

บทที่ 2

ทฤษฎีและสรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง

2.1 ก๊าซชีวภาพ

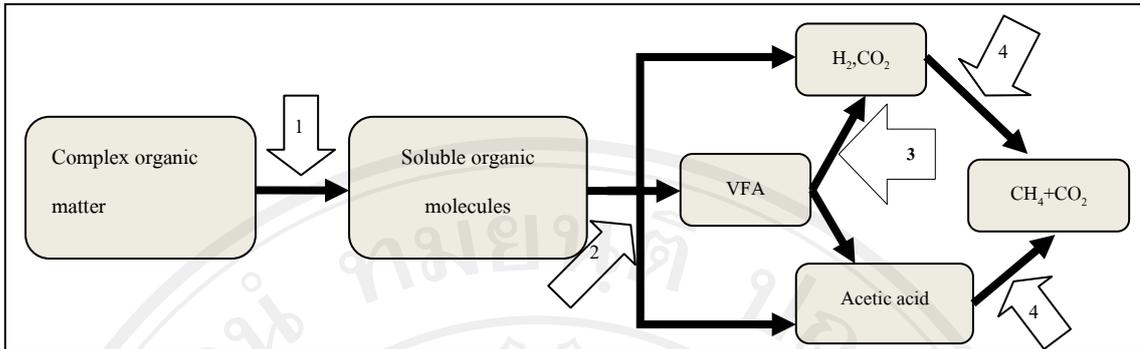
ก๊าซชีวภาพเป็นก๊าซที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์หรือชีวมวล โดยอาศัยแบคทีเรียชนิดไม่ใช้ออกซิเจนในสภาวะไร้อากาศ (anaerobic process) ทำให้สารประกอบอินทรีย์เกิดการเปลี่ยนแปลงกลายเป็นก๊าซ ซึ่งองค์ประกอบหลักของก๊าซชีวภาพคือ ก๊าซมีเทน (CH_4) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) นอกจากนี้ยังประกอบด้วยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ก๊าซไนโตรเจน (N_2) และก๊าซออกซิเจน (O_2) ในสัดส่วนเล็กน้อย โดยความเข้มข้นขององค์ประกอบก๊าซชีวภาพแสดงดังตารางที่ 2.1

ตาราง 2.1 ความเข้มข้นขององค์ประกอบก๊าซชีวภาพ (Electrigaz Technologies, 2008)

องค์ประกอบก๊าซชีวภาพ	ความเข้มข้นในก๊าซชีวภาพ
ก๊าซมีเทน	50 – 80 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	20 – 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร
ก๊าซแอมโมเนีย	0 – 300 ส่วนต่อล้านส่วน
ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์	50 – 5000 ส่วนต่อล้านส่วน
ก๊าซไนโตรเจน	1 – 4 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร
ก๊าซออกซิเจน	< 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร
ความชื้น	อิมดัว 2 – 5 เปอร์เซ็นต์โดยมวล

2.1.1 กระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพเกิดจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศ โดยหลักการของการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน คือ ทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ในของเสียที่มีโมเลกุลใหญ่ ๆ ไปเป็นสารที่มีโมเลกุลเล็กลงเรื่อย ๆ ดังรูปที่ 2.1 โดยอาศัยปฏิกิริยาชีวเคมีของกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรียในสภาพไร้ออกซิเจนแบ่งออกได้ 4 ขั้นตอนดังนี้



รูป 2.1 ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน (สุบัตินิต นิมรัตน์, 2548)

ก. ขั้นตอนที่ 1 ปฏิกริยา Hydrolysis

ขั้นตอนที่ 1 ปฏิกริยา Hydrolysis ขั้นตอนนี้เป็นกระบวนการที่จุลินทรีย์ปล่อยเอนไซม์ออกมาภายนอกเซลล์ เพื่อย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อนและมีโมเลกุลขนาดใหญ่ (แป้ง โปรตีน และไขมัน) ให้กลายเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีโมเลกุลอย่างง่าย (กลูโคส กรดอะมิโน และกรดไขมัน)

ข. ขั้นตอนที่ 2 ปฏิกริยา Acidogenesis

ขั้นตอนที่ 2 ปฏิกริยา Acidogenesis ซึ่งสารประกอบอินทรีย์ที่มีโมเลกุลอย่างง่ายจะถูกเปลี่ยนเป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่าย ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งกระบวนการที่เกิดขึ้นเป็นกระบวนการหมัก (Fermentation) โดยกลุ่มแบคทีเรียจำพวกอะซิโดเจน

ค. ขั้นตอนที่ 3 ปฏิกริยา Acetogenesis

ขั้นตอนที่ 3 ปฏิกริยา Acetogenesis เป็นปฏิกริยาที่ย่อยสลายกรดอินทรีย์ระเหยง่าย โดยแบคทีเรียอะซิโทเจนีซิส ทำให้ได้กรดอะซิติก ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นสารตั้งต้นที่สำคัญ เพราะมีคาร์บอนจำนวน 1-2 อะตอมเท่านั้น

ง. ขั้นตอนที่ 4 ปฏิกริยา Methanogenesis

ขั้นตอนที่ 4 ปฏิกริยา Methanogenesis ขั้นตอนนี้แบคทีเรียอีกกลุ่มหนึ่งซึ่งเรียกว่าเมทาโนเจน จะทำหน้าที่เปลี่ยนกรดอะซิติกและไฮโดรเจน เป็นก๊าซมีเทน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แบคทีเรียพวกนี้เป็นชนิดที่ต้องอยู่ในสภาพที่ไร้ออกซิเจน ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนนี้จะขึ้นอยู่กับปริมาณของสารอาหารที่กลุ่มแบคทีเรียต้องการ เช่น กรดอะซิติก จากปฏิกริยาที่เกิดขึ้นก่อนหน้านั้น

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซที่ไม่ติดไฟ ดังนั้นการใช้ประโยชน์จากก๊าซชีวภาพเพื่อเป็นเชื้อเพลิงจึงขึ้นอยู่กับก๊าซมีเทนเป็นหลัก โดยก๊าซมีเทนมีน้ำหนักเบากว่าอากาศและอยู่ในสถานะก๊าซที่ความดันและอุณหภูมิโดยปกติ ถ้าหากต้องการให้ก๊าซชีวภาพเปลี่ยนสถานะกลายเป็น

ของเหลว จะต้องใช้ความดันประมาณ 200 บาร์และมีอุณหภูมิกลั่นตัวเป็นของเหลวจะอยู่ที่ -161 องศาเซลเซียสคุณสมบัติอื่นๆของก๊าซชีวภาพ แสดงในตารางที่ 2.2

ตาราง 2.2 ชนิดของก๊าซและคุณสมบัติของก๊าซชีวภาพที่ความดันบรรยากาศและอุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส (สมบูรณ์ ศิริพรมงคลชัย, 2546)

ชนิดของก๊าซ/คุณสมบัติ	CH ₄	CO ₂	H ₂	H ₂ S	60%CH ₄ , 40%CO ₂	65%CH ₄ , 34%CO ₂ , 1%อื่นๆ
ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร)	35.64	-	10.8	22.68	21.6	24.48
สัดส่วนติดไฟ (เปอร์เซ็นต์โดยอากาศ)	5-15	-	4 – 80	4 – 45	6 – 12	7.7 – 23
อุณหภูมิตัดไฟ (°ซ.)	650 – 750	-	585	-	650 – 750	650 – 750
ความดันเปลี่ยนสถานะ (บาร์)	47	75	13	89	75 – 89	75 – 89
อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะ (°ซ.)	-82.5	31.0	-240	100	-82.5	-82.5
ความหนาแน่น (ก./ล.)	0.72	1.98	0.09	1.54	1.2	1.15
ความจุความร้อน (กก./ม. ³ /°ซ.)	1.6	1.6	1.3	1.4	1.6	1.6

2.2 ไบโอมีเทน

ไบโอมีเทน (Biomethane) คือก๊าซชีวภาพที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ โดยการลดปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ความชื้น และก๊าซชนิดอื่นๆ จนมีอัตราส่วนปริมาณของก๊าซมีเทนในองค์ประกอบสูงขึ้น ซึ่งเรียกว่า ก๊าซธรรมชาติแบบทดแทน (Renewable Natural Gas, RNG) และเมื่อมีการอัดลงถังบรรจุก๊าซเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับยานยนต์ (Compressed Biomethane Gas, CBG) โดยสามารถเทียบได้กับก๊าซธรรมชาติที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับยานยนต์ (Natural Gas for Vehicles, NGV) หรือ ก๊าซธรรมชาติแบบอัดความดัน (Compressed Natural Gas, CNG) ที่มาจากก๊าซธรรมชาติ แต่ในปัจจุบันยังไม่มีข้อกำหนดมาตรฐานเฉพาะเพื่อใช้สำหรับการกำหนดคุณภาพของไบโอมีเทน แต่หากกล่าวถึงลักษณะการใช้งานของไบโอมีเทนหรือองค์ประกอบของไบโอมีเทนซึ่งใกล้เคียงกับก๊าซธรรมชาติมาก ดังนั้นมาตรฐานของไบโอมีเทนในปัจจุบันจึงต้องอ้างอิงตามมาตรฐานสากลของก๊าซธรรมชาติเป็นหลัก

ได้แก่ The Society of Automotive Engineers J1616 (SAE J1616), California Air Resources Board (CARB), New Zealand Standard (NZS) และ California Public Utilities Commission (CPUC) ซึ่งแสดงดังตารางที่ 2.3

ตาราง 2.3 มาตรฐานสากลของก๊าซธรรมชาติจากสถาบันต่างๆ ที่มีใช้อยู่ในปัจจุบัน

ส่วนประกอบ	SAE J1616 (1994)	CARB (1992)	NZS 5442 (1999)	CPUC Rule30 (2002)	CARB ร่างใหม่
CH ₄	-	≥88 เปอร์เซ็นต์	-	-	-
C ₂ H ₆	-	≤6 เปอร์เซ็นต์	-	-	-
C ₃₊	-	≤3 เปอร์เซ็นต์	-	-	-
C ₄₊	-	-	-	-	5 เปอร์เซ็นต์
C ₆₊	-	≤0.2 เปอร์เซ็นต์	-	-	-
N ₂	-	-	-	-	-
CO ₂	≤3 เปอร์เซ็นต์	≤0.1 เปอร์เซ็นต์	-	≤3 เปอร์เซ็นต์	-
ก๊าซเฉื่อย (CO ₂ +N ₂ +O ₂)	-	1.5 – 4.5	-	4 เปอร์เซ็นต์	-
กำมะถัน	8 – 30 ส่วนต่อล้าน ส่วน	≤16 ส่วนต่อล้าน ส่วน	50 มก./ม. ³	0.75 เกรน/ 100 ฟ. ³	1 เกรน/ 100 ฟ. ³
เลขมีเทน	-	-	-	-	≥80(ทั้งรัฐ), 73(บางพื้นที่)
ค่าความร้อน	-	-	-	36 – 42.8 เมกะจูลต่อ ลูกบาศก์เมตร 970 – 1150 บีทียู/ฟ. ³	-
ความถ่วงจำเพาะ	-	-	≤0.8	-	-
ดัชนีวอบบี (เม กะจูลต่อตาราง เมตร)	48.5-52.9	-	48-52	±10 เปอร์เซ็นต์	กำหนดยังไม่ ประกาศ

สำหรับการใช้ประโยชน์จากไบโอมิเทนในประเทศไทยไม่ได้มีการกำหนดมาตรฐานของไบโอมิเทน แต่ถ้าหากจะมองจากวัตถุประสงค์การใช้งานซึ่งเน้นที่การใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์สันดาบภายในยานยนต์ ดังนั้นจึงควรอ้างอิงมาตรฐานตามประกาศของกรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงาน เรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของก๊าซธรรมชาติสำหรับยานยนต์ พ.ศ. 2552 แสดงดังตารางที่ 2.4

ตาราง 2.4 ข้อกำหนดและวิธีการทดสอบตามประกาศกรมธุรกิจพลังงาน (กรมธุรกิจพลังงาน, 2552)

ข้อกำหนด	เกณฑ์มาตรฐาน	วิธีทดสอบ
1. จุดน้ำค้างที่ความดัน 20,000 กิโลปาสคาล	≤ 9.2	ASTM 1142
2. จุดน้ำค้างไฮโดรคาร์บอน ที่ความดัน 4,500 กิโลปาสคาล ซึ่งควบแน่นเป็นของเหลวไม่เกิน 1 เปอร์เซ็นต์	≤ 15.5	ASTM 1945 คำนวณ Equation of State และ GRI Method
3. ค่ามีเทน (MN Number)*	≥ 65	
4. ไฮโดรเจน (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร)	≤ 0.1	
5. คาร์บอนไดออกไซด์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร)	≤ 18	
6. ออกซิเจน (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร)	≤ 1.0	
7. คีชีวอบบี* (เมกกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร)	≥ 37 และ ≤ 42	ASTM 3350
8. ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (มก./ม. ³)	≤ 23	ASTM 5504
9. กำมะถัน (มก./ม. ³)	≤ 50	

