บทที่ 3
การดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยเพื่อศึกษาถึงสภาวะที่เหมาะสมของระบบปรับปรุงก๊าซชีวภาพ ซึ่งได้ผลิตภัณฑ์ คือ ไบโอมีเทน สามารถแบ่งการทดลองออกเป็นดังนี้ คือ การหาระยะเวลาการเข้าสู่สภาวะสมดุลของระบบการดูดซึมก๊าซชีวภาพ เพื่อให้ได้ไบโอมีเทนที่มีปริมาณความเข้มข้นของก๊าซมีเทนที่ค่อนข้างคงที่ การทดลองเดินระบบด้วยสภาวะการเดินระบบต่างๆ เพื่อให้ทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของไบโอมีเทนที่ผลิตได้ อันได้แก่ ความดันภายในระบบ อัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ และค่า L/G Ratio รวมถึงสภาวะที่ให้ไบโอมีเทนที่มีปริมาณความเข้มข้นของก๊าซมีเทนที่เป็นไปตามประกาศของกรมธุรกิจพลังงาน และการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบปรับปรุงก๊าซชีวภาพ การวิเคราะห์คุณสมบัติของไบโอมีเทน การวิเคราะห์ปริมาณการสูญเสียก๊าซมีเทนในระบบ และหาค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทมวล ซึ่งขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัยดังแสดงตามลำดับได้ดังต่อไปนี้

3.1 สถานที่ในการดำเนินการวิจัยและระบบก๊าซชีวภาพ

สถานที่ดำเนินงานวิจัยสำหรับระบบปรับปรุงก๊าซชีวภาพ นั้นตั้งอยู่บนพื้นที่ของบริษัทโฟร์ทีฟาร์ม อ.ดอยหล่อ จ.เชียงใหม่ ซึ่งเป็นฟาร์มสุกรและมีระบบก๊าซชีวภาพแบบบ่อหมักเร็วน้ำข้น (H-UASB: High Suspension Solid-Upflow Anaerobic Sludge Blanket) โดยระบบก๊าซชีวภาพมีขนาด 4,200 ลูกบาศก์เมตร และมีปริมาณน้ำเสียเข้าสู่ระบบ 800 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ระบบมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเฉลี่ย 2,500 ลูกบาศก์เมตรต่อวันดังแสดงในรูปที่ 3.1

3.2ก๊าซชีวภาพที่ใช้ในการทดลอง

ก๊าซชีวภาพที่ใช้ในการทดลองเป็นก๊าซชีวภาพจริงจากมูลสุกร โดยก๊าซชีวภาพที่ใช้มีคุณสมบัติเบื้องต้นดังตารางที่ 3.1ในการทดลองจะมีการควบคุมปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ไม่ให้เกินกว่า 2,500ส่วนต่อล้านส่วนโดยปริมาตร(สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ , 2552) โดยใช้การกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยฝอยเหล็ก ทั้งนี้เพื่อป้องกันการกัดกร่อนของชุดคอมเพรสเซอร์ และต้องมีก๊าซออกซิเจนและก๊าซไนโตรเจนที่ไม่สูงจนเป็นอุปสรรคต่อการปรับปรุงก๊าซชีวภาพ เพื่อให้ได้ตามมาตรฐานเชื้อเพลิงสำหรับยานยนต์

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

รูป 3.1บ่อก๊าซชีวภาพแบบ H-UASB ณ บริษัทโฟร์ทีฟาร์ม จ.เชียงใหม่

ตาราง 3.1คุณสมบัติเบื้องต้นของก๊าซชีวภาพที่ใช้ทดลองสำหรับระบบปรับปรุงก๊าซชีวภาพ

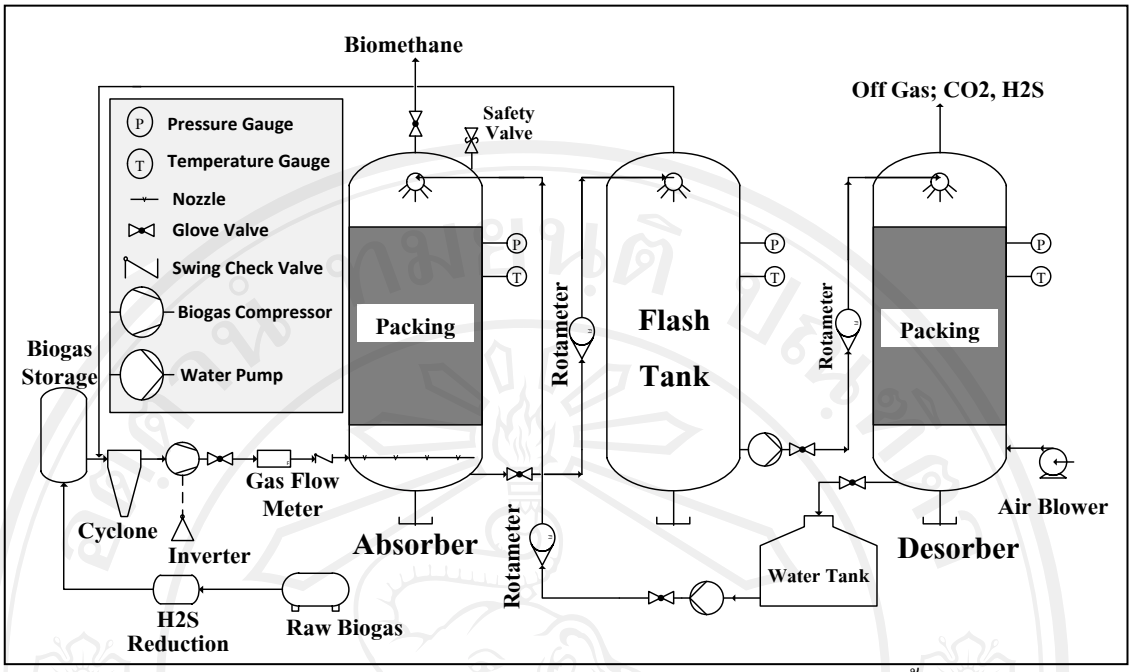
คุณสมบัติ	ปริมาณ
ก๊าซมีเทน (CH_4)	50 – 70 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร
ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S)	< 2,500 ส่วนต่อล้านส่วนโดยปริมาตร
ก๊าซออกซิเจน (O_2)	< 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร
ก๊าซไนโตรเจน (N_2)	< 15 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

