบนพื้นผิวของตัวดูดซับได้โดยตรง หรือเกิดบนชั้นของสารถูกดูดซับที่อยู่บนพื้นผิวของตัวดูดซับแล้ว ดังนั้นปริมาณสมการดูดซับสารถูกดูดซับจำเพาะของตัวดูดซับชนิดหนึ่งจึงเพิ่มขึ้นอย่างไร้ขีดจำกัดเมื่อความดันของสารถูกดูดซับเพิ่มขึ้น สมการสมการดูดซับของบีอีทีที่แสดงดังนี้

$$q = \frac{q_m K_{BET} P_r}{(1 - P_r)(1 - P_r + K_{BET} P_r)} \quad (2.5)$$

เมื่อ  $P_r$  คือ อัตราส่วนความดันสมดุลของสารถูกดูดซับต่อความดันไอ ( $P/P^0$ )

#### 4) แบบจำลองสมการดูดซับของฟรุนดลิช (Freundlich)

ปริมาณสมการดูดซับสารถูกดูดซับจำเพาะ ( $q$ ) แปรผันตรงกับความดันสมดุล ( $P$ ) ของสารถูกดูดซับยกกำลังค่าคงที่ ( $n$ ) ดังสมการ

$$q = K_F P^n \quad (2.6)$$

เมื่อ  $q$  คือ ปริมาณตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับ ( $\text{mg/g}$ )

$P$  คือ ความดันสมดุลของสารถูกดูดซับ

$K_F$  คือ Freundlich Capacity Factor

$n$  คือ Freundlich Intensity Parameter

สามารถจัดสมการใหม่ได้เป็น

$$\ln q = n \ln P + \ln K_F \quad (2.7)$$

#### 5) แบบจำลองสมการดูดซับของชิปส์

ชิปส์ (Sips) เสนอแบบจำลองสมดุลดูดซับแบบใหม่โดยเป็นแบบจำลองที่ผสมลักษณะแบบจำลองสมดุลดูดซับระหว่าง แลงมัวร์ และฟรุนดลิช ดังนี้

$$q = q_{\max} \left( \frac{K_S P}{1 + K_S P} \right)^n ; n < 1 \quad (2.8)$$

- เมื่อ  $q$  คือ ปริมาณตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับ ( $\text{mgg}^{-1}$ )  
 $P$  คือ ความดันสมดุลของสารถูกดูดซับ  
 $K_S$  คือ ค่าคงที่สมดุลดูดซับของชิปส์  
 $n$  คือ ดัชนีชี้กำลัง

#### 6) แบบจำลองสมดุลดูดซับของ โทเบลคอร์ริแกน

โทเบล (Koble) และคอร์ริแกน (Corrigan) ได้เสนอแบบจำลองเส้นโค้งดูดซับที่มีรูปแบบผสมของแบบจำลองของแลงมัวร์และฟรุนดลิช

$$q = \frac{q_{\max} (K_{KC} P)^n}{1 + (K_{KC} P)^n} ; n < 1 \quad (2.9)$$

- เมื่อ  $q$  คือ ปริมาณตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับ ( $\text{mgg}^{-1}$ )  
 $P$  คือ ความดันสมดุลของสารถูกดูดซับ  
 $K_{KC}$  คือ ค่าคงที่สมดุลดูดซับของโทเบลคอร์ริแกน  
 $n$  คือ ดัชนีชี้กำลัง

#### 7) แบบจำลองสมดุลดูดซับของทอธ

ทอธ (Toth) ได้พัฒนาแบบจำลองสมดุลดูดซับที่เป็นลักษณะผสมระหว่างแลงมัวร์และฟรุนดลิชอีกรูปแบบหนึ่งคือ

$$q = q_{\max} \left( \frac{(K_T P)^n}{1 + (K_T P)^n} \right)^{1/n} ; n < 1 \quad (2.10)$$

- เมื่อ  $q$  คือ ปริมาณตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับ ( $\text{mgg}^{-1}$ )

$P$  คือ ความดันสมดุลของสารดูดซับ

$K_T$  คือ ค่าคงที่สมดุลดูดซับของทอธ

$n$  คือ คำนีซีกำลัง

### 2.2.3 จลน์ศาสตร์ดูดซับ

จลนพลศาสตร์การดูดซับอย่างง่ายในรูปของ Pseudo-First Order Equation และ Pseudo-Second Order Equation ในรูปแบบของ Ho และ McKey

#### 2.2.3.1 Pseudo-First Order Equation

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad (2.11)$$

เมื่อ  $k_1$  คือ ค่า Rate Constant ของการดูดซับแบบ Pseudo-First Order

$q_e$  คือ ปริมาณการดูดซับสารที่สภาวะสมดุล

$q_t$  คือ ปริมาณการดูดซับสารที่เวลา  $t$

กำหนดให้สภาวะเริ่มต้นคือ

$$q_t = 0 \quad \text{ที่} \quad t = 0$$

$$q_t = q_t \quad \text{ที่} \quad t = t$$

$$q_t = q_e \quad \text{ที่} \quad t = \infty$$

ดังนั้น

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303}t \quad (2.12)$$

#### 2.2.3.2 Pseudo-Second Order Equation

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \quad (2.13)$$

เมื่อ  $k_2$  คือ ค่า Rate Constant ของการดูดซับแบบ Pseudo-Second Order

กำหนดให้สภาวะเริ่มต้นคือ

$$q_t = 0 \quad \text{ที่} \quad t = 0$$

$$q_t = q_t \quad \text{ที่} \quad t = t$$

$$q_t = q_e \quad \text{ที่} \quad t = \infty$$

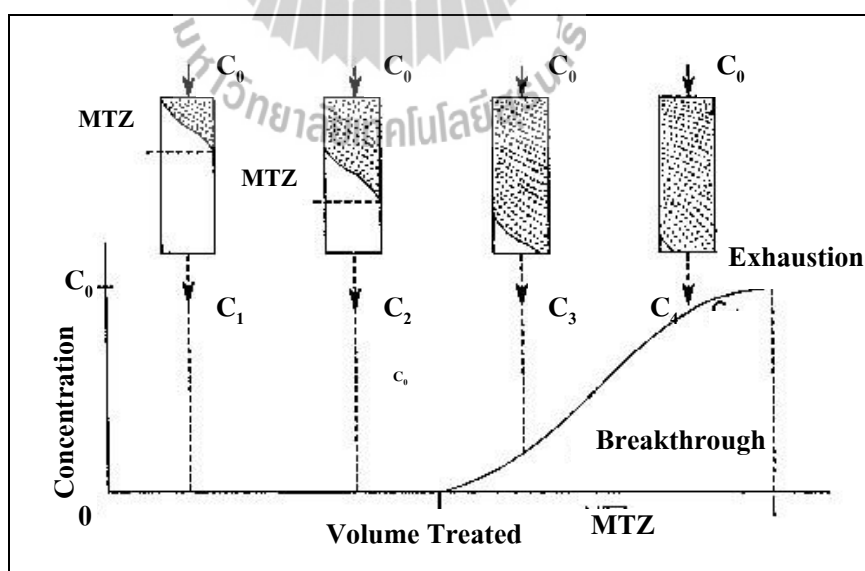
ดังนั้น

$$\frac{1}{(q_e - q_t)} = \frac{1}{q_e} + k_2 t \quad (2.14)$$

จัดรูปสมการใหม่

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (2.15)$$

#### 2.2.4 บริเวณการเคลื่อนย้ายมวลสารสำหรับการดูดซับในหลอดขับ



รูปที่ 2.7 Mass Transfer Zone

บริเวณการเคลื่อนย้ายมวลสาร (Mass Transfer Zone, MTZ) หมายถึง ช่วงความสูงในคอลัมน์ที่เกิดการดูดซับระหว่างตัวถูกละลายกับตัวดูดซับในคอลัมน์ ความสูงที่อยู่ต่ำกว่า MTZ ลงมาจะยังไม่มี การดูดซับระหว่างตัวถูกละลายกับตัวดูดซับในคอลัมน์ ส่วนความสูงที่อยู่เหนือช่วง MTZ นี้จะมีการดูดซับและเข้าสู่สภาวะสมดุลไปเรียบร้อยแล้ว โดยที่สภาวะสมดุลปริมาณตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับในทางทฤษฎี จะต้องมีความเท่ากับค่าที่ได้จากการทดลองแบบกะ ช่วงความสูง MTZ จะเคลื่อนที่ต่ำลงมาเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงจุดต่ำสุดของคอลัมน์ซึ่งเราจะเรียกจุดนี้ว่า “เบรคทรู” (Breakthrough) แสดงดังรูป 2.7 โดยทั่วไปจุดเบรคทรูจะเกิดที่ความเข้มข้นเท่ากับ  $0.05 +$  / และจุดที่ตัวดูดซับหมดสภาพในการดูดซับ (Exhaustion) คือจุดที่ความเข้มข้นเท่ากับ  $0.95 +$  / กราฟเบรคทรูโดยทั่วไปมีลักษณะคล้ายตัวเอส (S-Shape)

ความสูงของ MTZ จะแปรเปลี่ยนไปตามอัตราการไหล เนื่องจากจะทำให้ความปั่นป่วน (Dispersion) การแพร่กระจาย (Diffusion) และการไหลในช่องว่างเม็ดตัวดูดซับ โดยในทางปฏิบัติจริง ๆ แล้วจะมีการไหลเร็วหรือการไหลลัดวงจร (Bypass) เกิดขึ้นเนื่องจากพื้นที่ผนังภายในคอลัมน์ เมื่อทำการกรองสารละลายที่มีตัวถูกละลายปริมาณหนึ่ง ๆ อยู่ด้วยตัวกลางเพื่อดูดซับตัวถูกละลายชนิดนั้น ช่วงแรก ๆ สามารถหาปริมาณตัวถูกละลาย ณ ตำแหน่งที่ผ่านออกมาจากการกรองจะมีปริมาณน้อย หรือแทบไม่มีอยู่เลยเนื่องจากถูกดูดซับไปหมด และเมื่อปริมาณการกรองที่ผ่านออกมาเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่หลุดออกมาจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งความเข้มข้นของตัวถูกละลายหลังการกรองเท่ากับก่อนการกรอง

**2.2.5 การขยายขนาดของหอดูดซับ (Scale Up)** ถูกพัฒนาโดย Fornwalt และ Hutchins ในปี 1966 (Reynolds and Richards, 1996, quoted in Wibulswat, 1999) ได้ดังนี้คือ

ก. คำนวณหาปริมาตรของตัวดูดซับ

$$\text{Bed Volume (BV)} = Q/Q_b \quad (2.15)$$

เมื่อ  $Q$  คือ อัตราการไหลที่ใช้ในการออกแบบคอลัมน์

$Q_b$  คือ อัตราการไหลในคอลัมน์ทดลอง (หน่วยเป็นปริมาตรของเบดนิ่งต่อเวลา)

ข. มวลของการออกแบบคอลัมน์

$$M = (BV) \rho \quad (2.16)$$

เมื่อ  $M$  คือ น้ำหนักของตัวดูดซับที่ใช้ในการออกแบบคอลัมน์

$\rho$  คือ Bulk Density ของตัวดูดซับ

ค. เวลาของการออกแบบคอลัมน์จนถึงจุดเบรคทรู

$$T = M/M_t \quad (2.17)$$

เมื่อ  $T$  คือ Breakthrough Time สำหรับการออกแบบคอลัมน์

$M_t$  คือ มวลของตัวดูดซับในคอลัมน์ที่จุดตัวดูดซับหมดสภาพ (Exhaustion) ต่อหน่วยเวลา

$$V_b = QT \quad (2.18)$$

เมื่อ  $V_b$  คือ ปริมาตรที่ผ่านการบำบัดจากคอลัมน์จนถึงจุดเบรคทรู

### 2.2.6 กระบวนการดูดซับสลับความดัน

กระบวนการดูดซับสลับความดัน คือ กระบวนการแยกสารประกอบชนิดหนึ่งหรือกลุ่มหนึ่งออกจากสารผสม โดยจะทำงานเป็นวัฏจักรซึ่งประกอบด้วยคาบดูดซับและคาบปรับสภาพ กระบวนการสลับความดันนี้เป็นกระบวนการสำคัญกระบวนการหนึ่งในอุตสาหกรรมการผลิตเพื่อแยกสารเจือปนออกจากก๊าซผลิตภัณฑ์ เช่น การกำจัดความชื้นที่ปนในอากาศเพื่อผลิตอากาศแห้ง สำหรับระบบควบคุมการกำจัดความชื้นที่ปนในก๊าซไฮโดรเจน ( $H_2$ ) ที่ผลิตจากกระบวนการผลิตโซดาไฟ (NaOH) หรือการกำจัดความชื้นที่ปนอยู่ในก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น

วัฏจักรความดันของการดูดซับสลับความดันมักเพิ่มขึ้นตามจำนวนของหอดูดซับ คาบย่อยต่าง ๆ ทั้งหมดของวัฏจักรสามารถจำแนกได้ตามลักษณะการเปลี่ยนความดันของหอดูดซับ และการเคลื่อนที่ของก๊าซหรือสารถูกดูดซับในหอดูดซับนั้น ๆ ซึ่งลักษณะการเปลี่ยนแปลงความดันสามารถจำแนกได้ 4 ลักษณะ ได้แก่ ความดันสูงคงที่ ความดันลดลง ความดันต่ำคงที่ และความดันเพิ่มขึ้น ส่วนลักษณะการเคลื่อนที่ของก๊าซหรือสารถูกดูดซับในหอดูดซับจำแนกได้สองลักษณะ คือการเคลื่อนที่ไปทางด้านของผลิตภัณฑ์ และการเคลื่อนที่ไปทางด้านปล่อยก๊าซเจือปนออก ดังนั้น วัฏจักรความดันของกระบวนการสลับความดันจึงจำแนกตามลักษณะการเปลี่ยนแปลงความดันร่วมกับการเคลื่อนที่ของสารถูกดูดซับ

1. คาบความดันสูงคงที่ไหลออกทางผลิตภัณฑ์ (High Pressure Product) เป็นคาบผลิตก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ความดันสูงสุดซึ่งเป็นสภาวะที่ตัวดูดซับสามารถดูดซับสารเจือปนได้มากที่สุดของวัฏจักรความดัน

2. คาบความดันต่ำคงที่ไหลออกจากสารเจือปน (Low Pressure Purge) เป็นคาบไล่สารเจือปนออกจากสารดูดซับที่ความดันต่ำสุดซึ่งเป็นสภาวะที่ตัวดูดซับสามารถดูดซับสารเจือปนได้น้อยที่สุดของวัฏจักรความดัน
3. คาบลดความดันออกจากผลิตภัณฑ์ (Cocurrent Depressurization) เป็นคาบปรับลดสภาวะการดูดซับสารเจือปน โดยลดปริมาณดูดซับสารเจือปนจำเพาะที่สะสมบนผิวตัวดูดซับตามความดันของหอดูดซับที่ลดลงด้วยการระบายก๊าซผลิตภัณฑ์ที่สะสมในบริเวณด้านที่ก๊าซผลิตภัณฑ์ไหลออกจากหอดูดซับ และจ่ายก๊าซผลิตภัณฑ์ความดันต่ำเพื่อปรับเพิ่มความดันของหอดูดซับอื่นหรือเพื่อปรับลดความดันย่อยของสารเจือปนในหอดูดซับที่ความดันต่ำสุดตามความเหมาะสม
4. คาบลดความดันออกจากสารเจือปน (Countercurrent Depressurization) เป็นคาบลดสภาวะการดูดซับสารเจือปน โดยลดปริมาณดูดซับสารเจือปนจำเพาะที่สะสมบนผิวตัวดูดซับตามความดันของหอดูดซับที่ลดลงด้วยการระบายก๊าซสารเจือปนที่สะสมไว้ในบริเวณด้านที่ก๊าซผสมไหลเข้าสู่หอดูดซับออกจากหอดูดซับ
5. คาบเพิ่มความดันด้วยก๊าซผลิตภัณฑ์ (Product Prepressurization) เป็นคาบปรับเพิ่มสภาวะการดูดซับสารเจือปน โดยเพิ่มความดันของหอดูดซับด้วยก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ เพื่อให้สารเจือปนที่เหลือค้างอยู่ในหอดูดซับได้เคลื่อนไปสะสมบนผิวของตัวดูดซับในบริเวณด้านที่ก๊าซผสมไหลเข้าสู่หอดูดซับ
6. คาบเพิ่มความดันด้วยก๊าซผสม (Feed Prepressurization) เป็นคาบปรับเพิ่มสภาวะการดูดซับสารเจือปน โดยเพิ่มความดันหอดูดซับด้วยก๊าซผสมที่ต้องการแยกสารเจือปนออก

วัฏจักรความดันของกระบวนการสลับความดัน ซึ่งประกอบด้วยคาบย่อยต่าง ๆ ที่มีลักษณะเดียวกันหรือต่างกันดังกล่าวแล้วข้างต้น ตัวแปรของคาบย่อยต่าง ๆ คือช่วงเวลาของคาบย่อย ( $\Delta t$ ) แต่ละคาบ และความดัน (P) ที่เปลี่ยนแปลงไปของคาบย่อยนั้น ๆ แต่ลักษณะที่สำคัญของกระบวนการสลับความดัน คือ สารเจือปนจะไม่เคลื่อนที่ออกจากหอดูดซับทางด้านปลายผลิตก๊าซผลิตภัณฑ์แต่จะเคลื่อนที่ออกจากหอดูดซับทางด้านปลายที่ก๊าซผสมไหลเข้าเท่านั้น

## 2.3 สมรรถนะของเครื่องยนต์

### 2.3.1 เครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพ (Biogas Engine)

ประเทือง ฝั้นแก้ว (2554) กล่าวว่าในการนำก๊าซชีวภาพมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับ

เครื่องยนต์สันดาบภายในนั้นจะต้องทำการดัดแปลงเครื่องยนต์ก่อนเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมัน

**2.3.1.1 เครื่องยนต์ก๊าซดีเซล (Gas Diesel Engine)** คือ การนำเครื่องยนต์ดีเซลมาเปลี่ยนเป็นใช้เชื้อเพลิงคือ น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ โดยให้ก๊าซชีวภาพผสมกับอากาศเข้าห้องเผาไหม้ ส่วนการจุดระเบิดยังใช้น้ำมันดีเซลฉีดเข้าไปยังก๊าซชีวภาพกับอากาศที่อัดให้มีความดันและอุณหภูมิสูงในกระบอกสูบซึ่งเครื่องยนต์ต้องการน้ำมันดีเซลเพื่อจุดระเบิดประมาณ 10-20% ของการใช้เครื่องยนต์ดีเซลปกติทำให้สามารถประหยัดน้ำมันประมาณ 80-90%

**2.3.1.2 เครื่องยนต์ดีเซลดัดแปลง (Modification of a Diesel Engine into a Gas Otto Engine)** เป็นเครื่องยนต์ก๊าซโซลีนที่ใช้เชื้อเพลิงก๊าซ คือ การนำเครื่องยนต์ดีเซลมาดัดแปลงเป็นเครื่องยนต์แก๊สโซลีน โดยวิธีการเปลี่ยนการจุดระเบิดเป็นแบบออตโตผสมกับก๊าซชีวภาพให้มีความดันและอุณหภูมิสูงแล้วจุดระเบิดด้วยหัวเทียน

**2.3.1.3 เครื่องยนต์แก๊สโซลีนที่ใช้เชื้อเพลิงก๊าซ (Gas Otto Engine)** คือ การนำเครื่องยนต์ก๊าซโซลีนทั่วไปที่ใช้น้ำมันเบนซินเป็นเชื้อเพลิงเปลี่ยนมาเป็นก๊าซธรรมชาติแทน แต่เมื่อดัดแปลงแล้วประสิทธิภาพของเครื่องยนต์จะลดลงประมาณ 20%

### 2.3.2 สมรรถนะของเครื่องยนต์

ขั้นตอนและวิธีวัดกำลังของเครื่องยนต์ผ่านไดนาโมมิเตอร์แบบกระแสเหนี่ยวนำ (Eddy Current Dynamometer) ใช้หลักการขดลวดตัวนำไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านไปในสนามแม่เหล็กซึ่งจะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นในขดลวดตัวนำ กระแสที่เกิดในขดลวดจะต้านการหมุนของเครื่องยนต์

#### 2.3.2.1 การคำนวณหาแรงบิดของเครื่องยนต์ (Torque)

$$\text{Torque} = \text{Load} \times G \times L \quad (2.19)$$

เมื่อ Torque คือ ค่าแรงบิดของเครื่องยนต์ (N-m)

Load คือ น้ำหนักที่วัดได้จากตาชั่งแขวน (kg)

G คือ แรงโน้มถ่วงของโลกเท่ากับ  $9.81 \text{ m/s}^2$

L คือ ความยาวแขนของโมเมนต์ เท่ากับ 0.75 m

#### 2.3.2.2 การคำนวณค่ากำลังของเครื่องยนต์ (Power)

$$\text{Power} = \frac{2 \times \Pi \times N \times \text{Torque}}{60 \times 100} \quad (2.20)$$



เมื่อ Power คือ ค่ากำลังของเครื่องยนต์ (kw)  
N คือ ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ (rpm)

### 2.3.2.3 การคำนวณหาอัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (Fuel Consumption)

$$\text{Fuel Consumption} = \frac{\text{Fuel}(kg)}{\text{time}(h)} \quad (2.21)$$

เมื่อ Fuel Consumption คือ อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (kg/h)

### 2.3.2.4 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ (Specific Fuel Consumption)

$$\text{Specific Fuel Consumption} = \frac{\text{Fuel Consumption}}{\text{Power}} \quad (2.22)$$

## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการตรวจเอกสารพบว่า กระบวนการปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพโดยวิธีการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนนำมาใช้กับยานพาหนะในต่างประเทศได้มีการพัฒนาจนสามารถนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ได้แล้ว อย่างไรก็ตามการพัฒนาเทคโนโลยีดังกล่าวยังไม่เกิดขึ้นในประเทศไทย อันเนื่องมาจากน้ำมันเชื้อเพลิง ก๊าซธรรมชาติ (NGV) ก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) ในประเทศไทยมีราคาถูกขณะที่เครื่องจักรในระบบการอัดก๊าซเป็นระบบความดันสูงราคาค่อนข้างแพง

Guo, B. (2006) ทำการศึกษาการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิ 303-333 K สมดุลดูดซับสามารถอธิบายได้ด้วยสมการของ Dubinin-Radushkevich และจากการศึกษาความแตกต่างของอุณหภูมิ พบว่าที่อุณหภูมิต่ำการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยถ่านกัมมันต์เกิดขึ้นได้ดีกว่าที่อุณหภูมิสูง แสดงว่ากระบวนการดูดซับนี้เป็นกระบวนการคายความร้อน

Ilyas, S. Z. (2006) ศึกษาการใช้ก๊าซชีวภาพบรรจุถังในประเทศปากีสถานซึ่งเป็นประเทศกำลังพัฒนาเพื่อทดแทนพลังงานเชิงพาณิชย์ในภาคอุตสาหกรรมท้องถิ่น พบว่าก๊าซชีวภาพอัดถังนี้สามารถทดแทนน้ำมันดีเซลได้ถึง 240 ลิตรต่อวัน

Navaza, J. M. (2008) ได้ศึกษาวิธีการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้สารละลาย MDEA (*N*-methyldiethanolamine) และเตาปฏิกรณ์ที่ใช้เป็นแบบ Bubble Column ซึ่งจะอาศัยการ

แลกเปลี่ยนมวลระหว่างก๊าซกับของเหลว พบว่าเมื่อความเข้มข้นของ MDEA เพิ่มขึ้น องค์ประกอบของมีเทนก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วย (การกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์มีประสิทธิภาพดีขึ้น)