* หมายเหตุค่ามีเทน (MN Number) คือ ค่าความต้านทานการน็อกของเครื่องยนต์เชื้อเพลิงประเภทก๊าซ โดยค่ามีเทนที่ 100 คือต้านทานมากที่สุด และค่ามีเทนที่ 0 คือต้านทานน้อยที่สุด
คีชีวอบบี คือ ค่าความร้อนที่เข้าสู่หัวเผา หรือค่าความร้อนของก๊าซธรรมชาติ

2.2.1 ข้อดีของไบโอมิเทน

ก. เป็นแหล่งของพลังงานที่สามารถสร้างทดแทนได้ขึ้นมาอย่างเสมอ (renewable energy) ซึ่งแตกต่างจากก๊าซธรรมชาติและน้ำมัน ซึ่งใช้แล้วหมดไป

ข. เมื่อเครื่องยนต์เผาไหม้ไบโอมิเทนแล้วจะปลดปล่อยมลพิษน้อย เมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซลและเบนซิน ดังค่าปัจจัยการปล่อยมลพิษ (Emission factors) ที่แสดงในตารางที่ 2.5

ค. แหล่งผลิตก๊าซชีวภาพในประเทศไทย ซึ่งเป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตไบโอมิเทน มีจำนวนมากและกระจายอยู่ในภูมิภาคต่างๆ ของประเทศซึ่งทำให้ไม่ต้องมีการขนส่งก๊าซเป็นระยะทางไกลเหมือนในกรณีของก๊าซธรรมชาติ

ง. กระบวนการผลิตไบโอมิเทน เป็นการแยกเอาก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นหนึ่งในก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse gases) ที่สำคัญและส่งผลทำให้เกิดภาวะโลกร้อน ออกจากก๊าซชีวภาพ โดยจะได้ผลผลิตเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้มข้น ซึ่งง่ายต่อการจัดการต่อไป

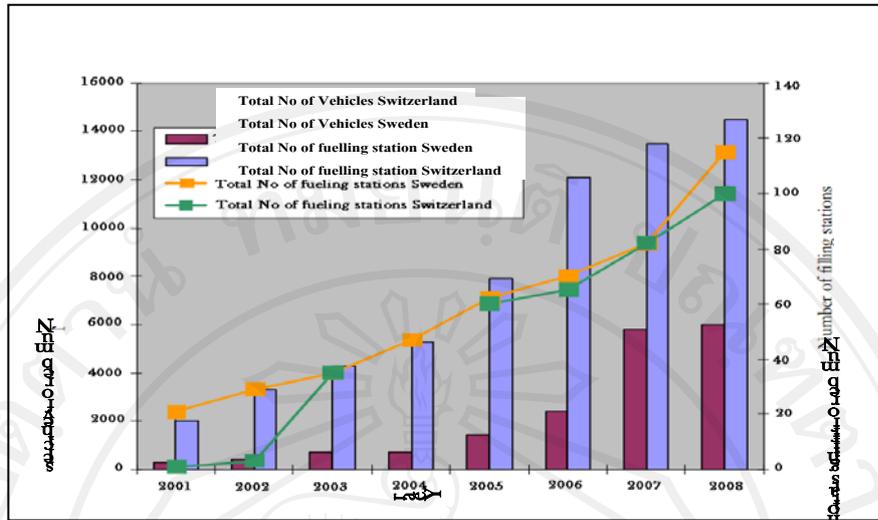
ตาราง 2.5 ปัจจัยการปล่อยมลพิษของยานยนต์ที่มีการใช้เชื้อเพลิงชนิดต่างๆ (Electrigaz Technologie, 2008)

พารามิเตอร์	ปัจจัยการปล่อยมลพิษ	เบนซิน	ดีเซล	CNG (CBG)
CO	ก./กก.	10.9	0.662	6.54
NOx	มก./กม.	559	507	504
SO ₂	มก./กม.	3.5	21.6	3.5
VOC	มก./กม.	662	166	146
TPM	มก./กม.	15.8	68.3	3.2
PM10	มก./กม.	15.5	68.2	3.1
PM2.5	มก./กม.	7.1	55.6	1.4

2.2.2 การใช้ไบโอมิเทนในต่างประเทศ

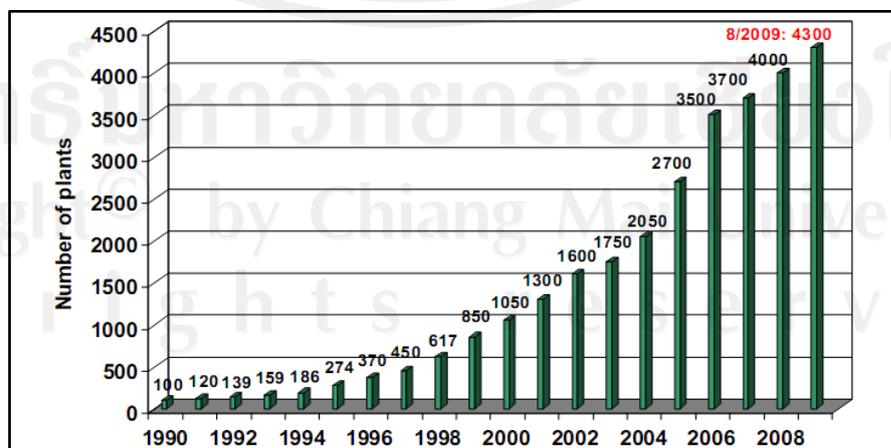
ประเทศสวีเดนเป็นหนึ่งในชาติกลุ่มผู้นำในการผลิตไบโอมิเทนเพื่อใช้ในระบบท่อส่งก๊าซและเชื้อเพลิงของยานพาหนะ โดยในปี พ.ศ. 2551 สวีเดนมีจำนวนยานพาหนะที่ใช้เชื้อเพลิงไบโอมิเทนเพิ่มขึ้นมากกว่า 14,000 คัน ในขณะที่สถานีเติมเชื้อเพลิงไบโอมิเทนมีจำนวนประมาณ 120 สถานี (Kornmann and Wellinger, 2009) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยสวีเดนมีการตั้งเป้าหมายไว้ในปี พ.ศ. 2563 จะผลักดันให้ไบโอมิเทนสามารถที่จะทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลในสัดส่วนร้อยละ 20 (Svensen, 2007)

ปัจจุบันประเทศเยอรมันมีการผลิตไบโอมิเทนเพื่อนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับยานพาหนะและใช้ในระบบท่อส่งก๊าซธรรมชาติ ในปี พ.ศ. 2552 ที่เมือง Güstrow ได้มีการสร้างโรงงานปรับปรุงก๊าซชีวภาพที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในเยอรมันนี้ มีการเลือกใช้เทคโนโลยีแบบการดูดซึมด้วยน้ำ (Pressurized Water Scrubbing, PWS) ในกระบวนการผลิตไบโอมิเทน วัตถุประสงค์ที่ใช้ผลิตเป็นกลุ่มพีซพลังงานในปริมาณ 450,000 ตันต่อปี มีการใช้ถังหมัก 20 ถัง สามารถผลิต Bio-CNG ได้ 46 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี หรือ 160 ล้านกิโลวัตต์ต่อปี (Weiland, 2009) ในปี พ.ศ. 2552 เยอรมันมีโรงผลิตก๊าซชีวภาพอยู่ 4,300 โรง ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งสามารถผลิตพลังงานได้ 1,500 เมกกะวัตต์

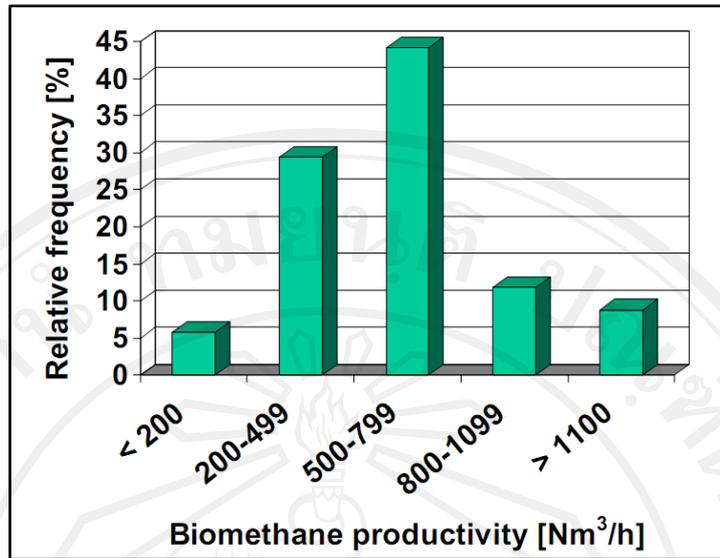


รูป 2.2 ปริมาณยานยนต์ที่ใช้ไบโอมิเทนเป็นเชื้อเพลิงในประเทศสวีเดนและสวีตเซอร์แลนด์ (Kornmann and Wellinger, 2009)

รัฐบาลเยอรมันนี้ได้ตั้งเป้าหมายให้ปี พ.ศ. 2563 จะสามารถผลิตไบโอมิเทนเพื่อทดแทนก๊าซธรรมชาติได้ในปริมาณ 6,000 ล้านลูกบาศก์เมตร ปัจจุบันสำเร็จไปแล้ว 3 เปอร์เซ็นต์ โดยมีโรงผลิตไบโอมิเทน 21 โรง ซึ่งกำลังผลิตเพื่อใช้ในระบบท่อส่งก๊าซ และปี พ.ศ. 2573 จะมีปริมาณไบโอมิเทนประมาณ 10,000 ล้านลูกบาศก์เมตร (Weiland, 2009) เพื่อใช้สำหรับทดแทนก๊าซธรรมชาติ โดยปริมาณการผลิตไบโอมิเทนของโรงงานผลิตแสดงดังรูปที่ 2.4 รัฐบาลยังส่งเสริมการใช้เชื้อเพลิงไบโอมิเทน โดยในปี พ.ศ. 2558 จะมีการยกเว้นภาษีให้สำหรับยานพาหนะที่ใช้เชื้อเพลิงชนิดไบโอมิเทน



รูป 2.3 โรงงานผลิตก๊าซชีวภาพในประเทศเยอรมันนี (Weiland, 2009)



รูป 2.4 ปริมาณการผลิตไบโอมีเทนของโรงปรับปรุงก๊าซชีวภาพจำนวน 34 โรง ในเยอรมันนี้ซึ่งรวมทั้งโรงงานที่กำลังดำเนินงานและกำลังอยู่ระหว่างการก่อสร้าง (Weiland, 2009)

2.3 การปรับปรุงก๊าซชีวภาพในการผลิตไบโอมีเทน

ก่อนการนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์จำเป็นต้องมีการปรับปรุงก๊าซชีวภาพและพิจารณาการกำจัดและลดก๊าซปนเปื้อนอื่นๆ เพื่อเพิ่มความเข้มข้นของมีเทนในก๊าซชีวภาพ ซึ่งจะทำให้ก๊าซมีค่าความร้อนเพิ่มขึ้นจาก 23 เมกกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร เป็น 37-42 เมกกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร (Electrigaz Technologies, 2008) และเป็นไปตามที่ประกาศของกรมธุรกิจพลังงาน เรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของก๊าซธรรมชาติสำหรับยานยนต์ พ.ศ. 2553 โดยกระบวนการปรับปรุงจะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนหลักๆ ได้แก่ การทำความสะอาดก๊าซชีวภาพ (Biogas cleaning) และการเพิ่มคุณภาพก๊าซชีวภาพ (Biogas upgrading) โดยมักจะมีขั้นตอนลดความชื้นและปรับแต่งคุณภาพก๊าซภายหลัง ดังมีรายละเอียดดังนี้

2.4 การทำความสะอาดก๊าซชีวภาพ (Biogas Cleaning)

ในก๊าซชีวภาพมักจะมีส่วนประกอบไม่พึงประสงค์ ซึ่งทำให้เกิดการกัดกร่อนของเครื่องยนต์ มีความเป็นพิษต่อร่างกายและสิ่งแวดล้อม หรือทำให้เกิดการอุดตันในกระบวนการผลิตไบโอมีเทน จึงจำเป็นต้องมีการทำความสะอาดก๊าซก่อนเข้าสู่ระบบ โดยก๊าซปนเปื้อนที่จำเป็นต้องกำจัด ได้แก่

2.4.1 ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen Sulfide)

ไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นส่วนประกอบหนึ่งในก๊าซชีวภาพ เกิดจากแบคทีเรียย่อยสลายซัลไฟด์ในสารอนินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน ซึ่งเป็นก๊าซพิษอันประกอบด้วยธาตุไฮโดรเจนและกำมะถัน เมื่อสัมผัสกับน้ำหรือไอน้ำจะเปลี่ยนสภาพเป็นกรดกำมะถัน (H_2SO_4) ซึ่งเป็นสาเหตุของการกัดกร่อนโลหะและวัสดุอุปกรณ์ได้ ดังนั้นการลดปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ในก๊าซชีวภาพก่อนนำไปใช้ประโยชน์นั้นจะเป็นผลดีต่อสิ่งแวดล้อมโดยทั่วไปและจะช่วยยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ใช้ก๊าซด้วย (Van Haren and Fleming, 2005) ซึ่งค่าความเข้มข้นสูงสุดของไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่มีในก๊าซชีวภาพสำหรับการใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.6

ตาราง 2.6 ค่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ยอมรับได้ในการใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ (Electrigaz Technologies, 2008)

การนำไปใช้ประโยชน์	ค่าความเข้มข้นสูงสุดของไฮโดรเจนซัลไฟด์
Boiler	1000 ส่วนต่อล้านส่วน
Electrical Generator (CHP)	500 ส่วนต่อล้านส่วน
Vehicle fuel	23 ส่วนต่อล้านส่วน
Grid Injection	4 ส่วนต่อล้านส่วน
Fuel Cell	1 ส่วนต่อล้านส่วน

2.4.2 ออกซิเจน (Oxygen)

ออกซิเจนคือก๊าซในธรรมชาติและจะพบในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนในองค์ประกอบก๊าซชีวภาพในปริมาณเล็กน้อย และในการลดไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยการเติมอากาศซึ่งจะเป็นการเพิ่มปริมาณออกซิเจนในก๊าซชีวภาพสูงให้ขึ้น การกำจัดออกซิเจนยังสามารถกำจัดได้โดยวิธีการแยกด้วยเมมเบรน และการดูดซับแบบ Carbon molecular seive โดยค่าความเข้มข้นสูงสุดของออกซิเจนที่ใช้ไบโอมิเทนในแต่ละประเทศแสดงดังตารางที่ 2.7

ตาราง 2.7 ค่าความเข้มข้นสูงสุดของออกซิเจนของไบโอมิเทนที่ยอมรับได้ (Electrigaz Technologies, 2008)

สถานที่	ความเข้มข้นของออกซิเจนโดยปริมาตร
สวีตเซอร์แลนด์	0.5 เปอร์เซ็นต์
ฝรั่งเศส	0.01 เปอร์เซ็นต์
สวีเดน	1 เปอร์เซ็นต์

ตาราง 2.7 ค่าความเข้มข้นสูงสุดของออกซิเจนของไบโอมิเทนที่ยอมรับได้ (ต่อ) (Electrigaz Technologies, 2008)

สถานที่	ความเข้มข้นของออกซิเจนโดยปริมาตร
เยอรมันนี	3 เปอร์เซ็นต์
บริติช-โคลัมเบีย	0.2 เปอร์เซ็นต์
รัฐมิชิแกน	3 เปอร์เซ็นต์
ประกาศกรมธุรกิจพลังงานฯ	1 เปอร์เซ็นต์

2.4.3 ความชื้น (Moisture)

ก๊าซชีวภาพจากการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนนั้น โดยทั่วไปแล้วจะมีความชื้นเกิดขึ้นมากับก๊าซด้วย ดังนั้นการปรับปรุงคุณภาพก๊าซนั้นจะมีกระบวนการที่ปรับลดความชื้นในก๊าซชีวภาพด้วย โดยความชื้นจะเป็นปัญหาเมื่อกลายเป็นไอน้ำหรือเป็นน้ำแข็งเมื่อผ่านระบบการลดความดัน ซึ่งจะทำให้เกิดการกัดกร่อนและทำให้เกิดอุดตันที่หัวกระจายน้ำของระบบแบบดูดซึมด้วยน้ำ (Water Scrubber) ค่าความชื้นที่กำหนดสำหรับไบโอมิเทนในแต่ละประเทศแสดงดังตารางที่ 2.8

ตาราง 2.8 ค่าความชื้นสูงสุดของไบโอมิเทนที่ยอมรับได้ (Electrigaz Technologies, 2008)

สถานที่	ปริมาณความชื้นสูงสุด
สวีตเซอร์แลนด์	ความชื้น 60 เปอร์เซ็นต์
ฝรั่งเศส	จุดน้ำค้างที่ -5°C .
สวีเดน	จุดน้ำค้าง = อุณหภูมิห้อง -5°C . ถึง 32 มก./ม. ³ ของก๊าซ
เยอรมันนี	จุดน้ำค้างต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง
บริติช-โคลัมเบีย	65 มก./ม. ³ ของก๊าซ
รัฐมิชิแกน	No Condensation
ประกาศกรมธุรกิจพลังงานฯ	$\leq 9.2^{\circ}\text{C}$. ที่ 20,000 กิโลปาสกาล

2.4.4 แอมโมเนีย (Ammonia)

เมื่อแอมโมเนียเกิดการเผาไหม้จะทำให้เกิดไนโตรเจนในรูปไนโตรเจนออกไซด์ โดยปกติเครื่องยนต์ชนิดก๊าซสามารถรับได้มากที่สุดที่ 100 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตรของก๊าซ เฉพาะมาตรฐานไบโอมิเทนสำหรับการส่งเข้าสู่ระบบท่อก๊าซของประเทศสวีเดน ได้กำหนดให้มีค่าแอมโมเนียสูงสุดซึ่งเป็นส่วนประกอบของไบโอมิเทนที่ 20 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตรของก๊าซ โดย

ปกติจะมีแอมโมเนียคงอยู่ในปริมาณที่ต่ำกว่า 1 ล้านต่อล้านส่วน เนื่องจากแอมโมเนียสามารถละลายน้ำได้ ทำให้ถูกกำจัดด้วยการควบแน่นกับพร้อมน้ำและการดูดซับด้วยน้ำ

2.4.5 ฝุ่นละออง (Particulates)

อนุภาคฝุ่นผงและละอองน้ำมันจากคอมเพรสเซอร์อาจพบได้ในก๊าซ โดยอนุภาคเหล่านี้จะถูกกรองที่ 2 – 5 ไมครอน สำหรับวัสดุกรองจะผลิตมาจากกระดาษหรือผ้า

2.4.6 Siloxanes

สารประกอบ Siloxanes สามารถพบได้ในเครื่องสำอางค์ ยาคับกลีน สารปรุงแต่งอาหาร และสบู่ สำหรับ Siloxanes ในก๊าซชีวภาพส่วนใหญ่จะพบจากก๊าซที่เกิดจากหลุมฝังกลบขยะและก๊าซจากโรงบำบัดน้ำเสีย แต่จะไม่พบในก๊าซชีวภาพจากการเกษตรกรรม ซึ่ง Siloxanes จะสะสมและกัดกร่อนลูกสูบและฝาสูบทั้งยังสามารถลดอายุการใช้งานของเครื่องยนต์ โดย Siloxanes สามารถถูกกำจัดได้ด้วยถ่านกัมมันต์และการดูดซับด้วยสารผสมของไฮโดรคาร์บอน แต่ทั้งสองระบบก็มีราคาแพง ส่วนการทำให้ก๊าซเย็นตัวลงจะสามารถกำจัด Siloxanes และน้ำได้พร้อมกัน แต่ก็มีประสิทธิภาพที่ต่ำ ถ้าต้องการให้ระบบมีประสิทธิภาพสูงต้องทำให้อุณหภูมิต่ำถึง -30 องศาเซลเซียส ซึ่งจะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพถึง 99 เปอร์เซ็นต์

2.4.7 ไนโตรเจน (Nitrogen)

ก๊าซชีวภาพจากหลุมฝังกลบขยะจะประกอบด้วยไนโตรเจนในสัดส่วนที่สูงและจะไม่ค่อยพบในก๊าซชีวภาพจากฟาร์ม การกำจัดไนโตรเจนจะค่อนข้างยาก เนื่องจากไนโตรเจนมีคุณสมบัติเป็นก๊าซที่ค่อนข้างเฉื่อย ไนโตรเจนจะส่งผลทำให้ค่าปริมาณความร้อนลดลง สำหรับระบบที่ใช้กำจัดไนโตรเจนคือระบบดูดติดผิวแบบสลับความดัน (Pressure swing adsorption) และระบบทำความเย็น (Cryogenics) ทั้งสองระบบข้างต้นมีค่าใช้จ่ายที่สูง

2.4.8 Halogenated Hydrocarbon

ฮาโลเจนเตเตไฮโดรคาร์บอนสามารถตรวจพบได้จากก๊าซชีวภาพจากหลุมฝังกลบขยะ แต่จะไม่พบในก๊าซชีวภาพจากโรงบำบัดน้ำเสียและขยะอินทรีย์ ซึ่งฮาโลเจนจะก่อให้เกิดการกัดกร่อนและสามารถทำให้เกิดไดออกซินและฟูแรน การกำจัดฮาโลเจนเตเตไฮโดรคาร์บอนสามารถทำได้โดยถ่านกัมมันต์

2.5 การเพิ่มคุณภาพของก๊าซชีวภาพ (Biogas Upgrading)

การปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพมุ่งเน้นเพื่อกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นก๊าซเฉื่อย ซึ่งมีผลต่อการเพิ่มค่าพลังงานต่อปริมาตรในไบโอมีเทน โดยพบว่าถ้าหากมีคาร์บอนไดออกไซด์เจือปนอยู่ในปริมาณสูงเกิน 60 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร จะทำให้เครื่องยนต์เดินสะดุด (Bari, 1996) โดย

ค่าความเข้มข้นสูงสุดของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ขอมให้มีในไบโอมีเทนสำหรับแต่ละประเทศที่กำหนดใช้แสดงดังตารางที่ 2.9

ตาราง 2.9 ความเข้มข้นสูงสุดของคาร์บอนไดออกไซด์ในไบโอมีเทนที่ยอมรับได้ (Electrigaz Technologies, 2008)

สถานที่	ค่าความเข้มข้น CO ₂ สูงสุด
สวีตเซอร์แลนด์	6 เปอร์เซ็นต์
ฝรั่งเศส	2 เปอร์เซ็นต์
เยอรมันนี	6 เปอร์เซ็นต์
บริติช-โคลัมเบีย	2 เปอร์เซ็นต์
สวีเดน	5 เปอร์เซ็นต์ (CO ₂ +O ₂ +N ₂)
รัฐมิชิแกน สหรัฐอเมริกา	2 เปอร์เซ็นต์
ประกาศกรมธุรกิจพลังงานฯ	18 เปอร์เซ็นต์

การปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพ ซึ่งใช้วิธีการในการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากก๊าซชีวภาพ โดยเทคโนโลยีหลักๆ ดังนี้

- การดูดซับแบบสลับแรงดัน (Pressure swing adsorption method)
- การดักจับด้วยสารเคมีโดยใช้สารละลายเอมีน (Chemical scrubbing with amine solvent method)
- การดูดซับด้วยสารละลายเคมี (Chemisorption method)
- การแยกด้วยชั้นเมมเบรน (Membrane separation method)
- การดูดซับด้วยน้ำ (Water absorption method)

นอกจากเทคโนโลยีที่ได้กล่าวมาข้างต้น ยังมีการพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ๆ เพื่อใช้ปรับปรุงคุณภาพของก๊าซชีวภาพ แต่ก็ยังอยู่ในขั้นตอนการพัฒนา เช่น วิธีการปรับปรุงก๊าซชีวภาพด้วยอุณหภูมิต่ำ (Cryogenic upgrading method)

2.5.1 การดูดซับแบบสลับความดัน (Pressure Swing Adsorption Method)

กระบวนการนี้เป็นกระบวนการแยกคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากก๊าซมีเทนโดยการดูดซับด้วย Zeolites หรือ Activated carbon ที่ความแตกต่างของความดันในถังซึ่งจะดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำได้เป็นพิเศษ ส่วนมีเทนก็จะไหลผ่านไป กระบวนการนี้กระทำภายใต้ความดันพอประมาณในการทำหลายๆ ชั้น เพื่อลดพลังงานในการอัดก๊าซ และความดันของก๊าซที่ปล่อยออกมาจะถูกนำไปใช้ในส่วนอื่นๆ ต่อ การลดหรือการสูญหายของมีเทนทำได้โดยมีการ

ออกแบบระบบให้สามารถหมุนวนก๊าซที่ไหลย้อนลงมากลับมาวนซ้ำ (Wellinger and Lindeberg, 1999)

2.5.2 การดักจับด้วยสารเคมีโดยใช้สารละลายเอมีน (Chemical Scrubbing with Amine Solvent Method)

การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายเอมีนถูกใช้อย่างกว้างขวางในภาคอุตสาหกรรมและถูกนำมาขยายขนาดเพื่อใช้ในระบบการแยกคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากก๊าซธรรมชาติ กระบวนการนี้ใช้สารละลายเอมีน คือ monoethanolamine (MEA), diethanolamine (DEA) และ diglycolamine (DGA) โดยสารละลายเอมีนสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยการนำไปผ่านความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 80 – 100 องศาเซลเซียส และมีการลดความดันเพื่อนำคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากสารละลายและนำกลับไปใช้ใหม่ได้