3.3 ระบบปรับปรุงก๊าซชีวภาพโดยกระบวนการดูดซึมด้วยน้ำ

ในการทดลองได้ใช้ระบบปรับปรุงก๊าซชีวภาพโดยใช้กระบวนการดูดซึมด้วยน้ำในระดับนำร่อง (pilot scale)ดังรูปที่ 3.2 และหลักการทำงานของระบบปรับปรุงก๊าซชีวภาพได้แสดงดังรูปที่ 3.3

รูป 3.2 ระบบปรับปรุงก๊าซชีวภาพที่ติดตั้ง ณ บริษัทโฟร์ทีฟาร์ม จ.เชียงใหม่

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูป 3.3 ระบบปรับปรุงก๊าซชีวภาพโดยกระบวนการดูดซึมด้วยน้ำ

ขั้นตอนการทำงานของระบบปรับปรุงก๊าซชีวภาพโดยกระบวนการดูดซึมด้วยน้ำ เริ่มจากเครื่องอัดก๊าซทำการดูดก๊าซชีวภาพจากบ่อเก็บก๊าซเพื่อเพิ่มแรงดันที่จะส่งไปยังท่อกระจายก๊าซตรงบริเวณด้านล่างของชุดถังดูดซึม และกระจายก๊าซชีวภาพผ่านวัสดุเพิ่มพื้นที่ผิว ก๊าซชีวภาพจะถูกอัดอยู่ภายในถังดูดซึมที่ความดันภายในถังดูดซึม 2 – 4 บาร์ ซึ่งเป็นความดันของระบบที่ใช้สำหรับการทดลอง และในขณะเดียวกันปั๊มสูบน้ำจะสูบน้ำส่งไปที่หัวสเปรย์ภายในถังดูดซึม เพื่อทำการกระจายน้ำไปยังวัสดุเพิ่มพื้นที่ผิว และน้ำจะไหลลงสู่ท่อน้ำออกทางด้านก้นถังดูดซึม ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จะถูกน้ำดูดซึม โดยที่การไหลระหว่างน้ำและก๊าซชีวภาพจะเป็นแบบการไหลแบบสวนทิศทางกัน ก๊าซชีวภาพที่ผ่านกระบวนการดูดซึมแล้วจะไหลออกทางด้านบนของถังดูดซึม ซึ่งจะมีปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ลดลง

ส่วนของน้ำที่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ละลายปนอยู่ในน้ำจะถูกแรงดันถายในถังดูดซึมส่งไปยังชุดถังคายก๊าซ เพื่อทำหน้าที่คายก๊าซทั้ง 2ชนิดออกจากน้ำ และชุดถังคายก๊าซจะติดตั้งพัดลมเป่าอากาศจากภายนอกถังคายก๊าซ ซึ่งจะช่วยดึงเอาก๊าซที่ละลายอยู่ออกจากน้ำ โดยก๊าซที่ถูกดึงออกจะไหลออกสู่บรรยากาศ ในส่วนของน้ำที่ผ่านการคายก๊าซแล้วจะตกลงสู่ก้นถังคายก๊าซ และไหลไปยังถังพักน้ำเพื่อรอสำหรับการวนกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนดูดซึมด้วยน้ำที่เกิดภายในถังดูดซึม สำหรับก๊าซชีวภาพดิบที่จะเข้าสู่ระบบปรับปรุงก๊าซชีวภาพจะต้องผ่านระบบกรองก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เบื้องต้นและระบบไซโคลนก่อนซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ระบบการกรองก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S Reduction) เป็นระบบที่ลดปริมาณความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ก่อนที่จะเข้าสู่ระบบปรับปรุงก๊าซชีวภาพ ระบบนี้ใช้หลักการ Iron sponge โดยฝอยเหล็กจะทำปฏิกิริยากับ O_2 ได้เป็น Fe_2O_3 ซึ่งจะไปทำปฏิกิริยากับ H_2S ได้เป็น Fe_2S_3(เพ็ญจิตร แสงสุรศักดิ์ และคณะ, 2540) ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.4

รูป 3.4ระบบการกรองก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยฝอยเหล็ก

ระบบไซโคลน (Cyclone)เป็นระบบดักน้ำและอนุภาคต่างๆ ก่อนเข้าสู่ระบบการดูดซึมด้วยน้ำ โดยใช้หลักการแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ระบบไซโคลนทำจากวัสดุสแตนเลส มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 เซนติเมตร สูง 1เมตร ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.5

รูป 3.5ระบบไซโคลน (Cyclone)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

3.4 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่ ระบบดูดซึมก๊าซ ระบบคายก๊าซ และชุดเครื่องมือวัดและบันทึกผลการทดลอง โดยรายละเอียดในแต่ละส่วนมีดังนี้

3.4.1ระบบดูดซึมก๊าซ (Absorber System)

สำหรับระบบดูดซึมก๊าซชีวภาพจะประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆ ดังนี้

ก. ถังดูดซึมก๊าซ (Absorber)

ถังดูดซึมก๊าซถูกสร้างด้วยวัสดุชนิดแสตนเลส มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 เซนติเมตร ความสูง 3เมตร ผนังหนา 5มิลลิเมตร ซึ่งถังดูดซึมจะทำหน้าที่ดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.6 โดยภายในบรรจุตัวกลางแบบ Small Pall Ringเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส

รูป3.6ชุดถังดูดซึมก๊าซ (Absorber)

ข. หัวสเปรย์น้ำ

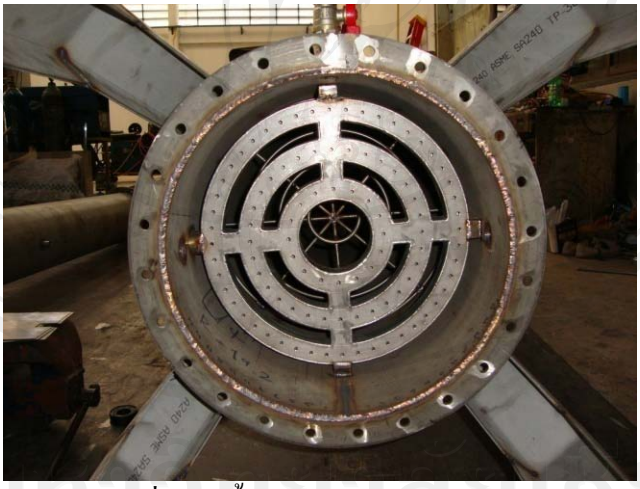
หัวสเปรย์น้ำเป็นแบบกรวยตัน ทำด้วยพลาสติกแบบโพลีอะซิทัล (Polyacetal: POM)ซึ่งรองรับอัตราการไหลน้ำ 15 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง โดยจะสเปรย์น้ำให้เป็นละอองขนาดเล็ก ซึ่งทำให้พื้นที่สัมผัสกับก๊าซเพิ่มมากขึ้นซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.7