Vijay, V. K. (2006) ศึกษาการบรรจุก๊าซชีวภาพลงในถัง CNG เพื่อใช้กับรถยนต์แทนการใช้ก๊าซธรรมชาติ ปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพด้วยวิธีการดูดซับด้วยน้ำโดยใช้น้ำที่ความดันสูงไหลแบบสวนทางกันทำให้ก๊าซชีวภาพนี้สามารถอัดได้เพิ่มขึ้นที่ความดัน 20 Mpa (200 bar)

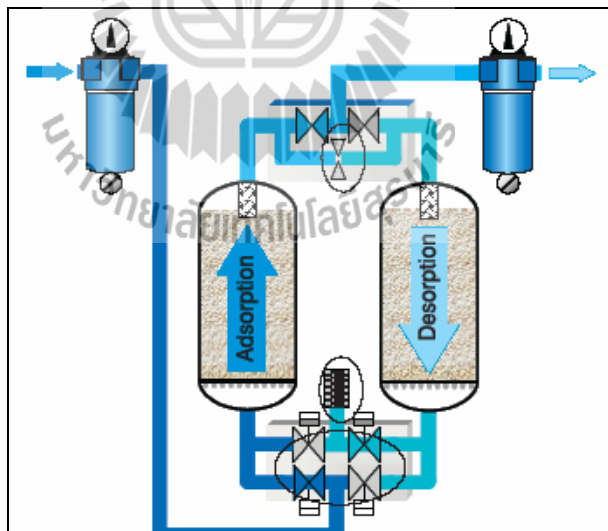
ประเทือง ผึ้งแก้ว (2554) ดัดแปลงเครื่องยนต์ดีเซล Kubota รุ่น ET 80 ขนาด 8 แรงม้าให้สามารถใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ และทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ โดยหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างน้ำมันดีเซลกับก๊าซชีวภาพที่ความเร็วรอบ 1500 รอบต่อนาที พบว่าเครื่องยนต์ดัดแปลงใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพมีประสิทธิภาพสูงสุดร้อยละ 17.01 ที่อัตราส่วนน้ำมันดีเซลต่อก๊าซชีวภาพ 30:70 เป็นช่วงที่เหมาะสมที่สุดเนื่องจากไม่เกิดการน็อคของเครื่องยนต์ และมีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงก๊าซชีวภาพ 1.26 m<sup>3</sup>/hr และอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันดีเซล 0.00034 m<sup>3</sup>/hr

ปิยะพงษ์ สิงห์บัว (2554) ศึกษาระบบอัดก๊าซชีวภาพและดัดแปลงรถจักรยานยนต์เพื่อให้ใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงได้รวมไปถึงหาอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเมื่อใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงในรถจักรยานยนต์ โดยทำการพัฒนาระบบอัดก๊าซชีวภาพที่ความดัน 15 บาร์ เพื่อบรรจุในถังใช้กับรถจักรยานยนต์ดัดแปลง โดยติดตั้งระบบจ่ายก๊าซและผสมก๊าซกับอากาศเพิ่มเติม พบว่ารถจักรยานยนต์สามารถวิ่งได้ที่ความเร็ว 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และไอเสียที่เกิดจากก๊าซชีวภาพมีปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรคาร์บอนน้อยกว่ากรณีที่ใช้ น้ำมันแก๊สโซลีนร้อยละ 97.42 และ 31.08 ตามลำดับ แต่กลับปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่า น้ำมันแก๊สโซลีนร้อยละ 35.51 เนื่องจากก๊าซชีวภาพมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบสูง

### บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย

#### 3.1 การพัฒนาเครื่องต้นแบบปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพ ด้วยการดูดซับสลับความดัน

เครื่องต้นแบบปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพด้วยการดูดซับสลับความดัน (Pressure Swing Adsorption) นี้อาศัยหลักการของความแตกต่างของความดัน โดยกระบวนการดูดซับ (Adsorption) จะเกิดได้ดีที่ความดันสูงแต่การคายซับ (Desorption) จะเกิดได้ดีที่ความดันต่ำ ๆ กระบวนการนี้เหมาะสมที่จะใช้เพื่อแยกสารที่มีความดันไอสูง หรือมีสถานะก๊าซที่อุณหภูมิห้องซึ่งมักมีความแรงของการดูดซับ (Adsorption strength) ต่ำ การคายซับจึงทำได้ง่ายกว่าการดูดซับ กล่าวคือจะใช้เวลาในการดูดซับนานกว่าการคายซับ กระบวนการดูดซับสลับความดันจึงมักประกอบด้วยถังดูดซับ 2 ถังขึ้นไป ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 กระบวนการดูดซับสลับความดัน

หลักการทำงานของระบบดูดซับสลับความดันนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพได้โดยการแยกเอาก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากก๊าซชีวภาพ เพื่อให้เหลือ

เพียงก๊าซมีเทนที่มีสัดส่วนเหมาะสมต่อการใช้งาน โดยเครื่องต้นแบบปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพมีองค์ประกอบหลัก ๆ ดังนี้

- 1) หน่วยดูดซับประกอบด้วยหอดูดซับที่ทำจากสแตนเลสสตีล 2 หอ สูง 450 มิลลิเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 6 มิลลิเมตร สามารถเปลี่ยนตัวดูดซับได้



รูปที่ 3.2 หอดูดซับสลั้บความดัน

- 2) หน่วยควบคุมอุณหภูมิมีหน้าที่ลดความชื้น และควบคุมอุณหภูมิของระบบ โดยสามารถทำความเย็นได้ต่ำสุด 0 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.3 ชุดควบคุมอุณหภูมิ

- 3) หน่วยควบคุมความดันในระบบ ซึ่งสามารถเพิ่มความดันให้กับระบบได้สูงสุด 8 บาร์



รูปที่ 3.4 อุปกรณ์ปรับความดัน

- 4) หน่วยควบคุมอัตราการไหล



รูปที่ 3.5 ระบบควบคุมความดันและการไหล

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของเครื่องปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัย

คุณลักษณะ		ค่าบังคับ
ความดันระบบ	ความดันระบบสูงสุด	8 bar(g)/116 psig
ก๊าซมีเทนชีวภาพ	อัตราการไหลสูงสุด	25 lite /min *
ขนาด	กว้าง×ยาว×สูง	1000 × 1200 × 1800 (mm)
	น้ำหนักสุทธิ	180 kg
ข้อมูลด้านไฟฟ้า	กระแส/ความถี่	230Vac/50Hz
	การใช้พลังงาน	400 W

หมายเหตุ : \* อัตราการไหล 25 ลิตร/นาที ก๊าซมีเทนที่ได้มากกว่าร้อยละ 90 ตามการออกแบบ

### 3.2 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง:

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปะปนอยู่กับก๊าซชีวภาพด้วยเครื่องปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการดูดซับสลับความดัน (Pressure swing Adsorption) ที่พัฒนาขึ้นดังรูปที่ 3.6 โดยใช้ตัวดูดซับเชิงพาณิชย์ 2 ชนิด คือ ผลึกคัดโมเลกุล (Molecular sieve) และถ่านดูดซับ (Activated carbon) เป็นตัวดูดซับ และใช้ก๊าซชีวภาพจากบ่อผลิตก๊าซชีวภาพแบบ Covered Lagoon ที่มีมูลสุกรเป็นสารตั้งต้นในการผลิตก๊าซชีวภาพ ดังนั้นจึงแบ่งอุปกรณ์และวิธีการทดลองดังนี้



รูปที่ 3.6 เครื่องดูดซับสลับความดัน (Pressure Swing Adsorption)

#### 3.2.1 ศึกษาและวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่ใช้ในการวิจัย

วัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์หาองค์ประกอบและคุณสมบัติเริ่มต้นของก๊าซชีวภาพก่อนทำการศึกษาระบวนการปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพเพื่อใช้ในการควบคุมคุณภาพเริ่มต้นของก๊าซชีวภาพ และใช้เปรียบเทียบกับองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพทำการทดลองโดยวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพด้วยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซชีวภาพ Geotech รุ่น Biogas Check ดังรูปที่ 3.7 โดยใช้ก๊าซมาตรฐานในการสอบเทียบเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพจากบริษัท Thai Industrial Gas Public Company Limited.



รูปที่ 3.7 เครื่องวิเคราะห์ห้องค์ประกอบก๊าซชีวภาพ

### 3.2.2 ศึกษาสมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับเชิงพาณิชย์ที่มีผลต่อการดูดซับ

วัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับ Molecular sieve และ Activated Carbon ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ โดยการหาพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ Molecular sieve และ Activated Carbon ด้วยเครื่องวัด Automatic Surface Analyzer รุ่น ASAP 2010 ของ Micromeritics เพื่อวัดขนาดรูพรุนของตัวดูดซับโดยวัดความสามารถในการดูดซับก๊าซไนโตรเจนของ Molecular sieve และ Activated Carbon ซึ่งมีลักษณะทั่วไปดังนี้

#### 3.2.2.1 Molecular sieve Zeolite 13X ของบริษัท Sorbead India.

ตารางที่ 3.2 ลักษณะทั่วไปของตัวดูดซับ Molecular sieve Zeolite 13X

ลักษณะทั่วไป	MS 13X
Shape	Sphere
Diameter	2.0-4.0 mm
Size ratio up to grade	96 %
Bulk density	>0.6 g/ml
Wear ratio	< 0.2 %
Crushing Strength	>40 N
Static H <sub>2</sub> O Adsorption	>25 %
CO <sub>2</sub> Adsorption	>14 NL/g
Packed moisture Content	<15 %



### 3.2.2.2 ถ่านดูดซับ Activated Carbon ของบริษัท ซีไอแกนติกคาร์บอน จำกัด

ตารางที่ 3.3 ลักษณะทั่วไปของถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการวิจัย

คุณสมบัติ	CGC-11	CGC-11A	CGC-12
ค่าการดูดซับไอโอดีน (มิลลิกรัม/กรัม)	1040.3	1086.2	1190.5
ความชื้น (%)	2.5	3.8	3.0
เถ้า (%)	2.6	2.0	2.4
ค่าความเป็นกรด-ด่าง	10.2	10.3	10.3
ค่าความแข็ง (%)	99.5	99.6	98.3
ความหนาแน่นเชิงปริมาตร(กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)	0.48	0.46	0.45
การกระจายตัวของขนาด (%)			
+4 mesh	4.2	2.7	2.9
4-8mesh	91.1	93.7	94.8
-8 mesh	4.7	3.6	3.3

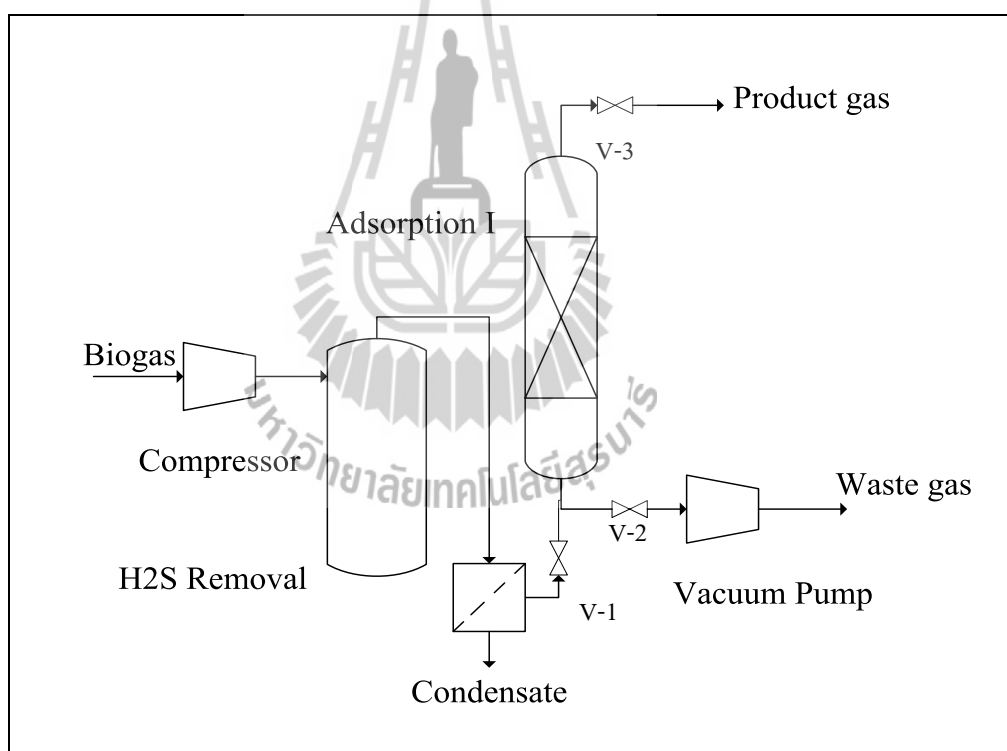


รูปที่ 3.8 เครื่อง Accelerated Surface Area and Porosimetry



### 3.2.3 การทดสอบระบบแบบเบดนิ่ง

วัตถุประสงค์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการดูดซับของตัวดูดซับแต่ละชนิดต่อการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยระบบทดสอบการดูดซับแบบเบดนิ่งดังรูปที่ 3.9 อาทิเช่น ความดัน อุณหภูมิ และปริมาณตัวดูดซับ โดยใช้เครื่องต้นแบบที่พัฒนาขึ้น ภายในห้องดูดซับบรรจุตัวดูดซับต่างๆในปริมาณที่แตกต่างกันในแต่ละการทดลองคือ 200, 300, 450 กรัม ตามลำดับ และควบคุมอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพที่ไหลเข้าหน่วยดูดซับอยู่ที่ 25 ลิตรต่อนาที ทำการทดสอบที่อุณหภูมิดูดซับ 2 ระดับคือ 4 และ 10 องศาเซลเซียส โดยทำการเปลี่ยนแปลงระดับความดันที่ 2, 3, 4, 5, 6 และ 7 บาร์ วิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่ผ่านการดูดซับอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งความเข้มข้นของสารถูกดูดซับที่ผ่านหน่วยดูดซับมีค่าใกล้เคียงกับค่าเริ่มต้นที่ไหลเข้าหน่วยดูดซับนั้น



รูปที่ 3.9 ระบบทดสอบความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ



รูปที่ 3.10 เครื่องชั่งไฟฟ้าละเอียด 2 ตำแหน่ง

### 3.2.3.1 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองแบบเบคนิง

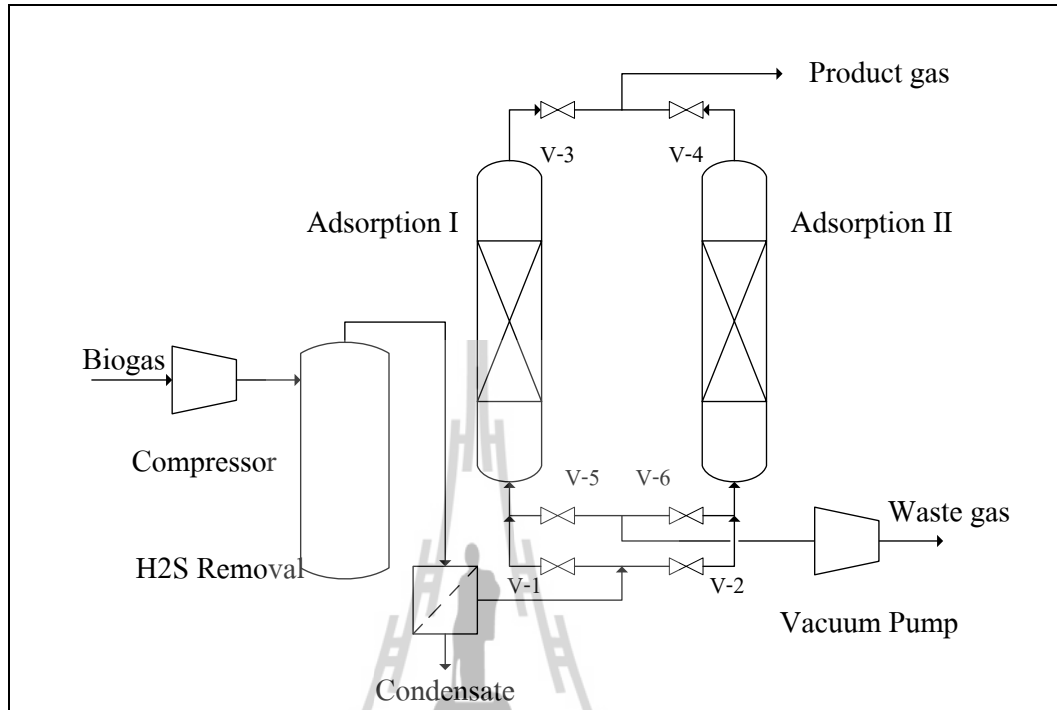
ตารางที่ 3.4 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองคุณสมบัติของการดูดซับ

ตัวแปร	การทดลองแบบเบคนิง	กระบวนการสลับความดัน
ตัวแปรอิสระ	-อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง -ชนิดของตัวดูดซับ -ปริมาณตัวดูดซับ	-ชนิดของตัวดูดซับ
ตัวแปรควบคุม	-องค์ประกอบเริ่มต้นของก๊าซชีวภาพ -อัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ -ความดันในการดูดซับ	-องค์ประกอบเริ่มต้นของก๊าซชีวภาพ -อัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ -ความดันในการดูดซับ -อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง -ปริมาณตัวดูดซับ
ตัวแปรตาม	-ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากก๊าซชีวภาพ	-ปริมาตรที่จุดเบรคทูร

ตารางที่ 3.5 แผนการทดสอบระบบแบบเบดนิ่งเพื่อศึกษาสภาวะการดูดซับของตัวดูดซับ

ปริมาณการไหล (L/min)	อุณหภูมิ (°C)	ปริมาณตัวดูดซับ (g)	ความดัน (bar)
25	4	200	2
			4
			5
			6
			7
		300	2
			4
			5
			6
			7
		450	2
			4
			5
			6
			7
	10	200	2
			4
			5
			6
			7
		300	2
4			
5			
6			
7			
450	2		
	4		
	5		
	6		
	7		

### 3.2.4 การทดลองระบบดูดซับสลับความดัน (Pressure Swing Adsorption)



รูปที่ 3.11 ระบบทดสอบการดูดซับสลับความดัน

วัตถุประสงค์เพื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพเครื่องปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพด้วยระบบดูดซับสลับความดันที่พัฒนาขึ้น ทำการทดสอบโดยควบคุมสภาวะต่าง ๆ ของระบบ เช่น ความดัน อุณหภูมิ และอัตราการไหลของก๊าซผสมที่ไหลเข้าหน่วยดูดซับให้สอดคล้องกับสภาวะที่ดีที่สุดตามการทดสอบระบบแบบเบดนิ่ง วิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่ผ่านการดูดซับอย่างต่อเนื่อง บันทึกความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ไหลผ่านหน่วยดูดซับแต่ละหน่วยเพื่อหาประสิทธิภาพและวัฏจักรการดูดซับของระบบปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพที่พัฒนาขึ้น



รูปที่ 3.12 ชุดอุปกรณ์ทดสอบสลับความดัน

### 3.2.5 การทดสอบหาสมรรถนะของเครื่องยนต์

วัตถุประสงค์เพื่อทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ขนาดเล็ก เมื่อใช้ก๊าซมีเทนชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมัน Gasoline 91 โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ISO15550-2002: Internal Combustion Engine Determination and Method for the Measurement of Engine Power (ISBGS, 2002) ซึ่งเป็นมาตรฐานการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ทั่วไปที่ใช้กับเครื่องยนต์สันดาปภายในเกือบทุกชนิด ทำการทดสอบโดยใช้น้ำมันเบนซินกับเครื่องยนต์ขนาดเล็ก Honda GX 240 8HP ขนาด 270 cc ดังรูปที่ 3.13 เพื่อใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการอ้างอิง และเปรียบเทียบผลกับการทดสอบเครื่องยนต์รุ่นเดียวกันแต่ใช้ก๊าซมีเทนชีวภาพเป็นเชื้อเพลิง ทั้งนี้สมรรถนะเครื่องยนต์ ได้แก่ กำลัง แรงบิด รอบ และอัตราการใช้เชื้อเพลิง เป็นต้น โดยตัวแปรที่ใช้ในการทดลองแสดงไว้ในตารางที่ 3.6 ทำการทดสอบโดย

ก. อุ่นเครื่องยนต์โดยเดินเบาที่ 1,000 รอบต่อนาที หมุน loading valve บน Dynamometer ทวนเข็มนาฬิกาเพื่อปลดภาระ (แรงบิด) ที่อยู่ใน dynamometer ให้หมดไปหรือเหลือน้อยที่สุดแล้วให้คงสภาวะนั้นไว้จนอุณหภูมิเครื่องยนต์ขึ้นไปถึง 70 องศาเซลเซียส

ข. ปรับรอบความเร็วของเครื่องยนต์ไปที่ 3,600 รอบต่อนาที

ค. เพิ่มภาระให้กับเครื่องยนต์โดยค่อย ๆ หมุน loading valve บน dynamometer ตามเข็มนาฬิกาจนกระทั่งรอบเครื่องยนต์ลดลงครึ่งละ 50 รอบต่อนาที ในทุก ๆ ครั้งที่รอบลดลง 50

รอบต่อนาทีเมื่อเพิ่มแรงบิดให้บันทึกข้อมูลแรงบิด (engine break torque) กำลังเบรค (engine break power) การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (fuel consumption) จนกระทั่งรอบเครื่องยนต์ลดลงเหลือ 2,000 รอบต่อนาที จึงยุติการทดสอบ



รูปที่ 3.13 ชุดอุปกรณ์ทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์

ตารางที่ 3.6 ตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์เมื่อใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิง

ตัวแปร	เครื่องยนต์เบนซิน
ตัวแปรอิสระ	-ความเร็วรอบของเครื่องยนต์
ตัวแปรควบคุม	-ความเข้มข้นของก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพ
ตัวแปรตาม	-กำลังของเครื่องยนต์ -ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ -อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง

### 3.2.6 การศึกษาด้านทุนทางเศรษฐศาสตร์ของการปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพ

มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาด้านทุนในการปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพสำหรับใช้ในการประเมินความเป็นไปได้ในการนำก๊าซชีวภาพมาทดแทนก๊าซธรรมชาติสำหรับยานพาหนะในเชิงพาณิชย์ต่อไป

## บทที่ 4

### ผลการศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูล

#### 4.1 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพก่อนการปรับปรุงคุณภาพ

ก๊าซชีวภาพเกิดจากการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุด้วยจุลินทรีย์ชนิดไร้อากาศ ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นก๊าซผสมที่มีองค์ประกอบของ ก๊าซมีเทน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซอื่น ๆ ซึ่งรวมไปถึง ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ อันมีผลทำให้อายุการใช้งานของตัวดูดซับที่ใช้ลดลงได้ จึงต้องมีการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในเบื้องต้นก่อนนำก๊าซชีวภาพมาใช้งานวิจัยดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่ใช้ในงานวิจัย (%Volume)

ก๊าซ	องค์ประกอบเริ่มต้น	ก๊าซที่ใช้ในงานวิจัย*
มีเทน	68-70%	68-70 %
คาร์บอนไดออกไซด์	30-32%	30-32%
ออกซิเจน	<0.2	<0.2
ไนโตรเจน	<0.2	<0.2
ไฮโดรเจนซัลไฟด์	≥ 2000 ppm	< 23 ppm

หมายเหตุ : \* เป็นก๊าซที่ผ่านการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เพียงอย่างเดียว

เมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพจากตารางที่ 4.1 กับลักษณะและคุณภาพของก๊าซธรรมชาติสำหรับยานยนต์ตามประกาศกรมธุรกิจพลังงาน พบว่าก๊าซชีวภาพที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีอัตราส่วนของก๊าซมีเทนมากกว่าร้อยละ 65 และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์น้อยกว่า 23 ppm ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด มีเพียงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่านั้นที่มีค่าสูงกว่าที่กำหนดคือสูงกว่าร้อยละ 18 เป็นผลให้ค่าดัชนีวอบบีต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดด้วย