2.5.3 การดูดซึมด้วยสารละลายเคมี (Chemisorption Method)

กระบวนการดักจับนี้จะคล้ายกับการดักจับโดยใช้น้ำ เป็นกระบวนการดักจับเชิงกายภาพ และมีการใช้สารละลายในการดักจับนิยมใช้ในอุตสาหกรรมการแยกก๊าซธรรมชาติและอื่นๆ คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์จะสามารถถูกดักจับได้เป็นอย่างดี โดยจะใช้สารละลายเคมีเช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) (Brettschneider *et al.* 2004) น้ำปูนขาว (Ca(OH)₂) (Yang *et al.* 2008) และ Selexol ซึ่งใช้ความเข้มข้นต่ำและเก็บไว้ได้ความดันเป็นการปรับปรุงคุณภาพในการดักจับสิ่งเจือปนออก นอกจากนั้น น้ำและสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจะถูกดักจับออกจากก๊าซชีวภาพ (Electrigaz Technologies, 2008)

2.5.4 การแยกด้วยชั้นเมมเบรน (Membrane Separation Method)

ในการแยกคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเมมเบรน ก๊าซชีวภาพจะไหลผ่านเมมเบรนโดยตรง ซึ่งเมมเบรนจะมีขนาดของรูพรุนน้อยกว่า 1 นาโนเมตร อัตราการแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ไหลผ่านเมมเบรนมีอัตราสูงกว่าแพร่ของก๊าซมีเทน ทำให้มีเทนถูกแยกและกักเก็บไว้ด้านหนึ่งของเมมเบรนในขณะที่คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ จะผ่านไปอยู่อีกด้านหนึ่งของเมมเบรน โดยปกติจะต่อเมมเบรนแบบอนุกรมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกมีเทน การใช้เมมเบรนได้ถึง 96 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร (Electrigaz Technologies, 2008) แต่มีราคาเมมเบรนค่อนข้างสูง และต้องใช้ความดัน 16 – 40 บาร์ ทำให้สิ้นเปลืองพลังงาน

2.5.5 การดูดซึมด้วยน้ำ (Water Absorption Method)

กระบวนการการดูดซึมด้วยของเหลวเป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางทั้งการคัดแยกและบำบัดก๊าซ โดยจะใช้หลักการของการถ่ายเทมวล (Mass transfer) ทำให้ก๊าซเปลี่ยนรูปไปปรากฏอยู่ในของเหลวการดูดซึมก๊าซด้วยของเหลวจะเกิดขึ้นเมื่อปริมาณก๊าซในของเหลวมีน้อยกว่า

ปริมาณที่ทำให้เกิดสมดุลความเข้มข้นของก๊าซ (Equilibrium concentration) ซึ่งความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นจริงกับความเข้มข้นสมดุลก่อให้เกิดแรงขับเคลื่อน (driving forces) ของการดูดซึม อัตราการดูดซึมจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกายภาพของก๊าซหรือของเหลว และสภาวะของตัวดูดซึม กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิต่ำลง พื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้นสัดส่วนระหว่างของเหลวและก๊าซสูงขึ้น ความเข้มข้นของกระแสก๊าซมากขึ้น ส่งผลให้การดูดซึมจะเกิดได้ดีขึ้น

การดูดซึมเกิดขึ้นได้ทั้งแบบกายภาพและแบบเคมี การดูดซึมแบบกายภาพเกิดขึ้นเมื่อก๊าซที่ถูกดูดกลืนละลายอยู่ในตัวทำละลาย และหากเกิดปฏิกิริยาระหว่างก๊าซที่ถูกดูดกลืนกับตัวทำละลาย นั่นคือเกิดการดูดกลืนแบบเคมี ถ้าก๊าซที่ปนเปื้อนนั้นละลายในของเหลวได้ดี การบำบัดด้วยวิธีการดูดกลืนจะมีประสิทธิภาพสูง (นพภาพร พานิช และคณะ, 2547) และสำหรับก๊าซปนเปื้อนที่ละลายไม่ดีในตัวทำละลาย บางครั้งอาจต้องมีการเพิ่มสารเคมีเข้าไปในระบบเพื่อเพิ่มความสามารถในการละลายของก๊าซที่ปนเปื้อนนั้น สารเคมีเหล่านั้นอาจช่วยให้ก๊าซปนเปื้อนละลายได้มากขึ้น หรือสารเหล่านั้นอาจเกิดปฏิกิริยากับก๊าซปนเปื้อน ดังนั้นการเลือกคุณสมบัติของของเหลวที่ใช้ดูดกลืนควรพิจารณาถึงประสิทธิภาพที่ต้องการและราคาของสารเคมี ซึ่งโดยทั่วไปมักใช้น้ำเนื่องจากก๊าซที่ปนเปื้อนสามารถละลายในน้ำได้ อีกทั้งน้ำยังสามารถหาได้ง่ายและราคาถูก

จากที่กล่าวมาข้างต้นพบว่าแต่ละกระบวนการบำบัดที่ใช้สำหรับการปรับปรุงคุณภาพก๊าซมีทั้งข้อดีและข้อจำกัดแตกต่างกันไป ซึ่งสามารถสรุปไว้ดังตารางที่ 2.10 เมื่อพิจารณาถึงกระบวนการที่สามารถทำการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์พบว่าวิธีการดูดซึมด้วยน้ำ (Water wash) เป็นวิธีที่เหมาะสม โดยสามารถลดก๊าซทั้ง 2 ชนิดไปพร้อมๆ กัน ทั้งยังมีค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานไม่สูงและเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพดี ซึ่งทำให้เห็นว่าระบบนี้มีความศักยภาพที่จะสามารถนำมาพัฒนาให้สามารถปรับปรุงก๊าซชีวภาพเพื่อผลิตไบโอมิเทนได้

ตาราง 2.10 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของเทคโนโลยีดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ลักษณะของระบบ	PSA	Water Wash	MEA	Membrane
ลักษณะการดูดซึม	ดูดติดผิว	ดูดซึมทางกายภาพ	ดูดซึมทางเคมี	แยกด้วยเมมเบรน
ระบบทำความสะอาด	จำเป็น	ไม่จำเป็น	จำเป็น	จำเป็น
ความดัน (บาร์)	4 – 7	4 – 7	บรรยากาศ	16 – 40
ปริมาณก๊าซมีเทนที่สูญเสียไป	3 – 10 เปอร์เซ็นต์	1 -2 เปอร์เซ็นต์	< 0.1 เปอร์เซ็นต์	ไม่มีข้อมูล
ความเข้มข้นของมีเทนที่ทำได้	> 96 เปอร์เซ็นต์	> 97 เปอร์เซ็นต์	> 99 เปอร์เซ็นต์	90 – 94 เปอร์เซ็นต์

ตาราง 2.10 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของเทคโนโลยีดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ต่อ)

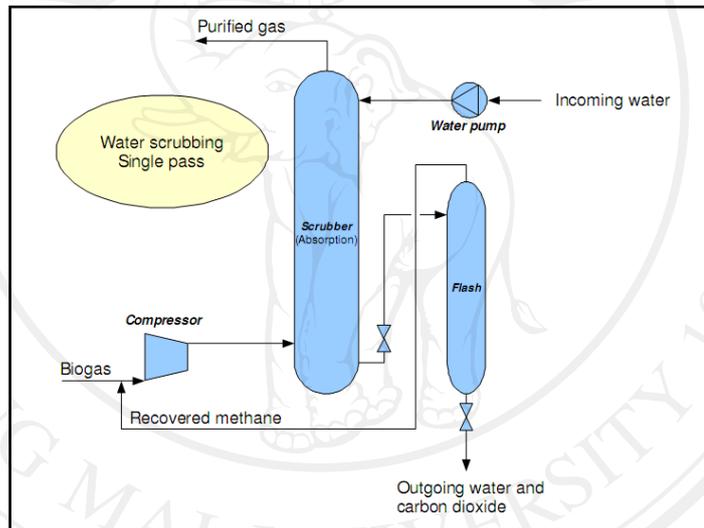
ลักษณะของระบบ	PSA	Water Wash	MEA	Membrane
พลังงานที่ใช้ (กิโวลต์ต่อลูกบาศก์เมตรของก๊าซ)	0.25	< 0.25	< 0.15	ไม่มีข้อมูล
อุณหภูมิของระบบ (°ซ.)	ปกติ	ปกติ	100	ปกติ
การคืนสภาพของสารเคมี	ได้	ได้	ได้	-
พลังงานที่ใช้ในการคืนสภาพสารดูดซึม	พอควร	พอควร	สูงมาก	ไม่มี

2.6 การดูดซึมด้วยน้ำกับก๊าซชีวภาพ

มีการนำกระบวนการดูดซึมด้วยน้ำ หรือ การดักจับด้วยน้ำ (Water Scrubbing or Water wash process) มาใช้เป็นกระบวนการที่ใช้ในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากก๊าซชีวภาพ เพื่อเพิ่มศักยภาพการใช้ประโยชน์ของก๊าซชีวภาพ (Krich *et al.* 2005) โดยกระบวนการดูดซึมด้วยน้ำนั้นจะทำให้ความดันขาเข้าของก๊าซเพิ่มขึ้นในการอัดก๊าซ ดังนั้นการนำก๊าซเข้าด้านล่างของถังแนวดิ่ง ก๊าซชีวภาพจะไหลเข้าไปในบริเวณด้านล่างของถังและไหลขึ้นสู่ด้านบนถัง และมีการปล่อยน้ำเข้าบริเวณด้านบนถัง ไหลลงสู่ด้านล่างของถัง ในถังน้ำกับก๊าซจะสัมผัสกันโดยตรงในการดักจับ

ก๊าซที่ปล่อยออกมาจากถังจะมีมีเทนได้สูงถึงร้อยละ 95 จากการวัดโดยการใช้อิงเดียว และน้ำที่ใช้ในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์แล้วสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เช่น การปล่อยให้สัมผัสกับอากาศโดยตรง ที่ความดันบรรยากาศ หรือการนำกลับไปผ่านถังอีกครั้งให้สัมผัสกับอากาศ โดยคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกปล่อยออกมาและปะปนไปกับอากาศทั่วไป การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการดูดซึมด้วยน้ำ สามารถทำได้โดยการนำก๊าซชีวภาพสัมผัสกับน้ำที่มีความดันสูง ภายในถังที่มีความใส่ตัวกลางเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส (Packed column) ทำให้เกิดการดูดซึมทางกายภาพ (Physical absorption) ของคาร์บอนไดออกไซด์กับโมเลกุลของน้ำ โดยคาร์บอนไดออกไซด์มีความสามารถในการละลายน้ำมากกว่ามีเทนเกินกว่า 10 เท่า (สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์, 2553) จากการศึกษพบว่าระบบนี้สามารถดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ได้เกือบ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยมีเทนที่สูญเสียไปกับการดูดซึมด้วยน้ำมีปริมาณน้อยมาก (< 2 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) เนื่องจากก๊าซมีเทนเป็นโมเลกุลชนิดไม่มีขั้ว ทำให้มีการละลายในตัวทำละลายมีขั้ว เช่น น้ำ หรือแอลกอฮอล์ได้ดี ทำให้ความเข้มข้นของมีเทนในก๊าซชีวภาพที่ผ่านระบบนี้สามารถทำได้อยู่ที่มากกว่า 97 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ระบบนี้จะใช้พลังงานเฉลี่ยประมาณ 0.3 กิโลวัตต์ต่อก๊าซที่ผ่านการบำบัดแล้ว 1 ลูกบาศก์เมตร โดยจัดว่าเป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับระบบดักจับอื่น (Perrson, 2007)