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

รูป 3.7หัวสเปรย์น้ำที่จะติดตั้งภายในบริเวณด้านบนของถังดูดซึมก๊าซ

ค. ท่อพ่นก๊าซ

ท่อพ่นก๊าซทำด้วยวัสดุชนิดแสตนเลส เป็นแบบวงกลม 3วง วางซ้อนถัดกันไป ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 20 และ 10เซนติเมตร ตามลำดับ ท่อพ่นก๊าซทั้ง 3 วง จะเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร ที่บริเวณพื้นผิวด้านล่าง จำนวนทั้งหมด 96 รู ท่อพ่นก๊าซทำหน้าที่เป็นตัวกระจายก๊าซชีวภาพเข้าสู่ภายในถังดูดซึมซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูป 3.8ท่อพ่นก๊าซที่จะติดตั้งภายในบริเวณด้านล่างของถังดูดซึมก๊าซ

ง. วัสดุเพิ่มพื้นที่ผิว (Packing Media)

วัสดุเพิ่มพื้นที่ผิวมีหน้าที่เพิ่มพื้นที่ในการทำปฏิกิริยาระหว่างก๊าซชีวภาพกับน้ำ วัสดุเพิ่มพื้นที่ผิวที่ใช้สำหรับการทดลอง คือ ตัวกลางแบบพอลริงขนาดเล็ก (small pall ring media)มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ความสูง 5 เซนติเมตร มีพื้นที่ผิวเฉพาะ 111.1 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร และมีสัดส่วนช่องว่าง (Void fraction) 0.919 โดยจะบรรจุไว้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ภายในถังดูดซึม มีความ สูงประมาณ 2 เมตร จำนวนทั้งหมด 1,396ชิ้น มีปริมาตร 251 ลิตร ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่3.9

ก. ข.

รูป 3.9 วัสดุเพิ่มพื้นที่ผิวแบบพอลริงขนาดเล็กที่ใช้ในถังดูดซึม ก) ลักษณะของพอลริงแบบพลาสติก ข) การจัดเรียงแบบสุ่มของวัสดุเพิ่มพื้นที่ผิวภายในถังดูดซึม

จ. ถังเก็บก๊าซชีวภาพ

ถังเก็บก๊าซชีวภาพทำด้วยวัสดุแสตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 เซนติเมตร สูง 1.4 เมตร หนา 4.5 มิลลิเมตร และมีปริมาตร 160 ลิตรทำหน้าที่เก็บก๊าซชีวภาพเพื่อสำรองจ่ายให้กับระบบดูดซึมด้วยน้ำ ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.10

รูป3.10ถังเก็บก๊าซชีวภาพก่อนเข้าสู่ถังดูดซึม

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ฉ. เครื่องอัดก๊าซ (Gas Compressor)

เครื่องอัดก๊าซที่ใช้ในการทดลองเป็นแบบลูกสูบ (SWAN; Model:SVP-203)จำนวน 2 สูบ และประกอบด้วยมอเตอร์กันระเบิด (Compton)ขนาด 3 แรงม้า ซึ่งใช้ขับสายพานไปยังเครื่องอัดก๊าซแบบลูกสูบ ซึ่งมีอัตราการไหล 355ลิตรต่อนาที ทำหน้าที่อัดก๊าซชีวภาพที่ความดัน 2 – 4 บาร์เกจ ไปยังชุดถังดูดซึมก๊าซ

ง. เครื่องสูบน้ำ

เครื่องสูบน้ำเป็นแบบหอยโข่ง (GSD)ขนาด 5.5 กิโลวัตต์ มีอัตราการไหล 22 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง เฮด38 เมตร

ซ. ถังเก็บน้ำ

ถังเก็บน้ำเป็นแบบถังบรรจุน้ำพลาสติกสีฟ้า ขนาดความจุ 1,000ลิตร จำนวน 1 ถัง ถังเก็บน้ำทำหน้าที่พักน้ำที่มาจากชุดถังคายก๊าซ เพื่อรอส่งน้ำเข้าสู่ชุดดูดซึมก๊าซ

3.4.2ระบบคายก๊าซ (Desorber System)

ระบบคายก๊าซประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ถัง Flash Tank ถังคายก๊าซ และอุปกรณ์อื่นๆ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ก. ถัง Flash Tank

ถังFlash Tank สร้างด้วยวัสดุชนิดแสตนเลส มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60เซนติเมตร ความสูง 2 เมตร ผนังหนา 5 มิลลิเมตร และมีปริมาตร 565 ลิตร ถัง Flash Tankทำหน้าที่คายก๊าซมีเทนที่ละลายติดมากับน้ำให้กลับเข้าสู่ระบบปรับปรุงก๊าซอีกครั้งซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.11

รูป 3.11 ชุดถัง Flash Tank

ข. ถังคายก๊าซ (Desorber)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ถังคายก๊าซ ทำด้วยวัสดุชนิดแสตนเลส มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง30 เซนติเมตร ความสูง2 เมตร ผนังหนา 5มิลลิเมตร และมีปริมาตร 175 ลิตร ภายในถังคายก๊าซจะบรรจุตัวกลางแบบพอลริงขนาดเล็กเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส ตัวกลางมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ชั้นบรรจุมีความสูง 1.5 เมตร และมีหัวพ่นอากาศ และหัวสเปรย์น้ำที่มีลักษณะเหมือนกับถังดูดซึม ถังคายก๊าซทำหน้าที่คายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกจากน้ำที่ออกจากถังดูดซึม ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่3.12

รูป 3.12 ชุดถังคายก๊าซ (Desorber)

ค. วัสดุเพิ่มพื้นที่ผิว

ถังคายก๊าซนี้จะใช้วัสดุเพิ่มพื้นที่ผิวเหมือนกับถังดูดซึม เพื่อทำหน้าที่เพิ่มพื้นที่ในการทำปฏิกิริยาระหว่างอากาศกับน้ำ วัสดุเพิ่มพื้นที่ผิวที่ใช้ คือ ตัวกลางแบบพอลริงขนาดเล็ก (small pall ringmedia) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตรสูง 5 เซนติเมตร ใส่ลงในชุดคอลัมน์คายก๊าซ (Desorber) สูงประมาณ 1.5 เมตร จำนวน 537 ชิ้น ปริมาตร 106 ลิตร