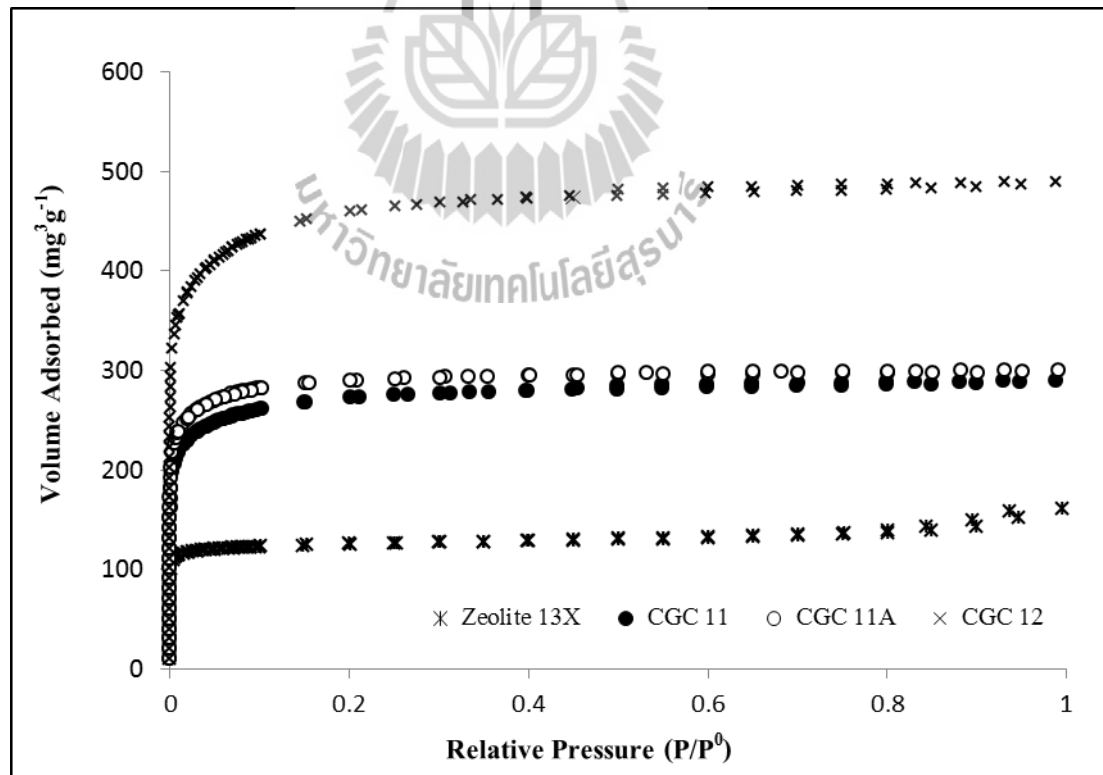
#### 4.2 ลักษณะทางกายภาพของตัวดูดซับเชิงพาณิชย์

ลักษณะทางกายภาพของตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ เช่น พื้นที่ผิวจำเพาะ หรือขนาดรูพรุนเฉลี่ยของตัวดูดซับมีผลต่อประสิทธิภาพของระบบดูดซับ ดังนั้นเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการดูดซับที่ดีจึงต้องเลือกตัวดูดซับให้เหมาะสมกับลักษณะการใช้งาน

จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวดูดซับ Molecular sieve และ Activated Carbon ด้วยเครื่อง Automatic Surface Analyzer แสดงในตารางที่ 4.2 พบว่า Molecular sieve Zeolite 13X มีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยกว่า Activated Carbon แต่มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยใหญ่กว่าซึ่งจากรูปที่ 4.1 แสดงการดูดซับก๊าซไนโตรเจน ซึ่งจะเห็นได้ว่า Activated Carbon มีความสามารถในการดูดซับก๊าซไนโตรเจนได้ดีกว่า Molecular Sieve Zeolite 13X เนื่องจากโมเลกุลของไนโตรเจนมีขนาดเล็กมาก จึงสามารถดูดซับได้ดีในตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่า

ตารางที่ 4.2 ลักษณะทางกายภาพของตัวดูดซับ Molecular Sieve และ Activated Carbon

ชนิดของตัวดูดซับ	พื้นที่ผิวจำเพาะ, ( $\text{m}^2\text{g}^{-1}$ )	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย, (nm)
Zeolite 13X	414	2.4
Activated carbon CGC 11	892	2.0
Activated carbon CGC 11A	956	1.94
Activated carbon CGC 12	1490	2.03



รูปที่ 4.1 การดูดซับก๊าซไนโตรเจนของตัวดูดซับเชิงพาณิชย์

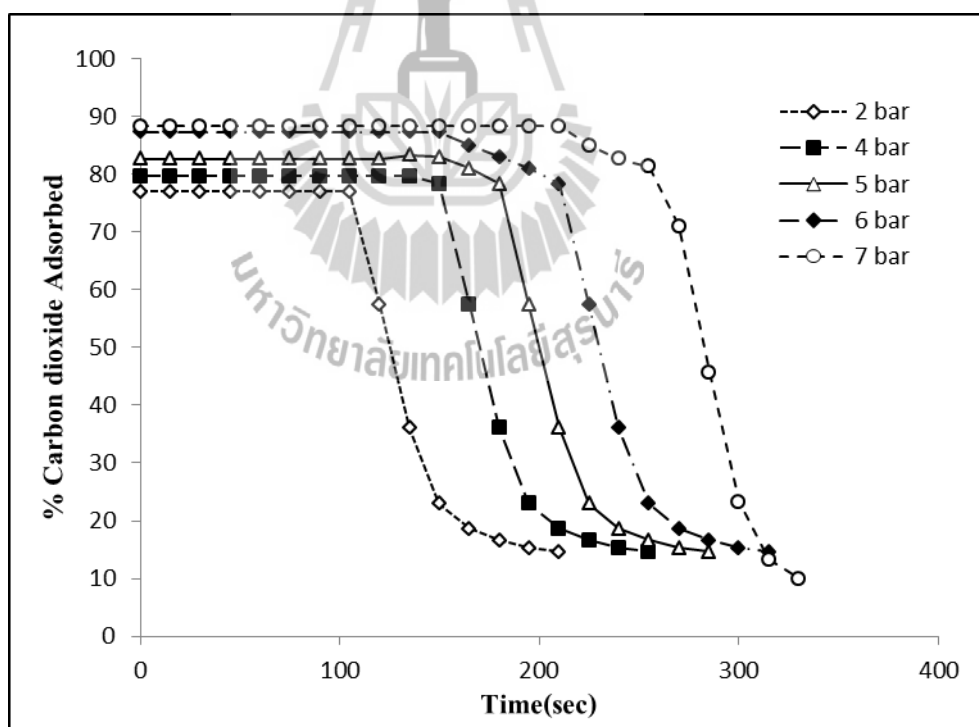


### 4.3 ความสามารถของตัวดูดซับในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แบบเบตหนึ่ง

ความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับสภาวะของระบบที่เหมาะสม เช่น ความดัน อุณหภูมิ และปริมาณตัวดูดซับ เป็นต้น

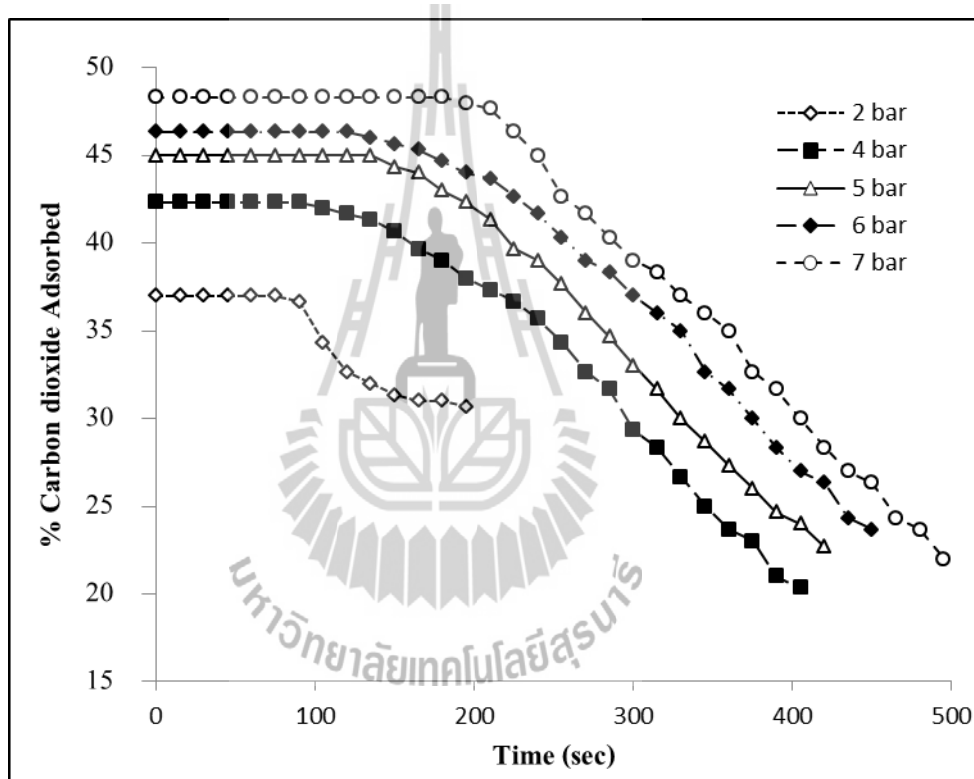
#### 4.3.1 ผลของความดันต่อประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ

เมื่อศึกษาความดันที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ Molecular sieve Zeolite 13X โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับ 300 กรัม อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของก๊าซผสม 25 ลิตรต่อนาที ดังรูปที่ 4.2 พบว่า Molecular sieve Zeolite 13X สามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ร้อยละ 77 ที่ความดัน 2 บาร์ และเมื่อความดันของระบบมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 4, 5, 6 และ 7 บาร์ การดูดซับของตัวดูดซับจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 80, 82, 87 และ 89 ตามลำดับ อีกทั้งระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุลจะเพิ่มขึ้นด้วย แสดงให้เห็นว่าอัตราการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ Molecular sieve Zeolite 13X แปรผันตรงกับความดัน



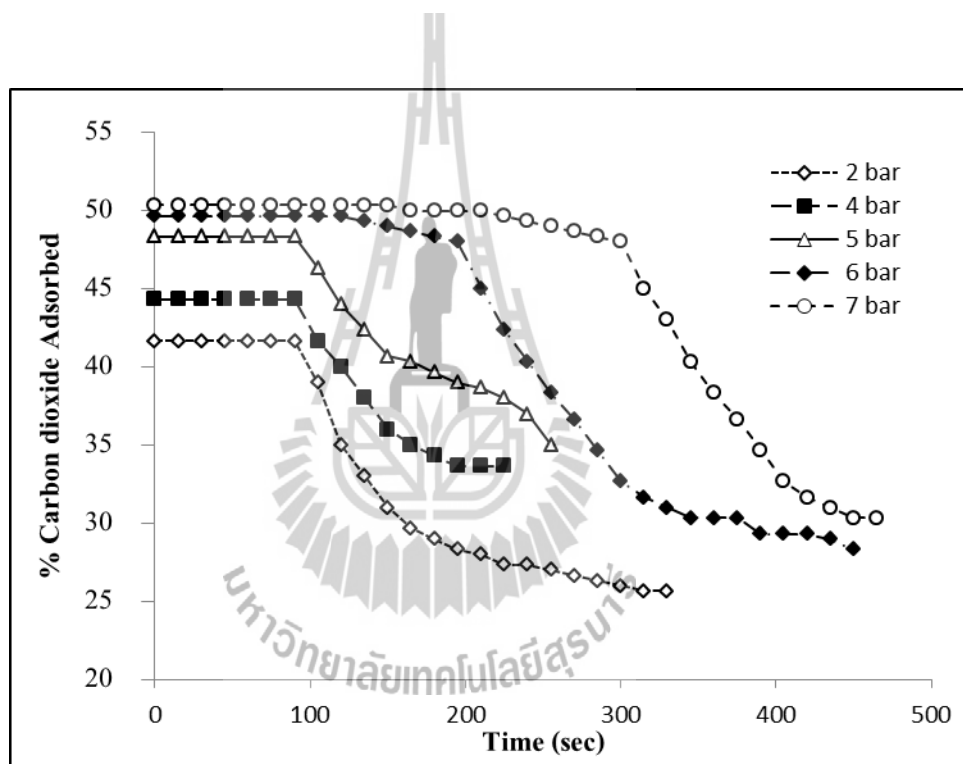
รูปที่ 4.2 ร้อยละของการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย Molecular sieve Zeolite 13X ที่ความดัน 2-7 บาร์

เมื่อศึกษาความดันที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของ ถ่านดูดซับ Activated Carbon CGC 11 โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับ 450 กรัม อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของก๊าซผสม 25 ลิตรต่อนาที ดังรูปที่ 4.3 พบว่า Activated Carbon CGC 11 สามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ร้อยละ 37 ที่ความดัน 2 บาร์ และเมื่อความดันของระบบ มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 4, 5, 6 และ 7 บาร์ การดูดซับของตัวดูดซับจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 43, 45, 46 และ 48 ตามลำดับ อีกทั้งระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุลจะเพิ่มขึ้นด้วยซึ่งแสดงให้เห็นว่าอัตราการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของ Activated Carbon CGC 11 แปรผันตรงกับความดัน



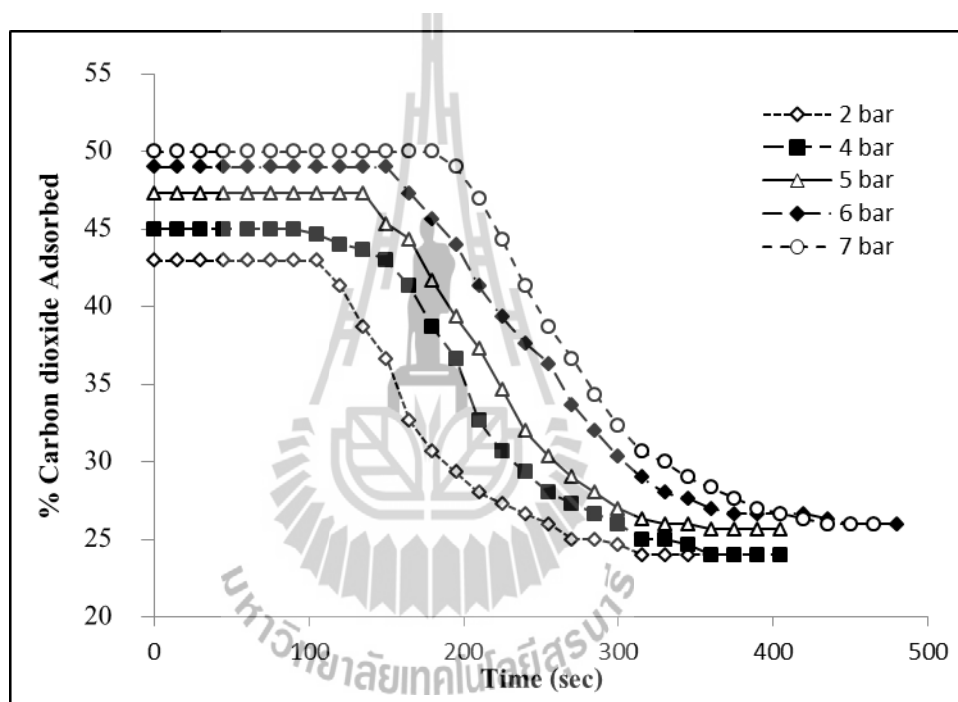
รูปที่ 4.3 ร้อยละของการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย Activated Carbon CGC 11 ที่ความดัน 2-7 บาร์

เมื่อศึกษาความดันที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของ ถ่านดูดซับ Activated Carbon CGC 11A โดยใช้ปริมาณถ่านดูดซับ 450 กรัม อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของก๊าซผสม 25 ลิตรต่อนาที ดังรูปที่ 4.4 พบว่า Activated Carbon CGC 11A สามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถึงร้อยละ 42 ที่ความดัน 2 บาร์ และเมื่อความดันของระบบมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 4, 5, 6 และ 7 บาร์ การดูดซับของตัวดูดซับจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 44.5, 48, 49.5 และ 51 ตามลำดับ อีกทั้งระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุลจะเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอัตราการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของ Activated Carbon CGC 11A แปรผันตรงกับ ความดัน



รูปที่ 4.4 ร้อยละของการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย Activated Carbon CGC 11A ที่ความดัน 2-7 บาร์

เมื่อศึกษาความดันที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของถ่านดูดซับ Activated Carbon CGC 12 โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับ 450 กรัม อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของก๊าซผสม 25 ลิตรต่อนาที ดังรูปที่ 4.5 พบว่า Activated Carbon CGC 12 สามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถึงร้อยละ 43.5 ที่ความดัน 2 บาร์ และเมื่อความดันของระบบมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 4, 5, 6 และ 7 บาร์ การดูดซับของตัวดูดซับจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 45, 47, 48.5 และ 50 ตามลำดับ อีกทั้งระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุลจะเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอัตราการดูดซับก๊าซคาร์บอนได ออกไซด์ของ Activated Carbon CGC 12 แปรผันตรงกับความดัน



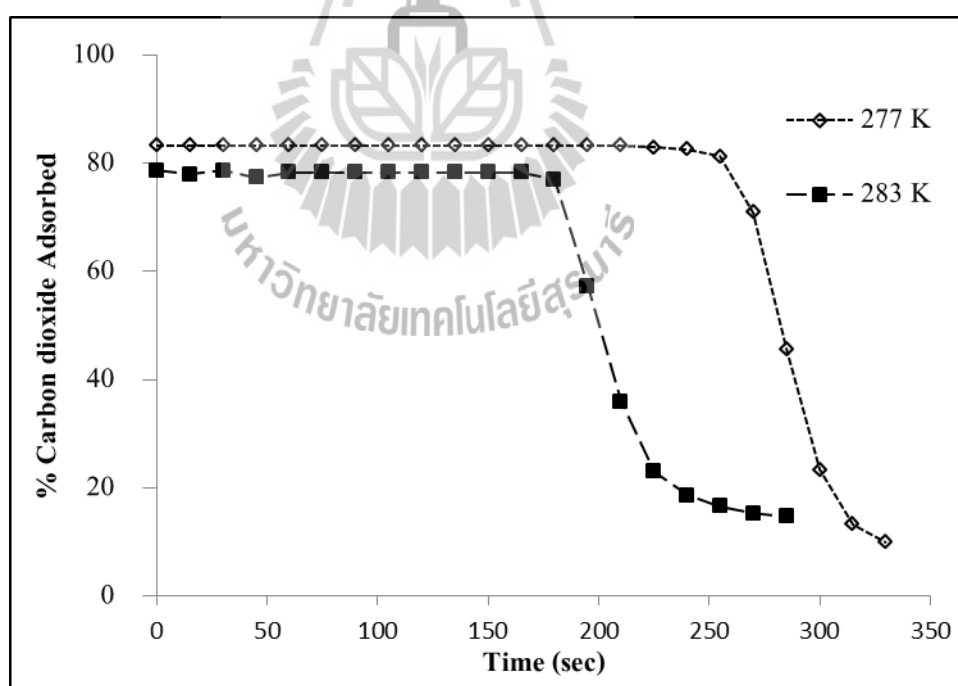
รูปที่ 4.5 ร้อยละของการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย Activated Carbon CGC 12 ที่ความดัน 2-7 บาร์

จากการทดลองผลของความดันต่อประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทำให้เห็นว่าเมื่อก๊าซชีวภาพไหลผ่านตัวดูดซับในเบดนิ่ง ตัวดูดซับจะดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไว้ภายใน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จึงเริ่มสะสมทั้งในเม็ดตัวดูดซับและช่องว่างระหว่างเม็ดตัวดูดซับ เขตของการสะสมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แพร่ออกในทางเดียวกับการไหลจนกระทั่งเขตของการสะสมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในตัวดูดซับแพร่ไปทั่วทั้งหอดูดซับ เมื่อก๊าซชีวภาพเคลื่อนที่ผ่านชั้นเม็ดตัวดูดซับ ก๊าซชีวภาพที่ผ่านการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

แล้วจะไหลออกจากหอดูดซับจนกระทั่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สะสมเกือบทั่วบริเวณหอดูดซับ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จึงเริ่มเคลื่อนออกจากหอดูดซับ และเมื่อเพิ่มความดันให้กับระบบดูดซับ จะทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของระบบจะสูงขึ้นด้วย เนื่องจากการเพิ่มความดันให้กับระบบจะทำให้ความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นด้วย

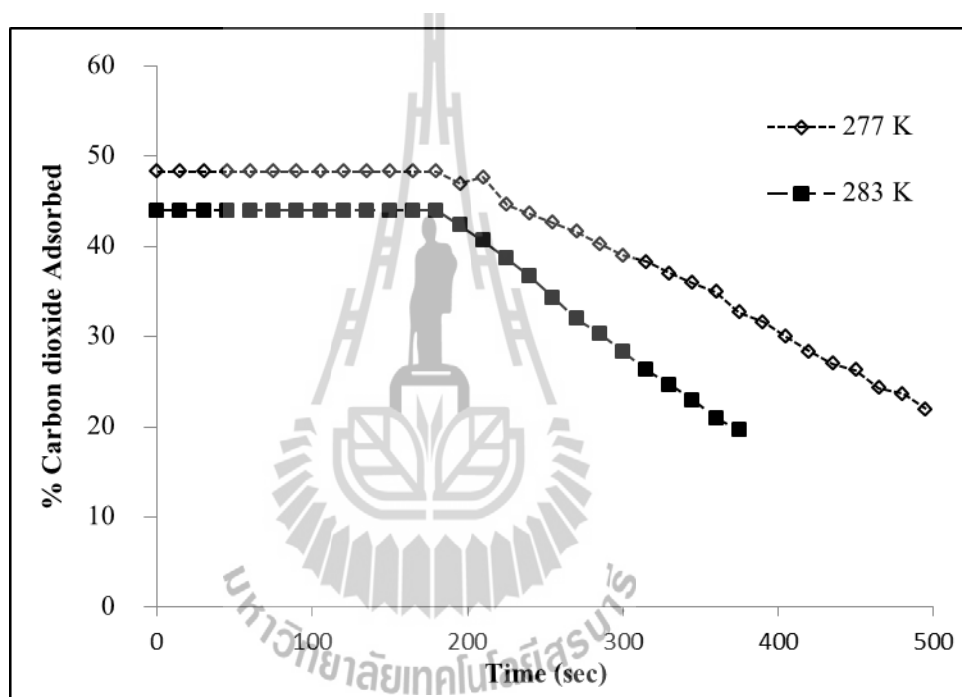
#### 4.3.2 ผลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ของตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ

จากการศึกษาอุณหภูมิที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับ Molecular sieve Zeolite 13X โดยควบคุมระบบที่ความดัน 7 บาร์ และอัตราการไหล 25 ลิตรต่อนาที ผลการทดลองดังรูปที่ 4.6 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปจะทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับของระบบเปลี่ยนแปลงไปด้วย คือเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นระบบจะมีประสิทธิภาพในการดูดซับลดลงดังนี้ ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส สามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ร้อยละ 83 แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 10 องศาเซลเซียส การดูดซับจะลดลงเหลือเพียงร้อยละ 79 แสดงให้เห็นว่าการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย Molecular sieve Zeolite 13X เป็นกระบวนการคายความร้อน