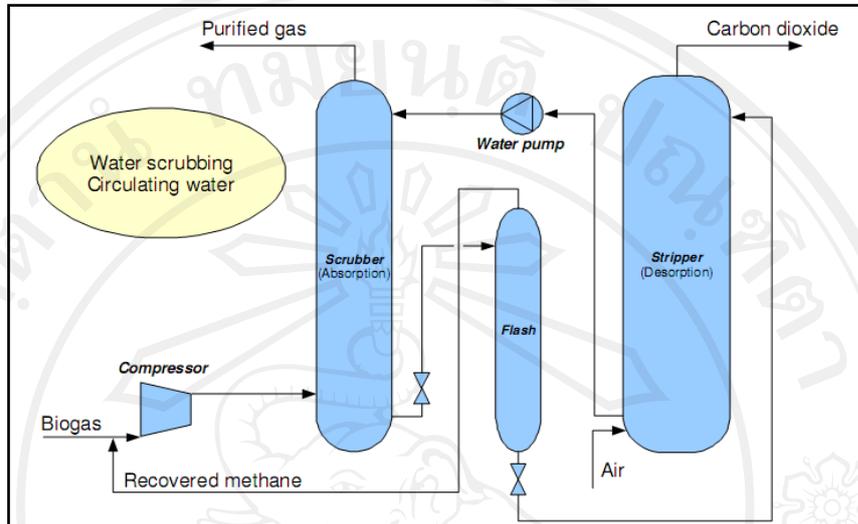
กระบวนการ Water wash ยังแบ่งออกได้เป็น 2 แบบหลักๆ คือ แบบที่ไม่มีการวนน้ำกลับ เพื่อคืนสภาพ (non-regenerative wash) และแบบที่มีการวนน้ำกลับเพื่อคืนสภาพ (regenerative wash) โดยแบบที่ไม่มีการวนน้ำกลับจะนิยมใช้กับบริเวณที่อยู่ใกล้กับแหล่งน้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง โรงบำบัดน้ำเสีย ซึ่งสามารถนำน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วมาใช้ในกระบวนการได้โดยไม่จำกัด และแบบไม่ต้องเสียค่าใช้จ่าย (Electrigaz Technologies, 2008) โดยน้ำที่ผ่านการดูดซึม คาร์บอนไดออกไซด์แล้วจะปล่อยทิ้งไปได้เลย โดยจะมีการคายคาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน และ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกมาส่วนหนึ่ง ในระบบขนาดใหญ่ปริมาณก๊าซมีเทนที่สูญเสียไปมีมากอย่างมีนัยสำคัญ จึงมีการติดตั้งถังพักน้ำ (Flash tank) เพื่อวนเอาก๊าซมีเทนที่ถูกคายออกมากลับเข้าไปในระบบอีกครั้ง เพื่อลดความสูญเสีย ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูป 2.5 ระบบกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยน้ำที่ไม่มีการวนน้ำกลับ (Electrigaz Technologies, 2008)

ระบบดักจับคาร์บอนไดออกไซด์แบบที่มีการวนน้ำกลับ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 จะมีการวนน้ำเข้าไปยังถังคายก๊าซ (Desorber) ซึ่งเป็นถังที่มีการใส่ตัวกลางเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส โดยคาร์บอนไดออกไซด์ถูกคายออกมาเนื่องจากความสามารถในการละลายของก๊าซต่ำลง เมื่อความดันลดลง โดยทั่วไประบบคายก๊าซมักดำเนินการที่ความดันปกติ และมีการเป่าอากาศเพื่อช่วยดึงก๊าซออกจากน้ำ (Air stripping) หรืออาจทำความดันให้เป็นสูญญากาศด้วยการติดตั้งระบบดูดอากาศ ก็ทำให้สามารถดึงก๊าซออกมาได้ง่ายขึ้น น้ำที่ผ่านระบบคายก๊าซแล้วอาจมีการผ่านระบบทำความเย็นเพื่อให้อุณหภูมิของน้ำต่ำลง ทำให้ดูดซึมก๊าซได้ดีขึ้น น้ำที่ผ่านระบบคายก๊าซแล้วอาจมีการผ่านระบบทำความเย็นเพื่อให้อุณหภูมิของน้ำต่ำลง ทำให้ดูดซึมก๊าซได้ดีขึ้น สิ่งที่ต้องระวังในระบบวน

น้ำกลับ คือ การเจริญของเชื้อจุลินทรีย์โดยเฉพาะน้ำที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสีย ซึ่งอาจทำให้เกิดการสะสมอุดตันในท่อและหัวฉีดน้ำได้ ดังนั้นจึงควรมีการเปลี่ยนน้ำเป็นระยะๆ เพื่อป้องกันปัญหานี้



รูป 2.6 ระบบกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยน้ำที่มีการวนน้ำกลับ (Electrigaz Technologies, 2008)

จากการศึกษาอัตราการใช้ในระบบที่ไม่ได้มีการน้ำกลับที่กำลังการผลิตต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.11 พบว่าระบบจะใช้น้ำประมาณ 150 ลิตรต่อก๊าซชีวภาพดิบ 1 ลูกบาศก์เมตร ในขณะที่ระบบที่มีการวนน้ำกลับจะใช้น้ำน้อยกว่าหลายร้อยเท่า ขึ้นอยู่กับความถี่ในการเปลี่ยนน้ำที่ใช้ดูดซึม จากการศึกษาระบบในประเทศสวีเดน ที่มีการวนกลับขนาด 1,400 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง และความดันที่ใช้เป็น 8 บาร์ พบว่ามีอัตราการใช้น้ำประมาณ 2 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง หรือคิดเป็น 1.4 ลิตรต่อก๊าซชีวภาพดิบ 1 ลูกบาศก์เมตร ที่เข้าสู่ระบบ (Perrson, 2007) ระบบที่มีความจึงเหมาะสมกับบริเวณสถานที่ที่มีทรัพยากรน้ำสะอาด

ตาราง 2.11 ปริมาณน้ำที่ใช้ระบบดูดซึมด้วยน้ำแบบไม่วนกลับ (Perrson, 2007)

อัตราก๊าซชีวภาพ (ม. ³ ก๊าซ/ชม.)	ความดันในระบบ (บรรยากาศ)	ปริมาณน้ำ (ม. ³ /ชม.)	ปริมาณน้ำจำเพาะ (ม. ³ /ม. ³ ก๊าซชีวภาพ)
300	10 -13	30	0.1
150	8 -12	30 -35	0.2
80	7.5	11 -14	0.14 – 0.18

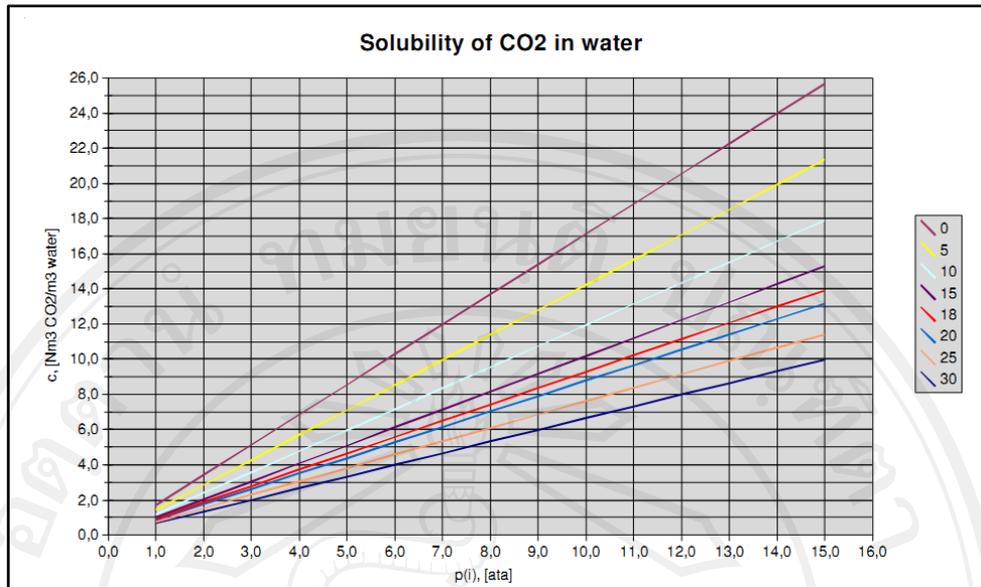
กระบวนการ Water wash ยังสามารถดักจับก๊าซอื่นๆ ได้แก่ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H₂S) และแอมโมเนีย (NH₃) ได้ไปพร้อมกันในช่วงขั้นตอนเดียว โดยทั่วไปแล้วก๊าซที่ผ่านการดูดซึมด้วยน้ำ

จะมีความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ต่ำกว่า 1 ส่วนต่อล้านส่วน (Biomill, 2008) ในกรณีที่การดักจับ H_2S ด้วยน้ำไม่สามารถกำจัดได้หมด เป็นข้อบ่งชี้ว่า ควรจะมีการติดตั้งระบบดักจับซัลเฟอร์เพิ่มเติม เช่น ถังกรองชีวภาพ ผงเหล็ก ก้อนเหล็ก เป็นต้น โดยควรติดตั้งก่อนจะเข้าสู่ระบบ Water wash เนื่องจากไฮโดรเจนซัลไฟด์มีฤทธิ์กัดกร่อน และอาจเกิดการสะสมของกำมะถันอุดตันระบบท่อ โดยเฉพาะในระบบที่มีการวนน้ำกลับ นอกจากนี้ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ยังก่อให้เกิดกลิ่นเหม็น เมื่อถูกคายออกจากถังคายก๊าซ (Biogas Partner, 2009)

ปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เข้าสู่ระบบมีผลต่อประสิทธิภาพของระบบ เนื่องจากไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ละลายน้ำจะเพิ่มแรงตึงผิวของน้ำ ทำให้การกระจายของน้ำบนผิวของตัวกลางทำได้ไม่ดีส่งผลให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างก๊าซกับของเหลวต่ำลง (Electrigaz Technologies, 2008) โดยความเข้มข้นสูงสุดที่ระบบจะรับได้ คือ 1500 ส่วนต่อล้านส่วนในกรณีที่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ของก๊าซที่เข้าสู่ระบบสูง อาจแก้ไขได้โดยการเติมสารลดแรงตึงผิวลงไปในระบบเพียงเล็กน้อย โดยในสวีเดนมีการใช้สารที่มีชื่อว่า Kontra spum ในการลดแรงตึงผิว ด้วยอัตรา 1/4 ลูกบาศก์เมตรต่อสัปดาห์ สำหรับระบบดูดซึมกำลังการผลิตขนาด 650 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

จากรูปที่ 2.7 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มความดันให้สูงขึ้น การละลายน้ำของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะเพิ่มสูงขึ้น แต่ถ้าหากอุณหภูมิของน้ำเพิ่มสูงขึ้น การละลายน้ำของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะต่ำลง โดยความสัมพันธ์ของค่าการละลายของก๊าซจะมีลักษณะเป็นเส้นตรง โดยความสามารถในการละลายของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จะมีค่าการละลายน้ำน้อยกว่าที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส ทำให้การดูดซึมจะเพิ่มขึ้นได้ดีที่ความดันสูง และอุณหภูมิต่ำ ดังนั้น ประสิทธิภาพของระบบ Water wash ขึ้นอยู่กับสภาวะอุณหภูมิและความดันภายในถังเป็นหลัก

คุณภาพของน้ำที่ใช้เป็นตัวดูดซึมก็มีผลต่อการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเช่นกัน เช่น หากน้ำมีสภาพเป็นด่างสูง ก็ส่งผลให้การดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีขึ้น เพราะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีคุณสมบัติเป็นกรดอ่อน จึงทำปฏิกิริยาทางเคมีได้ดีกับน้ำที่มีความเป็นด่างได้ดี หรือถ้ามีปริมาณเกลือหรือไอออนที่ไม่ทำปฏิกิริยากับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มาก ความสามารถในการละลายน้ำของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก็จะต่ำลง แต่คุณภาพของน้ำก็มีอิทธิพลน้อยกว่าอุณหภูมิ และความดันมาก เนื่องจากการดูดซึมทางกายภาพ

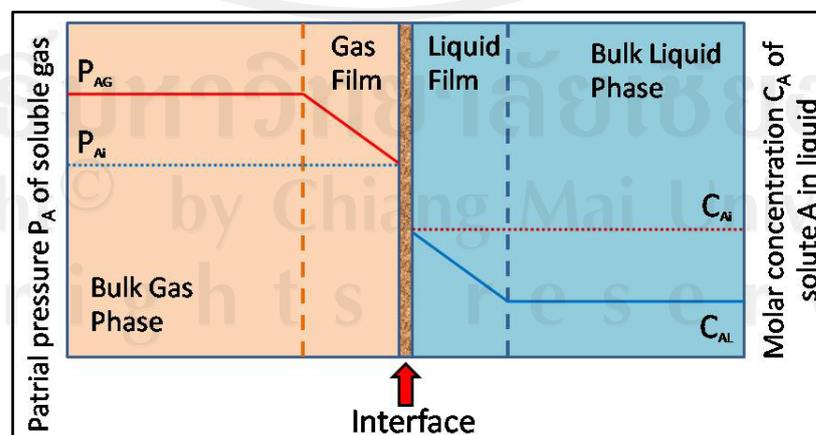


รูป 2.7 ความสามารถในการละลายน้ำของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ
(Electrigaz Technologies, 2008)

2.7 กลไกการดูดซึม (Mechanism of Absorption)

2.7.1 การถ่ายเทมวล (Mass Transfer)

กระบวนการดูดซึมเป็นการถ่ายเทมวล และมีพื้นฐานมาจากทฤษฎีฟิล์มสองชั้นที่ใช้อธิบายกระบวนการดูดซึม แบบจำลองของทฤษฎีฟิล์มสองชั้นกล่าวถึงการถ่ายเทมวลที่มีอยู่ในสถานะก๊าซและของเหลวบริเวณระหว่างรอยต่อที่ผิวของทั้ง 2 สถานะ (Warren *et al.* 2005) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งการถ่ายเทมวลจะประกอบด้วยกัน 2 ส่วน คือ ส่วนของก๊าซและส่วนของเหลว สำหรับทฤษฎีฟิล์มสองชั้นจะกล่าวในหัวข้อที่ 2.7.1.1ต่อไป