ง. เครื่องสูบน้ำ

เครื่องสูบน้ำเป็นแบบหอยโข่ง (Lucky Pro; Model: MSC80) ขนาด2.2กิโลวัตต์ มีอัตราการไหล 50 – 450 ลิตรต่อนาที เฮด 15 – 33เมตร เครื่องสูบน้ำเครื่องนี้จะทำหน้าที่สูบน้ำถัง Flash Tank ไปยังถังคายก๊าซ

จ. เครื่องเป่าลม (Blower)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

เครื่องเป่าลมที่ใช้เป็นแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์ มีมอเตอร์ขนาด 0.2 กิโลวัตต์ อัตราการไหล 6.5ลูกบาศก์เมตรต่อนาที เครื่องเป่าลมจะทำหน้าที่เป่าอากาศจากภายนอกเข้าสู่ถังคายก๊าซ เพื่อไล่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกจากถังคายก๊าซ

3.4.3 ชุดเครื่องมือวัดและบันทึกผลการทดลอง

เครื่องมือวัดที่ใช้กับระบบปรับปรุงก๊าซชีวภาพ ซึ่งระบบเป็นแบบระดับ pilot scaleโดยชุดอุปกรณ์เครื่องมือตรวจวัดประกอบด้วย เครื่องวัดองค์ประกอบก๊าซชีวภาพ เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพันธ์ เครื่องวัดอัตราการไหลก๊าซชีวภาพและอากาศ เครื่องวัดค่า pHเครื่องวัดแรงดันก๊าซและอุณหภูมิ เครื่องวัดแรงดันน้ำ และเครื่องบันทึกข้อมูล การติดตั้งชุดเครื่องมือวัดแสดงดังรูปที่3.14และรายละเอียดชุดเครื่องมือวัดมีดังนี้

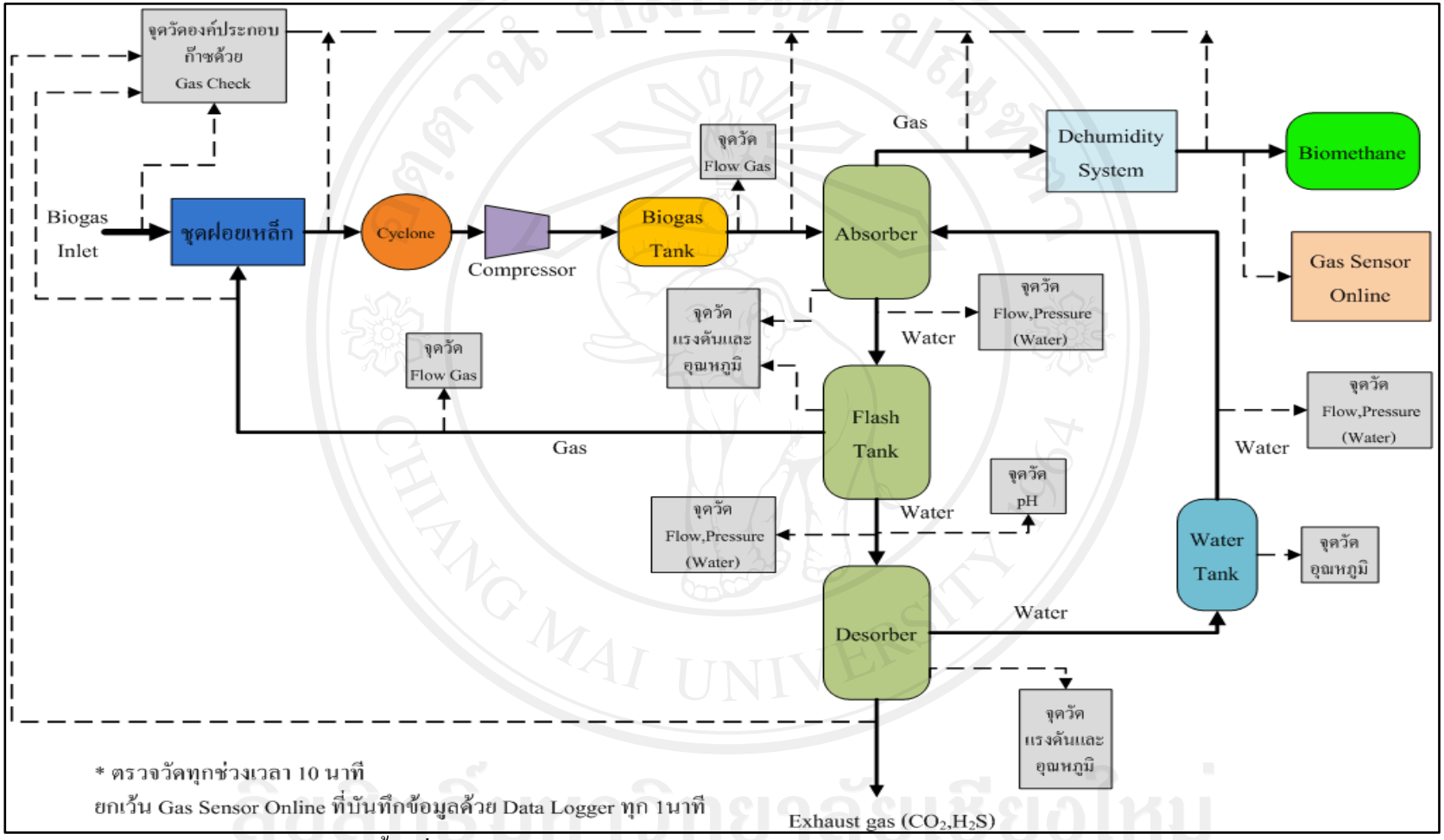
ก. ระบบควบคุมระบบไฟฟ้า

ระบบควบคุมไฟฟ้าหรือตู้ควบคุมระบบไฟฟ้า ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าทั้งหมดของระบบปรับปรุงก๊าซชีวภาพซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่3.13

ก. ข.

รูป3.13ชุดตู้ควบคุมระบบไฟฟ้าภายในระบบปรับปรุงก๊าซชีวภาพ
ก) ตู้ควบคุมไฟฟ้าระบบดูดซึมและคายก๊าซ ข) ตู้ควบคุมไฟฟ้าหลัก

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูป 3.14ตำแหน่งจุดตรวจวัดและจุดติดตั้งเครื่องมือวัด

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ข. เครื่องวัดองค์ประกอบก๊าซชีวภาพแบบพกพา (Portable)

เครื่องวัดองค์ประกอบก๊าซชีวภาพแบบ Portable(Geotech: Biogas Check) ใช้สำหรับวัดปริมาณก๊าซมีเทน มีย่านการวัด 0 – 100 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ย่านการวัด 0 – 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ก๊าซออกซิเจน ที่ย่านการวัด 0 – 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่ย่านการวัด 0 – 5,000 ส่วนต่อล้านส่วนโดยปริมาตร ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.15

รูป3.15เครื่องวัดองค์ประกอบก๊าซชีวภาพแบบพกพา (Portable)

ค. เครื่องวัดองค์ประกอบก๊าซชีวภาพแบบติดตั้งออนไลน์ (Fixed Online)

เครื่องวัดองค์ประกอบก๊าซชีวภาพแบบติดตั้งออนไลน์ (Geotech) ใช้วัดปริมาณก๊าซมีเทน ที่ย่านการวัด 0 – 100 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ย่านการวัด 0 – 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ก๊าซออกซิเจน ที่ย่านการวัด 0 – 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่ย่านการวัด 0 – 5,000 ส่วนต่อล้านส่วนโดยปริมาตร ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.16

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ก. ข.