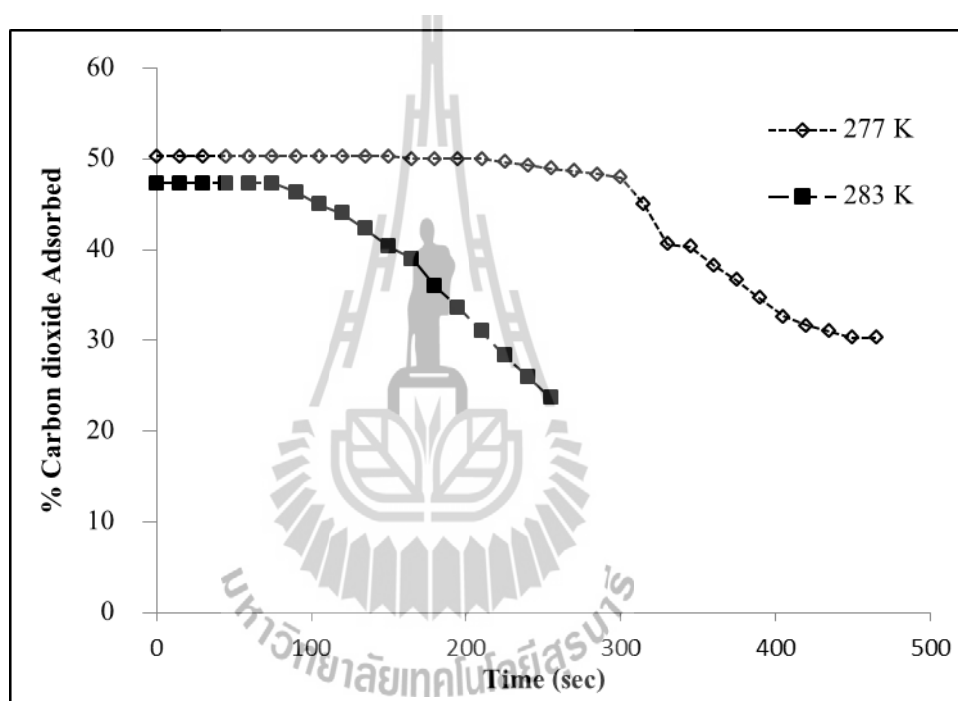
รูปที่ 4.6 ร้อยละของการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย Molecular sieve Zeolite 13X ที่อุณหภูมิต่างกัน

จากการศึกษาอุณหภูมิที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยถ่านดูดซับ Activated Carbon CGC 11 โดยควบคุมระบบที่ความดัน 7 บาร์ และอัตราการไหล 25 ลิตรต่อนาที ผลการทดลองดังรูปที่ 4.7 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปจะทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับของระบบเปลี่ยนแปลงไปด้วย คือเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นระบบจะมีประสิทธิภาพในการดูดซับลดลงดังนี้ ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส สามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ร้อยละ 48 แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 10 องศาเซลเซียส การดูดซับจะลดเหลือเพียงร้อยละ 44 แสดงให้เห็นว่าการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย Activated Carbon CGC 11 เป็นกระบวนการคายความร้อน



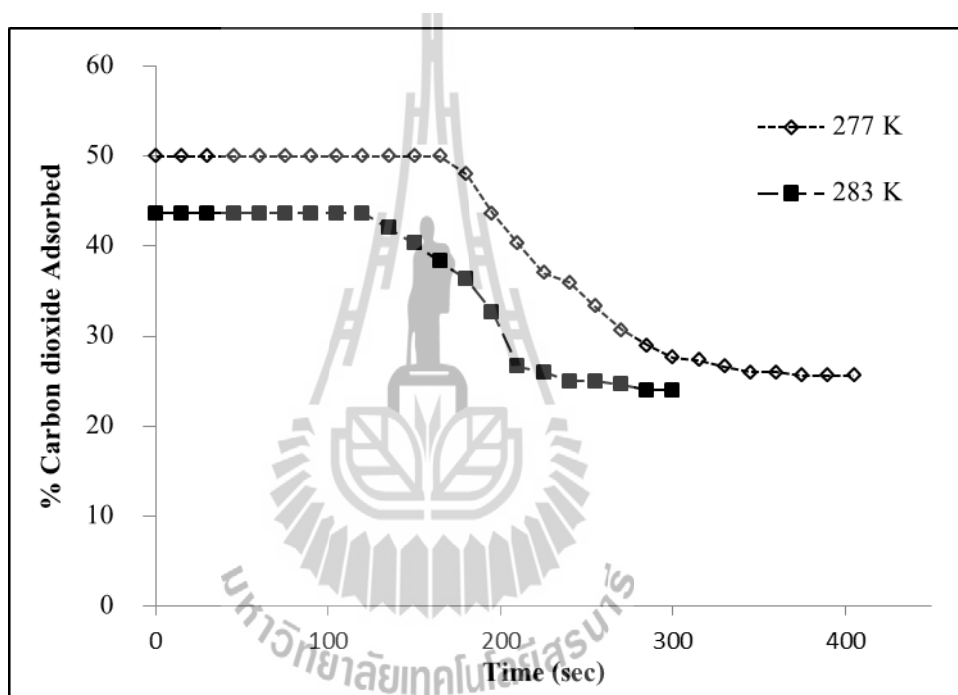
รูปที่ 4.7 ร้อยละของการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย Activated Carbon CGC 11 ที่อุณหภูมิต่างกัน

จากการศึกษาอุณหภูมิที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยถ่านดูดซับ Activated Carbon CGC 11A โดยควบคุมระบบที่ความดัน 7 บาร์ และอัตราการไหล 25 ลิตรต่อนาที ผลการทดลองดังรูปที่ 4.8 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปจะทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับของระบบเปลี่ยนแปลงไปด้วย คือเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นระบบจะมีประสิทธิภาพในการดูดซับลดลงดังนี้ ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส สามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ร้อยละ 51 แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 10 องศาเซลเซียส การดูดซับจะลดเหลือเพียงร้อยละ 47 แสดงให้เห็นว่าการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย Activated Carbon CGC 11A เป็นกระบวนการคายความร้อน



รูปที่ 4.8 ร้อยละของการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย Activated Carbon CGC 11A ที่อุณหภูมิต่างกัน

จากการศึกษาอุณหภูมิที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยถ่านดูดซับ Activated Carbon CGC 12 โดยควบคุมระบบที่ความดัน 7 บาร์ และอัตราการไหล 25 ลิตรต่อนาที ผลการทดลองดังรูปที่ 4.9 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปจะทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับของระบบเปลี่ยนแปลงไปด้วย คือเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นระบบจะมีประสิทธิภาพในการดูดซับลดลงดังนี้ ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส สามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ร้อยละ 50 แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 10 องศาเซลเซียส การดูดซับจะลดเหลือเพียงร้อยละ 44 แสดงให้เห็นว่าการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย Activated Carbon CGC 12 เป็นกระบวนการคายความร้อน



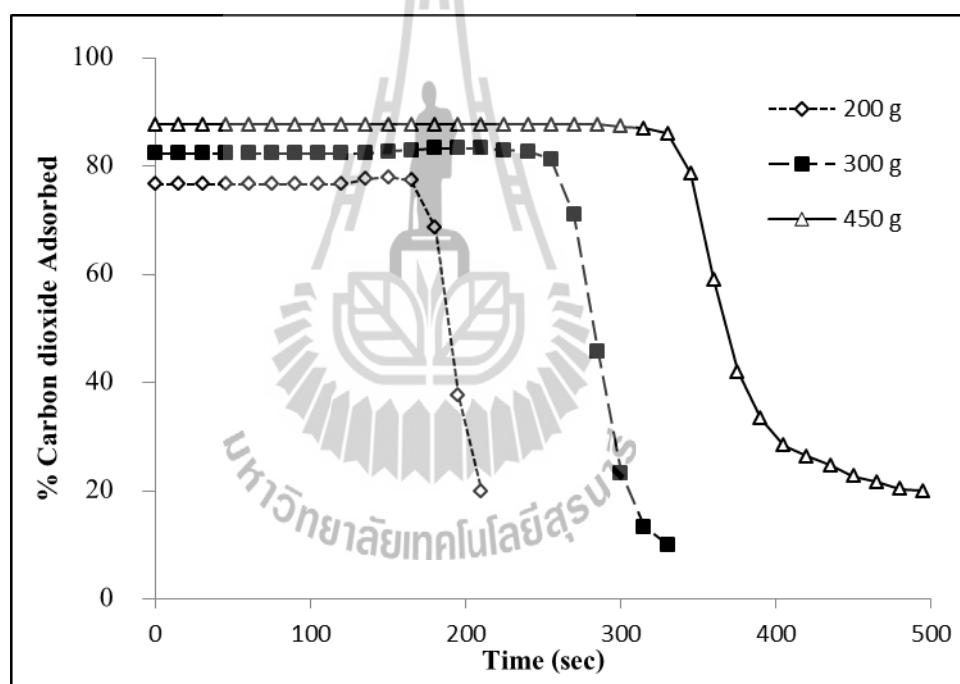
รูปที่ 4.9 ร้อยละของการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย Activated Carbon CGC 12 ที่อุณหภูมิต่างกัน

การดูดซับเป็นปรากฏการคายความร้อน โดยความร้อนของกระบวนการดูดซับมักมีค่าน้อยกว่าความร้อนของปฏิกิริยามาก ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นดังกล่าวนี้สามารถดึงออกได้โดยง่าย (เดชา นัทรศิริเวช, 2552)



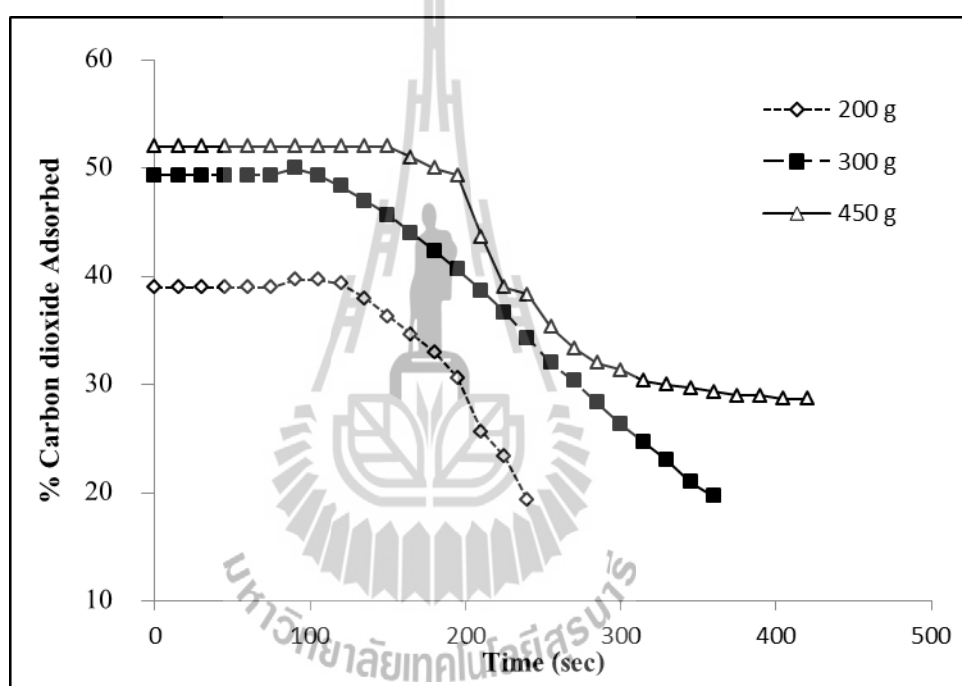
### 4.3.3 ผลของปริมาณตัวดูดซับต่อประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ

จากการศึกษาปริมาณของตัวดูดซับ Molecular sieve Zeolite 13X ต่อประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยควบคุมระบบที่ความดัน 7 บาร์ อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส และอัตราการไหล 25 ลิตรต่อนาที ผลการทดลองดังรูปที่ 4.10 พบว่าปริมาณตัวดูดซับมีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับของระบบ คือเมื่อปริมาณตัวดูดซับเพิ่มขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับของระบบเพิ่มขึ้นดังนี้ เมื่อบรรจุตัวดูดซับปริมาณ 200 กรัม ลงในหอดูดซับจะสามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ร้อยละ 76 แต่เมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับเป็น 300 และ 450 กรัม การดูดซับจะเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 82 และ 88 ตามลำดับ



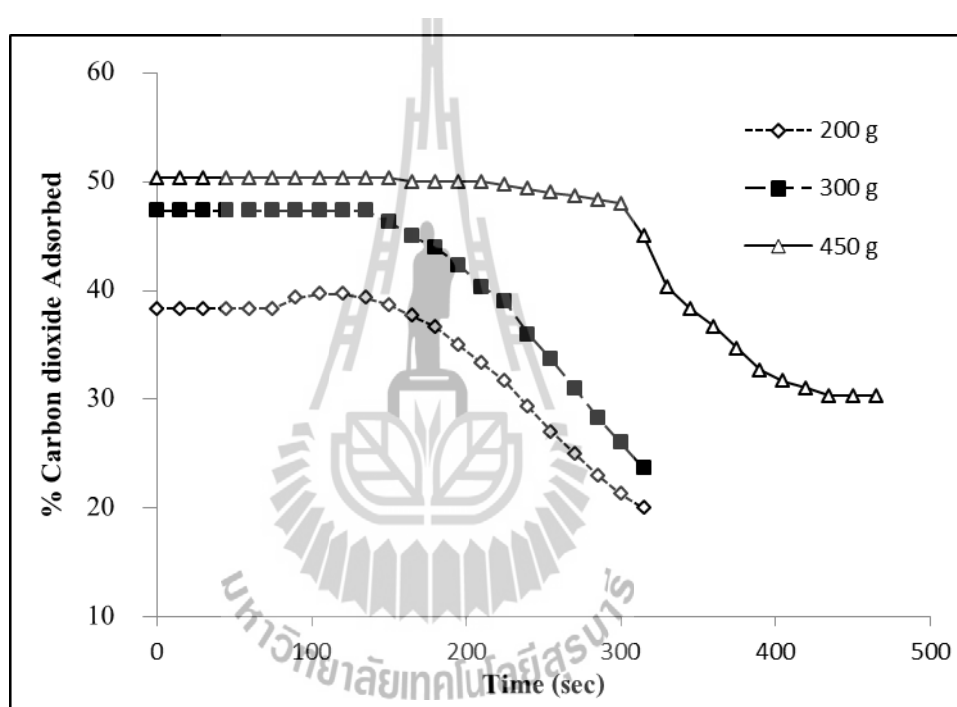
รูปที่ 4.10 ร้อยละของการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับ Molecular sieve Zeolite 13X ที่ปริมาณตัวดูดซับแตกต่างกัน

จากการศึกษาปริมาณของถ่านดูดซับ Activated Carbon CGC 11 ต่อประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยควบคุมระบบที่ความดัน 7 บาร์ อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส และอัตราการไหล 25 ลิตรต่อนาที ผลการทดลองดังรูปที่ 4.11 พบว่าปริมาณถ่านดูดซับมีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับของระบบ คือเมื่อปริมาณถ่านดูดซับเพิ่มขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับของระบบเพิ่มขึ้นดังนี้ เมื่อบรรจุถ่านดูดซับปริมาณ 200 กรัม ลงในหอดูดซับจะสามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ร้อยละ 39 แต่เมื่อเพิ่มปริมาณถ่านดูดซับเป็น 300 และ 450 กรัม การดูดซับจะเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 49 และ 52 ตามลำดับ



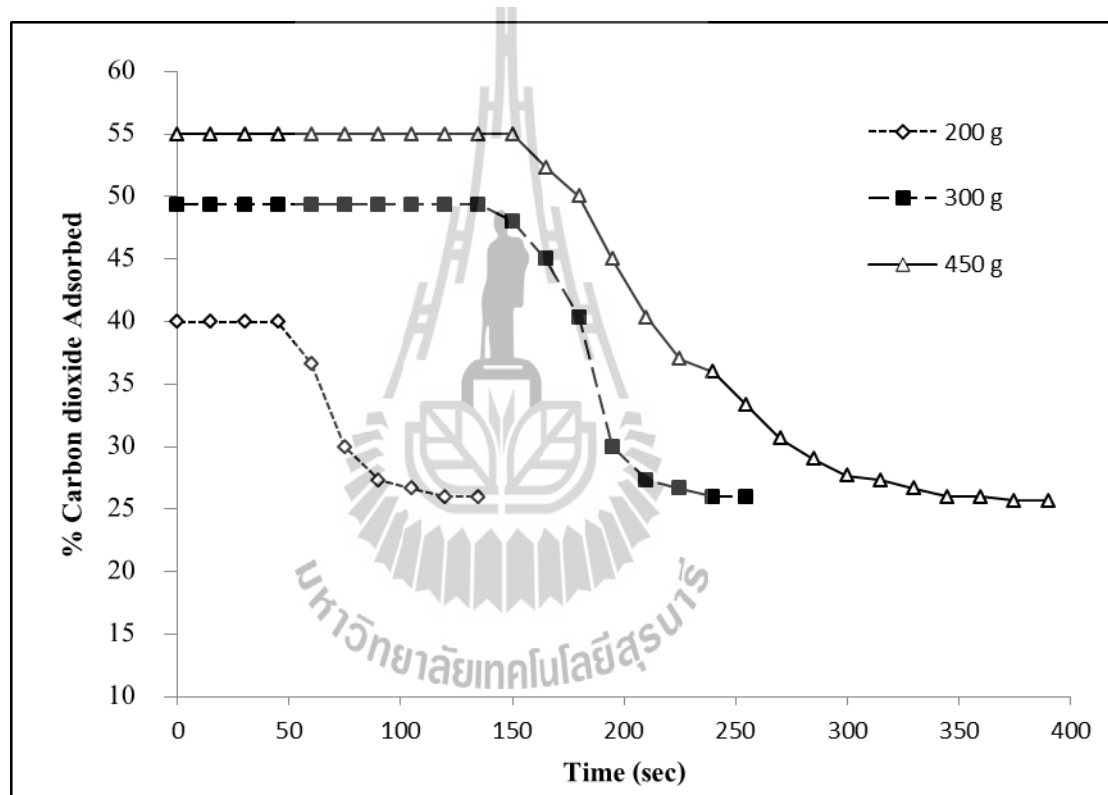
รูปที่ 4.11 ร้อยละของการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยถ่านดูดซับ Activated Carbon CGC 11 ที่ปริมาณตัวดูดซับแตกต่างกัน

การศึกษาปริมาณของถ่านดูดซับ Activated Carbon CGC 11A ต่อประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยควบคุมระบบที่ความดัน 7 บาร์ อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส และอัตราการไหล 25 ลิตรต่อนาที ผลการทดลองดังรูปที่ 4.12 พบว่าปริมาณถ่านดูดซับมีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับของระบบ คือเมื่อปริมาณถ่านดูดซับเพิ่มขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับของระบบเพิ่มขึ้นดังนี้ เมื่อบรรจุถ่านดูดซับปริมาณ 200 กรัม ลงในหอดูดซับจะสามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ร้อยละ 38 แต่เมื่อเพิ่มปริมาณถ่านดูดซับเป็น 300 และ 450 กรัม การดูดซับจะเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 48 และ 50 ตามลำดับ



รูปที่ 4.12 ร้อยละของการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยถ่านดูดซับ Activated Carbon CGC 11A ที่ปริมาณตัวดูดซับ แตกต่างกัน

จากการศึกษาปริมาณของถ่านดูดซับ Activated Carbon CGC 12 ต่อประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยควบคุมระบบที่ความดัน 7 บาร์ อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส และอัตราการไหล 25 ลิตรต่อนาที ผลการทดลองดังรูปที่ 4.13 พบว่าปริมาณถ่านดูดซับมีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับของระบบ คือเมื่อปริมาณถ่านดูดซับเพิ่มขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับของระบบเพิ่มขึ้นดังนี้ เมื่อบรรจุถ่านดูดซับปริมาณ 200 กรัม ลงในหอดูดซับจะสามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ร้อยละ 40 แต่เมื่อเพิ่มปริมาณถ่านดูดซับเป็น 300 และ 450 กรัม การดูดซับจะเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 50 และ 55 ตามลำดับ



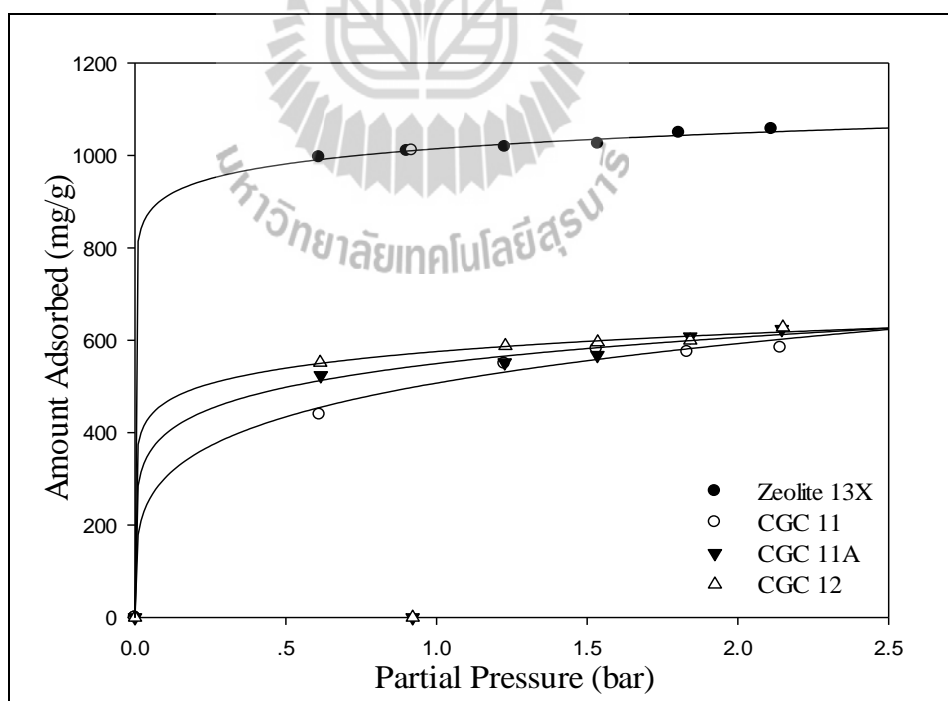
รูปที่ 4.13 ร้อยละของการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยถ่านดูดซับ Activated Carbon CGC 12 ที่ปริมาณตัวดูดซับแตกต่างกัน

ความสามารถในการดูดซับขึ้นอยู่กับชนิดของตัวดูดซับ ซึ่งตัวดูดซับที่ดีจะต้องมีพื้นที่ผิวจำเพาะมาก ๆ ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับจะทำให้ความสามารถในการดูดซับดีขึ้น เนื่องจากการเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะของการดูดซับให้มากขึ้นด้วย

จากการศึกษาความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ แบบเบดนิ่ง โดยทำการศึกษาผลของความดัน อุณหภูมิ และปริมาณตัวดูดซับ ที่เปลี่ยนแปลงไปกับความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เจือปนอยู่ในก๊าซชีวภาพ พบว่าการดูดซับจะเกิดได้ดีในช่วงแรก หลังจากนั้นเมื่อตัวดูดซับเริ่มเข้าสู่สมดุลความสามารถในการดูดซับจะเริ่มลดลงจนกระทั่งไม่สามารถดูดซับได้อีก

#### 4.3.4 ไอโซเทอมของการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ

จากรูป 4.14 ไอโซเทอมของการดูดซับอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่สมดุลกับจำนวนของตัวดูดซับที่มีการดูดซับ ที่อุณหภูมิคงที่ 4 องศาเซลเซียส ความดัน 7 บาร์ ไอโซเทอมของการดูดซับเป็นสมการที่มีประโยชน์สำหรับวิเคราะห์การดูดซับ สมการฟรุนดลิชมีสมมติฐานของการดูดซับที่ว่าพื้นผิวของตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด (พื้นผิวของตัวดูดซับมีลักษณะขรุขระ) พื้นที่ผิวและพลังงานมีการกระจายตัวเป็นแบบเลขชี้กำลังเมื่อค่าคงที่ของฟรุนดลิชแสดงถึงความสามารถในการดูดซับ และ  $n$  หมายถึงค่าคงที่ของฟรุนดลิชที่อธิบายถึงความเข้มข้นของการดูดซับ ดังนั้นจากตารางที่ 4.6 ค่าคงที่ของฟรุนดลิชสามารถบอกได้ว่าตัวดูดซับ Zeolite 13X มีประสิทธิภาพในการดูดซับก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์สูงกว่าถ่านดูดซับทั้งสามชนิด



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซผสมกับ ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ

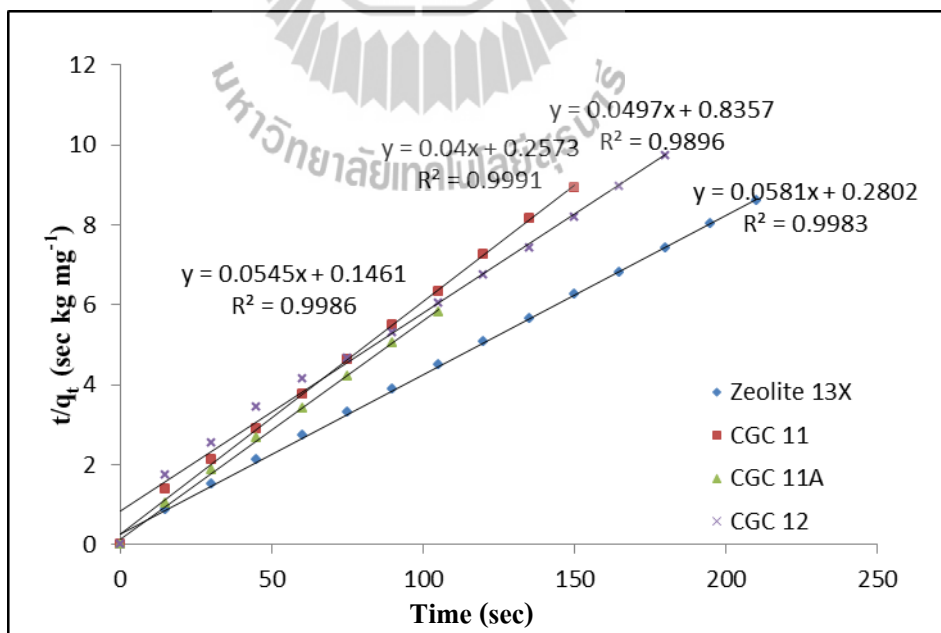
ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับต่าง ๆ สามารถคำนวณได้จาก Freundlich Adsorption Isotherm ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ

ชนิดของตัวดูดซับ	ค่าคงที่ของฟรอนด์ลิช	ค่าดัชนีชี้กำลัง	R <sup>2</sup>
Zeolite 13X	1014.55	0.0475	0.9997
CGC 11	507.405	0.2251	0.9944
CGC 11A	549.703	0.1419	0.9973
CGC 12	575.678	0.0928	0.9993

#### 4.3.5 จลนพลศาสตร์การดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ

จากการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ โดยใช้สมการ Pseudo-First Order และ Pseudo-Second Order พบว่ากระบวนการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับที่ใช้ศึกษามีลักษณะการดูดซับแบบ Pseudo-Second Order ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $t/q_t$  ( $\text{sec kg mg}^{-1}$ ) กับ Time (sec) เมื่อการดูดซับเป็น Pseudo-Second Order

จลนพลศาสตร์การดูดซับใช้ในการอธิบายอัตราเร็วของการดูดซับซึ่งประกอบด้วย การแพร่ที่ฟิล์มภายนอก การดูดซับ และการแพร่ภายในรูพรุน ความถูกต้องของผลการทดลอง ตรวจสอบได้จากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของ Pseudo-Second Order

ชนิดของตัวดูดซับ	$R^2$	$k_2$ (kg sec <sup>-1</sup> mg <sup>-1</sup> )
Zeolite 13X	0.9983	0.0120
CGC 11	0.9991	0.0400
CGC 11A	0.9986	0.0203
CGC 12	0.9896	0.0030

#### 4.4 ความสามารถของตัวดูดซับในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของระบบดูดซับสลับความดัน

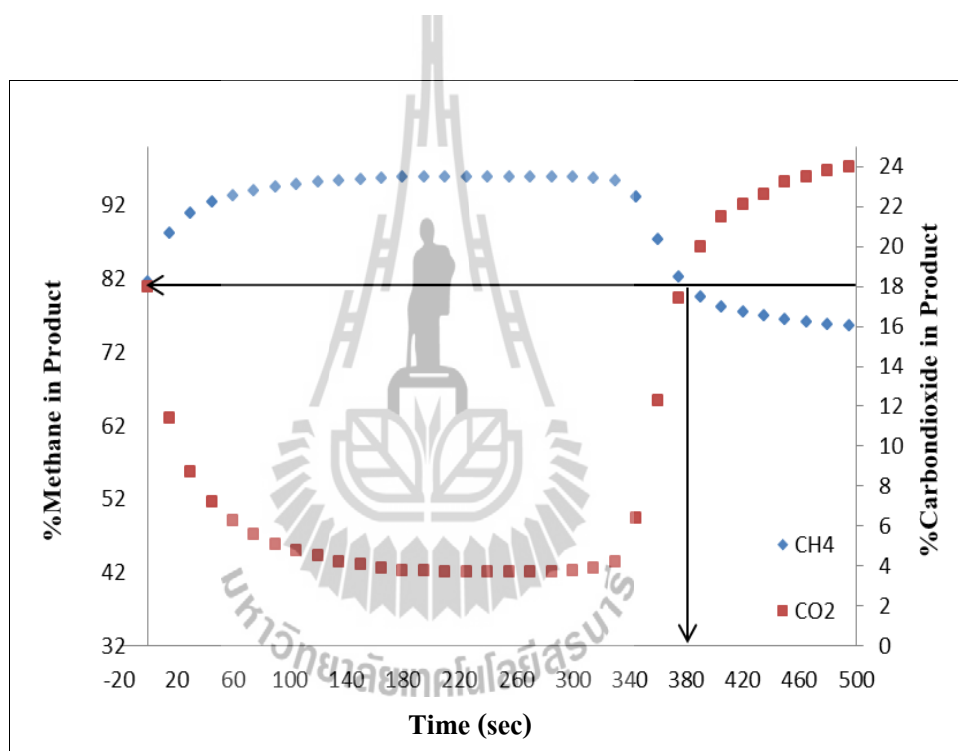
จากการศึกษาความสามารถของตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ ในการทดลองแบบเบดนิ่งซึ่งได้ศึกษา ก่อนหน้านี้ทำให้ทราบว่าตัวดูดซับชนิด Molecular sieve Zeolite 13X มีความสามารถในการดูดซับ ก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์สูงกว่าถ่านดูดซับมาก อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับระหว่างถ่านดูดซับด้วยกันแล้ว จะเห็นได้ว่า Activated carbon CGC 12 มีความสามารถในการดูดซับสูงที่สุดจึงเลือก Molecular sieve zeolite 13 X และ Activated carbon CGC 12 ในการทดสอบประสิทธิภาพของระบบปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการดูดซับสลับความดันที่พัฒนาขึ้นต่อไป

##### 4.4.1 ตัวแปรควบคุมต่าง ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ

###### ของกระบวนการดูดซับสลับความดัน

กระบวนการดูดซับสลับความดันเป็นกระบวนการที่อาศัยหลักการที่สารถูกดูดซับ ซึ่งในที่นี้หมายถึงก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์จะถูกดูดซับได้ดีที่ความดันสูง แต่จะคายซับได้ดีที่ความดันต่ำ ๆ ซึ่งจากการศึกษาความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับต่าง ๆ ที่ผ่านมาพบว่าเมื่อระบบมีอุณหภูมิต่ำ และมีความดันสูงความสามารถในการดูดซับจะดีขึ้น ดังนั้นในการทดลองต่อไปจึงควบคุมระบบที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส และความดันระบบ 7 บาร์ ที่อัตราการไหล 25 ลิตรต่ออนาที ทำการทดลองโดยใช้ระบบปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพที่พัฒนาขึ้น

เมื่อศึกษาผลของตัวแปรควบคุมต่าง ๆ ที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับในระบบหอดูดซับสลับความดัน โดยใช้ Molecular sieve Zeolite 13X เป็นตัวดูดซับดังรูปที่ 4.16 ที่สภาวะการทดลองระบบอุณหภูมิตั้งที่ 4 องศาเซลเซียส ความดันระบบ 7 บาร์ อัตราการไหล 25 ลิตรต่อนาที ปริมาณตัวดูดซับ 450 กรัม ระดับความสูงของตัวดูดซับในหอดูดซับ 27 เซนติเมตร ที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้นร้อยละ 30-32 กำหนดให้ห้วงที่ประกอบของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่จุดเบรคทรมีค่าเท่ากับร้อยละ 18 ตามลักษณะและคุณภาพของก๊าซธรรมชาติสำหรับยานยนต์ตามประกาศกรมธุรกิจพลังงาน พบว่าเวลาที่จุดเบรคทรมีค่าเท่ากับ 380 วินาที ซึ่งหลังจากจุดนี้ไปความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ

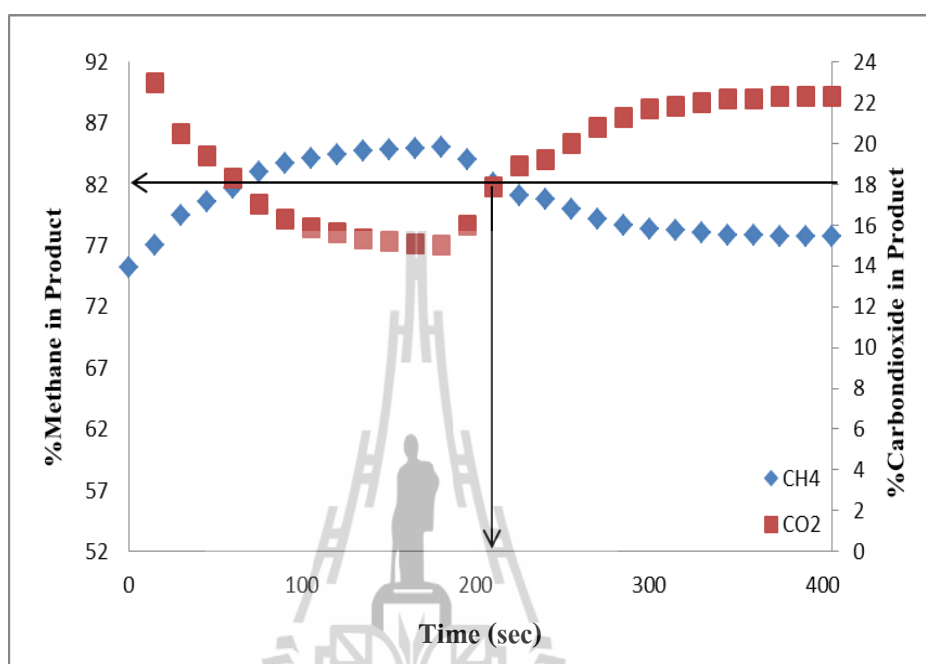


รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละขององค์ประกอบในก๊าซผลิตภัณฑ์กับเวลาในการดูดซับด้วยตัวดูดซับ Molecular sieve Zeolite 13X

เมื่อศึกษาผลของตัวแปรควบคุมที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับในระบบหอดูดซับสลับความดัน โดยใช้ถ่านดูดซับ Activated Carbon CGC 12 เป็นตัวดูดซับดังรูปที่ 4.17 ที่สภาวะการทดลองระบบอุณหภูมิตั้งที่ 4 องศาเซลเซียส ความดันระบบ 7 บาร์ ที่อัตราการไหล 25 ลิตรต่อนาที ปริมาณตัวดูดซับ 450 กรัม ระดับความสูงของถ่านดูดซับในหอดูดซับเท่ากับ 35 เซนติเมตร ที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้นร้อยละ 30-32 เมื่อกำหนดให้ห้วงที่ประกอบของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์



ที่จุดเบรคทรมีค่าเท่ากับร้อยละ 18 ตามลักษณะและคุณภาพของก๊าซธรรมชาติสำหรับยานยนต์ตามประกาศกรมธุรกิจพลังงาน พบว่าเวลาที่จุดเบรคทรมีค่าเท่ากับ 210 วินาที ซึ่งหลังจากจุดนี้ไปความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ



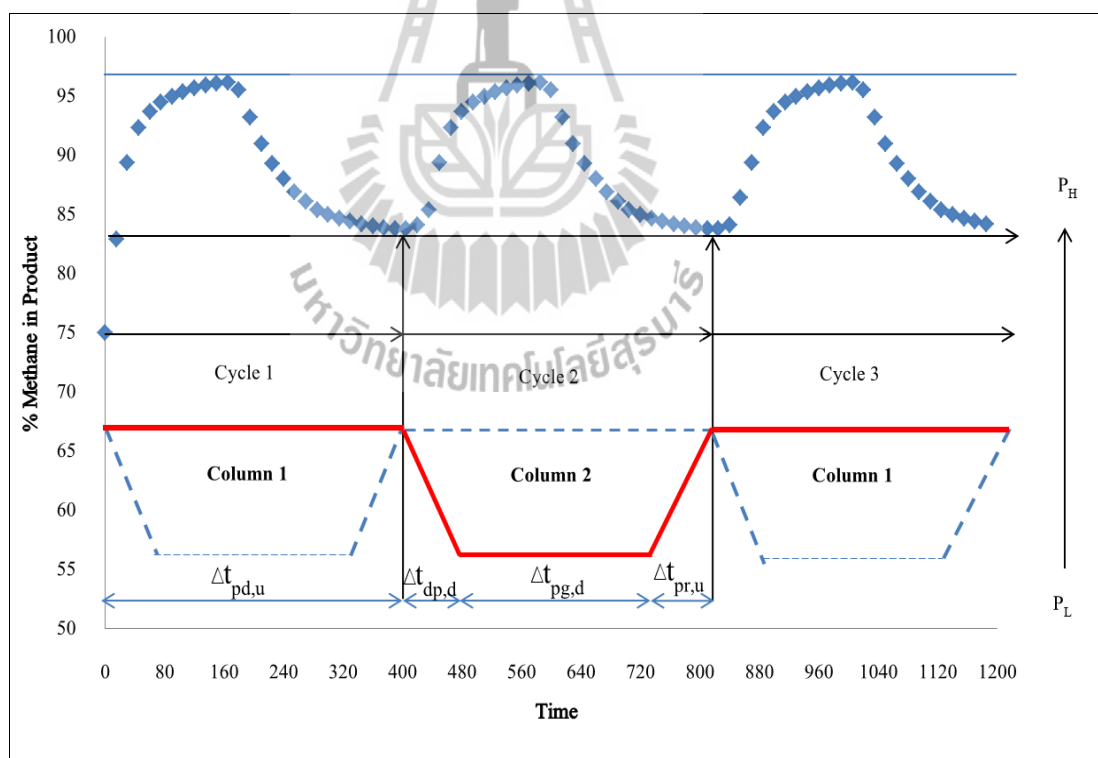
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละขององค์ประกอบในผลิตภัณฑ์กับเวลาในการดูดซับด้วยถ่านดูดซับ Activated Carbon CGC 12

จากการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับของกระบวนการดูดซับสลับความดันโดยใช้ตัวดูดซับ Molecular sieve Zeolite 13X และ Activated Carbon CGC 12 ทำการทดลองระบบที่ความดัน 7 บาร์ อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวดูดซับ 450 กรัม และอัตราการไหล 25 ลิตรต่อนาที พบว่าเมื่อกำหนดองค์ประกอบของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่จุดเบรคทรมีค่าเท่ากับร้อยละ 18 ตามลักษณะและคุณภาพก๊าซธรรมชาติที่ใช้ในยานพาหนะของกรมธุรกิจพลังงานปี 2552 ตัวดูดซับ Molecular sieve Zeolite 13X จะมีจุดเบรคทรมีค่าอยู่ที่ 380 วินาที ซึ่งคิดเป็นอัตราการดูดซับ 0.35 ลิตรต่อกรัมตัวดูดซับ คิดเป็นค่าการดูดซับ 0.471 บาทต่อลิตร เมื่อราคาของตัวดูดซับ Molecular sieve Zeolite 13X เท่ากับ 165 บาทต่อกิโลกรัม\* และถ่านดูดซับจะมีเบรคทรมีค่าอยู่ที่ 210 วินาที ซึ่งคิดเป็นอัตราการดูดซับ 0.19 ลิตรต่อกรัมตัวดูดซับ คิดเป็นค่าการดูดซับ 0.395 บาทต่อลิตร เมื่อราคาของถ่านดูดซับ Activated Carbon CGC12 เท่ากับ 75 บาทต่อกิโลกรัม ซึ่งค่าการดูด

ชั้นดังกล่าวคิดเมื่อตัวดูดซับต่าง ๆ ที่ใช้ไม่สามารถนำกลับมาใช้ได้ใหม่ (หมายเหตุ \* ราคา ณ วันที่ 1 พฤศจิกายน 2554)

#### 4.4.2 ประสิทธิภาพของชุดอุปกรณ์ดูดซับสลับความดัน

จากการทดสอบประสิทธิภาพระบบปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพด้วยวิธีการดูดซับสลับความดันของตัวดูดซับ Molecular sieve Zeolite 13 และ Activated Carbon CGC 12 ทำการทดลองที่ความดัน 7 บาร์ อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส และอัตราการไหล 25 ลิตรต่อนาที โดยใช้เครื่องจักรการดูดซับ 400 วินาที สำหรับ Molecular sieve Zeolite 13X และเครื่องจักรการดูดซับ 250 วินาที สำหรับ Activated Carbon CGC 12 พบว่าระบบที่ใช้ Molecular sieve Zeolite 13X สามารถเพิ่มสัดส่วนของก๊าซมีเทนได้ถึงร้อยละ 82-96 ส่วนถ่านดูดซับ Activated Carbon CGC 12 สามารถเพิ่มสัดส่วนของก๊าซมีเทนได้ถึงร้อยละ 82-85 วัฏจักรการดูดซับของกระบวนการปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพด้วยการดูดซับสลับความดันสามารถดูได้ดังรูป 4.18 ตัวอย่างกระบวนการดูดซับสลับความดันของตัวดูดซับสลับความดัน



รูปที่ 4.18 ตัวอย่างขั้นตอนต่าง ๆ ในกระบวนการสลับความดันของตัวดูดซับ

Molecular sieve Zeolite 13X

ตารางที่ 4.5 กระบวนการปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพด้วยวิธีการดูดซับสลับความดัน

ตัวดูดซับ คาบ	Molecular sieve Zeolite 13X		Activated Carbon CGC 12	
	เวลา (sec)	ความดัน (bar)	เวลา (sec)	ความดัน (bar)
คาบดูดซับ $\Delta t_{pd,u}$	400	7	250	7
คาบปรับลดความดัน $\Delta t_{dp,d}$	51	7 $\rightarrow$ -1	27	7 $\rightarrow$ -1
คาบย่อยไล่ก๊าซ $\Delta t_{pg,d}$	370	-1	213	-1
คาบเพิ่มความดัน $\Delta t_{pr,u}$	210	-1 $\rightarrow$ 7	120	-1 $\rightarrow$ 7
องค์ประกอบก๊าซผสม (%)	4-18 CO <sub>2</sub>	82-96 CH <sub>4</sub>	15-18 CO <sub>2</sub>	82-85 CH <sub>4</sub>

จากการทดสอบประสิทธิภาพของกระบวนการปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพด้วยวิธีการดูดซับสลับความดันที่พัฒนาขึ้น พบว่ากระบวนการดังกล่าวสามารถเพิ่มสัดส่วนของก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพหลังการปรับปรุงได้ด้วยการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นผลให้ค่าความร้อนรวมถึงดัชนีวอบบีสูงขึ้นดังตารางที่ 4.6 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะและคุณภาพของก๊าซธรรมชาติสำหรับยานยนต์ตามประกาศกรมธุรกิจพลังงานแล้วพบว่ามีความสมบัติใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบเครื่องปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพ (Pressure Swing Adsorption)

	หน่วย	ก่อนปรับปรุง	Zeolite 13X	CGC 12
ก๊าซมีเทน	%	68-70	82-96	82-85
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	%	30-32	4-18	15-18
ค่าความร้อน	MJ/m <sup>3</sup>	24.34-25.06	29.35-34.37	29.35-30.43
ดัชนีวอบบี*	MJ/m <sup>3</sup>	26.15-27.24	34.37-44.63	34.37-36.36

หมายเหตุ : \* มีส่วนสำคัญต่อปริมาณพลังงานที่จ่ายเข้าระบบเผาไหม้ที่ผ่านหัวฉีด

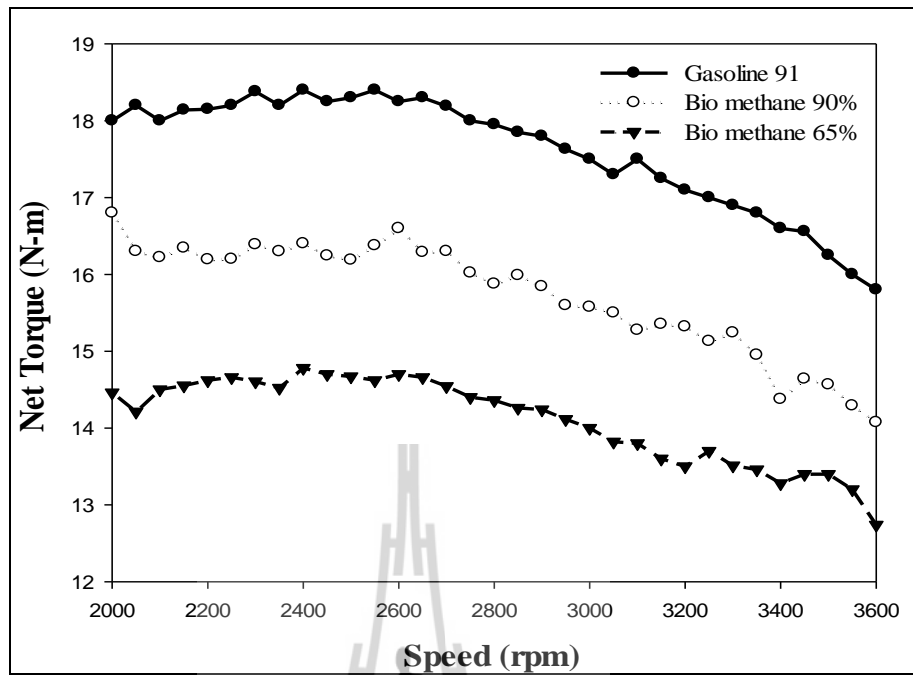
#### 4.5 ผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงก๊าซมีเทนชีวภาพ

ผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์นี้เป็นค่าที่แสดงถึงสมรรถนะของเครื่องยนต์ 3 ค่าหลัก ๆ ได้แก่ ค่ากำลังของเครื่องยนต์ (Engine power) ค่าแรงบิดของเครื่องยนต์ (Engine torque) และอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงจำเพาะ (Specific fuel consumption) โดยการเปรียบเทียบระหว่างค่าสมรรถนะต่าง ๆ ของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงต่างชนิดกันดังตารางที่ 4.7

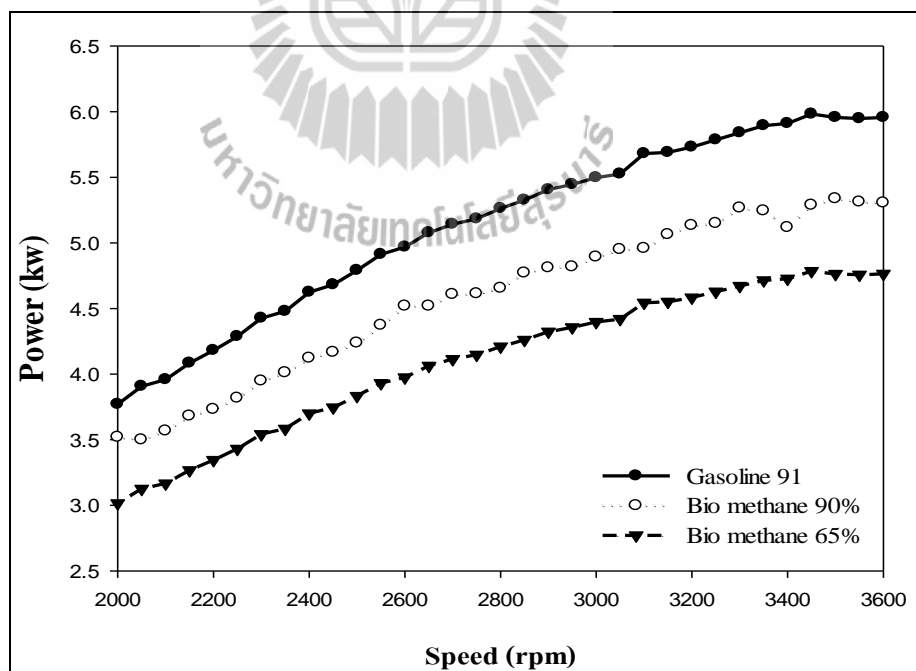
ตารางที่ 4.7 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์

เชื้อเพลิง	ค่าความร้อน	ดัชนีวอบบี (MJ/m <sup>3</sup> )
Gasoline 91	35.00 (MJ/L)	-
ก๊าซมีเทนชีวภาพ 90%	32.22 (MJ/m <sup>3</sup> )	39.91
ก๊าซมีเทนชีวภาพ 65%	23.27 (MJ/m <sup>3</sup> )	24.59

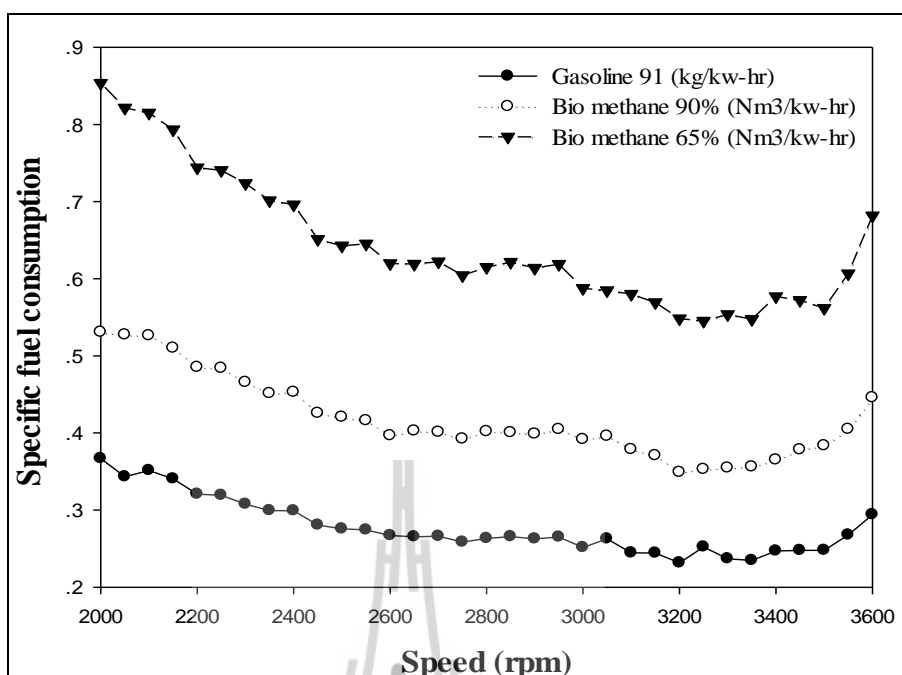
จากการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ Honda GX 240 ตามมาตรฐาน ISO 15550-2002 โดยใช้เชื้อเพลิง 3 ชนิดเปรียบเทียบกัน พบว่าค่าแรงบิดสุทธิสูงสุดของเครื่องยนต์จะอยู่ในช่วงความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาที ดังรูปที่ 4.19 สำหรับเครื่องยนต์ Honda GX 240 นี้ เมื่อใช้ก๊าซมีเทนชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงจะทำให้สมรรถนะของเครื่องยนต์ลดลงเกือบร้อยละ 20 เมื่อเทียบกับการใช้น้ำมัน Gasoline 91 ซึ่งให้ค่าแรงบิดสุทธิของเครื่องยนต์สูงสุดที่ลดลงมาคือ ก๊าซมีเทนชีวภาพ 90% และก๊าซมีเทนชีวภาพ 65% ตามลำดับ โดยมีค่าแรงบิดสุทธิสูงสุดที่ 18.3 N-m 16.4 N-m และ 14.5 N-m ตามลำดับ ซึ่งค่าแรงบิดสุทธิสูงสุดดังรูปที่ 4.20 นี้จะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับค่ากำลังของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ สำหรับอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงจำเพาะ (SFC) แสดงไว้ดังรูปที่ 4.21 เมื่อเปรียบเทียบก๊าซมีเทนชีวภาพก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพโดยใช้ก๊าซมีเทนชีวภาพ 65% เป็นเชื้อเพลิงจะให้ค่า SFC คือ 0.65 Nm<sup>3</sup>/kW-hr โดยคิดค่าเฉลี่ยในช่วงที่รอบเครื่องยนต์ Honda GX 240 ใช้งานจริง (2000–3600 รอบต่อนาที) ในขณะที่ก๊าซมีเทนชีวภาพ 90% มีค่า SFC เฉลี่ยต่ำกว่าคือ 0.42 Nm<sup>3</sup>/kW-hr



รูปที่ 4.19 สมรรถนะของเครื่องยนต์ (Net Torque (N.m) VS Engine Speed (rpm))



รูปที่ 4.20 สมรรถนะของเครื่องยนต์ (Net Power (kw) VS Engine Speed (rpm))



รูปที่ 4.21 อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงจำเพาะ (Specific fuel consumption)

จากผลการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ยี่ห้อ Honda GX240 โดยใช้เชื้อเพลิง 3 ชนิดคือน้ำมัน Gasoline 91 ก๊าซมีเทนชีวภาพ 65% และก๊าซมีเทนชีวภาพ 90% ในภาพรวมพบว่าก๊าซมีเทนชีวภาพมีศักยภาพในการทดแทนน้ำมัน Gasoline 91 ได้ แต่จะทำให้สมรรถนะของเครื่องยนต์ต่ำกว่าน้ำมัน Gasoline 91 ซึ่งในการทดสอบนี้ไม่ว่าจะเป็น ค่ากำลังสูงสุด ค่าแรงบิด และอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงจำเพาะ แสดงให้เห็นว่าก๊าซมีเทนชีวภาพสามารถนำมาใช้ทดแทนน้ำมัน Gasoline 91 สำหรับยานพาหนะได้แต่จะส่งผลให้สมรรถนะของเครื่องยนต์ลดต่ำกว่าร้อยละ 20

#### 4.6 การศึกษาต้นทุนทางด้านเศรษฐศาสตร์ในการปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพ

การใช้ประโยชน์จากก๊าซชีวภาพที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ (Bio methane) แล้วนั้นจะต้องทำการศึกษาด้านทุนทางเศรษฐศาสตร์เพื่อนำไปสู่การประเมินถึงความเป็นไปได้ และความเหมาะสมในการดำเนินการในภาพรวม โดยงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาด้านทุนทางเศรษฐศาสตร์โดยประเมินจากคุณภาพ และปริมาณในการปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพจากเครื่องปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพที่พัฒนาขึ้นในระดับห้องปฏิบัติการซึ่งมีอัตราปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพ 25 ลิตรต่อนาที่ และสามารถเพิ่มสัดส่วนของก๊าซมีเทนได้ร้อยละ 90 โดยเปรียบเทียบระหว่างตัวดูดซับ Molecular sieve Zeolite 13X และ Activated carbon CGC 12

ตารางที่ 4.8 การคำนวณต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์จากการผลิตไบโอมิเทน

รายการ	รายการคำนวณ	
ประสิทธิภาพ เครื่องปรับปรุง คุณภาพ ก๊าซชีวภาพ	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เครื่องปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพสามารถผลิตไบโอมิเทนได้ 25 ลิตรต่อนาที (<math>\text{CH}_4 = 90\%</math>)</li> <li>- ใช้แก๊สชีวภาพในการผลิตทั้งหมด 34.615 ลิตรต่อนาที (<math>32^\circ\text{C}</math>)</li> <li>- <math>\text{CH}_4</math> ในแก๊สชีวภาพ 90% เทียบความร้อนได้ <math>32.22 \text{ MJ/NM}^3</math></li> <li>- Wobbe Index ในแก๊สชีวภาพ 90% มีค่าเท่ากับ 39.92</li> </ul>	
ค่าไฟที่ใช้ใน การผลิตไบโอมิเทนต่อเดือน	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ไบโอมิเทนที่ผลิตได้ = 36 ลบ.ม. ต่อวัน หรือ 1,080 ลบ.ม.ต่อเดือน</li> <li>- กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตไบโอมิเทนนี้เท่ากับ 0.4 kWh ดังนั้นในหนึ่งเดือนเสียค่าไฟ เท่ากับ <math>0.4 \times 24 \times 30 \times 3.24 = 933.12</math> บาทต่อเดือน</li> <li>- คิดเป็นค่าไฟฟ้าในการผลิตเท่ากับ <math>933.12/1080 = 0.86</math> บาทต่อลบ.ม.</li> </ul>	
ค่าตัวดูดซับที่ใช้ ในการผลิตไบโอมิเทน	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ตัวดูดซับมีอายุการใช้งานนาน 1 ปี</li> <li>- จากประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบจะต้องใช้</li> </ul>	
	Molecular sieve zeolite 13 X	Activated Carbon CGC 12
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ใช้ตัวดูดซับ 450 g</li> <li>- ราคาตัวดูดซับ 165 บาทต่อกิโลกรัม</li> <li>- อายุการใช้งาน 1 ปี</li> <li>- คิดเป็น <math>0.45 \times 165 = 74.25</math> บาทต่อปี</li> <li>- คิดเป็น 0.0057 บาทต่อลบ.ม.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ใช้ตัวดูดซับ 900 g</li> <li>- ราคาตัวดูดซับ 75 บาทต่อกิโลกรัม</li> <li>- อายุการใช้งาน 1 ปี</li> <li>- คิดเป็น <math>0.90 \times 75 = 67.5</math> บาทต่อปี</li> <li>- คิดเป็น 0.0052 บาทต่อลบ.ม.</li> </ul>
ต้นทุนทาง เศรษฐศาสตร์	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ต้นทุนค่าเครื่องปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพ 800,000 บาท</li> <li>- ระยะเวลาคืนทุน 11 ปี</li> <li>- คิดเป็น 6060 บาทต่อเดือน</li> <li>- หรือคิดเป็น 5.6 บาทต่อลบ.ม.</li> <li>- ดังนั้นเมื่อใช้ Molecular sieve Zeolite 13X เป็นตัวดูดซับจะมีต้นทุนเท่ากับ <math>0.86 + 0.0057 + 5.6 = 6.46</math> บาทต่อลบ.ม.</li> <li>- และเมื่อใช้ Activated Carbon CGC 12 เป็นตัวดูดซับจะมีต้นทุนเท่ากับ <math>0.86 + 0.0052 + 5.6 = 6.46</math> บาทต่อลบ.ม.</li> </ul>	

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

การพัฒนากระบวนการปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพสำหรับใช้ในยานพาหนะนี้ มีแนวคิดที่จะศึกษาวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพของก๊าซชีวภาพให้มีศักยภาพ หรือความหลากหลายในการใช้งานมากขึ้น โดยการลดความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยวิธีการดูดซับสลับความดัน (Pressure swing Adsorption) ทำการทดลองโดยเปรียบเทียบระหว่างตัวดูดซับ 2 ชนิดคือ Molecular sieve และ Activated Carbon โดยใช้ความดัน 7 บาร์ และอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส สามารถปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพได้ถึง 25 ลิตรต่อนาที

กระบวนการดูดซับสลับความดันเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญในภาคอุตสาหกรรมโดยอาศัยความแตกต่างของความดัน ซึ่งใช้ความดันสูงในการดูดซับ และความดันต่ำในการคายซับ จากการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการดูดซับสลับความดันโดยใช้ตัวดูดซับ Molecular sieve Zeolite 13X และ Activated Carbon CGC 12 พบว่าเมื่อกำหนดสัดส่วนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตามข้อกำหนดลักษณะก๊าซธรรมชาติที่ใช้ในยานพาหนะของกรมธุรกิจพลังงาน ที่จุดเบรคทรมีค่าสัดส่วนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 18 ตัวดูดซับ Molecular sieve Zeolite 13X จะมีจุดเบรคทรูอยู่ที่ 380 วินาที ซึ่งคิดเป็นอัตราการดูดซับ 0.35 ลิตรต่อกรัมตัวดูดซับ และ Activated Carbon CGC12 จะมีจุดเบรคทรูอยู่ที่ 210 วินาที ซึ่งคิดเป็นอัตราการดูดซับ 0.19 ลิตรต่อกรัมตัวดูดซับ

พิจารณาความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับทั้งสองชนิดพบว่าตัวดูดซับทั้งสองชนิดสามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ แต่ Molecular sieve สามารถดูดซับได้ดีกว่า Activated Carbon ทั้งสามชนิดในทุกสภาวะการดูดซับ ซึ่งจากการทดลองพบว่า Molecular sieve สามารถเพิ่มสัดส่วนก๊าซมีเทนได้ร้อยละ 82-96 และ Activated Carbon สามารถเพิ่มสัดส่วนก๊าซมีเทนได้ร้อยละ 82-85 แม้ว่า Activated Carbon จะมีความสามารถในการดูดซับน้อยกว่า Molecular sieve แต่เนื่องจาก Activated Carbon มีราคาถูกกว่าและสามารถผลิตได้ในประเทศจึงเป็นตัวเลือกที่น่าสนใจในการใช้เป็นตัวดูดซับ

ทำการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ Honda GX 240 ในห้องปฏิบัติการ (short-term test) กับเชื้อเพลิงทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ น้ำมัน Gasoline 91 ก๊าซมีเทนชีวภาพ 90% และก๊าซมีเทนชีวภาพ 65% โดยมุ่งศึกษาถึงผลของเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ ที่จะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานของ



เครื่องยนต์อย่างไรนั้น จากการทดสอบพบว่าก๊าซมีเทนชีวภาพมีศักยภาพในการทดแทนน้ำมัน Gasoline 91 ในการทดสอบนี้ไม่ว่าจะเป็น ค่ากำลังสูงสุด ค่าแรงบิด และอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงจำเพาะ แสดงให้เห็นว่าก๊าซมีเทนชีวภาพสามารถนำมาทดแทนน้ำมัน Gasoline 91 กับยานพาหนะได้ แต่จะส่งผลให้สมรรถนะของเครื่องยนต์ลดลง

## 5.2 ข้อจำกัดในการวิจัย

- 5.2.1 Gas Compressor ที่ใช้ในการทดลองสามารถทำความดันได้สูงสุด 7 บาร์ที่อัตราการไหล 25 ลิตรต่อนาที
- 5.2.2 เครื่องทำความเย็นที่ใช้ในระบบสามารถทำความเย็นได้ต่ำสุด 0 องศาเซลเซียส

## 5.3 ข้อเสนอแนะในการดำเนินการวิจัยต่อไป

- 5.3.1 ศึกษาวิธีการนำก๊าซชีวภาพที่ปรับปรุงแล้วไปใช้ในครัวเรือนซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของอุปกรณ์ในครัวเรือน
- 5.3.2 พัฒนาเทคโนโลยีกระบวนการปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นควบคู่ไปกับการศึกษาต้นทุนโดยละเอียด เพื่อให้สามารถนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทนเชิงพาณิชย์ได้ต่อไป
- 5.3.3 ศึกษาวิธีการใช้ประโยชน์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียงจากกระบวนการปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพ
- 5.3.4 ศึกษาวิธีการบรรจุ การจัดเก็บ และการขนส่งก๊าซมีเทนชีวภาพที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพแล้ว เพื่อให้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีความหลากหลายมากขึ้น

## รายการอ้างอิง

- เดชา นัตรศิริเวช (2552). กระบวนการดูดซับ. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ประเทือง ฝันแก้ว (2554). การหาสมรรถนะของเครื่องยนต์เล็กดีเซลโดยใช้เชื้อเพลิงร่วมกับก๊าซชีวภาพ. การประชุมวิชาการครุศาสตร์อุตสาหกรรมระดับชาติ ครั้งที่ 4
- ปิยะพงษ์ สิงห์บัว และรัชพล สันติวรกร (2011). การอัดก๊าซชีวภาพและใช้ประโยชน์ในรถจักรยานยนต์. วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยขอนแก่น: 39-50
- ศุวสา กานตวนิชกูร (2535). เทคโนโลยีการหมุนเวียนทรัพยากรมาใช้ใหม่. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 3.4-3.32.
- สถาบันวิจัยและพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (2538). ข้อเสนอโครงการส่งเสริมก๊าซชีวภาพจากมูลสัตว์เพื่อเป็นพลังงานทดแทนและปรับปรุงสิ่งแวดล้อม ส่วนที่ 1 ฟาร์มขนาดกลางและขนาดใหญ่. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน (2550). สถานการณ์พลังงานในปี 2550 และแนวโน้มปี 2551. <http://www.energy.go.th>
- Adam, Eckstrom, Fanfoni, Kabrick, and Jewell. (1982). The Feasibility of Biogas Production on Farms. **Department of Agricultural Engineering, Cornell University**: 95-116.
- Boonkliang, A. (2002). Adsorption Equilibrium of Carbon Dioxide and Nitrogen with Carbon Adsorbent from Coconut Shell Boiled in Sulfuric Acid Solution. **Master's thesis in Chemical Engineering, Chulalongkorn University**.
- Cavenati, S., Grande, C. A., and Rodrigues, E. (2006). Separation of CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> mixtures by layered pressure swing adsorption for upgrade of natural gas. **Chemical Engineering Science**: 3893-3906.
- Cosoli, P., Ferrone, M., Pricl, S., and Fermeglia, M. (2008). Hydrogen sulfide removal from biogas by zeolite adsorption. **Chemical Engineering Journal**: 93-99.
- Esteves, I. A.A.C., Lopes, M. S.S., Nunes, P. M.C., and Mota, J. P.B. (2008). Adsorption of natural gas and biogas components on activated carbon. **Separation and Purification Technology**: 281-296.

- Favre, E., Bounaceur, R., and Roizard, D. (2009). Biogas, membranes and carbon dioxide capture. **Journal of Membrane Science**: 11-14.
- Guo, B., Chang, L., and Xie, K. (2006). Adsorption of Carbon Dioxide on Activated Carbon. **Journal of Natural Gas Chemistry**: 223-229.
- Kapdi, S.S., Vijay, V.K., Rajesh, S.K., and Prasad, R. (2004). Biogas scrubbing, compression and storage: perspective and prospectus in Indian context, **Centre for Rural Development and Technology, Indian Institute of Technology**
- MacZura, G., Goodboy, K. P., and Koenig, J.J. (1978). Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology (vol. 2, pp 218-244). **John-Wiley**.
- Mantell, C. L. (1951). Adsorption. **McGraw-Hill**.
- Mulloth, L. M. (2003). Carbon Dioxide Adsorption on a 5A Zeolite. **Designed for. NASA**.
- Navaza, J. M., Gómez-Díaz, D., La Rubi, M. D. (2009). Removal process of CO<sub>2</sub> using MDEA aqueous solution in a bubble column reactor. **J. Chem. Eng. Data**: 184-188.
- Nozic, M. (2006). Removal of carbon dioxide from biogas, **Department of Chemical Engineering, Lund University**.
- Ruthven, D.M. (1984). Principles of Adsorption and Adsorption Processes. **John Wiley & Sons**.
- Shen, C., Yu, J., Li, P., Grande, C. A., and Rodrigues, A. E. (2011). Capture of CO<sub>2</sub> from flue gas by vacuum pressure swing. **Adsorption**: 179-188.
- Syed, Z. I. (2006). A Case Study to Bottle the Biogas in Cylinders as Source. **World Applied Sciences Journal**: 127-130.
- Tagliabue, M., Farrusseng, D., Valencia, S., Aguado, S., Ravon, U., Rizzo, C., Corma, A., and Mirodatos, C. (2009). Natural gas treating by selective adsorption: Material science and chemical engineering interplay. **Chemical Engineering Journal**: 553-566.
- Takamura, Y., Narita, S., Aoki, J., Hironaka, S., and Uchida, S. (2001). Evaluation of dual-bed pressure swing adsorption for CO<sub>2</sub> recovery from boiler exhaust gas. **Separation and Purification Technology**: 519-528.
- Voll, M., and Kleinschmit, P. (2002). Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry (vol 6, chapter Carbon. pp 326-350). **Wiley-VCH**.
- Welsh, W. A., and Chapman, D.M. (2003). Ullmann,s Encyclopedia of Industrial Chemistry (vol 32, pp 322-329). **Wiley-VCH**.

Werner, U., Stöhr, U., and Hees, N. (1989). Biogas plants in animal husbandry. **A Publication of the Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien - GATE , a Division of the Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH.**

Zican, S.M. (2003). Removal of Hydrogen Sulfide from Biogas Using Cow-Manure Compost , **Maste's Thesis Cornell University.**






ภาคผนวก ก


เอกสารรับรองคุณภาพตัวจุดซั้บต่าง ๆ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



### Certificate of Analysis

หมายเลขเอกสาร : F-Q-003 วันที่มีผลบังคับใช้ : 09/03/47	R 03 แผ่นที่ 1/1
---	---------------------



This CGC-4x8 is Tested and Certified by NSF International against NSF/ANSI Standard 42 for material requirements only.

P.O.NUMBER : -  
 TOTAL QUANTITIES : 15 Kg.

DATE : 24/08/2011  
 PRODUCT NAME : CGC-11,CGC-11A,CGC-12 4 x 8  
 MANUFACTURING DATE : 08/2011


LOT NUMBER	QUANTITY (Kgs.)	PACKING (Kgs./BAG)	PARAMETER								
			MOISTURE (%)	ASH (%)	pH	A.D. (g/c.c.)	IODINE (mg/g.)	HARDNESS (%)	+4 mesh (%)	4-8 mesh (%)	-8 mesh (%)
4x8 540824 (I <sub>2</sub> 1000)	5	SPEC.	2.5	2.6	10.2	0.48	1040.3	99.5	4.2	91.1	4.7
4x8 540824 (I <sub>2</sub> 1050)	5		3.8	2.0	10.3	0.46	1086.2	99.6	2.7	93.7	3.6
4x8 540824 (I <sub>2</sub> 1150)	5		3.0	2.4	10.3	0.45	1190.5	98.3	1.9	94.8	3.3

CHECKED BY *N. Uthairat*  
(CHEMIST)

APPROVED BY *M. Sornate*  
(HEAD OF QUALITY ASSURANCE)

REMARK TEST METHOD BY ASTM

รูปที่ ก1 เอกสารรับรองคุณภาพถ่านกัมมันต์ Activated Carbon CGC 11, CGC 11A และCGC12



### Certificate of Analysis

หมายเลขเอกสาร : F-Q-003 R 03  
วันที่มีผลบังคับใช้ : 09/03/47 แผ่นที่ 1/1

DATE : 25/08/2011

PRODUCT NAME : CGC-16 4 x 8

MANUFACTURING DATE : 08/2011

P.O.NUMBER : -

TOTAL QUANTITIES : 25 Kg.

**NSF**<sup>®</sup>

This CGC-16 4x8 is Tested and Certified by NSF International against NSF/ANSI Standard 42 for material requirements only.

LOT NUMBER	QUANTITY (Kgs.)	PACKING (Kgs./BAG)	PARAMETER											
			MOISTURE (%)	ASH (%)	pH	A.I.D. (g/cc)	IODINE (mg/g.)	HARDNESS (%)	+4 mesh (%)	4-8 mesh (%)	-8 mesh (%)			
5312/388	25	25	MAX 5	MAX 5	-	-	MIN 1100	MIN 97	MAX 5	-	MAX 5	3.1	94.5	2.4
			2.4	3.2	10.5	0.43	1136.5	99.3						

CHECKED BY *N. Urdanaga* (CHEMIST)

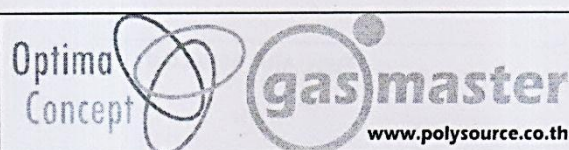
APPROVED BY *M. Samart* (HEAD OF QUALITY ASSURANCE)

**REMARK** TEST METHOD BY ASTM

รูปที่ ก2 เอกสารรับรองคุณภาพถ่านกัมมันต์ Activated Carbon CGC16





Separation | Purification Technology  
 Polysource Ltd.,Part.  
 Tel. 02-9792982-3 Fax. 029792984  
 www.optimaconcept.biz

## Molecular Sieve 13X

Molecular Sieve 13X is the sodium form of the type X crystal and has a much larger pore opening than the type A crystals. It will adsorb molecules with a kinetic diameter of less than 9 Angstrom (0.9 nm) and exclude those larger. It also has the highest theoretical capacity of the common adsorbents and very good mass transfer rates. It can remove impurities too large to fit into a type A crystal and is commonly used to separate nitrogen from oxygen.

■ **Typical Chemical Formula** :  $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot (2.8 \pm 0.2) \text{SiO}_2 \cdot (6-7)\text{H}_2\text{O}$

■ **SiO<sub>2</sub> : Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ≈ 2.6-3.0**

■ **Technical Parameter**

Item	Unit	Technical data	
Shape		Sphere	
Diameter	mm	1.7-2.5	3.0-5.0
Size ratio up to grade	%	≥96	≥96
Bulk density	g/ml	≥0.64	≥0.64
Wear ratio	%	≤0.10	≤0.10
Crushing strength	N	≥25/piece	≥65/piece
Static water adsorption	%	≥23.5	≥23.5
Static CO <sub>2</sub> adsorption	%	≥18	≥18
Water content, as shipped	%	≤1.5	≤1.5

■ **Application**

- Removal of Ethylene Glycon, CO<sub>2</sub> and moisture from air (air pre-purification) and other gases.
- Separation of enriched oxygen from air. Production of bulk oxygen in PSA units .
- Removal of mercaptans and hydrogen sulphide from natural gas.
- Removal of mercaptans and hydrogen sulphide from hydrocarbon liquid streams (LPG, butane, propane etc.)
- Catalyst protection, removal of oxygenates from hydrocarbons (olefin streams).
- Production of medical oxygen in small scale oxygen concentrators

- **Regeneration** :Molecular sieve Type 13X can be regenerated by either heating in the case of thermal swing processes; or by lowering the pressure in the case of pressure swing processes.  
 To remove moisture from a 13X molecular sieve, a temperature of 250-300°C is required. A properly regenerated molecular sieve can give moisture dew points below -100°C, or mercaptan or CO<sub>2</sub> levels below 2 ppmv.

The outlet concentrations on a pressure swing process will depend on the gas present, and on the conditions of the process

- **Size** : 13X - Zeolites are available in beads of 1-2 mm, (10x18 mesh) 2-3 mm, (8x12 mesh) , 2.5-5 mm, (4x8 mesh) and as powder, and in pellet 1.6", 3.2".

รูปที่ ก3 เอกสารรับรองคุณภาพ Molecular sieve Zeolite 13X





ภาคผนวก ข

ข้อมูลทดสอบในห้องปฏิบัติการ



ตารางที่ ข1.2 ผลการทดลองความดันที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ตัวถ่านดูดซับ Activated Carbon CGC 11

Time (sec)	2 bar		4 bar		5 bar		6 bar		7 bar	
	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>
0	81.1	18.9	83.7	16.3	75.6	16.2	76.7	16.1	77.6	15.5
15	81.1	18.9	83.7	16.3	80	16.2	79	16.1	79.2	15.5
30	81.1	18.9	83.7	16.3	82	16.2	81.1	16.1	82	15.5
45	81.1	18.9	83.7	16.3	83.1	16.2	82.3	16.1	83.2	15.5
60	81.1	18.9	83.7	16.3	83.3	16.2	82.9	16.1	83.6	15.5
75	81.1	18.9	83.7	16.3	83.5	16.2	83.3	16.1	83.8	15.5
90	81	19	83.7	16.3	83.6	16.2	83.5	16.1	83.9	15.5
105	80.3	19.7	83.6	16.4	83.5	16.3	83.6	16.1	84.1	15.5
120	79.8	20.2	83.5	16.5	83.4	16.4	83.7	16.1	84.1	15.5
135	79.6	20.4	83.4	16.6	83.3	16.5	83.6	16.2	84.1	15.5
150	79.4	20.6	83.2	16.8	83.1	16.7	83.5	16.3	84.3	15.5
165	79.3	20.7	82.9	17.1	83	16.8	83.4	16.4	84.3	15.5
180	79.3	20.7	82.7	17.3	82.7	17.1	83.2	16.6	84.3	15.5
195	79.2	20.8	82.4	17.6	82.5	17.3	83	16.8	84.2	15.6
210			82.2	17.8	82.2	17.6	82.9	16.9	84.1	15.7
225			82	18	81.7	18.1	82.6	17.2	82.9	16.6
240			81.7	18.3	81.5	18.3	82.3	17.5	81.5	16.9
255			81.3	18.7	81.1	18.7	81.9	17.9	81.3	17.2
270			80.8	19.2	80.6	19.2	81.5	18.3	80.4	17.5
285			80.5	19.5	80.2	19.6	81.3	18.5	79.8	17.9
300			79.8	20.2	79.7	20.1	80.9	18.9	79.4	18.3
315			79.5	20.5	79.3	20.5	80.6	19.2	79.2	18.5
330			79	21	78.8	21	80.3	19.5	78.9	18.9
345			78.5	21.5	78.4	21.4	79.6	20.2	78.8	19.2
360			78.1	21.9	78	21.8	79.3	20.5	78.7	19.5
375			77.9	22.1	77.6	22.2	78.8	21	78.6	20.2
390			77.3	22.7	77.2	22.6	78.3	21.5	78.5	20.5
405			77.1	22.9	77	22.8	77.9	21.9	78.5	21
420			76.6	23.4	76.6	23.2	77.7	22.1	78.4	21.5
435							77.1	22.7	78.4	21.9
450							76.9	22.9	78.4	22.1
465							76.4	23.4	78.4	22.7
480									78.3	22.9

ตารางที่ ข1.3 ผลการทดลองความดันที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ด้วยถ่านดูดซับ Activated Carbon CGC 11A

Time (sec)	2 bar		4 bar		5 bar		6 bar		7 bar	
	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>
0	83	17	83.3	16.7	83.5	16.5	84.9	15.1	85.1	14.9
15	83	17	83.3	16.7	83.5	16.5	84.9	15.1	85.1	14.9
30	83	17	83.3	16.7	83.5	16.5	84.9	15.1	85.1	14.9
45	83	17	83.3	16.7	83.5	16.5	84.9	15.1	85.1	14.9
60	83	17	83.3	16.7	83.5	16.5	84.9	15.1	85.1	14.9
75	83	17	83.3	16.7	83.5	16.5	84.9	15.1	85.1	14.9
90	83	17	83.3	16.7	83.5	16.5	84.9	15.1	85.1	14.9
105	81.7	18.3	81.5	18.5	82.5	17.5	84.9	15.1	85.1	14.9
120	80.5	19.5	81	19	81.2	18.8	84.9	15.1	85.1	14.9
135	79.9	20.1	80.4	19.6	81.2	18.8	84.8	15.2	85.1	14.9
150	79.3	20.7	79.8	20.2	81.2	18.8	84.7	15.3	85.1	14.9
165	78.9	21.1	79.5	20.5	81.1	18.9	84.6	15.4	85	15
180	78.7	21.3	79.3	20.7	80.9	19.1	84.5	15.5	85	15
195	78.5	21.5	79.1	20.9	80.7	19.3	84.4	15.6	85	15
210	78.4	21.6	79.1	20.9	80.6	19.4	83.5	16.5	85	15
225	78.2	21.8	79.1	20.9	80.4	19.6	82.2	17.8	84.9	15.1
240	78.2	21.8			80.1	19.9	82.1	17.9	84.8	15.2
255	78.1	21.9			79.5	20.5	81.5	18.5	84.7	15.3
270	78	22			79.3	20.7	81	19	84.6	15.4
285	77.9	22.1			79.1	20.9	80.4	19.6	84.5	15.5
300	77.8	22.2			79.1	20.9	79.8	20.2	84.4	15.6
315	77.7	22.3			79.1	20.9	79.5	20.5	83.5	16.5
330	77.7	22.3					79.3	20.7	82.2	17.8
345							79.1	20.9	82.1	17.9
360							79.1	20.9	81.5	18.5
375							79.1	20.9	81	19
390							78.8	21.2	80.4	19.6
405							78.8	21.2	79.8	20.2
420							78.8	21.2	79.5	20.5
435							78.7	21.3	79.3	20.7
450							78.5	21.5	79.1	20.9

ตารางที่ ข1.4 ผลการทดลองความดันที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ตัวถ่านดูดซับ Activated Carbon CGC 12

Time (sec)	2 bar		4 bar		5 bar		6 bar		7 bar	
	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>
0	83.1	16.9	83.7	16.3	84.2	15.8	84.3	15.7	85	15
15	83.1	16.9	83.7	16.3	84.2	15.8	84.3	15.7	85	15
30	83.1	16.9	83.7	16.3	84.2	15.8	84.3	15.7	85	15
45	83.1	16.9	83.7	16.3	84.2	15.8	84.3	15.7	85	15
60	83.1	16.9	83.7	16.3	84.2	15.8	84.3	15.7	85	15
75	83.1	16.9	83.7	16.3	84.2	15.8	84.3	15.7	85	15
90	83.1	16.9	83.5	16.5	84.2	15.8	84.3	15.7	85	15
105	82.9	17.1	83.4	16.6	84.2	15.8	84.3	15.7	85	15
120	82.4	17.6	83.2	16.8	84.2	15.8	84.3	15.7	85	15
135	81.6	18.4	83.1	16.9	84.2	15.8	84.3	15.7	85	15
150	81	19	82.9	17.1	83.6	16.4	84.3	15.7	85	15
165	79.8	20.2	82.4	17.6	83.3	16.7	83.6	16.4	85	15
180	79.2	20.8	81.6	18.4	82.1	17.9	83.3	16.7	85	15
195	78.8	21.2	81	19	81.8	18.2	82.6	17.4	84.3	15.7
210	78.4	21.6	79.8	20.2	81.2	18.8	82.3	17.7	83.6	16.4
225	78.2	21.8	79.2	20.8	80.4	19.6	82.1	17.9	83.3	16.7
240	78	22	78.8	21.2	79.6	20.4	81.8	18.2	82.4	17.6
255	77.8	22.2	78.4	21.6	79.1	20.9	81.2	18.8	81.6	18.4
270	77.5	22.5	78.2	21.8	78.7	21.3	80.4	19.6	81	19
285	77.5	22.5	78	22	78.4	21.6	79.6	20.4	79.8	20.2
300	77.4	22.6	77.8	22.2	78.3	21.7	79.1	20.9	79.2	20.8
315	77.2	22.8	77.5	22.5	78.1	21.9	78.7	21.3	78.8	21.2
330	77.2	22.8	77.5	22.5	78	22	78.4	21.6	78.4	21.6
345	77.2	22.8	77.4	22.6	77.9	22.1	78.3	21.7	78.2	21.8
360	77.2	22.8	77.2	22.8	77.9	22.1	78.1	21.9	78	22
375			77.2	22.8	77.9	22.1	78	22	77.9	22.1
390			77.2	22.8	77.9	22.1	77.9	22.1	77.9	22.1
405			77.2	22.8	77.8	22.2	77.9	22.1	77.9	22.1
420							77.9	22.1	77.9	22.1
435							77.9	22.1	77.8	22.2
450							77.8	22.2		

ตารางที่ ข2. ผลการทดลองอุณหภูมิที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์  
ของตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ

Time (sec)	Zeolite 13X		CGC 11		CGC 11A		CGC 12	
	% CO <sub>2</sub> Adsorbed		% CO <sub>2</sub> Adsorbed		% CO <sub>2</sub> Adsorbed		% CO <sub>2</sub> Adsorbed	
	4°C	10°C	4°C	10°C	4°C	10°C	4°C	10°C
0	5.0	6.4	15.5	16.8	14.9	15.8	15.0	16.9
15	5.0	6.6	15.5	16.8	14.9	15.8	15.0	16.9
30	5.0	6.4	15.5	16.8	14.9	15.8	15.0	16.9
45	5.0	6.8	15.5	16.8	14.9	15.8	15.0	16.9
60	5.0	6.5	15.5	16.8	14.9	15.8	15.0	16.9
75	5.0	6.5	15.5	16.8	14.9	15.8	15.0	16.9
90	5.0	6.5	15.5	16.8	14.9	16.1	15.0	16.9
105	5.0	6.5	15.5	16.8	14.9	16.5	15.0	16.9
120	5.0	6.5	15.5	16.8	14.9	16.8	15.0	16.9
135	5.0	6.5	15.5	16.8	14.9	17.3	15.0	17.4
150	5.0	6.5	15.5	16.8	14.9	17.9	15.0	17.9
165	5.0	6.5	15.5	16.8	15.0	18.3	15.0	18.5
180	5.0	6.9	15.5	16.8	15.0	19.2	15.6	19.1
195	5.0	12.8	15.9	16.8	15.0	19.9	16.9	20.2
210	5.0	19.2	15.7	17.3	15.0	20.7	17.9	22.0
225	5.1	23.1	16.6	17.8	15.1	21.5	18.9	22.2
240	5.2	24.4	16.9	18.4	15.2	22.2	19.2	22.5
255	5.6	25.0	17.2	19.0	15.3	22.9	20.0	22.5
270	8.7	25.4	17.5	19.7	15.4		20.8	22.6
285	16.3	25.6	17.9	20.4	15.5		21.3	22.8
300	23.0		18.3	20.9	15.6		21.7	22.8
315	26.0		18.5	21.5	16.5		21.8	
330	27.0		18.9	22.1	17.8		22.0	
345			19.2	22.6	17.9		22.2	
360			19.5	23.1	18.5		22.2	
375			20.2	23.7	19.0		22.3	
390			20.5	24.1	19.6		22.3	
405			21.0		20.2		22.3	
420			21.5		20.5			
435			21.9		20.7			
450			22.1		20.9			
465			22.7		20.9			
480			22.9		20.9			
495			23.4					



ตารางที่ ข4.1 ข้อมูลการทดลองค่าไอโซเทอมของตัวดูดซับ Molecular sieve Zeolite 13X

ความดัน (bar)	Raw Biogas (%)					Outlet Biogas (%)				
	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S
2	69.4	30.3	0.1	0.2	0	94.1	5.6	0.1	0.2	0
	69.2	30.6	0.1	0.1	0	94.1	5.7	0.1	0.1	0
	69.3	30.4	0.2	0.1	0	94.1	5.3	0.2	0.1	0
3	69.1	30.6	0.1	0.2	0	94.4	4.4	0.1	0.2	0
	70.2	29.6	0.2	0.0	0	95.3	4.7	0.2	0	0
	70.0	29.7	0.3	0.0	0	95.1	4.8	0.3	0	0
4	69.3	30.5	0.1	0.1	0	94.9	5.1	0.1	0.1	0
	68.9	30.7	0.1	0.3	0	94.7	5.2	0.1	0.3	0
	69.3	30.6	0.1	0.0	0	94.4	5.1	0.1	0	0
5	69.7	29.9	0.2	0.2	0	94.8	5	0.2	0.2	0
	69.2	30.5	0.2	0.1	0	94.6	4.9	0.2	0.1	0
	68.3	31.5	0.1	0.1	0	94.8	5.1	0.1	0.1	0
6	69.9	29.9	0.1	0.1	0	94.7	3.8	0.1	0.1	0
	69.6	30.1	0.2	0.1	0	96	3.9	0.2	0.1	0
	69.7	30.0	0.1	0.2	0	95.8	3.6	0.1	0.2	0
7	69.5	30.2	0.2	0.1	0	96.1	3.7	0.2	0.1	0
	69.0	30.5	0.2	0.3	0	96	3.7	0.2	0.3	0
	70.3	29.5	0.1	0.1	0	95.8	3.5	0.1	0.1	0

ตารางที่ ข4.2 ข้อมูลการทดลองค่าไอโซเทอมของถ่านดูดซับ Activated Carbon CGC 11

ความดัน (bar)	Raw Biogas (%)					Outlet Biogas (%)				
	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S
2	69.2	30.7	0	0.1	0	80.3	19.6	0	0.1	0
	69.4	30.5	0	0.1	0	80.4	19.5	0	0.1	0
	69.7	30.1	0.1	0.1	0	80.1	19.7	0.1	0.1	0
3	69.3	30.5	0.1	0.1	0	80.7	19.1	0.1	0.1	0
	69.1	30.8	0	0.1	0	81.1	18.8	0	0.1	0
	69	30.8	0.1	0.1	0	81.1	18.7	0.1	0.1	0
4	69.8	30.2	0	0	0	82.5	17.5	0	0	0
	69.4	30.4	0.1	0.1	0	83.2	16.6	0.1	0.1	0
	69.6	30.3	0.1	0	0	83.4	16.5	0.1	0	0
5	69.9	29.9	0.1	0.1	0	84	15.8	0.1	0.1	0
	70	29.9	0.1	0	0	83.7	16.2	0.1	0	0
	68.3	31.7	0	0	0	83.8	16.2	0	0	0
6	67.9	31.8	0.2	0.1	0	83.4	16.3	0.2	0.1	0
	69.3	30.4	0.1	0.2	0	83.8	15.9	0.1	0.2	0
	70.1	29.8	0	0.1	0	83.8	16.1	0	0.1	0
7	70.2	29.7	0.1	0	0	84	15.9	0.1	0	0
	70.5	29.3	0.1	0.1	0	83.8	16	0.1	0.1	0
	69.4	30.4	0.1	0.1	0	83.9	15.9	0.1	0.1	0



ตารางที่ ข4.3 ข้อมูลการทดลองค่าไอโซเทอมของถ่านดูดซับ Activated Carbon CGC 11A

ความดัน (bar)	Raw Biogas (%)					Outlet Biogas (%)				
	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S
2	68.9	30.8	0.1	0.2	0	82.4	17.3	0.1	0.2	0
	69.3	30.5	0.1	0.1	0	82.3	17.5	0.1	0.1	0
	69.3	30.5	0.1	0.1	0	82	17.8	0.1	0.1	0
3	69.3	30.4	0.1	0.2	0	83.2	16.5	0.1	0.2	0
	69.3	30.6	0.1	0	0	83.6	16.3	0.1	0	0
	69.3	30.6	0.1	0	0	83	16.9	0.1	0	0
4	69.3	30.6	0	0.1	0	83.8	16.1	0	0.1	0
	69.3	30.3	0.1	0.3	0	82.9	16.7	0.1	0.3	0
	69.3	30.7	0	0	0	83.4	16.6	0	0	0
5	69.3	30.4	0.1	0.2	0	83	16.7	0.1	0.2	0
	69.3	30.6	0	0.1	0	83.4	16.5	0	0.1	0
	69.3	30.6	0	0.1	0	83.5	16.4	0	0.1	0
6	69.3	30.5	0.1	0.1	0	84.3	15.5	0.1	0.1	0
	69.3	30.4	0.2	0.1	0	84.1	15.6	0.2	0.1	0
	69.3	30.4	0.1	0.2	0	84.2	15.5	0.1	0.2	0
7	69.3	30.6	0	0.1	0	84.9	15	0	0.1	0
	69.3	30.3	0.1	0.3	0	84.5	15.1	0.1	0.3	0
	69.3	30.5	0.1	0.1	0	84.9	14.9	0.1	0.1	0

ตารางที่ ข4.4 ข้อมูลการทดลองค่าไอโซเทอมของถ่านดูดซับ Activated Carbon CGC 12

ความดัน (bar)	Raw Biogas (%)					Outlet Biogas (%)				
	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S
2	69.3	30.4	0.2	0.1	0	82.9	16.8	0.2	0.1	0
	69.3	30.4	0.1	0.2	0	82.8	16.9	0.1	0.2	0
	69.3	30.4	0.2	0.1	0	83.1	16.6	0.2	0.1	0
3	69.3	30.6	0	0.1	0	83.6	16.3	0	0.1	0
	69.3	30.4	0.2	0.1	0	83.2	16.5	0.2	0.1	0
	69.3	30.5	0.1	0.1	0	83	16.8	0.1	0.1	0
4	69.3	30.2	0.4	0.1	0	83.4	16.1	0.4	0.1	0
	69.3	30.5	0.1	0.1	0	83.6	16.2	0.1	0.1	0
	69.3	30.4	0.1	0.2	0	83.8	15.9	0.1	0.2	0
5	69.3	30.2	0.3	0.2	0	83.7	15.8	0.3	0.2	0
	69.3	30.5	0.1	0.1	0	84.1	15.7	0.1	0.1	0
	69.3	30.5	0.1	0.1	0	83.9	15.9	0.1	0.1	0
6	69.3	30.2	0.2	0.3	0	83.9	15.6	0.2	0.3	0
	69.3	30.5	0.1	0.1	0	84.1	15.7	0.1	0.1	0
	69.3	30.4	0.2	0.1	0	83.9	15.8	0.2	0.1	0
7	69.3	30.4	0.1	0.2	0	84.9	14.8	0.1	0.2	0
	69.3	30.4	0.2	0.1	0	84.6	15.1	0.2	0.1	0
	69.3	30.4	0.1	0.2	0	84.5	15.2	0.1	0.2	0

ตารางที่ ข5.1 ผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ Honda GX 240 โดยใช้เชื้อเพลิง

Gasoline 91

Engine Speed (rpm)	Net Torque (N-m)	Power (kw)	Specific fuel Consumption (kg/kw-hr)
3600	15.8	5.96	0.294
3550	16.0	5.95	0.268
3500	16.3	5.96	0.248
3450	16.6	5.98	0.248
3400	16.6	5.91	0.247
3350	16.8	5.89	0.235
3300	16.9	5.84	0.237
3250	17.0	5.79	0.252
3200	17.1	5.73	0.232
3150	17.3	5.69	0.244
3100	17.5	5.68	0.245
3050	17.3	5.53	0.263
3000	17.5	5.50	0.252
2950	17.6	5.45	0.265
2900	17.8	5.41	0.263
2850	17.9	5.33	0.266
2800	18.0	5.26	0.263
2750	18.0	5.18	0.259
2700	18.2	5.14	0.266
2650	18.3	5.08	0.265
2600	18.3	4.97	0.267
2550	18.4	4.91	0.274
2500	18.3	4.79	0.276
2450	18.3	4.68	0.281
2400	18.4	4.62	0.299
2350	18.2	4.48	0.299
2300	18.4	4.43	0.308
2250	18.2	4.29	0.319
2200	18.2	4.18	0.321
2150	18.1	4.08	0.340
2100	18.0	3.96	0.351
2050	18.2	3.91	0.343

2000	18.0	3.77	0.367
------	------	------	-------

ตารางที่ ข5.2 ผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ Honda GX 240 โดยใช้เชื้อเพลิง

Bio methane 90%

Engine Speed (rpm)	Net Torque (N-m)	Power (kw)	Specific fuel Consumption (Nm <sup>3</sup> /kw-hr)
3600	14.1	5.31	0.446
3550	14.3	5.31	0.405
3500	14.6	5.34	0.373
3450	14.6	5.29	0.378
3400	14.4	5.12	0.385
3350	15.0	5.25	0.356
3300	15.2	5.27	0.355
3250	15.1	5.15	0.383
3200	15.3	5.13	0.349
3150	15.4	5.06	0.371
3100	15.3	4.96	0.379
3050	15.5	4.95	0.396
3000	15.6	4.89	0.382
2950	15.6	4.82	0.405
2900	15.8	4.81	0.399
2850	16.0	4.77	0.401
2800	15.9	4.65	0.402
2750	16.0	4.61	0.392
2700	16.3	4.61	0.401
2650	16.3	4.52	0.403
2600	16.6	4.52	0.396
2550	16.4	4.37	0.416
2500	16.2	4.24	0.421
2450	16.2	4.17	0.426
2400	16.4	4.12	0.453
2350	16.3	4.01	0.451
2300	16.4	3.95	0.466
2250	16.2	3.82	0.484
2200	16.2	3.73	0.485
2150	16.3	3.68	0.510
2100	16.2	3.57	0.526
2050	16.3	3.50	0.517
2000	16.8	3.52	0.531

ตารางที่ ข5.3 ผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ Honda GX 240 โดยใช้เชื้อเพลิง

Bio methane 65%

Engine Speed (rpm)	Net Torque (N-m)	Power (kw)	Specific fuel Consumption (Nm <sup>3</sup> /kw-hr)
3600	12.64	4.77	0.687
3550	12.80	4.76	0.626
3500	13.00	4.76	0.579
3450	13.25	4.79	0.579
3400	13.28	4.73	0.577
3350	13.44	4.71	0.548
3300	13.52	4.67	0.553
3250	13.60	4.63	0.590
3200	13.68	4.58	0.541
3150	13.80	4.55	0.571
3100	14.00	4.54	0.572
3050	13.84	4.42	0.614
3000	14.00	4.40	0.588
2950	14.10	4.36	0.620
2900	14.24	4.32	0.614
2850	14.28	4.26	0.621
2800	14.36	4.21	0.615
2750	14.40	4.15	0.604
2700	14.55	4.11	0.622
2650	14.64	4.06	0.620
2600	14.60	3.98	0.624
2550	14.72	3.93	0.641
2500	14.64	3.83	0.644
2450	14.60	3.75	0.656
2400	14.72	3.70	0.699
2350	14.56	3.58	0.700
2300	14.70	3.54	0.719
2250	14.56	3.43	0.746
2200	14.52	3.35	0.749
2150	14.51	3.27	0.796
2100	14.40	3.17	0.821
2050	14.56	3.13	0.802
2000	14.40	3.02	0.857





ภาคผนวก ค

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

## รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

ปภัศ ชนะโรค กงจักร ลมวิชัย รัตนวรรณ เกียรติโกมล และ วีรชัย อาจหาญ. (2555). การปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการดูดซับสลับความดัน. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยครั้งที่ 13 ประจำปี 2555 การผสมผสานเทคโนโลยี และการเกษตรแบบยั่งยืน. หน้า 77





การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13  
4-5 เมษายน 2555 จังหวัดเชียงใหม่

EAE13

## การปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการดูดซับสลับความดัน Pressure swing Adsorption for Biogas upgrading

ปกัฒ ษนะโร๑ กงจักร ฅมวรีช๑๒ วัต๑นวรรณ เก๑ยร๑ติโกมล๑ และ วีรช๑ย อางห๑ญ๑๑

<sup>1</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา 30000

<sup>2</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา 30000

<sup>3</sup> สถาบันวิจัยและเทคโนโลยี การปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย

\*ผู้ติดต่อ: E-mail: arjharh@g.sut.ac.th, โทรศัพท์: 044 225 007, โทรสาร: 044 225 045,044 224 610

### บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ในงานวิจัยครั้งนี้เพื่อศึกษาการเพิ่มศักยภาพในการนำก๊าซชีวภาพมาใช้ทดแทนเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติสำหรับรถยนต์ เชื้อเพลิงก๊าซที่ใช้จะต้องเป็นเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพ มีสัดส่วนของก๊าซมีเทนมากกว่าร้อยละ 65 ตามประกาศของกรมธุรกิจพลังงาน ทั้งนี้ก๊าซชีวภาพ มีก๊าซมีเทน เป็นองค์ประกอบเพียง ร้อยละ 60-70 จำเป็นต้องทำการปรับปรุงคุณภาพให้มีสัดส่วนของแก๊สมีเทนเพิ่มมากขึ้น โดยการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) การทดลองจะใช้ชุดทดลองการดูดซับแบบสลับความดันที่ประกอบด้วย หอดูดซับซึ่งบรรจุตัวดูดซับ Molecular sieve Zeolite 13X จำนวน 2 หอ และทำการศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อกระบวนการดูดซับสลับความดัน เช่น อุณหภูมิ ความดัน และระยะเวลา จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มความดันหรือลดอุณหภูมิให้กับระบบ จะทำให้การดูดซับเกิดได้ดีขึ้น สัดส่วนสูงสุดของก๊าซมีเทนที่ได้เท่ากับร้อยละ 96 โดยปริมาตร

**คำหลัก:** ก๊าซชีวภาพ, ตัวดูดซับ, การดูดซับสลับความดัน

### Abstract

The objective of the present research was to study the potential of biogas upgrading for replacing natural gas in vehicles. Generally, fuel used in vehicle must be high in quality; the proportion of methane should be at least 65% as announced by Department of Energy Business. However, as the proportion of methane in biogas is usually about 60-70%, it is necessary to increase the methane concentration in biogas, which can be done by removing carbon dioxide. The experiment was carried out using a set of pressure swing adsorption, consisting mainly of two adsorption towers containing adsorbent molecular sieve Zeolite 13X. Parameters affecting the process of pressure swing adsorption such as temperature, pressure and retention time were investigated. The results showed that when increasing pressure or decreasing temperature in the system, the adsorption rate increased. The maximum methane concentration achieved is 96% by volume.

**Keywords:** Biogas, Adsorbent, Pressure swing adsorption





## 1. บทนำ

กระบวนการดูดซับสลับความดัน (Pressure swing Adsorption) คือกระบวนการดูดซับที่มีการทำงานเป็นวัฏจักร โดยที่กระบวนการนี้อาศัยความแตกต่างของความดันคือที่ความดันสูงการดูดซับ (Adsorption) จะเกิดขึ้นได้ดี ในขณะที่การคายซับ (Desorption) จะเกิดขึ้นได้ดีที่ความดันต่ำ [2] ดังนั้นโดยปรกติแล้วกระบวนการนี้จะประกอบด้วยหอดูดซับ 2 หอทำงานสลับกันระหว่างการดูดซับและการคายซับ

ก๊าซชีวภาพ(Biogas) จัดเป็นพลังงานทดแทนชนิดหนึ่งที่มีศักยภาพมาก เนื่องจากสามารถนำมาแปลงเป็นพลังงานได้หลายรูปแบบ เช่น ไฟฟ้าและความร้อน [3] ปัจจุบันยังไม่มีข้อกำหนดมาตรฐานการนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆอย่างชัดเจน งานวิจัยนี้จึงนำก๊าซชีวภาพที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพแล้วมาเปรียบเทียบกับก๊าซธรรมชาติที่ใช้กับยานพาหนะซึ่งมีคุณสมบัติใกล้เคียงกันแต่การนำก๊าซชีวภาพมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงสำหรับยานพาหนะนั้นยังน้อยอยู่ เนื่องจากเชื้อเพลิงก๊าซที่ใช้จะต้องเป็นเชื้อเพลิงที่มีลักษณะและคุณภาพ ตามประกาศของกรมธุรกิจพลังงานซึ่งกำหนดให้มี ก๊าซมีเทนไม่น้อยกว่าร้อยละ 65 คาร์บอนไดออกไซด์ไม่เกินร้อยละ 18 และค่าดัชนีวอมบี 37-42 MJ/m<sup>3</sup> [1] ทั้งนี้ก๊าซชีวภาพมีคุณภาพต่ำกว่าประกาศที่กำหนด จึงจำเป็นต้องทำการปรับปรุงคุณภาพโดยการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) และ ก๊าซอื่นๆ ออกไป

การวิจัยในครั้งนี้จะเป็นการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการสลับความดัน โดยเน้นที่จะกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อให้ก๊าซชีวภาพที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพนี้มีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้สำหรับยานพาหนะได้

## 2. อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

การศึกษาวิจัยนี้เป็นการศึกษาในรูปแบบของการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) โดย

การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13  
4-5 เมษายน 2555 จังหวัดเชียงใหม่

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปะปนอยู่กับก๊าซชีวภาพ ด้วยกระบวนการดูดซับสลับความดัน (Pressure swing Adsorption) โดยใช้ตัวดูดซับ Molecular sieve zeolite 13X เป็นตัวดูดซับ และใช้ก๊าซชีวภาพจากบ่อผลิตก๊าซชีวภาพแบบ Covered Lagoon ที่มีมูลสุกรเป็นสารตั้งต้นในการผลิตก๊าซชีวภาพ ดังนั้นจึงแบ่งอุปกรณ์และวิธีการทดลองดังนี้

### 2.1 ก๊าซชีวภาพที่ใช้ในการวิจัย

ก๊าซชีวภาพที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จากฟาร์มสุกร โดยจะทำการวิเคราะห์องค์ประกอบเบื้องต้นของก๊าซชีวภาพเพื่อใช้ในการควบคุมองค์ประกอบเริ่มต้นของก๊าซชีวภาพ และเปรียบเทียบกับองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพหลังการปรับปรุง ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพด้วยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซชีวภาพของ Geotech รุ่น Biogas Check ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซชีวภาพ

### 2.2 เครื่องปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพ

เครื่องปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพนี้เป็นเครื่องที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการวิจัยครั้งนี้ตามรูปที่ 3 และข้อมูลคุณสมบัติดังตารางที่ 1



รูปที่ 2 เครื่องดูดซับสลับความดัน

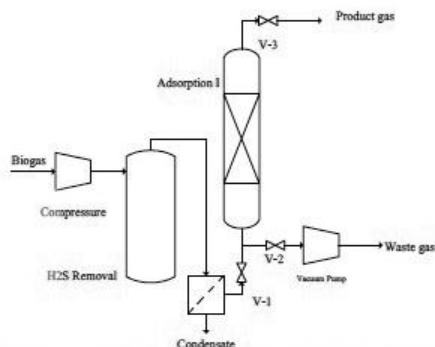
ตารางที่ 1 คุณสมบัติของเครื่องปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ความดันระบบ	ความดันระบบสูงสุด	8 bar(g)/116 psig
ก๊าซมีเทนชีวภาพ	อัตราการไหลสูงสุด	25 lite /min
ขนาด	กว้าง×ยาว×สูง	1.0×1.2×1.8 (m)
	น้ำหนักสุทธิ	180 kg
ข้อมูลด้านไฟฟ้า	กระแส/ความถี่	230Vac/50Hz
	การใช้พลังงาน	400

**2.3.1 ทดลองแบบเบดนิ่ง**

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับMolecular sieve zeolite 13X ด้วยระบบทดสอบการดูดซับแบบเบดนิ่ง อาทิเช่น ความดัน อุณหภูมิ และปริมาณตัวดูดซับภายในหอดูดซับบรรจุตัวดูดซับต่างๆในปริมาณที่แตกต่างกันในแต่ละการทดลองคือ 200, 300, 450 กรัมตามลำดับ ควบคุมอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพที่ไหลเข้าหน่วยดูดซับอยู่ที่ 25 ลิตรต่อนาที ทำการทดสอบที่อุณหภูมิดูดซับ 2 ระดับ คือ 4 และ 10 องศาเซลเซียส โดยเปลี่ยนแปลงระดับความดันที่ 2, 3, 4, 5, 6 และ 7 บาร์ ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่ผ่านการดูดซับอย่างต่อเนื่องด้วยเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพจนกระทั่งความเข้มข้นของสารถูกดูดซับที่ผ่านหน่วยดูดซับมีค่าเท่ากับค่าเริ่มต้นที่ไหลเข้าหน่วยดูดซับนั้น

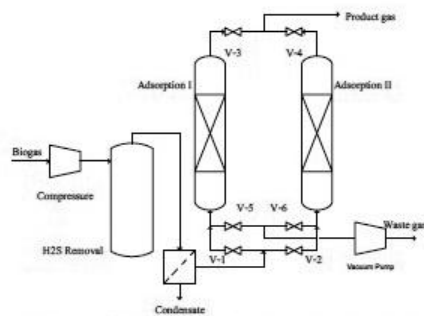
การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13  
4-5 เมษายน 2555 จังหวัดเชียงใหม่



รูปที่ 3 ระบบทดสอบสภาวะการดูดซับแบบเบดนิ่ง

**2.3.2 การทดลองระบบดูดซับสลับความดัน (Pressure swing adsorption)**

การทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพด้วยระบบดูดซับสลับความดันที่พัฒนาขึ้น ทำการทดสอบโดยควบคุมสภาวะของระบบ เช่นความดัน อุณหภูมิ และอัตราการไหลของก๊าซผสมที่ไหลเข้าหน่วยดูดซับให้สอดคล้องกับสภาวะที่ดีที่สุดตามการทดสอบระบบแบบเบดนิ่ง จากนั้นทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่ผ่านการดูดซับอย่างต่อเนื่อง บันทึกค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ไหลผ่านหน่วยดูดซับแต่ละหน่วย เพื่อหาประสิทธิภาพและวัฏจักรการดูดซับของระบบการดูดซับสลับความดันที่พัฒนาขึ้น



รูปที่ 4 ระบบทดสอบการดูดซับสลับความดัน



### 3. ผลการทดลองและวิจารณ์

#### 3.1 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพก่อนการปรับปรุงคุณภาพ

องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่ใช้ในการวิจัยนี้ ประกอบไปด้วยก๊าซมีเทน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซอื่นๆรวมไปถึงก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งมีผลทำให้อายุการใช้งานของตัวดูดซับที่ใช้ลดลงได้จึงต้องกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในเบื้องต้นก่อนนำก๊าซชีวภาพมาใช้ในการวิจัย ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่ใช้ในงานวิจัย (%Volume)

ก๊าซ	องค์ประกอบเริ่มต้น	ก๊าซที่ใช้ในงานวิจัย
CH <sub>4</sub>	68-70%	68-70 %
CO <sub>2</sub>	30-32%	30-32%
O <sub>2</sub>	<0.2	<0.2
N <sub>2</sub>	<0.2	<0.2
H <sub>2</sub> S	≥ 2000 ppm	<23 ppm

หมายเหตุ ผ่านการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยวิธีการดูดซับ

เมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพจากตารางที่ 2 กับลักษณะและคุณภาพของก๊าซธรรมชาติ ตามประกาศกรมธุรกิจพลังงาน [1] แล้ว พบว่าก๊าซมีเทนและก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์มีส่วนอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด มีเพียงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่านั้นที่มีมากกว่าค่าที่กำหนดตามประกาศกรมธุรกิจพลังงาน

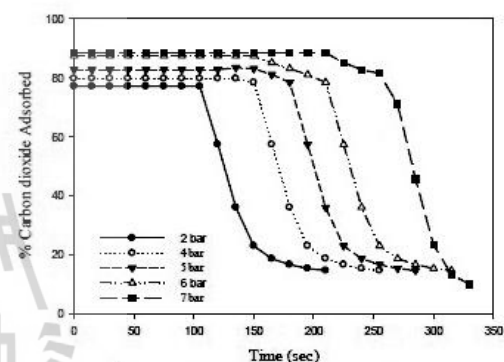
#### 3.2 ผลการทดสอบสภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

##### 3.2.1 ผลของความดันต่อประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

เมื่อศึกษาความดันที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ Molecular sieve Zeolite 13X โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับ 300 กรัม อุณหภูมิ 4°C และอัตราการไหลของก๊าซผสม 25 ลิตรต่ออนาที ดังรูปที่ 4.2 พบว่า Molecular sieve Zeolite 13X สามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ร้อยละ

การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13  
4-5 เมษายน 2555 จังหวัดเชียงใหม่

77 ที่ความดัน 2 bar เมื่อความดันของระบบมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 4, 5, 6 และ 7 bar การดูดซับของตัวดูดซับจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 80,82,87 และ 89 ตามลำดับ อีกทั้งระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุลจะเพิ่มขึ้นด้วย แสดงให้เห็นว่าอัตราการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ Molecular sieve Zeolite 13X แปรผันตรงกับความดัน



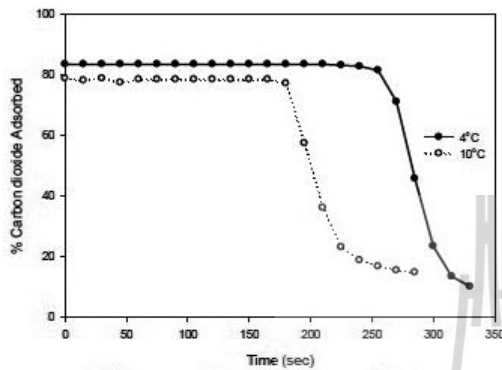
รูปที่ 5 การดูดซับ CO<sub>2</sub> ที่ความดันต่างๆ

##### 3.2.2 ผลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับ Molecular sieve Zeolite 13X ที่ความดันระบบ 7 bar และอัตราการไหล 25 ลิตรต่ออนาที พบว่าเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปทำให้ประสิทธิภาพของระบบเปลี่ยนแปลงไปโดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิประสิทธิภาพการดูดซับจะลดลง แสดงว่า การดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย Molecular sieve Zeolite 13X เป็นกระบวนการคายความร้อน จากรูปที่ 6 จะเห็นได้ว่า ที่อุณหภูมิ 4°C Molecular sieve Zeolite 13X สามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ร้อยละ 83 และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 10°C การดูดซับลดลงเหลือเพียงร้อยละ 79



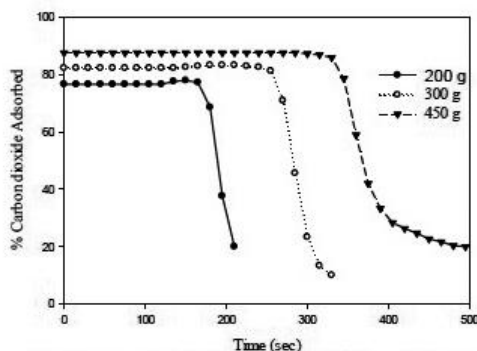
การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13  
4-5 เมษายน 2555 จังหวัดเชียงใหม่



รูปที่ 6 การดูดซับ CO<sub>2</sub> ที่อุณหภูมิต่างๆ

**3.2.3 ปริมาณตัวดูดซับต่อประสิทธิภาพของการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์**

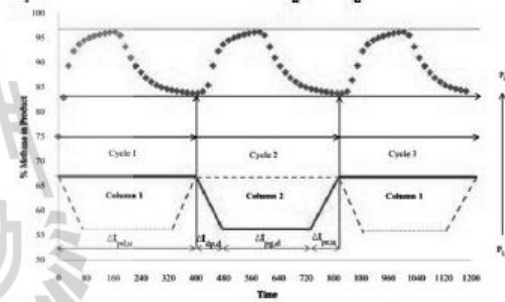
จากรูปที่ 7 ศึกษาผลของปริมาณตัวดูดซับ Molecular sieve Zeolite 13X ต่อประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยทำการทดลองที่สภาวะความดัน 7 bar อุณหภูมิ 4°C และอัตราการไหล 25 ลิตรต่อนาที พบว่าเมื่อปริมาณตัวดูดซับเพิ่มขึ้นจะทำให้ความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นดังนี้ 450g > 300g > 200g



รูปที่ 7 การดูดซับ CO<sub>2</sub> ที่ปริมาณตัวดูดซับต่างๆ

**3.3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของระบบดูดซับสลับความดัน**

การศึกษาประสิทธิภาพของการดูดซับสลับความดัน ทำการทดลองที่ความดัน 7 bar อุณหภูมิ 4°C และอัตราการไหล 25 ลิตรต่อนาที โดยใช้เครื่องวัฏจักรการดูดซับ 400 วินาที สำหรับ Zeolite 13 X พบว่ากระบวนการดูดซับสลับความดันที่ใช้ Molecular sieves Zeolite 13X สามารถเพิ่มสัดส่วนของก๊าซมีเทนได้ถึงร้อยละ 82-96 กระบวนการปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพสามารถดูได้ดังรูป 4.18



รูปที่ 8 กระบวนการปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพ

ตารางที่ 3 กระบวนการปรับปรุงคุณภาพก๊าซ ชีวภาพด้วยการดูดซับสลับความดัน

การดูดซับสลับความดัน	Molecular sieve Zeolite 13X	
	เวลา (sec)	ความดัน (bar)
คาบดูดซับ $\Delta t_{pd,u}$	400	7
คาบปรับลดความดัน $\Delta t_{dp,d}$	51	7 $\rightarrow$ -1
คาบย่อยไล่ก๊าซ $\Delta t_{pg,d}$	370	-1
คาบเพิ่มความดัน $\Delta t_{pr,u}$	210	-1 $\rightarrow$ 7
องค์ประกอบก๊าซผสม (%)	4-18 CO <sub>2</sub>	82-96 CH <sub>4</sub>

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบเครื่องปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพ (Pressure Swing Adsorption)

คุณสมบัติ	หน่วย	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง
Methane	%	68-70	82-96
Carbon dioxide	%	30-32	4-18
Heating Value	MJ/m <sup>3</sup>	24.34-25.06	29.35-34.37
Wobbe index	-	26.15-27.24	34.37-44.63



การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13  
4-5 เมษายน 2555 จังหวัดเชียงใหม่

#### 4. สรุป

การปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพด้วยการดูดซับ สลับความดันเป็นการศึกษาวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพของก๊าซชีวภาพให้มีความหลากหลายในการใช้งานมากขึ้น โดยทำการศึกษาผลของความดัน อุณหภูมิ และปริมาณตัวดูดซับ ที่เปลี่ยนแปลงไปกับประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เจือปนอยู่ในก๊าซชีวภาพ พบว่าความดัน อุณหภูมิ และปริมาณตัวดูดซับมีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ โดยเมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับ ความดัน และลดอุณหภูมิของระบบจะทำให้ระบบสามารถดูดซับได้ดีขึ้น และจากการศึกษาประสิทธิภาพของการดูดซับพบว่า ระบบสามารถเพิ่มสัดส่วนของก๊าซมีเทนได้ถึงร้อยละ 82-96

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานการอุดมศึกษาที่ให้การสนับสนุนงบประมาณในงานวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2552). ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน เรื่องกำหนดลักษณะและคุณภาพของก๊าซธรรมชาติสำหรับยานยนต์ พ.ศ. 2552. [ออนไลน์] <http://elaw.doeb.go.th/doeb>.
- [2] เตชา ฉัตรศิริเวช.(2552). กระบวนการดูดซับ. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2552.
- [3] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน.(2554).[ออนไลน์] <http://www.energy.go.th>.

## ประวัติผู้เขียน

นายปภัศ ชนะโรค เกิดเมื่อวันที่ 24 มีนาคม พ.ศ. 2521 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร เป็นบุตรคนที่ 3 ของ ร.ต.อ.หญิง สีดา ชนะโรค และ นาย ฉัฐคนัย ชนะโรค สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษาจากโรงเรียนสวนบัว เมื่อปี พ.ศ. 2532 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นและมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนวัดบวรนิเวศ เมื่อปี พ.ศ. 2538 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อปี พ.ศ. 2548 ปัจจุบันรับตำแหน่งวิศวกรและผู้ช่วยวิจัยประจำศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งได้ปฏิบัติงานเกี่ยวกับการวิจัยและพัฒนาพลังงานชีวมวลเพื่อใช้เป็นพลังงานหรือวัตถุดิบทดแทน และเมื่อปี พ.ศ. 2550 ได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