รูป 2.8 เกรเดียนต์ของความเข้มข้นที่ใกล้กับรอยเชื่อมต่อระหว่างก๊าซกับของเหลว

(Coulson *et al.* 1996)

2.7.2 ทฤษฎีฟิล์มสองชั้น (Two-Film Theory)

ในกระบวนการคัดแยกส่วนใหญ่ วัตถุประสงค์แพร่กระจายจากสถานะหนึ่งเข้าสู่สถานะอื่นๆ และอัตราการแพร่กระจายทั้งสองสถานะส่งผลต่ออัตราการถ่ายเทมวลรวม ในทฤษฎีฟิล์มสองชั้นจะสมมติให้มีการผสมอย่างสมบูรณ์ทั้งในส่วนของก๊าซและของเหลว รวมถึงค่าความต้านทานการถ่ายเทมวลทั้งหมด เมื่อเกิดการแพร่กระจายโมลผ่านเนื้อฟิล์มที่กั้นระหว่างสถานะก๊าซและสถานะของของเหลว ค่าความดันหรือความเข้มข้นของก๊าซจะเปลี่ยนจาก P_{AG} เป็น P_{Ai} ที่บริเวณผิวระหว่างฟิล์มทั้งสอง ในกรณีเดียวกันค่าความเข้มข้นของของเหลวจะเปลี่ยนจาก C_{Ai} เป็น C_{AL} ค่าอัตราส่วนการถ่ายเทมวลจะมีค่าเท่ากับปริมาณโมลโมเลกุลของสาร A ในเวลาที่เกิดแรงต้านทานการถ่ายเทมวลของสาร A ในเนื้อฟิล์ม จะเป็นตามสมการที่ 2-1 และ 2-2 (นพภาพร พานิช และคณะ, 2547)

$$N_A = k_g(p_{AG} - p_{Ai}) \quad (2-1)$$

$$N_A = k_l(C_{AG} - C_{Ai}) \quad (2-2)$$

เมื่อ N_A คืออัตราส่วนของการเคลื่อนย้ายองค์ประกอบของสาร A, กรัมโมลต่อชั่วโมงต่อตารางเมตร

k_g คือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของสถานะก๊าซ, กรัมโมลต่อชั่วโมงต่อตารางเมตรต่อปาสกาล

K_l คือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของสถานะของเหลว, กรัมโมลต่อชั่วโมงต่อตารางเมตรต่อปาสกาล

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ k_g และ k_l บอกถึงค่าความต้านทานการไหลของตัวถูกละลายที่มีการถ่ายเทมวลทะลุผ่านผิวเนื้อฟิล์ม (นพภาพร พานิช และคณะ, 2547) สมการทั้งสองมีความแตกต่างกันในการใช้งาน เนื่องจากไม่สามารถวัดค่าความเข้มข้นที่บริเวณรอยต่อระหว่างเนื้อฟิล์มทั้งสองได้ ดังนั้นการถ่ายเทมวลที่สถานะสมดุลและรวมค่าความต้านทานของแต่ละเนื้อฟิล์มที่มีอยู่ทั้งหมดเข้าด้วยกัน ถ้าหากเส้นสมดุลเป็นเส้นตรง อัตราการดูดซึมจะเป็นตามสมการที่ 2-3 และ 2-4

$$N_A = K_{OG}(p_{AG} - p_{A^*}) \quad (2-3)$$

$$N_A = K_{OL}(C_{A^*} - C_{A_i}) \quad (2-4)$$

เมื่อ p_A^* คือความดันที่จุดสมดุลของตัวทำละลาย A

C_{A^*} คือความเข้มข้นที่จุดสมดุลของตัวทำละลาย A

K_{OG} คือสัมประสิทธิ์พื้นฐานของการถ่ายเทมวลทั้งหมดในสภาวะก๊าซ, กรัม
โมลต่อชั่วโมงต่อตารางเมตรต่อปาสกาล

K_{OL} คือสัมประสิทธิ์พื้นฐานของการถ่ายเทมวลทั้งหมดในสภาวะของเหลว
, กรัมโมลต่อชั่วโมงต่อตารางเมตรต่อปาสกาล

สำหรับจุดสมดุล ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลทั้งหมดจะมีความสัมพันธ์กับค่า
สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของแต่ละสถานะ (นพภาพร พานิช และคณะ, 2547) ดังสมการที่ 2-5
และ 2-6

$$\frac{1}{K_{OG}} = \frac{1}{k_g} + \frac{H}{k_i} \quad (2-5)$$

$$\frac{1}{K_{OL}} = \frac{1}{k_i} + \frac{1}{H \cdot k_g} \quad (2-6)$$

2.8 ความสามารถในการละลายและกฎของเฮนรี (Solubility and Henry's Law)

2.8.1 ความสามารถในการละลาย (Solubility)

ความสามารถในการละลายก๊าซเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการดูดซึม โดยที่ความสามารถ
ในการละลายจะขึ้นกับค่าอุณหภูมิและความดันของระบบเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณก๊าซ
ที่ถูกดูดซึมด้วยของเหลวมีค่าลดลง ในทางกลับกันค่าความดันจะส่งผลกระทบต่อความสามารถใน
การละลายของก๊าซ โดยเมื่อค่าความดันของระบบเพิ่มขึ้น ปริมาณของก๊าซที่ถูกดูดกลืนด้วยน้ำจะมี
ค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

2.8.2 กฎของเฮนรี (Henry's Law)

กฎของเฮนรี ใช้แสดงความสามารถในการละลาย เมื่อความเข้มข้นของตัวถูกละลายถูกทำ
ให้เจือจางลง (นพภาพร พานิช และคณะ, 2547) ซึ่งสมการของเฮนรีเป็นดังสมการที่ 2-7

$$p^* = Hx \quad (2-7)$$

เมื่อ p^* คือความดันย่อยของตัวถูกละลาย ที่สมดุล , ปาสกาล

H คือค่าคงที่ของกฎเฮนรี่ , ปาสคาลต่อสัดส่วนโมล

x คือสัดส่วน โมลของตัวถูกละลายในของเหลว

สมการเฮนรี่สามารถเขียนได้อีกในรูปของสัดส่วน โมลของสถานะก๊าซ ซึ่งมีการใช้กัน
มาก ดังแสดงในสมการที่2-8

$$y^* = Hx \quad (2-8)$$

เมื่อ y^* คือสัดส่วน โมลของก๊าซในสภาวะสมดุลย์กับของเหลว

H คือค่าคงที่ของกฎเฮนรี่, สัดส่วน โมลในสถานะไอต่อสัดส่วน โมลใน
ของเหลว

จากข้อมูลผลการทดลองเกี่ยวกับสมดุลย์ของไอ-ของเหลว สำหรับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์
ก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ และก๊าซมีเทน ในน้ำที่ความดันจากความดันบรรยากาศไปถึง 1,014 ความ
ดันสมบูรณ์ และอุณหภูมิในช่วง 85 องศาฟาเรนไฮต์ ถึง 115 องศาฟาเรนไฮต์ (Arthur and Richard,
1997) สามารถคำนวณหาค่าคงที่ของสมดุลย์ (K) ได้จากสมการที่ 2-9 2-10 และ 2-11 ซึ่งสามารถ
นำไปคำนวณหาค่าคงที่ของกฎของเฮนรี่ได้

$$K_{CH_4} = 306,000/P + 2.19t + 3,910t/P - 145.0AG - 121.6R \quad (2-9)$$

$$K_{CO_2} = -3,500/P + 0.12t + 360.0t/P + 8.30AG - 5,825R/P \quad (2-10)$$

$$K_{H_2S} = 4.53 - 1,087/P + 110.0t/P + 4.65AG \quad (2-11)$$

เมื่อ K คือเศษส่วนโมลในวัฏภาคก๊าซ/เศษส่วน โมลในวัฏภาคน้ำ

P คือความดันของระบบ, ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

t คืออุณหภูมิของระบบ, องศาฟาเรนไฮต์

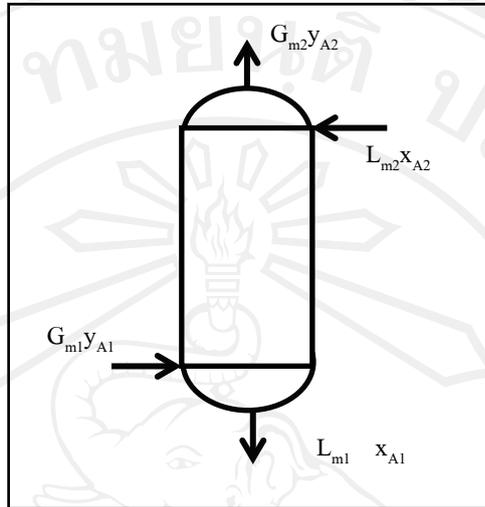
AG คือเศษส่วน โมลของ CO₂ รวมกับ H₂S ในวัฏภาคก๊าซ

R คือเศษส่วน โมลของ H₂S ต่อ AG

2.9 วัสดุเพิ่มพื้นที่ผิว(Packing Materials)

วัสดุเพิ่มพื้นที่ผิว เป็นส่วนประกอบสำคัญของกระบวนการดูดซึม ซึ่งวัสดุจะทำให้เกิด
พื้นที่ผิวจำนวนมากสำหรับการดูดซึม รูปที่ 2.9 แสดงวัสดุเพิ่มพื้นที่ผิวแบบต่าง ๆ โดยวัสดุจะผลิต

เมื่อ x คือเศษส่วนโมลของตัวทำละลายในของเหลว
 y คือเศษส่วนโมลของตัวถูกละลายในก๊าซ



รูป 2.10 สมดุลมวลแบบกระแสไหลสวนทิศทางของกระบวนการดูดซึม (Joseph et al. 2002)

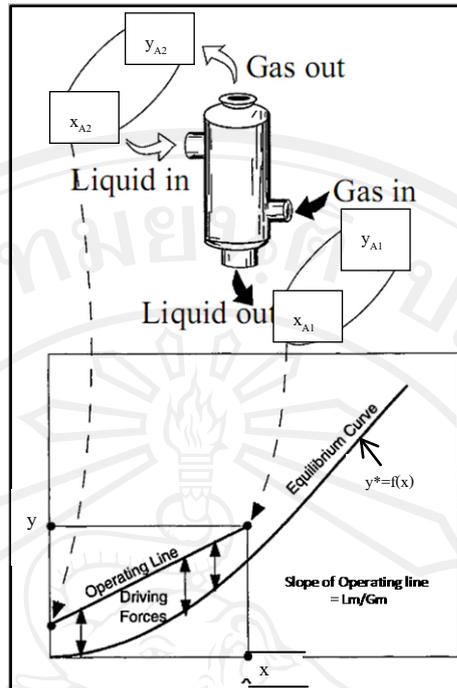
สมมติให้กระแสน้ำของก๊าซและของเหลวที่ไหลผ่านหอคูดซึมนี้น้อยมาก ดังนั้นทำให้ $G_{m1} = G_{m2}$ และ $L_{m1} = L_{m2}$ สมการที่ 2-13 สามารถเขียนใหม่ได้เป็นสมการที่ 2-14 และ 2-15

$$G_m y_{A1} + L_m x_{A2} = G_m y_{A2} + L_m x_{A1} \quad (2-14)$$

หรือ

$$G_m/L_m = (y_{A1} - y_{A2})/(x_{A1} - x_{A2}) \quad (2-15)$$

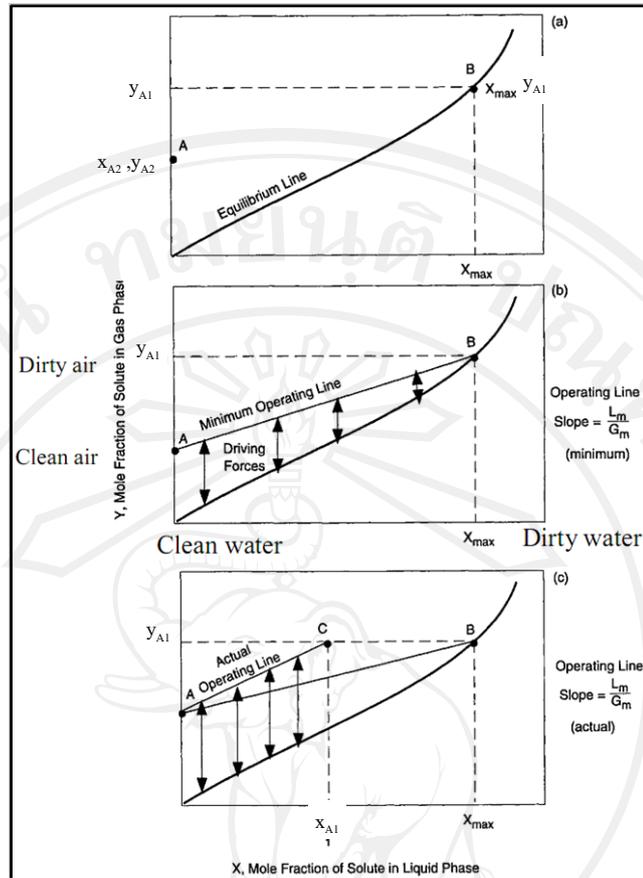
สมการที่ 2-15 เป็นสมการเส้นตรง เมื่อเส้นตรงอยู่ในแผนภาพสมดุลจะเป็นเส้นการปฏิบัติ ซึ่งคือสภาพการใช้งานภายในหอคูดซึม ดังแสดงในรูปที่ 2.11 และความชันของเส้นตรงคืออัตราส่วนระหว่างของเหลวและก๊าซ (Liquid to Gas Ratio) หรือ L_m/G_m ซึ่งใช้อธิบายหรือเปรียบเทียบระบบการดูดซึม ส่วนเส้นสมดุลมาจากความสัมพันธ์เศษส่วนโมลของตัวถูกละลายในของเหลวกับค่าคงที่ของกฎเฮนรี