รูป3.16 เครื่องวัดองค์ประกอบก๊าซชีวภาพแบบติดตั้งถาวร (Fixed online) ก) เครื่องวัดความเข้มข้นก๊าซมีเทน ข) เครื่องวัดความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

ง. เครื่องวัดอัตราการไหลก๊าซ

ในการวิจัยนี้ได้ใช้เครื่องมือวัดอัตราการไหลก๊าซ 2 แบบ คือ เครื่องวัดอัตราการไหลก๊าซ (FCI) ด้วยหลักการ Thermal mass มีย่านการวัด 0 – 1,000 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง และเครื่องวัดอัตราการไหลก๊าซ (Dwyer) เป็นแบบลูกลอย มีย่านการวัด 0-20ลูกบาศก์เมตรของก๊าซต่อชั่วโมง โดยใช้วัดก๊าซก่อนเข้าถังดูดซึมซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.17

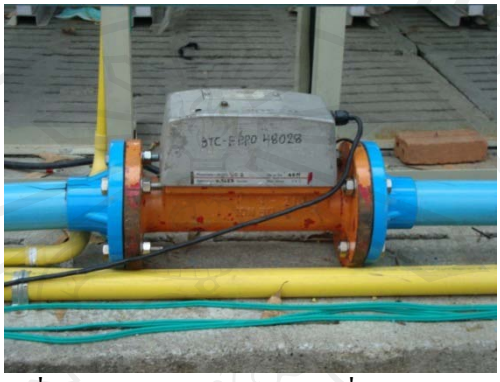
ก. ข.

รูป3.17เครื่องวัดอัตราการไหลก๊าซชีวภาพก่อนเข้าถังดูดซึมก) เครื่องวัดอัตราการไหลแบบ Thermal mass ข) เครื่องวัดอัตราการไหลแบบลูกลอย

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ฉ. เครื่องวัดอัตราการไหลอากาศ

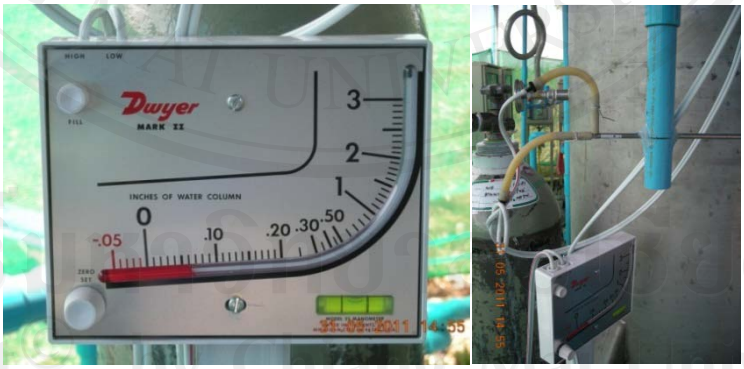
เครื่องวัดอัตราการไหลอากาศ (KOBOLD) ซึ่งเป็นแบบ Oscillator มีย่านการวัด 0 – 110 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงใช้วัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยออกจากถังคายก๊าซซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.18



รูป3.18เครื่องวัดอัตราการไหลอากาศที่ออกจากถังคายก๊าซ

ช. เครื่องวัดอัตราการไหลของไบโอมีเทน

เครื่องวัดอัตราการไหลไบโอมีเทนเป็นแบบ Pitot Tube ใช้ร่วมกับ Inclined manometer (Dwyer) มีย่านการวัด -0.05 ถึง 3 นิ้วน้ำใช้วัดอัตราการไหลไบโอมีเทนที่ผ่านถังดูดซึมไปชุดลดความชื้น ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.19



ก. ข.

รูป3.19เครื่องวัดอัตราการไหลไบโอมีเทนก) เครื่องวัด Inclined manometerข) เครื่องวัดอัตราการไหลแบบ Pitot Tube ที่เชื่อมต่อกับเครื่องInclined manometer

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ซ. เครื่องวัดอัตราการไหลน้ำ

เครื่องวัดอัตราการไหลน้ำเป็นแบบลูกลอย สำหรับชุดถังดูดซึมจะมีย่านการวัด 40 – 200 ลิตรต่อนาที และในชุดถังคายก๊าซมีย่านการวัด 80 – 400 ลิตรต่อนาทีซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.20

ก. ข.

รูป3.20 เครื่องวัดอัตราการไหลน้ำก) เครื่องวัดอัตราการไหลติดตั้งที่ชุดคายก๊าซ ข) เครื่องวัดอัตราการไหลติดตั้งที่ชุดดูดซึมก๊าซ

ฌ. เกจวัดอุณหภูมิภายใน

เกจวัดอุณหภูมิจะติดตั้งสำหรับวัดอุณหภูมิภายในถังดูดซึม ถังคายก๊าซ และถัง Flash Tank โดยเป็นแบบเข็มวัด มีย่านการวัด 0 – 100 องศาเซลเซียส ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.21

ก. ข.

รูป3.21เกจวัดอุณหภูมิภายในถังปฏิกรณ์ก) เกจวัดอุณหภูมิ
ข) การติดตั้งเข้ากับระบบดูดซึมและคายก๊าซ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ญ. เกจวัดความดันก๊าซภายใน

เกจวัดความดันก๊าซภายในถังดูดซึม ถังคายก๊าซ และถัง Flash Tank โดยเป็นแบบเข็มวัด มีย่านการวัด 0 – 5 และ -1 – 7 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.22

ก.ข.ค.

รูป3.22 เกจวัดความดันก๊าซภายในถังปฏิกรณ์ ก) เกจที่ติดตั้งกับชุดดูดซึมก๊าซ ข) เกจที่ติดตั้งกับชุดคายก๊าซค) การติดตั้งเกจเข้ากับถังปฏิกรณ์

ฎ. เกจวัดแรงดันน้ำ

เกจวัดแรงดันน้ำเป็นชนิดเข็มวัด มีย่านการวัด 0 – 5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ทำหน้าที่วัดแรงดันน้ำก่อนเข้าชุดถังดูดซึม และก่อนชุดถังคายก๊าซซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.23

รูป3.23 เกจวัดแรงดันน้ำแบบเข็มวัด

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

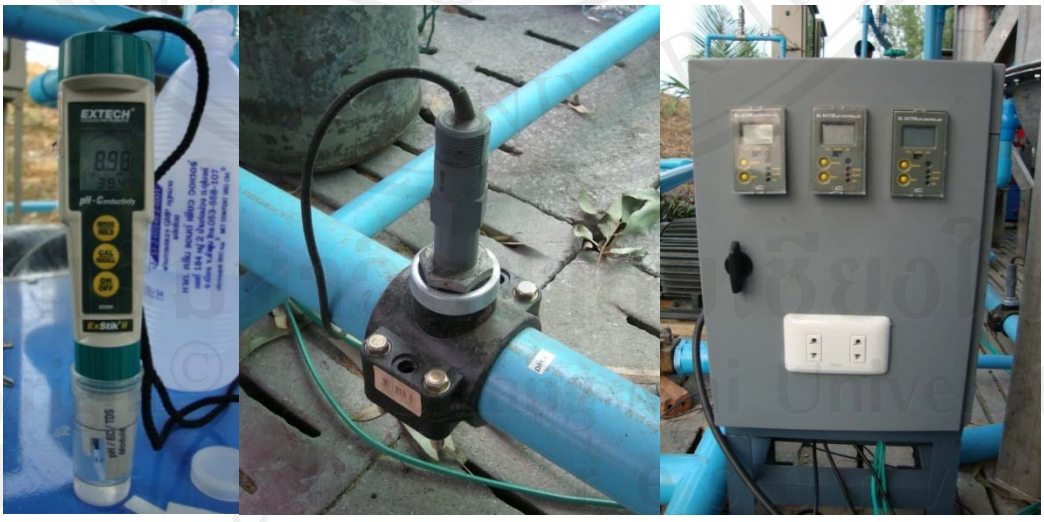
ฏ. เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศ

เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศ มีย่านการวัดอุณหภูมิ 0 – 100 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ มีย่านการวัด 0 – 100 เปอร์เซ็นต์ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.24

รูป3.24 เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศ

ฐ. เครื่องวัดค่าพีเอช

ในการวิจัยนี้ใช้เครื่องมือวัดค่าพีเพช 2 แบบ คือ เครื่องวัดค่าพีเอชแบบพกพา (Extech: ExStik pH 100) มีย่านการวัด 0 – 14 ใช้วัดค่าพีเอชของน้ำ ณ จุดตรวจวัดต่างๆ และเครื่องวัดค่าพีเอชแบบออนไลน์ (Index : ID 1000) มีย่านการวัด 0 – 14 โดยใช้วัดค่าพีเอชก่อนเข้าถังดูดซึม Flash Tank และถังคายก๊าซซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.25



ก. ข. ค.

รูป 3.25เครื่องวัดค่าพีเอชของน้ำก) เครื่องวัดค่าพีเอชแบบพกพา
ข) เครื่องวัดค่าพีเอชแบบออนไลน์ ค) ชุดควบคุมและแสดงผลเครื่องค่าวัดพีเอชแบบออนไลน์

ฒ. เครื่องบันทึกข้อมูลจากการทดลอง (Data Logger)

เครื่องบันทึกข้อมูล (Data Logger) ใช้เก็บบันทึกข้อมูลผลการทดลองที่ได้จากอุปกรณ์การตรวจวัดต่างๆซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.26

รูป3.26เครื่องบันทึกข้อมูล (Data Logger)

ณ. เครื่องวัดจุดน้ำค้าง (Dew Point Meter)

เครื่องวัดจุดน้ำค้าง (Dew Point Meter : Shaw) มีย่านการวัด -80/0องศาเซสเซียสของจุดน้ำค้างซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.27

รูป 3.27 เครื่องวัดจุดน้ำค้าง (Dew Point Meter)

ด. เครื่องวัดองค์ประกอบก๊าซชีวภาพแบบแก๊สโครมาโตกราฟฟี

เครื่องวัดองค์ประกอบก๊าซชีวภาพแบบแก๊สโครมาโตรกราฟฟี (Agilent Technologies : 7890A)ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.28

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

รูป 3.28 เครื่องวิเคราะห์ทางวิทยาศาสตร์ชั้นสูงแบบแก๊สโครมาโตรกราฟฟี

3.5 การทดลองระบบปรับปรุงก๊าซชีวภาพเพื่อผลิตไบโอมีเทน

การทดลองระบบปรับปรุงก๊าซชีวภาพเพื่อผลิตไบโอมีเทน จะมีการทดลองหาระยะเวลาการเข้าสู่สมดุลของระบบและศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างน้ำและก๊าซ รวมทั้งผลของความดันที่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบ จากนั้นจะทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพระบบ คุณสมบัติของไบโอมีเทน รวมถึงการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล ซึ่งขั้นตอนการทดลองเป็นดังนี้

3.5.1 การทดลองหาระยะเวลาการเข้าสู่สภาวะสมดุลของระบบ

การทดลองเพื่อศึกษาหาระยะเวลาการเข้าสู่สมดุลของระบบ โดยดำเนินการทดลองภายใต้แรงดันก๊าซภายในถังดูดซึมคงที่ที่ 3 บาร์เกจ ที่อัตราการไหลของก๊าซชีวภาพคงที่ที่ 10 ลูกบาศก์เมตรของก๊าซต่อชั่วโมง หรือมีค่า space velocity (SV) เท่ากับ 39.8ชม.$^{-1}$ โดยทำการทดลองที่อัตราการไหลของน้ำ 6 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง อัตราส่วนระหว่างน้ำและก๊าซ (L/G ratio)0.3 ซึ่งจะบันทึกค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังต่อไปนี้

- องค์ประกอบก๊าซชีวภาพ
- อัตราการไหลของก๊าซ
- อัตราการไหลของน้ำ
- ค่าพีเอชและอุณหภูมิ
- แรงดันของน้ำและแรงดันของก๊าซชีวภาพ