รูป 2.11 เส้นปฏิบัติการในระบบการดูดซึม (John *et al.* 1995)

2.11 ความต้องการของเหลวในระบบ(Liquid Requirements)

การออกแบบหอดูดซึมโดยมากจะใช้ปริมาณของก๊าซที่ต้องการคัดแยก (G_m) และความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่เข้าระบบ (y_{A1}) เป็นตัวกำหนดสภาพการดำเนินงานของระบบ ค่าความเข้มข้นต่ำที่สุดที่ระบายออก (y_{A2}) และต้องทราบองค์ประกอบของของเหลวในตัวดูดซึม (x_{A2}) หรือสมมติให้มีค่าเป็นศูนย์ในกรณีไม่มีการนำของเหลวกลับมาใช้ใหม่ รูปที่ 2.12(a) เป็นแผนภาพสมดุลและจุดอิมิตัวสำหรับการไหลสวนทิศทางในหอดูดซึม ปริมาณของเหลวน้อยที่สุด ส่วนของความเข้มข้นของตัวถูกละลายในก๊าซที่เข้าสู่ระบบ (y_{A1}) ต้องสมดุลกับความเข้มข้นของตัวถูกละลายในของเหลวที่ออกจากระบบ (x_{max}) ซึ่งที่จุดนี้ (B) ของเหลวที่ออกจากระบบจะอิมิตัวและไม่สามารถละลายได้อีกนอกจากมีการเพิ่มของเหลวเข้าไปอีก ในรูปที่ 2.12(b) แสดงอัตราการไหลที่ต่ำสุดซึ่งเป็นเส้นตรง AB และความชันของเส้นตรง AB เป็นค่า L_m/G_m น้อยที่สุด ส่วนแรงขับเคลื่อนจะลดลงเป็นศูนย์ที่จุด B ปกติอัตราการไหลของของเหลวจะอยู่ในช่วง 25 – 100 เปอร์เซ็นต์ซึ่งมากกว่าความต้องการที่น้อยที่สุด ในส่วนการทำงานของตัวดูดซึมควรอยู่ที่ 50 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมากกว่าอัตราการไหลของของเหลวที่ต่ำที่สุด (John *et al.* 1995) ในรูปที่ 2.12(c) เส้น AC เป็นเส้นตรงที่มีความชัน 1.5 เท่า (John *et al.* 1995) ของค่า L_m/G_m น้อยที่สุด โดยที่เส้น AC ใช้สำหรับสภาพการทำงานของตัวดูดซึม



รูป 2.12 แสดงการกำหนดอัตราการใช้ของเหลวในกระบวนการดูดซึม (John et al, 1995)

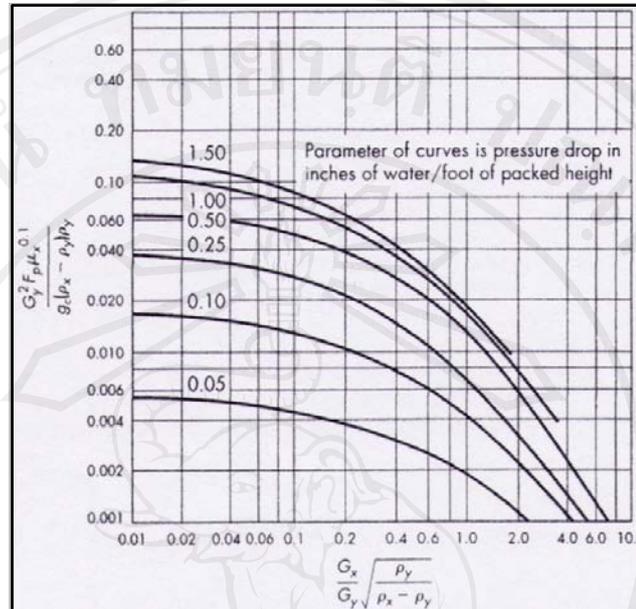
2.12 เส้นผ่านศูนย์กลางหอดูดซึม (Packed Column Diameter)

เส้นผ่านศูนย์กลางของหอจะเลือกขนาดเพื่อให้ได้ความเร็วของก๊าซตามที่ต้องการ ซึ่งความเร็วของก๊าซในหอจะมีค่าต่ำเพียงพอต่อการป้องกันไม่ให้มีมวลมากเกินไปจนความสามารถในการรับของของเหลวหอดูดซึมต้องมีเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงพอเหมาะสมกับก๊าซและของเหลว ทั้งนี้ต้องมีความสูงพอต่อปริมาณของมวลที่จะต้องเคลื่อนย้ายด้วยแรงขับเคลื่อน

พารามิเตอร์ที่มีผลต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์ ก็คือความเร็วของก๊าซที่ทำให้เกิดการสมดุลกับของเหลว ถ้าหากอัตราการใช้ของก๊าซมีสูงกว่าการใช้ของเหลวมาก จะทำให้เกิดช่องว่างที่ไม่สัมผัสกันของก๊าซและของเหลวในวัสดุเพิ่มพื้นที่ผิว

การออกแบบต้องพิจารณาค่าความเร็วในการท่วมของน้ำ (flooding velocity) และความเร็วก๊าซภายในคอลัมน์ควรอยู่ในช่วง 50 – 70 เปอร์เซ็นต์ของ flooding velocity (John et al. 1995) เพื่อให้ได้ความเร็วก๊าซมีค่าต่ำกว่าจุดภาวะบรรทุกันนี้สามารถใช้กราฟ U.S.Stoneware's Generalized Pressure Drop Correlation เพื่อดูความสัมพันธ์ของความเร็วในการท่วมของน้ำ ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.13 ซึ่งค่าความดันของน้ำในหอดูดซึม ควรมีค่าอยู่ในช่วง 0.2 – 0.4 นิ้วน้ำต่อความ

สูงของหอคูดซึมในหน่วยฟุต (นภาพพร พานิช และคณะ, 2547) และมีค่าสูงหรือต่ำนั้นจะขึ้นกับความสามารถในการดูดซึมของตัวดูดซึม



รูป 2.13 ความสัมพันธ์ของความเร็วที่ทำให้ของเหลวท่วมออกกับความดันลด (Warren *et al.*, 2005)

2.13 ความสูงของหอบรรจุตัวกลาง (Packed Column Height)

เมื่อกำหนดเส้นผ่านศูนย์กลางถูกกำหนดแล้ว จากนั้นสามารถหาความสูงของหอได้ ทั้งนี้เพื่อนำไปใช้สำหรับการตัดสินใจเลือกประสิทธิภาพในการดูดซึม ส่วนของความสูงตัวกลางที่บรรจุในหอคูดซึมจะหมายถึงความกว้างของตัวกลางที่จำเป็นต้องใช้เพื่อทำให้เกิดกระบวนการแยกก๊าซที่สมบูรณ์ การคำนวณความสูงของตัวกลางเป็นไปตามสมการที่ 2-16 และ 2-17

$$Z = HTU \times NTU \quad (2-16)$$

หรือ

$$Z = N_{OG} \times H_{OG} = N_{OL} \times H_{OL} \quad (2-17)$$

เมื่อ Z คือความสูงของตัวกลาง, เมตร

HTU คือความสูงของ Transfer Units, เมตร

NTU คือจำนวนของ Transfer Units

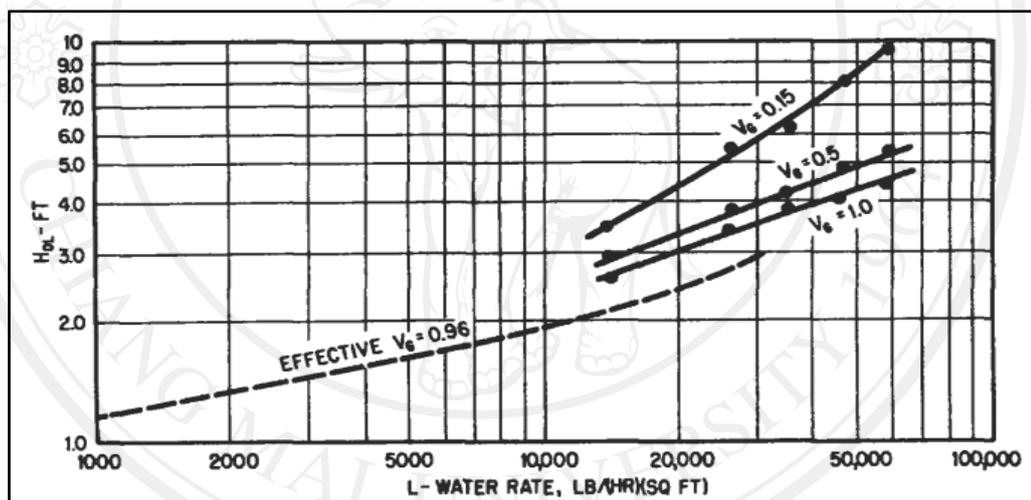
N_{OG} คือจำนวนของ Transfer Units ที่ขึ้นกับประสิทธิภาพของแผ่นฟิล์มก๊าซทั้งหมด

N_{OL} คือจำนวนของ Transfer Units ที่ขึ้นกับประสิทธิภาพของแผ่นฟิล์มของเหลวทั้งหมด

H_{OG} คือความสูงของ Transfer Units ที่ขึ้นกับประสิทธิภาพของแผ่นฟิล์มก๊าซทั้งหมด

H_{OL} คือความสูงของ Transfer Units ที่ขึ้นกับประสิทธิภาพของแผ่นฟิล์มของเหลวทั้งหมด

ค่า H_{OL} สามารถหาได้จากการทดลองหรือกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง H_{OL} กับ อัตราการไหลของ ก๊าซ (กิโลกรัมต่อชั่วโมงต่อตารางเมตร) กับอัตราการไหลของของเหลว (กิโลกรัมต่อชั่วโมงต่อตารางเมตร) ดังรูปที่ 2.14 ซึ่งใช้ตัวกลางแบบ steel rasching rings และ ceramic rasching rings



รูป 2.14 ผลของ Superficial Liquid Flow Rate บนความสูงของหน่วยการถ่ายเทสำหรับการดูดซึมก๊าซ CO_2 ด้วยน้ำ (Arthur and Richard, 1997)

ค่า NTU ในกรณีที่มีความเข้มข้นต่ำและเส้นสมดุลเป็นเส้นตรง สามารถที่จะคำนวณจำนวนของ N_{OG} ที่อยู่ในสถานะก๊าซได้ จากสมการที่ 2-17

$$N_{OG} = \frac{\ln \left[\frac{Y_1 - mX_2}{Y_2 - mX_2} \left(1 + \frac{mG_m}{L_m} \right) + \frac{mG_m}{L_m} \right]}{1 - \frac{mG_m}{L_m}} \quad (2-17)$$

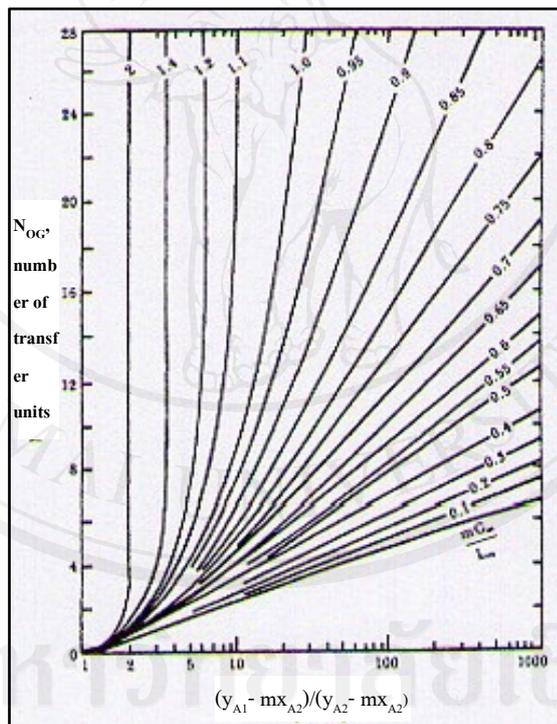
เมื่อ m คือความชันของเส้นสมดุล

G_m คืออัตราการไหลของก๊าซ, กิโลกรัม โมลต่อชั่วโมง

- L_m คืออัตราการไหลของของเหลว, กิโลกรัมโมลต่อชั่วโมง
 X_2 คือสัดส่วนโมลของสารที่ละลายเข้าไปในหอดูดซึม
 Y_1 คือสัดส่วนโมลของสารละลายในก๊าซที่เข้าไป
 Y_2 คือสัดส่วนโมลของสารละลายในก๊าซที่ออกมา

ดังนั้นจากสมการที่ 2-19 สามารถแก้สมการได้โดยตรงหรือหาโดยใช้กราฟ Colburn Diagram ที่แสดงดังรูปที่ 2.15 ซึ่งกราฟ Colburn Diagram เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง N_{OG} กับ $\ln[y_{A1} - mx_{A2}/y_{A2} - mx_{A2}]$ ที่ค่าของ (mG_m/L_m) ต่างๆ ในส่วนของ (mG_m/L_m) นั้นมาจากค่า Absorption factor และจากกราฟที่สามารถหาค่า Absorption Factor จากสมการที่ 2-19

$$A = \frac{L}{mG_m} \quad (2-19)$$



รูป 2.15 แผนภาพของคอลเบิร์น (Colburn) (John *et al.* 1995)

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Kapdi *et al.* (2004) ได้ทำการศึกษาการดูดก๊าซชีวภาพลงถังเพื่อใช้สำหรับยานพาหนะ โดยได้ทำการกรองก๊าซชีวภาพ ในส่วนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) โดยการสเปรย์น้ำ (Water scrubber) ผ่านด้านบนของถังที่มีขนาดเส้นผ่าน

ศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร ความสูง 4,500 มิลลิเมตร และชั้นอัดตัว 3,500 มิลลิเมตร และอัดก๊าซชีวภาพทางด้านล่างของถัง สามารถเพิ่มปริมาณมีเทนจาก 65 เปอร์เซ็นต์เป็น 95 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรหลังจากนั้นได้ทำการอัดก๊าซชีวภาพปริมาณ 43.20 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน (ค่าความร้อน 1,469 เมกกะจูล) ลงถึงขนาด 21.50 ลิตรที่ความดัน 20 เมกกะปาสกาลได้ถึงละ 5.40 ลูกบาศก์เมตร หรือ 3.80 กิโลกรัมต่อถัง (ค่าความร้อน 183.60 เมกกะจูลต่อถัง) รวมจำนวน 8 ถังหรือ 30.40 กิโลกรัม โดยอัตราการอัดลงถึงเท่ากับ 5.40 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงใช้เวลาทั้งสิ้น 8 ชั่วโมง ใช้กำลังในการอัด 5 กิโลวัตต์ โดยใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิง 1.80 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง (ค่าความร้อน 489 เมกกะจูล) และมีต้นทุนในการอัดก๊าซ 5.6 รูปีต่อกิโลกรัม (รวมระบบก๊าซชีวภาพและการอัด) ซึ่งสามารถจำหน่ายได้ในราคา 12.40 รูปีต่อกิโลกรัมหรือ 377 รูปีต่อวัน ในขณะที่สามารถคืนทุนได้ในระยะเวลา 8 ปี หนึ่ง ได้ทำการนำก๊าซชีวภาพที่อัดลงถึงแล้วไปใช้ในรถลาก สามารถวิ่งได้ 100-120 กิโลเมตรต่อวัน ลดการใช้น้ำมันดีเซลได้ 15,768 ลิตรต่อวัน หรือ 0.66 ล้านรูปีและยังลดการปลดปล่อยมลพิษได้มาก พร้อมทั้งช่วยเพิ่มการจ้างงาน ประมาณ 12 คนต่อวัน (1 ดอลลาร์สหรัฐ = 45 รูปี)

Kapdi *et al.* (2005) ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของก๊าซชีวภาพเพื่อนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ โดยได้ทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการใช้น้ำมาปรับปรุงคุณภาพของก๊าซโดยการแยกคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกจากก๊าซชีวภาพ เนื่องจากน้ำมีราคาถูกหาง่าย สามารถทำปฏิกิริยาได้ต่อเนื่องไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของก๊าซชีวภาพที่ผลิตอยู่ในชนบทได้ง่าย โดยงานวิจัยนี้ได้ออกแบบเครื่องดักจับก๊าซแบบ packed bed มีการปล่อยน้ำให้สัมผัสถูกกันโดยตรงกับก๊าซชีวภาพ น้ำเมื่อผ่านกระบวนการแล้วจะถูกปล่อยทิ้งประสิทธิภาพของในดักจับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ถือว่าไม่ดีมากเมื่อเทียบกับสารเคมีอื่น ก๊าซชีวภาพที่ได้จากการแยกแล้วจะถูกเก็บโดยการอัดลงถึงที่ความดันมากว่า 20 เมกกะปาสกาล เพื่อเก็บไว้ใช้ประโยชน์ต่อไป

Hese. (1980) ได้กล่าวถึงการศึกษาเกี่ยวกับแรงดันของก๊าซชีวภาพที่มีผลต่อการกรองก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) โดยใช้ถังทรงกระบอก ทำการสเปรย์น้ำผ่านทางด้านบนชุดเซรามิกส์ และจ่ายก๊าซชีวภาพที่แรงดัน 1 บรรยากาศ ทางด้านล่าง พบว่า CO₂ จะสามารถละลายได้ในน้ำ 1 ลิตร ที่มีสภาพเป็นกลางในปริมาณ 878 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อลูกบาศก์เดซิเมตรที่อุณหภูมิ 293 องศาเซลวิน (878 ซีซีต่อลิตรที่อุณหภูมิ 20 องศาเซียสเซล) ภายใต้อุณหภูมิบรรยากาศ และถ้าเพิ่มความดันเป็น 25 บรรยากาศ จะสามารถละลายได้ 16,000 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อลูกบาศก์เดซิเมตร ดังนั้นแรงดันของก๊าซชีวภาพมีผลต่อการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ สำหรับการลด H₂S จะใช้ผงเหล็ก หรือ เฟอริกคลอไรด์ (Ferric Chloride) ซึ่งสามารถนำกลับมาใช้ใหม่โดยใช้ความร้อน

Rasi *et al.* (2008) ได้ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพ ก๊าซชีวภาพเพื่อให้เป็นเชื้อเพลิงที่ใช้กับยานพาหนะ โดยการใช้วิธีของกระบวนการดูดซึม และใช้ Absorption column ที่มีอัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่าศูนย์กลางอยู่ที่ 3 : 1 ซึ่งโดยทั่วไปมีอัตราส่วนอยู่ที่ 20: 1 ทำการทดลองที่ความดัน 10, 15, 20, 25 และ 30 บาร์ ความเร็วของน้ำที่ 5 และ 10 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลก๊าซที่ 50 และ 100 ลิตรต่อนาที ส่วนคุณสมบัติก๊าซดิบคือ CH₄ มีค่า 53.2 ± 1.4 เปอร์เซ็นต์ CO₂ มีค่า 40.8 ± 10 เปอร์เซ็นต์ O₂ มีค่า 0.4 ± 0.3 เปอร์เซ็นต์ N₂ มีค่า 4.9 ± 1.2 เปอร์เซ็นต์ และ H₂S มีค่า 30 – 120 ส่วนต่อล้านส่วนจากการทดลองพบว่า ที่อัตราการไหลน้ำ 10 ลิตรต่อนาทีที่ความดัน 20 บาร์ค่า CH₄ มีค่า 68 เปอร์เซ็นต์และ CO₂ มีประสิทธิภาพในการกำจัด 90 เปอร์เซ็นต์ที่ความดัน 20 บาร์อัตราการไหลน้ำ 10 ลิตรต่อนาทีและที่ 30 บาร์ที่อัตราการไหลน้ำ 5 ลิตรต่อนาทีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ที่ 3.2–4.8 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับและมี ไนโตรเจน อยู่ที่ 6–7 เปอร์เซ็นต์ส่วนไฮโดรเจนซัลไฟด์ถูกกำจัดไปจนไม่สามารถตรวจวัดได้ และมีเทนมีค่ามากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์โดยจะสูงขึ้นเมื่อความดันสูงขึ้น

Gomez-Diaz *et al.* (2006) ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์การถ่ายเทมวลระหว่างของเหลวและก๊าซ ในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ โดยได้ออกแบบระบบการทดสอบเป็นแบบ Bubble Column ใช้สารละลาย Glucose และ Glucosamine ผสมกันที่ความเข้มข้น 0-0.4 โมลาร์สำหรับการทำปฏิกิริยา ในการทดลองนี้ใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทดสอบที่อัตราการไหล 18 30 และ 40 ลิตรต่อชั่วโมงและจากการศึกษาพบว่า กระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์จะขึ้นอยู่กับอัตราการไหลและความเข้มข้นของสารละลาย โดยสารละลายที่มีอัตราการไหลและความเข้มข้นสูงจะสามารถดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดี และปัจจัยที่มีผลต่อการถ่ายเทมวลระหว่างของเหลวและก๊าซคือการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสารละลาย การไหลวนหรือการไหลแบบราบเรียบเป็นต้น

Pradeep and Marshall. (2010) ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ก๊าซชีวภาพที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกระบวนการ scrubbing เพื่อนำกลับมาใช้ในพลังงานพลศาสตร์ โดยการปรับปรุงก๊าซได้ใช้ระบบจากบริษัทชั้นนำของโลก เป็นเครื่องบำบัด 3 ขั้นตอน ก๊าซชีวภาพที่ทำการทดลองได้จากน้ำชะขยะ ภายใต้ความดันบรรยากาศและภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ (RH 100%) ความชื้นและอนุภาคอื่นๆ ถูกกำจัดออกด้วย Separator ก๊าซดิบจะผ่านเข้า Compressor ที่ความดันสูงเข้า Scrubber ที่ด้านล่างถึง โดย CO₂ และ H₂S จะถูกดูดซึมด้วยน้ำ CH₄ ที่ออก มีค่า 97 – 98 เปอร์เซ็นต์ที่ 100 เปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์และก๊าซที่บริสุทธิ์จะถูกส่งเข้า Drier tank เพื่อส่งไปใช้งานต่อไป โดยก๊าซที่ไม่ผ่านค่ามาตรฐานในถัง Flashing จะถูกส่งวนกลับเข้า Compressor เพื่อทำการปรับปรุงคุณภาพก๊าซอีกครั้ง และน้ำที่ผ่าน Stripper จะมี CO₂ จะถูกกำจัดด้วยความดันอากาศและน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วจะถูกนำกลับไปกระจายใน Scrubber ต่อไป

Martinez(2011) ได้รายงานว่าที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส มีค่าการละลายของก๊าซมีเทน เข้าสู่ น้ำเท่ากับ 0.027 หรือ 20 ส่วนต่อล้านส่วนของโมลต่อบาร์ (1.1 โมลต่อลูกบาศก์เมตรต่อบาร์) การละลายของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่ น้ำเท่ากับ 0.80 หรือ 580 ส่วนต่อล้านส่วนของโมลต่อ บาร์ (32 โมลต่อลูกบาศก์เมตรต่อบาร์) การละลายของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เข้าสู่ น้ำเท่ากับ 2.5 หรือ 1800 ส่วนต่อล้านส่วนของโมลต่อบาร์ (100 โมลต่อลูกบาศก์เมตรต่อบาร์) ซึ่งจะเห็นได้ว่า ก๊าซมีเทนจะละลายเข้าสู่ น้ำได้ยากกว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ก่อน ซ้อนมาก จึงทำให้สามารถที่จะแยกก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกได้ และหากความดันเพิ่มสูงขึ้นจะสามารถทำให้ก๊าซละลายลงสู่ น้ำได้มากยิ่งขึ้น

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องและนำมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยนี้ สามารถสรุปได้ดัง ตารางที่ 2.12

ตาราง 2.12เปรียบเทียบงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยที่ศึกษา

รายการ	Reactor			L/G Ratio	ความดัน ,บาร์	องค์ประกอบ ก๊าซชีวภาพ	Packing
	ϕ ,ม.	สูง ,ม.	ความจุ ,ม. ³				
Kapdi et al. (2004)	0.15	4.5	0.08	0.67-1.8	10	CH ₄ : 60-65% CO ₂ : 35-40%	Resching rings
Hese (1980)	-	-	-	-	1-25	-	-
Rasi et al. (2008)	0.6	1.85	0.52	0.05-0.2	10-30	CH ₄ : 52-55% CO ₂ : 31-51%	Pall rings
งานวิจัยนี้	0.4	3	0.38	0.24-1.05	2 -3	CH ₄ : 50-70% CO ₂ : 30-50%	Pall rings