เมื่อเริ่มต้นการเดินระบบ จะมีการอ่านค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ข้างต้น ผ่านเครื่องมือวัดองค์ประกอบก๊าซชีวภาพ โดยมีการแสดงค่าทางหน้าจอและบันทึกข้อมูลการทดลองเข้าสู่อุปกรณ์บันทึกข้อมูล (data logger) อย่างต่อเนื่อง จะถือว่าระบบได้เข้าสู่สภาวะสมดุล (steady state) เมื่อพารามิเตอร์ต่างๆ มีค่าเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ของค่าเดิม เป็นระยะเวลาไม่ต่ำกว่า 15 นาที ซึ่งมีการทดลองซ้ำ 3 ซ้ำ เพื่อหาระยะเวลาที่ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลเฉลี่ย

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

การคำนวณค่า space velocity (SV) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3-1

$$SV = \frac{Q}{V} \quad (3\text{-}1)$$

เมื่อ SV คือ ความเร็วเชิงสเปซ(ชม.$^{-1}$)

Q คือ อัตราการไหลของก๊าซ (ม.^{3}/ชม)

V คือ ปริมาตรของตัวกลาง (ม.^{3})

และมีการ วิเคราะห์ค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ ซึ่งคิดค่าเฉลี่ยทุกๆ 15 นาที เช่น เริ่มคิดค่าเฉลี่ยจากเวลา 0 – 15 นาที ถัดไปเป็นค่าเฉลี่ยที่เวลา 1 – 16 นาที จะคิดค่าเฉลี่ยทุก 15 นาทีไปเรื่อยๆ จนจบการทดลอง และจะวิเคราะห์ที่ระดับความคลาดเคลื่อน 5 เปอร์เซ็นต์โดยค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ เป็นการคำนวณหาค่าเฉลี่ยในช่วงเวลาหนึ่ง ในขณะที่เวลาต่อมาข้อมูลได้เปลี่ยนแปลงไป ค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ก็จะเปลี่ยนแปลงไปด้วยแต่ด้วยอัตราที่ช้ากว่า โดยค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่สามารถสังเกตและคาดการณ์แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลได้ สำหรับการคำนวณค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3-2

$$S_{t+1} = \frac{X_t + X_{t-1} + \ldots + X_{t-N+1}}{N} \quad (3\text{-}2)$$

เมื่อ X_t คือ ข้อมูลที่สังเกต ณ เวลา t

N คือ จำนวนข้อมูลที่ใช้หาค่าเฉลี่ย

3.5.2 การทดลองเพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างน้ำและก๊าซ (L/G Ratio) และผลของความดันที่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบปรับปรุงก๊าซชีวภาพ

อัตราส่วนระหว่างน้ำและก๊าซ (L/G Ratio) คืออัตราการไหลของน้ำต่ออัตราการไหลของก๊าซ ซึ่งทั้งสองจะไหลเข้าสู่ระบบการดูดซึม และความดันภายในถังดูดซึม เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ใช้สำหรับควบคุมระบบดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยจะมีการทดสอบระบบที่อัตราการไหลของก๊าซชีวภาพที่ 10 ลูกบาศก์เมตรของก๊าซต่อชั่วโมง และปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำซึ่งขึ้นกับค่า L/G Ratio ที่ต้องการศึกษา รวมทั้งปรับใช้ความดันของระบบคงที่ที่ 2 บาร์เกจ 3 บาร์เกจ และ 4 บาร์เกจ ซึ่งแสดงดังตารางที่ 3.2

โดยในทุกการทดลอง จะมีการทำซ้ำ 3 ครั้ง โดยเริ่มอ่านค่าหลังจากที่ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลแล้ว และจะมีการวัดประสิทธิภาพของระบบเพื่อศึกษาผลของความดันและอัตราส่วนระหว่างน้ำและก๊าซ (L/G Ratio) ที่มีต่อประสิทธิภาพของการเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของก๊าซมีเทน และ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ประสิทธิภาพการลดปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3-2 และ 3-3 ตามลำดับ

$$\%CH_4 \text{ Enrichment} = (C_{CH4,out} - C_{CH4,in})/C_{CH4,in} \times 100 \quad (3\text{-}2)$$

$$\%CO_2 \text{ Reduction} = (C_{CO2,in} - C_{CO2,out})/C_{CO2,in} \times 100 \quad (3\text{-}3)$$

เมื่อ C_{in}และ C_{out}คือความเข้มข้นของก๊าซ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่เข้าและออกจากถังดูดซึมก๊าซ ตามลำดับ

3.5.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติของไบโอมีเทน

ไบโอมีเทนเป็นก๊าซที่ผ่านออกจากถังดูดซึม จะมีการอ่านค่าพารามิเตอร์หลักๆ เช่น ปริมาณความเข้มข้นมีเทน จากระบบตรวจวัดแบบออนไลน์ จนได้ไบโอมีเทนที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับคุณสมบัติของก๊าซธรรมชาติสำหรับยานยนต์ แล้วจึงมีการเก็บตัวอย่างไบโอมีเทนใส่ถุงเก็บก๊าซตัวอย่างชนิด Tedlar Bags จากนั้นนำก๊าซตัวอย่างไปวิเคราะห์ที่ห้องปฏิบัติการ โดยจะมีการเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์ซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อความแม่นยำในการวิเคราะห์ ซึ่งวิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติของไบโอมีเทนแสดงดังตารางที่ 3.3

3.5.4 การวิเคราะห์การสูญเสียก๊าซมีเทนของระบบปรับปรุงก๊าซชีวภาพ

การวิเคราะห์การสูญเสียก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นภายในระบบ โดยใช้หลักการของสมดุลมวลแบบไหลสวนทางกันของสถานะสองสถานะที่แตกต่างกัน เพื่อทราบผลที่มีต่อประสิทธิภาพของระบบปรับปรุงก๊าซชีวภาพ สำหรับความสัมพันธ์ของการสูญเสียก๊าซมีเทนแสดงดังสมการที่ 3-4

$$\%Loss = G_{in}Y_{in} - G_{Ab,out}Y_{Ab,out} \quad (3\text{-}4)$$

เมื่อ G_{in} คืออัตราส่วนการไหลของก๊าซที่เข้าสู่ระบบ, กรัมโมล/ชั่วโมง

Y_{in} คือเศษส่วนโมลของมีเทนในก๊าซที่เข้าสู่ระบบ

$G_{Ab,out}$ คืออัตราส่วนการไหลของก๊าซที่ออกจากถังดูดซึม, กรัมโมล/ชั่วโมง

$Y_{Ab,out}$ คือเศษส่วนโมลของมีเทนในก๊าซที่ออกจากถังดูดซึม

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง3.2 สภาวะการทดลองเพื่อศึกษาผลของ L/G Ratio และความดันที่มีต่อประสิทธิภาพของระบบ

ความดันภายในถังดูดซึม ,บาร์	อัตราการไหลก๊าซชีวภาพ 10 ม.^{3} ก๊าซ/ชม.			อัตราการไหลก๊าซชีวภาพ 15 ม.^{3} ก๊าซ/ชม.			อัตราการไหลก๊าซชีวภาพ 20 ม.^{3} ก๊าซ/ชม.			อัตราการไหลก๊าซชีวภาพ 30 ม.^{3} ก๊าซ/ชม.		
	L/G Ratio	Liquid Flow rate, ม.^{3}/ชม.	SV, ชม.$^{-1}$	L/G Ratio	Liquid Flow rate, ม.^{3}/ชม.	SV, ชม.$^{-1}$	L/G Ratio	Liquid Flow rate, ม.^{3}/ชม.	SV, ชม.$^{-1}$	L/G Ratio	Liquid Flow rate, ม.^{3}/ชม.	SV, ชม.$^{-1}$
2	0.24	2.4	39.8	0.20	3.0	59.8	0.21	4.2	79.7	0.20	3.0	119.5
	0.30	3.0	39.8	0.30	4.5	59.8	0.30	6.0	79.7	0.30	4.5	119.5
	0.42	4.2	39.8	0.40	6.0	59.8	0.39	7.8	79.7			
	0.48	4.8	39.8	0.50	7.5	59.8	0.48	9.6	79.7			
	0.60	6.0	39.8	0.60	9.0	59.8						
	0.72	7.2	39.8	0.72	10.8	59.8						
	0.78	7.8	39.8									
	0.90	9.0	39.8									
	1.05	10.5	39.8									
3	0.24	2.4	39.8	0.20	3.0	59.8	0.21	4.2	79.7			
	0.30	3.0	39.8	0.30	4.5	59.8	0.30	6.0	79.7			
	0.42	4.2	39.8	0.40	6.0	59.8	0.39	7.8	79.7			
	0.48	4.8	39.8	0.50	7.5	59.8						
	0.60	6.0	39.8									
	0.72	10.5	39.8									
4				0.20	3.0	59.8						
				0.30	4.5	59.8						

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 3.3 วิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติของไบโอมีเทน

พารามิเตอร์ตามข้อกำหนด	วิธีการทดสอบ
1. จุดน้ำค้างที่ความดัน 20,000 กิโลปาสคาล	วัดที่หน้างานจริง โดยใช้เครื่องมือ Shaw Meter เทียบเคียง ASTM D1142
2. จุดน้ำค้างไฮโดรคาร์บอน ที่ความดัน 4,500 กิโลปาสคาล ซึ่งควบแน่นเป็นของเหลวไม่เกิน 1 เปอร์เซ็นต์ 3. ค่ามีเทน 4. ไฮโดรเจน 5. คาร์บอนไดออกไซด์ 6. ออกซิเจน	เก็บใส่ถุงตัวอย่างแล้ววิเคราะห์ด้วย Gas Chromatography (TCD) ตามมาตรฐาน ASTM 1945 คำนวณจุดน้ำค้างไฮโดรคาร์บอนได้สมการ Equation of State และคำนวณค่ามีเทนตามวิธี GRI Method
7. ดัชนีวอบบี้	เก็บใส่ถุงตัวอย่างแล้ววิเคราะห์ด้วย Gas Chromatography (TCD) คำนวณตามมาตรฐาน ASTM 3350
8. ไฮโดรเจนซัลไฟด์ 9. กำมะถัน	เก็บใส่ถุงตัวอย่างแล้ววิเคราะห์ด้วย Gas Chromatography (FID + FPD) คำนวณตามมาตรฐาน ASTM 5504

3.5.5 การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของระบบปรับปรุงก๊าซชีวภาพ

การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลทั้งหมดที่เกิดขึ้นภายในถังดูดซึม สามารถคำนวณหาค่าได้ทั้งสถานะของเหลวและก๊าซ โดยจะสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลได้จากสมการที่ 3-5 และ 3-6

การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในเฟสของก๊าซสามารถคำนวณได้จากสมการหาค่าความสูงของชั้นวัสดุเพิ่มพื้นที่ผิวในกรณีในเฟสของก๊าซ

$$Z = H_{OG} N_{OG} = \frac{G_m}{K_G a P} \int_{y_2}^{y_1} \frac{dy}{y - y_e} \qquad (3\text{-}5)$$

การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในเฟสของเหลวสามารถคำนวณได้จากสมการหาค่าความสูงของชั้นวัสดุเพิ่มพื้นที่ผิวในกรณีในเฟสของเหลว

$$Z = H_{OL} N_{OL} = \frac{L_m}{K_L a C_t} \int_{x_2}^{x_1} \frac{dx}{x_e - x} \qquad (3\text{-}6)$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

เมื่อ Z คือ ความสูงของชั้นวัสดุเพิ่มพื้นที่ผิว, เมตร

H_{OG} คือ ความสูงของหน่วยการถ่ายเทมวลทั้งหมดของสถานะก๊าซ, เมตร

H_{OL} คือ ความสูงของหน่วยการถ่ายเทมวลทั้งหมดของสถานะของเหลว, เมตร

N_{OG} คือ จำนวนของหน่วยการถ่ายเทมวลทั้งหมดของสถานะก๊าซ, เมตร

N_{OL} คือ จำนวนของหน่วยการถ่ายเทมวลทั้งหมดของสถานะของเหลว, เมตร

G_m คือ อัตราการไหลของก๊าซในหน่วยโมลาร์ต่อหน่วยพื้นที่หน้าตัด

L_m คือ อัตราการไหลของเหลวในหน่วยโมลาร์ต่อหน่วยพื้นที่หน้าตัด

a คือInterfacial surface areaต่อหน่วยปริมาตร

P คือ ความดันทั้งหมด

C_t คือ ความเข้มข้นทั้งหมดในหน่วยโมลาร์

K_G คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของปริมาตรทั้งหมดของก๊าซ

K_L คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของปริมาตรทั้งหมดของเหลว

y_1 คือ เศษส่วนโมลของตัวถูกละลายในก๊าซที่ก้นถังปฏิกรณ์

y_2 คือ เศษส่วนโมลของตัวถูกละลายในก๊าซที่ด้านบนถังปฏิกรณ์

x_1 คือ เศษส่วนโมลของตัวถูกละลายในของเหลวที่ก้นถังปฏิกรณ์

x_2 คือ เศษส่วนโมลของตัวถูกละลายในของเหลวที่ด้านบนถังปฏิกรณ์

y_e คือเศษส่วนโมลในก๊าซที่อยู่ในสมดุลกับความเข้มข้นของเหลวที่จุดใดๆ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved