คู่มือการปฏิบัติงานเกี่ยวกับการออกแบบ การผลิต การควบคุมคุณภาพ และการใช้ก๊าซชีวภาพ (Biogas) สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม

คู่มือฉบับนี้เป็นลิขสิทธิ์ของ

กรมโรงงานอุตสาหกรรม
DEPARTMENT OF INDUSTRIAL WORKS

สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย
กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม

โทรศัพท์ 0-2202-4222
www.diw.go.th

คู่มือการปฏิบัติงานเกี่ยวกับการออกแบบ การผลิต การควบคุมคุณภาพ และการใช้ก๊าซชีวภาพ (Biogas) สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม

กรมโรงงานอุตสาหกรรม
กระทรวงอุตสาหกรรม

กรมโรงงานอุตสาหกรรม
DEPARTMENT OF INDUSTRIAL WORKS

คู่มือ การปฏิบัติงานเกี่ยวกับการออกแบบ การผลิต การควบคุมคุณภาพ และการใช้ก๊าซชีวภาพ (Biogas)

สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม

สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย
กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม

คู่มือการปฏิบัติงานเกี่ยวกับการออกแบบ การผลิต การควบคุมคุณภาพ และการใช้ก๊าซชีวภาพ (Biogas) สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม

เจ้าของลิขสิทธิ์

กรมโรงงานอุตสาหกรรม

75/6 ถนนพระรามที่ 6 แขวงทุ่งพญาไท เขตราชเทวี กรุงเทพฯ 10400

พิมพ์ครั้งที่ 1: พฤศจิกายน 2553

จำนวน 500 เล่ม

ISBN 978-616-7148-83-0

บทนำ

การบำบัดน้ำเสียจากสารอินทรีย์ โดยอาศัยกระบวนการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ในระบบการหมักแบบไม่ใช้อากาศ ทำให้เกิดเป็นก๊าซชีวภาพซึ่งใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนได้ การลงทุนสร้างระบบมีผลตอบแทนที่คุ้มค่า ช่วยแก้ปัญหามลภาวะ ปัจจุบันจึงมีโรงงานที่ติดตั้งระบบผลิตและใช้ก๊าซชีวภาพมากกว่า 200 โรงงาน แต่ในระหว่างปี พ.ศ. 2549 ถึง 2553 ได้เกิดอุบัติเหตุร้ายแรงเกี่ยวกับก๊าซชีวภาพในโรงงานหลายครั้ง ทำให้ทรัพย์สินเสียหาย มีผู้ได้รับบาดเจ็บและเสียชีวิตหลายคน โดยเกิดขึ้นทั้งในระบบการผลิตก๊าซชีวภาพ ระบบลำเลียงก๊าซ และในระบบที่นำก๊าซชีวภาพไปใช้งาน จากการสอบสวนอุบัติเหตุโดยสำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย พบว่าสาเหตุการเกิดอุบัติเหตุเกี่ยวข้องกับความบกพร่องในการออกแบบหรือติดตั้งระบบผลิตและเก็บก๊าซ คุณภาพก๊าซ ความล้มเหลวของอุปกรณ์ความปลอดภัย และการขาดความรู้ความเข้าใจของบุคลากรที่เกี่ยวข้องอย่างถูกต้องตามหลักวิศวกรรมหรือตามมาตรฐานความปลอดภัยในการปฏิบัติงานเกี่ยวกับก๊าซชีวภาพ

สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย กรมโรงงานอุตสาหกรรม จึงได้จัดทำ “คู่มือการปฏิบัติงานเกี่ยวกับการออกแบบ การผลิต การควบคุมคุณภาพ และการใช้ก๊าซชีวภาพ (Biogas) สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม” ขึ้นภายใต้โครงการศึกษากฎหมาย ข้อบังคับ มาตรฐานการปฏิบัติงานด้านความปลอดภัยและอาชีวอนามัยเกี่ยวกับก๊าซชีวภาพสำหรับโรงงานอุตสาหกรรม งบประมาณประจำปี 2553 โดยมอบให้มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เป็นที่ปรึกษาโครงการฯ ดังกล่าว

คู่มือเล่มนี้ ประกอบด้วย การผลิตและการใช้ก๊าซชีวภาพในประเทศไทย การเกิดก๊าซและสมบัติของก๊าซชีวภาพ เทคโนโลยีการออกแบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพ การเริ่มต้นและดูแลระบบ การเก็บ การลำเลียง และอุปกรณ์ความปลอดภัยสำหรับก๊าซชีวภาพ การปรับปรุงและควบคุมคุณภาพ การใช้ประโยชน์ และความปลอดภัยในระบบก๊าซชีวภาพ

สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย กรมโรงงานอุตสาหกรรม หวังเป็นอย่างยิ่งว่า คู่มือเล่มนี้จะเป็นประโยชน์ในด้านการป้องกันอุบัติเหตุอันตราย การรักษาประสิทธิภาพของระบบ การยืดอายุการใช้งานของเครื่องจักรอุปกรณ์ การเสริมสร้างความรู้ความเข้าใจที่ถูกต้องตามหลักวิศวกรรมและมาตรฐานความปลอดภัยในการปฏิบัติงานต่อผู้ประกอบกิจการโรงงานที่ผลิตและใช้ก๊าซชีวภาพ ผู้ออกแบบ ผู้ก่อสร้าง ผู้ติดตั้งหรือซ่อมแซมระบบ ผู้ปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้องกับการดูแลระบบการผลิต ระบบปรับปรุงและควบคุมคุณภาพ ระบบเก็บและลำเลียงก๊าซ ระบบการใช้งาน การตรวจสอบและการบำรุงรักษา และเป็นประโยชน์ต่อการกำกับดูแลด้านความปลอดภัย สิ่งแวดล้อม พลังงาน ของหน่วยงานภาครัฐ และส่งเสริมความรู้แก่ผู้สนใจทั่วไป

สารบัญ

หน้า

บทนำ

สารบัญ ก-1

สารบัญรูป ข-1

สารบัญตาราง ค-1

บทที่ 1. สถานการณ์การผลิตและใช้ก๊าซชีวภาพในประเทศไทย 1-1

บทที่ 2. ขั้นตอนการเกิดก๊าซชีวภาพ

2.1 กระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพ 2-1

2.2 กระบวนการย่อยสลายในสภาวะไม่ใช้อากาศ (Anaerobic Digestion) 2-2

2.2.1 ขั้นตอนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้อากาศ 2-3

2.2.2 แบคทีเรียที่เกี่ยวข้อง 2-5

2.2.3 สภาวะแวดล้อมและปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายในสภาวะไม่ใช้อากาศ 2-9

บทที่ 3. คุณสมบัติของก๊าซชีวภาพ

3.1 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ 3-1

3.2 สมบัติก๊าซชีวภาพ 3-3

3.2.1 สมการสถานะ 3-3

3.2.2 ค่าแฟกเตอร์การอัดได้ (Compressibility factor, Z) 3-4

3.2.3 ความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะ 3-5

3.2.4 ความหนืดของก๊าซ 3-8

3.2.5 ความเร็วเปลวไฟ (Flame velocity) 3-9

หน้า

3.2.6 ขีดจำกัดการติดไฟได้ (Flammability limit) หรือขีดจำกัดการระเบิด (Explosive limit) 3-10

3.2.7 การจุดติดไฟอัตโนมัติ (Auto ignition) 3-11

3.2.8 อุณหภูมิเปลวไฟ (Flame temperature) 3-11

3.2.9 ค่าความร้อนและการเผาไหม้ (Heating value and Combustion) 3-12

3.2.10 ความชื้นของก๊าซ 3-22

บทที่ 4. เทคโนโลยีการออกแบบระบบก๊าซชีวภาพ

4.1 การจำแนกประเภทและเปรียบเทียบเทคโนโลยีระบบผลิตก๊าซชีวภาพ 4-1

4.1.1 ถังปฏิกรณ์ที่เชื้อจุลินทรีย์อยู่ในสภาพแขวนลอย (Suspended growth) 4-2

4.1.2 ถังปฏิกรณ์ที่เชื้อจุลินทรีย์เกาะอยู่บนวัสดุตัวกลาง (Attached growth) 4-19

4.1.3 จุดเด่น-ข้อจำกัดของเทคโนโลยีและการเปรียบเทียบทางเทคโนโลยี 4-23

4.1.4 การประเมินค่าใช้จ่ายในการลงทุนและการเดินระบบเบื้องต้น 4-30

4.2 แนวทางการเลือกเทคโนโลยีที่เหมาะสม 4-31

4.2.1 ลักษณะของระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่เราต้องการ 4-31

4.2.2 ปัจจัยที่ควรพิจารณาก่อนเลือกเทคโนโลยี 4-32

4.2.3 ลักษณะของระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่ประสบผลสำเร็จ 4-33

บทที่ 5. การเริ่มต้นระบบและเดินระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ

5.1 ช่วงเริ่มต้นเดินระบบ (Start up) 5-1

5.1.1 คุณภาพและปริมาณของเชื้อจุลินทรีย์ตั้งต้น 5-1

5.1.2 ลักษณะและองค์ประกอบของน้ำเสีย 5-2

5.1.3 ธาตุอาหาร (Nutrients) 5-2

5.1.4 ระยะเวลากักเก็บน้ำเสีย (Hydraulic Retention Time: HRT) และ ระยะเวลาที่เชื้อแบคทีเรียอยู่ในถังปฏิกรณ์ (Solid Retention Time : SRT) 5-2

5.1.5 การป้อนสารอาหารเข้าสู่ระบบ 5-3

หน้า

5.2 ช่วงเดินระบบ (Operation) 5-4

5.2.1 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) 5-4

5.2.2 ค่าความเป็นด่าง (Alkalinity: Alk) 5-5

5.2.3 กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Fatty Acids: VFA) 5-5

5.2.4 อัตราการผลิตก๊าซมีเทนและองค์ประกอบก๊าซชีวภาพ 5-6

5.2.5 ประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีโอดี (COD) 5-6

5.2.6 การตรวจสอบและวิเคราะห์ผลระบบบำบัดน้ำเสีย 5-6

บทที่ 6. การเก็บก๊าซ การลำเลียง และอุปกรณ์ความปลอดภัย

6.1 การเก็บก๊าซชีวภาพ 6-1

6.1.1 การเก็บรักษาที่ความดันต่ำ 6-2

6.1.2 การเก็บรักษาที่ความดันปานกลางและสูง 6-10

6.1.3 การอัดก๊าซชีวภาพเพื่อเป็นเชื้อเพลิงสำหรับรถยนต์ 6-11

6.2 ระบบท่อก๊าซ 6-12

6.2.1 อุณหภูมิที่ออกแบบและอุณหภูมิที่ใช้งาน 6-12

6.2.2 ความดันที่ออกแบบและความดันที่ใช้งาน 6-13

6.2.3 การกำหนดขนาดท่อสำหรับก๊าซชีวภาพ 6-16

6.2.4 การหาความดันลดหรือความดันสูญเสีย (Pressure drop/Head loss) ในระบบท่อ 6-18

6.2.5 การกำหนดจุดดึงก๊าซออกจากบ่อผลิตก๊าซชีวภาพ 6-20

6.2.6 วัสดุที่ใช้ทำท่อก๊าซชีวภาพ 6-22

6.2.7 การกำหนดสีของท่อ 6-22

6.2.8 การวางท่อ และการกำหนดระยะของ support 6-23

6.3 การเลือกใช้วาล์วสำหรับก๊าซชีวภาพ 6-30

6.4 ระบบเพิ่มความดันหรือส่งก๊าซชีวภาพ 6-30

6.4.1 ชนิดของเครื่องเป่า (Blower) 6-31

หน้า

6.4.2 การคำนวณกำลังที่ใช้งานของเครื่องเป่า (Blower) 6-33

6.4.3 การเลือกจำนวนรอบของเครื่องเป่า 6-34

6.5 อุปกรณ์ความปลอดภัยในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ 6-35

6.5.1 อุปกรณ์ระบายความดัน 6-36

6.5.2 Back Pressure Check Valve 6-40

6.5.3 อุปกรณ์วัดความดัน 6-40

6.5.4 ระบบดักละอองน้ำและระบายน้ำออกจากท่อ 6-41

6.5.5 อุปกรณ์ดักเปลวไฟหรืออุปกรณ์ป้องกันเปลวไฟย้อนกลับ (Flame Arrester) 6-46

6.5.6 อุปกรณ์ตรวจวัดสมบัติของก๊าซ 6-50

6.6 ระบบเผาก๊าซทิ้ง (Flare system) 6-53

6.7 การควบคุมการทำงานของระบบส่งก๊าซชีวภาพ 6-56

บทที่ 7. การปรับปรุงและควบคุมคุณภาพก๊าซชีวภาพ

7.1 การพิจารณาเพื่อปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพ 7-1

7.2 การกำจัดความชื้น 7-3

7.2.1 การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซชีวภาพกับน้ำเย็น 7-3

7.2.2 การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซชีวภาพกับสารทำความเย็น 7-5

7.3 การกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) 7-9

7.3.1 กระบวนการแบบแห้ง (Dry Process) 7-9

7.3.2 กระบวนการแบบเปียก (Wet Process) 7-12

7.4 การกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ 7-26

7.4.1 Water Scrubber Technology 7-26

7.4.2 Pressure Swing Adsorption (PSA) Technology 7-28

7.4.3 Chemical Absorption Technology 7-29

7.4.4 Membrane Separation Technology 7-31

หน้า

7.5 การกำจัดไซลอกเซน (Siloxane) 7-37

7.5.1 Adsorption Technology 7-38

7.5.2 Refrigeration Technology 7-39

7.5.3 Liquid Absorption Technology 7-41

บทที่ 8. การใช้ประโยชน์จากก๊าซชีวภาพ

8.1 การคำนวณการเผาไหม้ของก๊าซชีวภาพ 8-1

8.1.1 สมการสมดุลปฏิกิริยาการเผาไหม้ของก๊าซชีวภาพ (Stoichiometric ratio) 8-1

8.1.2 Equivalence Ratio 8-2

8.2 ชุดอุปกรณ์ก๊าซ (Gas Train) 8-3

8.3 การใช้ประโยชน์ก๊าซชีวภาพในการผลิตพลังงาน 8-6

8.3.1 การผลิตพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้โดยตรง 8-7

8.3.2 การผลิตพลังงานไฟฟ้า 8-15

8.4 ระบบเผาก๊าซทิ้ง (Gas Flare) 8-33

8.5 การบำรุงรักษา 8-35

8.6 ปัญหาจากการใช้งานก๊าซชีวภาพ 8-38

8.7 กรณีศึกษาการระเบิดจากการใช้งานของก๊าซชีวภาพ 8-41

บทที่ 9. ความปลอดภัยในระบบก๊าซชีวภาพ

9.1 ความเสี่ยงจากการระเบิดและไฟไหม้ 9-1

9.1.1 พื้นที่อันตราย (Hazardous Area) 9-1

9.1.2 การระเบิด (Explosion) 9-2

9.1.3 แหล่งที่ทำให้เกิดการจุดระเบิด (Ignition Source) 9-3

9.1.4 พื้นที่โซนอันตรายและการระเบิดและไฟไหม้ 9-5

9.1.5 แนวทางการเลือกอุปกรณ์ป้องกันการระเบิด 9-9

หน้า

9.1.6 แนวทางการจัดแบ่งโซนรอบๆ อุปกรณ์ก๊าซชีวภาพ 9-20

9.2 การเดินสายไฟฟ้าบริเวณพื้นที่อันตราย 9-33

9.3 การต่อฝากและการต่อลงดิน 9-34

9.4 ระบบป้องกันฟ้าผ่า 9-36

9.4.1 ย่านป้องกันฟ้าผ่า (LPZ) 9-37

9.4.2 การป้องกันฟ้าผ่าภายในและภายนอก 9-37

9.4.3 ถังปฏิกรณ์และโดมเก็บแก๊ส 9-38

9.5 มาตรการควบคุมในการลดความเสี่ยงจากเพลิงไหม้ 9-40

9.6 ความเป็นพิษของก๊าซและสถานที่อับอากาศ 9-41

9.6.1 นิยาม และความหมายของคำศัพท์ 9-41

9.6.2 ก๊าซและความเป็นพิษ 9-42

9.6.3 สถานที่อับอากาศ 9-45

9.6.4 ขั้นตอนการตรวจวัดในการทำงานในพื้นที่อันตรายจากสถานที่อับอากาศ 9-49

9.7 การปฐมพยาบาล 9-51

9.7.1 การปฐมพยาบาลเบื้องต้น (First Aid) 9-51

9.7.2 การปฐมพยาบาลเมื่อผู้ป่วยหมดสติ 9-51

9.7.3 วิธีการปฐมพยาบาล 9-52

9.8 ตัวอย่างแบบฟอร์มต่างๆ 9-54

9.8.1 ตัวอย่างแบบฟอร์มการขออนุญาตเข้าทำงานในสถานที่อับอากาศ 9-54

9.8.2 ตัวอย่างแบบฟอร์มใบอนุญาตเริ่มงานของผู้รับเหมา 9-58

9.8.3 ตัวอย่างแบบฟอร์มประเมินการปฏิบัติงานผู้รับเหมา/ผู้รับเหมาช่วง /ผู้ให้บริการ 9-59

9.8.4 ตัวอย่างแบบฟอร์มเข้าทำงานที่ต้องใช้ความร้อน (เชื่อม, ตัด, ทำให้เกิดประกายไฟ, ขุดเจาะ, เจียรและรังสี) 9-60

9.9 ป้ายเตือนความปลอดภัย 9-61

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	แสดงกระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพ	2-2
2.2	ลำดับขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้อากาศ	2-4
3.1	แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างค่าแฟกเตอร์การอัดได้ (สำหรับก๊าซบริสุทธิ์)	3-5
3.2	กราฟแสดงผลของ CO_2 ที่มีต่อความเร็วเปลวไฟของการเผาไหม้มีเทนกับอากาศที่ความดัน 1 บาร์ สมบูรณ์ อุณหภูมิ 298 เคลวิน	3-9
3.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของขีดจำกัดการระเบิดได้กับความเข้มข้นของมีเทน	3-11
3.4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเปลวไฟกับความเข้มข้นของมีเทนและความชื้น	3-12
3.5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าความร้อนของก๊าซชีวภาพที่ % มีเทนต่างๆ	3-13
3.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นจำเพาะของก๊าซชีวภาพกับอุณหภูมิก๊าซชีวภาพที่ความดันต่างๆ	3-23
4.1A	แสดง Continuously Stirred Tank Reactor; CSTR	4-3
4.1B	แสดง Anaerobic contact; AC	4-4
4.2	แสดงรูปถังปฏิกรณ์แบบ UASB และภาพจำลองภายในถัง	4-6
4.3	แสดงลักษณะของบ่อปิดแบบไร้อากาศ (Anaerobic Covered Lagoon)	4-10
4.4	แสดงลักษณะของบ่อปิดแบบไร้อากาศดัดแปลง (Modified Anaerobic Covered Lagoon)	4-12
4.5	แสดงรูปแบบการวางแผ่นกั้น (Baffle) ของระบบ Anaerobic Baffle Reactor	4-15
4.6	แสดงบ่อแบบรางหรือ Channel Digester	4-17
4.7	แสดงลักษณะของ A: ถังกรองไร้อากาศ (Anaerobic Filter) และ B: ถังแบบตรึงฟิล์มจุลินทรีย์ (Anaerobic Fixed Film) และรูปถ่ายระบบตรึงฟิล์มจุลินทรีย์	4-21
4.8	แสดงถังปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไดซ์เบด (Anaerobic fluidized bed)	4-23

รูปที่ **หน้า**

รูปที่		หน้า
6.1	แสดงการเก็บก๊าซในถังปฏิกรณ์แบบโดมคงที่	6-2
6.2	แสดงการเก็บก๊าซในถังปฏิกรณ์ใช้ฝาคลุมสแตนเลส และใช้น้ำหล่อป้องกันก๊าซรั่ว	6-2
6.3	แสดงการเก็บก๊าซในถังปฏิกรณ์ UASB เพดาน คสล. และใช้น้ำหล่อป้องกันก๊าซรั่ว	6-3
6.4	แสดงการเก็บก๊าซในถังแบบโดมลอยตัว และใช้น้ำหล่อป้องกันก๊าซรั่ว	6-3
6.5	แสดงการเก็บก๊าซในบ่อที่มีการยึดขอบแผ่นพลาสติกในรางน้ำ	6-4
6.6	แสดงการเก็บก๊าซในบ่อที่การยึดขอบแผ่นพลาสติกโดยดินทับ	6-5
6.7	แสดงการเก็บก๊าซในถังแบบโดมสองชั้น และอุปกรณ์ประกอบ	6-6
6.8	แสดงการเก็บก๊าซในถังแบบโดมสองชั้นรูปแบบต่างๆ	6-7
6.9	แสดงการเชื่อมแบบ Dual Hot Wedge seam ที่มีช่องสำหรับทดสอบและเครื่องเชื่อม	6-8
6.10	แสดงการเชื่อมแบบ EXTRUSION WELDING และเครื่องเชื่อม	6-9
6.11	แสดงถังเก็บก๊าซชีวภาพที่ความดันสูง	6-10
6.12	แสดงตัวอย่างกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อเป็นเชื้อเพลิงสำหรับรถยนต์	6-12
6.13	แสดงอุณหภูมิของก๊าซที่ท่อทางส่งของ Blower	6-13
6.14	กราฟแสดงความสัมพันธ์ความดันลดในท่อตรงกับอัตราการไหลก๊าซชีวภาพ	6-19
6.15	แสดงลักษณะของโฟมและสกัมภายในบ่อก๊าซชีวภาพ	6-21
6.16	แสดงการต่อท่อออกจากบ่อผลิตก๊าซชีวภาพหลายท่อ	6-22
6.17	แสดงการวางท่อที่มี Support	6-24
6.18	แสดงลักษณะการยึดท่อ	6-25
6.19	แสดง Expansion joint	6-26
6.20	แสดงการติดตั้ง Expansion joint ที่ Blower และในแนวท่อแยก	6-27
6.21	แสดงลักษณะการวางท่อใต้ดิน	6-28
6.22	แสดงการวางท่อและกลบท่อก๊าซ	6-28
6.23	แสดง Root Blower ที่ใช้ในระบบส่งก๊าซชีวภาพ	6-31
6.24	แสดง Ring Blower ที่ใช้ในระบบส่งก๊าซชีวภาพ	6-32
6.25	แสดง Centrifugal Blower ที่ใช้ในระบบส่งก๊าซชีวภาพ	6-32
6.26	กราฟแสดงสมรรถนะของ Blower แบบต่างๆในระบบส่งก๊าซชีวภาพ	6-33

รูปที่ **หน้า**

6.27	ผังแสดงอุปกรณ์ความปลอดภัยในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ	6-35
6.28	แสดง Over pressure relief device แบบ Water seal	6-36
6.29	แสดง Over pressure relief valve แบบสปริงและแบบตุ้มน้ำหนัก	6-37
6.30	แสดง Over pressure and Negative relief valve แบบ Water seal	6-38
6.31	แสดง Over pressure and Vacuum relief valve และลักษณะการทำงาน กรณี over pressure (ภาพ A) และกรณี Vacuum pressure (ภาพ B)	6-39
6.32	แสดง Back Pressure Check Valve	6-40
6.33	แสดงการวัดความดันในท่อ	6-40
6.34	แสดง Knock out Drum	6-41
6.35	แสดงขนาดสัดส่วนของ Knock out Drum	6-42
6.36	แสดงแผงดักละอองน้ำ (Mist Eliminator)	6-43
6.37	แสดงอุปกรณ์ดักน้ำแบบไซโคลน	6-44
6.38	แสดงลักษณะของอุปกรณ์ระบายน้ำแบบ Tee และ U-tube	6-45
6.39	แสดงอุปกรณ์ Auto Drain	6-45
6.40	แสดงการป้องกันเปลวไฟของอุปกรณ์ป้องกันเปลวไฟย้อนกลับ	6-46
6.41	แสดงองค์ประกอบของอุปกรณ์ป้องกันเปลวไฟย้อนกลับ	6-47
6.42	กราฟแสดงความดันลดของอุปกรณ์ป้องกันเปลวไฟย้อนกลับตามขนาด และอัตราการไหล	6-49
6.43	แสดงมิเตอร์ก๊าซแบบอาศัยหลักการหมุนของใบพัดแบบต่างๆ	6-50
6.44	แสดงมิเตอร์ก๊าซแบบหลักการวัดความดันลดที่ตกคร่อม Orifice และ Venturi	6-51
6.45	แสดงมิเตอร์ก๊าซแบบหลักการวัดอัตราการไหลเชิงมวล	6-52
6.46	แสดงอุปกรณ์วัดองค์ประกอบก๊าซแบบ Online methane analyzer	6-52
6.47	แสดงระบบเผาก๊าซทิ้งแบบเปิด (A) และแบบปิด (B)	6-54
6.48	กราฟแสดงความสูงของFlare กับอัตราการเผาก๊าซชีวภาพ	6-54
6.49	แสดงอุปกรณ์ของระบบเผาก๊าซทิ้ง	6-56
6.50	แสดงการควบคุมความดันที่ท่อทางส่งก๊าซชีวภาพแบบ Manual	6-56
6.51	ผังแสดงการควบคุมการทำงานของ Blower	6-57

รูปที่ **หน้า**

6.52	แสดงการวนก๊าซชีวภาพกลับที่ท่อด้านทางส่งกลับเข้าไปทางด้านดูด	6-58
7.1	แสดงผังกระบวนการปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพโดยรวม	7-2
7.2	ผังแสดงกระบวนการกำจัดความชื้นที่ใช้การแลกเปลี่ยนความร้อน ระหว่างก๊าซชีวภาพกับน้ำเย็น	7-4
7.3	แสดงเครื่องกำจัดความชื้นที่ใช้การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่าง ก๊าซชีวภาพกับสารทำความเย็น	7-5
7.4	ผังแสดงการจำแนกเทคโนโลยีการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์	7-9
7.5	แสดงลักษณะของถังกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบแห้ง	7-10
7.6	แสดงลักษณะของถังกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ใช้สารละลายด่าง ทั้งแบบมีการฟื้นสภาพตัวดูดซึมและ ไม่มีการฟื้นสภาพตัวดูดซึม	7-13
7.7	แสดงลักษณะของถังกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบ Biofilter	7-15
7.8	แสดงลักษณะของถังกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบ Biotrickling filter	7-17
7.9	แสดงลักษณะของถังกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ Bioscrubber	7-18
7.10	แสดงเทคโนโลยีการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ แบบ Water Scrubber Technology ชนิดนำน้ำกลับมาใช้ใหม่	7-27
7.11	แสดงเทคโนโลยีการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ แบบ Pressure Swing Adsorption	7-28
7.12	แสดงเทคโนโลยีการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ แบบ Chemical Absorption Technology	7-30
7.13A	แสดงเทคโนโลยีการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ แบบ Membrane Technology	7-31
7.13B	แสดงระบบการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้ระบบเมมเบรน แบบ Hollow Fiber	7-33
7.14	แสดงคราบของ SiO_2 ใน Gas Engine และที่ลูกสูบอันเนื่องมาจากไซลอกเซน	7-38
7.15	แสดงผังกระบวนการ Temperature Swing Adsorption	7-39
7.16	กราฟแสดงการทำนายการกำจัด Siloxane เมื่อการลดอุณหภูมิ ที่ความดัน 1 บาร์ โดยให้ก๊าซชีวภาพเป็นก๊าซอุดมคติ	7-40
8.1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงโดยปริมาตร กับความเข้มข้นของมีเทน	8-2

รูปที่		**หน้า**
8.2	แสดงชุดอุปกรณ์ก๊าซ (Gas train) สำหรับหัวเผาก๊าซชีวภาพ	8-3
8.3	แสดงชุดอุปกรณ์ก๊าซ (Gas train) สำหรับเครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพ	8-3
8.4	แสดงตัวอย่างวาล์วตัดก๊าซแบบธรรมดา (Manual shut off valve)	8-4
8.5	แสดงตัวอย่างลักษณะของหม้อกรองก๊าซ	8-4
8.6	แสดงลักษณะส่วนประกอบของ Pressure regulator ของก๊าซรูปแบบหนึ่ง	8-5
8.7	แสดงลักษณะส่วนประกอบของ Double solenoid valve	8-6
8.8	แสดงลักษณะส่วนประกอบของหัวเผาก๊าซ และ Gas train	8-9
8.9	แสดงลักษณะของหัวผสมของหัวเผาก๊าซรูปแบบหนึ่ง	8-9
8.10	แสดงลักษณะของหัวเผาชนิด Dual Burner	8-11
8.11	แสดงลักษณะของคลัชแม่เหล็กไฟฟ้า (Electro magnetic clutch)	8-11
8.12	แสดงหัวเผาก๊าซชีวภาพผสมน้ำมันแบบถ้วยเหวี่ยงน้ำมัน (Rotary cup Combination burner)	8-13
8.13	แสดงลักษณะการผสมของก๊าซกับอากาศของหัวเผาก๊าซผสมน้ำมันแบบถ้วยเหวี่ยงน้ำมัน (Rotary cup combination burner)	8-13
8.14	แสดงลักษณะหัวเผาแบบถ้วยเหวี่ยงน้ำมันผสมก๊าซ ขณะเปิดบานสวิงลูกถ้วยออก เพื่อให้ดูลักษณะภายในของหัวเผา	8-14
8.15	แสดงชุดอุปกรณ์ก๊าซ (Gas train) ของเครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพ	8-16
8.16	แสดงเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้าจากก๊าซชีวภาพ	8-16
8.17	แสดงหลักการทำงานของเครื่องยนต์สเตอริ่ง	8-23
8.18	แสดงเครื่องยนต์แบบสเตอริ่ง	8-24
8.19	แสดงโครงสร้างการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง	8-26
8.20	แสดงแนวทางการนำก๊าซชีวภาพไปใช้ในเซลล์เชื้อเพลิง	8-26
8.21	แสดงเซลล์เชื้อเพลิงชนิด Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC) ที่ใช้อยู่ในประเทศเยอรมัน	8-30

รูปที่ **หน้า**

รูปที่		หน้า
8.22	แสดงระบบกังหันก๊าซ	8-30
8.23	แสดงภาพตัดภายในของกังหันก๊าซขนาดเล็ก (Micro gas turbine)	8-31
8.24	กราฟแสดงประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของเทคโนโลยีประเภทต่างๆ	8-32
8.25	กราฟแสดงการเปรียบเทียบต้นทุนของอุปกรณ์ตามเทคโนโลยีการผลิต ไฟฟ้าประเภทต่างๆ กับกำลังการผลิตไฟฟ้า (kW)	8-33
8.26	แสดงชุดอุปกรณ์ก๊าซ (Gas train) สำหรับระบบเผาก๊าซทิ้ง	8-34
8.27	แสดงระบบเผาก๊าซทิ้งแบบปิด (Enclosure flare) และอุปกรณ์ก๊าซ	8-34
8.28	แสดงบ่อผลิตก๊าซแบบผ้าใบคลุม ขนาด 80 x 220 เมตร (2 บ่อ)	8-42
8.29	แสดงสภาพปัญหาที่พบของบ่อผลิตก๊าซชีวภาพ และปัญหาการควบคุม ความดันก๊าซในบ่อ	8-42
8.30	แสดงห้องสูบส่งก๊าซก่อนเกิดเหตุการณ์ระเบิดของก๊าซชีวภาพ	8-43
8.31	แสดงสภาพข้อต่อรับการขยายตัวที่แตกรั่ว	8-43
8.32	แสดงสภาพข้อต่อรับการขยายตัวที่แตกรั่ว	8-44
8.33	แสดงแหล่งจุดระเบิดภายในห้องสูบส่งก๊าซ	8-45
8.34	แสดงสภาพหม้อน้ำมันร้อน ภายหลังการระเบิดของก๊าซชีวภาพในห้องเผาไหม้	8-46
8.35	แสดงอุปกรณ์ควบคุมก๊าซก่อนเข้าหัวเผา	8-48
8.36	แสดงผลการวิเคราะห์ด้วย Gas Analyzer	8-50
8.37	แสดง Double Solenoid Valve และ Valve Proving Systems	8-51
8.38	แสดง Valve Proving Systems	8-52
8.39	แสดงสภาพการถูกกัดกร่อนของ Double Solenoid Valve	8-53
8.40	แสดงสภาพของ Double Solenoid Valve ที่ถอดชิ้นส่วนออก	8-53
8.41	แสดงลักษณะและการทำงานปกติของ Double Solenoid Valve	8-54
8.42	แสดงสภาพก้านวาล์วและรูก้านวาล์ว	8-54
8.43	แสดงภาพความเสียหายเนื่องจากแรงระเบิด	8-56
8.44	แสดงสภาพภายในท่อที่สกปรก และเต็มไปด้วยการกัดกร่อน	8-57

รูปที่		หน้า
8.45	แสดงภาพการชำรุดและอุดตันของวาล์ว Valve Proving Systems	8-57
8.46	แสดงความเสียหายจากการระเบิด	8-58
8.47	แสดงการตรวจสอบการรั่วไหลของ Double Solenoid Valve และแสดงภาพวาล์วที่ถอดชิ้นส่วน	8-59
8.48	แสดงการตรวจสอบ Valve Proving Systems (VPS) และไฟที่แสดงการทำงานว่าปกติบน VPS (ภาพซ้ายล่าง) เกิดจากการลัดวงจรอันเนื่องมาจากการอุดตัน	8-60
8.49	แสดงสภาพภายในท่อส่งก๊าซชีวภาพ	8-60
9.1	แสดงองค์ประกอบ 3 อย่างที่ทำให้เกิดการจุดติดไฟ และการระเบิด	9-2
9.2	แสดงป้ายอุปกรณ์ป้องกันการระเบิดตามมาตรฐานยุโรป	9-9
9.3	แสดงการจัดแบ่งโซนรอบหน้าแปลน และข้อต่อของท่อก๊าซ	9-20
9.4	แสดงการจัดแบ่งโซนที่เครื่องวัดวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซแบบต่อเนื่อง	9-21
9.5	แสดงการจัดแบ่งโซนที่เครื่องวัดวิเคราะห์ก๊าซแบบพกพาหรือ Hand Held Gas Detector	9-22
9.6	แสดงการจัดแบ่งโซนที่ระบบผลิต/เก็บก๊าซชีวภาพแบบหลังคาคงตัว (Fixed Roof) และหลังคาลอย (Floating Roof) และระบบเก็บก๊าซ (Gas Storage)	9-23
9.7	แสดงการจัดแบ่งโซนที่ระบบผลิต/เก็บก๊าซชีวภาพแบบบอลลูนสองชั้นและแบบโดม	9-24
9.8	แสดงการจัดแบ่งโซนที่ระบบผลิต/เก็บก๊าซแบบ Cover lagoon	9-24
9.9	แสดงการจัดแบ่งโซนที่เครื่องเพิ่มความดันก๊าซและอุปกรณ์ใช้ประโยชน์ก๊าซชีวภาพในห้องแบบมีระบบ Ventilation ที่อัตราการระบายอย่างน้อย 12 เท่าของห้องต่อหนึ่งชั่วโมง (Air change rate per hour)	9-26
9.10	แสดงการจัดแบ่งโซนที่เครื่องเพิ่มความดันก๊าซและอุปกรณ์ใช้ประโยชน์ก๊าซชีวภาพหลายเครื่องในห้องแบบมีระบบ Ventilation ที่อัตราการระบายอย่างน้อย 12 เท่าของห้องต่อหนึ่งชั่วโมง (Air change rate per hour)	9-27

รูปที่		**หน้า**

9.11	แสดงการจัดแบ่งโซนที่เครื่องเพิ่มความดันก๊าซและอุปกรณ์ใช้ประโยชน์ก๊าซชีวภาพในห้องแบบมีระบบ Ventilation ที่อัตราการระบายต่ำกว่า 12 เท่าของห้องต่อหนึ่งชั่วโมง หรือใช้วิธีการระบายแบบธรรมชาติ	9-28
9.12	แสดงการจัดแบ่งโซนที่เครื่องเพิ่มความดันก๊าซและอุปกรณ์ใช้ประโยชน์ก๊าซชีวภาพในพื้นที่โล่งกลางแจ้ง	9-28
9.13	แสดงการจัดแบ่งโซนที่เครื่องเพิ่มความดันก๊าซและอุปกรณ์ใช้ประโยชน์ก๊าซชีวภาพในอาคารเปิดแบบไม่มีผนังห้อง การระบายแบบธรรมชาติ	9-29
9.14	แสดงการจัดแบ่งโซนที่อุปกรณ์ป้องกันไฟย้อนกลับ หรือ Flame Arrester	9-29
9.15	แสดงการจัดแบ่งโซนที่เครื่องดักน้ำและหม้อกรองติดตั้งด้านก่อนเข้าเครื่องเพิ่มความดัน วิธีการถ่ายน้ำแบบ manual	9-30
9.16	แสดงการจัดแบ่งโซนที่เครื่องดักน้ำและหม้อกรองติดตั้งด้านก่อนเข้าเครื่องเพิ่มความดัน วิธีการถ่ายน้ำออกแบบใช้ลูกลอย	9-31
9.17	แสดงการจัดแบ่งโซนที่ไซโคลน/อุปกรณ์แยกน้ำติดตั้งทางด้านขาออกของเครื่องเพิ่มความดัน วิธีการถ่ายน้ำแบบ manual	9-32
9.18	แสดงการจัดแบ่งโซนที่ไซโคลน/อุปกรณ์แยกน้ำติดตั้งทางด้านขาออกของเครื่องเพิ่มความดัน วิธีการถ่ายน้ำแบบลูกลอย	9-33
9.19	แสดงลักษณะการต่อฝาก และการต่อลงดิน	9-35
9.20	แสดงลักษณะการต่อฝาก สำหรับวาล์ว ท่อ และหน้าแปลน	9-35
9.21	แสดงลักษณะการทำ Potential Equalization ของท่อและหน้าแปลน	9-36
9.22	แสดงลักษณะการออกแบบระบบฟ้าผ่า	9-38
9.23	แสดงลักษณะการป้องกันถังปฏิกรณ์ที่มีโดมคลุมด้วยเสาเหล็กป้องกันฟ้าผ่า	9-39
9.24	แสดงถังปฏิกรณ์ที่มีเสาเหล็กป้องกันฟ้าผ่าที่มี 1 ตัวนำ	9-39
9.25	แสดงถังปฏิกรณ์ที่มีเสาเหล็กป้องกันฟ้าผ่าที่มี 2 ตัวนำ	9-40
9.26	แสดงตัวอย่างพื้นที่อับอากาศ	9-46
9.27	แสดงการผายปอด	9-51
9.28	แสดงการผายปอดด้วยวิธีการเป่าปาก	9-52

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1	แสดงระดับความเข้มข้นของสารต่างๆ ที่เป็นอันตรายต่อแบคทีเรีย ในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้อากาศ	2-12
3.1	แสดงองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ	3-1
3.2	แสดงคุณสมบัติของก๊าซบางชนิดในก๊าซชีวภาพ	3-2
3.3	แสดงค่าคงที่ของสมการ (Regression coefficient) สำหรับก๊าซ	3-9
3.4	แสดงผลของคาร์บอนไดออกไซด์ในกาซชีวภาพต่อความเร็วเปลวไฟ	3-10
3.5	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนสูญเสียในไอเสียกับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซชีวภาพ	3-14
3.6	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของก๊าซ และความดันไอที่อิ่มตัวของน้ำที่ความดัน 101.3 กิโลพาสคาล สมบูรณ์ (ความดันบรรยากาศ)	3-16
3.7	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันรวม และสัดส่วนของก๊าซแห้ง ($1-x_w$) ที่อุณหภูมิ 15.6°ซ	3-17
3.8	แสดงการหาค่าความร้อนรวมของก๊าซชีวภาพ (บนฐานก๊าซแห้ง)	3-18
3.9	แสดง Wobbe Index ของก๊าซเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ	3-20
4.1	แสดงแนวทางที่ใช้ในการจำแนกชนิดของระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ	4-1
4.2	สรุปข้อเด่น-ข้อจำกัดของระบบบำบัดน้ำเสียและผลิตก๊าซชีวภาพรูปแบบต่างๆ	4-25
4.3	แสดงการเปรียบเทียบเทคโนโลยีระบบผลิตก๊าซชีวภาพ	4-28
4.4	แสดงจำนวนระบบก๊าซชีวภาพในแต่ละประเภทของเทคโนโลยีที่ปัจจุบันมีการใช้ในประเทศไทย	4-29
4.5	แสดงการประมาณค่าใช้จ่ายในการลงทุนและค่าเดินระบบ	4-30
5.1	แสดงสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมสำหรับระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ	5-8

ตารางที่ **หน้า**

ตารางที่		หน้า
5.2	ตารางการวิเคราะห์ผลน้ำเสีย ชุดที่ 1	5-9
5.3	ตารางการวิเคราะห์ผลน้ำเสีย ชุดที่ 2	5-12
6.1	แสดงการจำแนกการเก็บก๊าซ	6-1
6.2	แสดงคุณสมบัติด้านความดันใช้งานของท่อ HDPE PE100 และ PE80	6-15
6.3	แสดงขนาดท่อ HDPE ที่นิยมใช้ในระบบก๊าซชีวภาพ	6-15
6.4	แสดงอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพที่ขนาดท่อต่างๆ	6-17
6.5	แสดงค่า Minor Loss Coefficient (ไม่มีหน่วย)	6-20
6.6	แสดงตัวอย่างการกำหนดสีและระบุตัวอักษรของท่อ	6-23
6.7	แสดงตัวอย่างการกำหนดขนาดของแถบสีและตัวหนังสือ	6-23
6.8	แสดงช่วงระยะห่างของตัวที่รองรับที่เหมาะสมกับท่อก๊าซ	6-24
6.9	แสดง Thermal Expansion ของท่อ	6-26
6.10	แสดงชนิดของวาล์วที่ใช้ในท่อก๊าซชีวภาพ	6-30
6.11	แสดงอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางถัง Knock out Drum	6-43
6.12	แสดงมาตรฐานการจำแนกกลุ่มก๊าซและไอระเหยของกลุ่มประเทศยุโรป	6-48
6.13	แสดงมาตรฐานการจำแนกกลุ่มก๊าซและไอระเหยของประเทศสหรัฐอเมริกา	6-48
6.14	แสดงค่ามาตรฐานการเดินระบบเผาก๊าซทิ้งแบบปิด	6-55
6.15	แสดงการเปรียบเทียบระหว่างระบบเผาก๊าซทิ้งแบบเปิด และแบบปิด	6-55
7.1	แสดงการเปรียบเทียบจุดเด่น (ข้อดี) – ข้อจำกัด (ข้อเสีย) ของระบบกำจัดความชื้นในก๊าซชีวภาพต่างๆ	7-7
7.2	แสดงการประมาณค่าใช้จ่ายในการลงทุนและค่าเดินระบบ	7-8
7.3	แสดงการเปรียบเทียบเทคโนโลยีการกำจัดความชื้นในก๊าซชีวภาพต่างๆ	7-8
7.4	แสดงการเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของระบบกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ต่างๆ	7-20
7.5	แสดงการประมาณค่าใช้จ่ายในการลงทุนและค่าเดินระบบ	7-24
7.6	แสดงการเปรียบเทียบเทคโนโลยีการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์	7-24
7.7	แสดงการเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของระบบกำจัด CO_2 ต่างๆ	7-34
7.8	แสดงการประมาณค่าใช้จ่ายในการลงทุนและค่าเดินระบบกำจัด CO_2	7-36

ตารางที่ **หน้า**

7.9	แสดงการเปรียบเทียบเทคโนโลยีการกำจัด CO_2	7-36
7.10	แสดงประสิทธิภาพการกำจัดไซลอกเซน เมื่อใช้กรดความเข้มข้นต่างๆ	7-41
7.11	แสดงการเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของระบบกำจัดไซลอกเซน ต่างๆ	7-42
8.1	แสดงลักษณะของก๊าซชีวภาพที่แนะนำให้ใช้กับเทคโนโลยีการใช้ประโยชน์ต่างๆ	8-7
8.2	แสดงคุณสมบัติเฉพาะของก๊าซชีวภาพที่ใช้กับเครื่องยนต์ของผู้ผลิตเครื่องยนต์ต่างๆ	8-19
8.3	แสดงชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง	8-27
8.4	แสดงรายการตรวจสอบและการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในระบบก๊าซชีวภาพ	8-35
8.5	แสดงปัญหาและผลกระทบเกี่ยวกับการใช้งานก๊าซชีวภาพ	8-38
8.6	แสดงปัญหาและผลกระทบที่เกิดขึ้นกับการใช้ก๊าซชีวภาพ	8-40
9.1	แสดงระดับการรั่วไหลของสารไวไฟ	9-6
9.2	แสดงการเปรียบเทียบมาตรฐานการจำแนกประเภทของพื้นที่ที่มีสารไวไฟ ของยุโรปและอเมริกา	9-6
9.3	แสดงความสัมพันธ์ของโซน กับโอกาสความเสี่ยงและระดับความรั่วไหล	9-7
9.4	แสดงการแบ่งกลุ่ม (Equipment groups) และประเภท (Categories) ของอุปกรณ์	9-10
9.5	แสดงชนิดอุปกรณ์ป้องกันการระเบิดแบ่งตามเทคนิคการป้องกัน	9-13
9.6	แสดงตัวอย่างก๊าซหรือไอระเหยของสารไวไฟเรียงลำดับตามอันตรายของสารไวไฟ	9-15
9.7	แสดงระดับอุณหภูมิการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้า (Temperature Classes)	9-16

บทที่ 1
สถานการณ์การผลิตและใช้ก๊าซชีวภาพในประเทศไทย

การใช้พลังงานของโลกเราทุกวันนี้ กำลังเปลี่ยนจากการใช้พลังงานสิ้นเปลืองไปเป็นการใช้พลังงานหมุนเวียนที่ต้องอาศัยเทคโนโลยีในการผลิตมากยิ่งขึ้น เช่น จากเดิมเราใช้น้ำมันปิโตรเลียมเป็นแหล่งพลังงานหลักก็เปลี่ยนมาเป็นการใช้พลังงานทดแทนจากแสงอาทิตย์ ลม หรือชีวมวล ซึ่งต้องอาศัยเทคโนโลยีในการเปลี่ยนรูปพลังงานเหล่านี้ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าสำหรับให้เราใช้สอยได้ต่อไป

ในปี พ.ศ. 2549 ประเทศไทยโดยกระทรวงพลังงานได้กำหนดมาตรการและกลยุทธ์ด้านพลังงานที่สำคัญของประเทศ 3 มาตรการ โดย 2 ใน 3 มาตรการหลัก มุ่งเน้นการส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนน้ำมัน และการตั้งเป้าผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน เช่น พลังงานชีวภาพ พลังงานน้ำ พลังงานแสงอาทิตย์ และพลังงานลม ซึ่งมาตรการเหล่านี้ตั้งขึ้นเพื่อลดการพึ่งพาการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศ และส่งเสริมให้ประเทศไทยหันมาผลิตพลังงานไว้ใช้เป็นของตนเอง โดยเหนือสิ่งอื่นใดก็ต้องอาศัยความร่วมมือของคนไทยในประเทศที่ช่วยกันประหยัดพลังงาน

ปัจจุบันประเทศไทยมีโรงงานอุตสาหกรรมเกี่ยวกับอาหารถึงประมาณ 10,000 โรงงาน ซึ่งลักษณะที่สำคัญอย่างหนึ่งของโรงงานประเภทนี้ คือ มีน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตเป็นจำนวนมากที่ต้องบำบัด ในขณะเดียวกันภายในโรงงานก็มีการใช้พลังงานในกระบวนการผลิต ไม่ว่าในรูปของน้ำมันเตาและไฟฟ้าเป็นจำนวนมาก ตัวอย่างเช่น โรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง จะมีของเสียในรูปน้ำเสียซึ่งมีสารอินทรีย์ปะปนอยู่ในรูปซีโอดี (Chemical Oxygen Demand : COD) ถึง 15 ลูกบาศก์เมตรต่อการผลิตแป้ง 1 ตัน และมีการใช้พลังงานในรูปน้ำมันเตาเพื่อการอบแห้ง 40 ลิตร และกระแสไฟฟ้า 165 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตันแป้ง รวมค่าใช้จ่ายพลังงานประมาณ 1,000 บาทต่อการผลิตแป้ง 1 ตัน

ในอดีต โดยทั่วไปการบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังนิยมใช้ระบบบำบัดแบบบ่อเปิด ซึ่งใช้พื้นที่ไม่ต่ำกว่า 100 ไร่ มักมีปัญหาเรื่องกลิ่นเหม็นรบกวนชาวบ้านบริเวณใกล้เคียง และระบบมีประสิทธิภาพต่ำในการบำบัดน้ำเสีย ทำให้โรงงานแต่ละแห่งเสียค่าใช้จ่ายสารเคมีในการบำบัดไม่ต่ำกว่าเดือนละ

สองแสนบาทและที่สำคัญที่สุด คือ การปลดปล่อยมลมลภาวะสู่สิ่งแวดล้อม เช่น กลิ่นเหม็นจากระบบบำบัดและกรณีของก๊าซเรือนกระจก ซึ่งถูกนำมาเป็นข้อกีดกันทางการค้าที่ประเทศผู้ส่งออกต้องถือปฏิบัติให้เป็นไปตามมาตรฐานที่เข้มงวด ดังนั้นการส่งเสริมการนำน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมเกี่ยวกับอาหารมาใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพ นอกจากจะสามารถใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทนสำหรับใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมเองแล้ว ยังช่วยแก้ปัญหาเรื่องสิ่งแวดล้อม และลดต้นทุนการบำบัดน้ำเสียได้อีกทางหนึ่ง การบำบัดน้ำเสียที่มีส่วนผลิตก๊าซชีวภาพจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่สำคัญในสภาวะที่การใช้พลังงานของประเทศไทยและราคาน้ำมันในตลาดโลกเพิ่มขึ้น ซึ่งช่วยลดต้นทุนการผลิตของโรงงานอย่างคุ้มค่า

การผลิตและใช้งานระบบผลิตก๊าซชีวภาพในโรงงานอุตสาหกรรมของประเทศไทยนั้น ภาครัฐมีส่วนสำคัญเป็นอย่างมากในการส่งเสริม โดยการให้เงินทุนสนับสนุน การประชาสัมพันธ์ และสร้างความเชื่อมั่นให้แก่ผู้ประกอบการโรงงาน พัฒนาการของการใช้ระบบผลิตก๊าซชีวภาพของโรงงานอุตสาหกรรมในประเทศไทย อาจแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง ดังนี้

- **ช่วงแรก : ยุคบุกเบิก**

เป็นการนำระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศมาใช้เสริม หรือทดแทนระบบแบบเติมอากาศ จุดประสงค์ก็เพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียมากกว่าความต้องการในการได้ก๊าซชีวภาพมาใช้เป็นพลังงานทดแทน โรงงานอุตสาหกรรมที่มีระบบผลิตก๊าซชีวภาพในยุคแรกนี้ ได้แก่ โรงงานสุรา/เบียร์ ส่วนโรงงานผลิตภัณฑ์อาหารและโรงงานแป้งก็เริ่มใช้ระบบผลิตก๊าซชีวภาพบ้าง โดยเทคโนโลยีระบบผลิตก๊าซชีวภาพโดยส่วนใหญ่มักจะเป็นของต่างประเทศ

- **ช่วงที่สอง : ยุคระบบต้นแบบ**

เป็นช่วงที่ภาครัฐเริ่มให้การสนับสนุนการใช้งานระบบผลิตก๊าซชีวภาพในโรงงานอุตสาหกรรม ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดวิกฤติการพลังงานของโลก ประกอบกับความสำเร็จของโครงการส่งเสริมก๊าซชีวภาพในฟาร์มเลี้ยงสัตว์ เพื่อเป็นพลังงานทดแทนและปรับปรุงสิ่งแวดล้อม ที่ดำเนินการโดยมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ร่วมกับองค์การความร่วมมือทางวิชาการเยอรมัน-ไทย (GTZ) โดยสำนักงานคณะกรรมการพลังงานแห่งชาติ (สพช. หรือในปัจจุบันคือ สนพ.) เป็นผู้ให้เงินทุนสนับสนุน ช่วงการสนับสนุนโดยภาครัฐให้ใช้ระบบผลิตก๊าซชีวภาพในโรงงานอุตสาหกรรมนี้ เริ่มประมาณปี พ.ศ. 2540 โดย สพช. ได้ให้ทุนสนับสนุนการก่อสร้างระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบตรึงฟิล์มจุลินทรีย์ในโรงงานแป้งข้าว จังหวัดนครปฐม ที่มีวัตถุประสงค์เพื่อแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อมและผลิตไฟฟ้าจากก๊าซชีวภาพ ผลสำเร็จจากการใช้ระบบผลิตก๊าซชีวภาพในโรงงานอุตสาหกรรมดังกล่าว ส่งผลให้เกิด

โครงการผลิตก๊าซชีวภาพในโรงงานอุตสาหกรรมขึ้น โดยสำนักงานนโยบายพลังงานแห่งชาติ (สนพ.) ได้ใช้เงินกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานในการสนับสนุนการก่อสร้างระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ในโรงงานอุตสาหกรรม 12 แห่ง เพื่อเป็นต้นแบบและสร้างความเชื่อมั่นในเทคโนโลยี โดยหน่วยงานเจ้าของโครงการหรือผู้ออกแบบต้องเป็นเฉพาะหน่วยงานภาครัฐหรือองค์กรไม่แสวงหากำไรเท่านั้น หน่วยงานเจ้าของโครงการมี 4 หน่วยงาน คือ กรมโรงงานอุตสาหกรรม กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) มูลนิธิสถาบันก๊าซชีวภาพ และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

- **ช่วงปัจจุบัน**

ผู้ประกอบการมีความเชื่อมั่นในเทคโนโลยีระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ ว่าสามารถที่จะใช้แก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อมได้ดี และยังให้ผลตอบแทนการลงทุนกลับคืนได้ด้วย โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง การสกัดน้ำมันปาล์ม และการผลิตเอธานอล อย่างไรก็ตาม การสนับสนุนโดยภาครัฐยังคงเป็นสิ่งที่จำเป็น เนื่องจากวงเงินลงทุนค่าก่อสร้างระบบที่สูงยังคงเป็นอุปสรรค นอกจากนี้ในอุตสาหกรรมเกษตรประเภทอื่น เช่น โรงงานอาหารทะเล โรงงานผลไม้แปรรูป โรงงานขนมปัง โรงงานก๋วยเตี๋ยว โรงงานลูกอม โรงงานผลิตน้ำยางข้น ฯลฯ ลักษณะน้ำเสียที่มีปริมาณสารอินทรีย์ไม่มากและอาจมีสารพิษ ทำให้ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้รับจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมีไม่มากเพียงพอ ที่จะได้รับผลตอบแทนการลงทุนที่คุ้มค่า หากไม่มีเงินทุนสนับสนุนจากภาครัฐ

จากการที่ผู้ประกอบการโรงงานให้ความยอมรับ เชื่อมั่นในเทคโนโลยี และประกอบกับการที่ภาครัฐยังคงให้การสนับสนุนอยู่ ทำให้ในปัจจุบันมีโรงงานอุตสาหกรรมที่ติดตั้งระบบผลิตก๊าซชีวภาพอย่างหลากหลายเทคโนโลยีจำนวนถึง 214 โรงงาน (นับรวมโรงงานที่อยู่ในขั้นตอนการก่อสร้างระบบผลิตก๊าซชีวภาพด้วย) โดยแยกตามประเภทโรงงานได้ดังนี้

ประเภทโรงงาน	จำนวน (โรง)
1. โรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังและผลิตภัณฑ์แป้ง	72
2. โรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม	35
3. โรงงานผลิตเอธานอล	16
4. โรงงานสุรา/เบียร์	16
5. โรงงานผลิตภัณฑ์อาหารเครื่องดื่ม /แปรรูปอาหาร/อาหารแช่แข็ง	42
6. โรงฆ่าสัตว์	9
7. อื่นๆ เช่น ผลิตน้ำยางข้น /เคมี /ใช้วัสดุเหลือทิ้งผลิตเป็นก๊าซชีวภาพ และบ่อฝังกลบขยะ	24
รวมโรงงานที่มีระบบผลิตก๊าซชีวภาพ	**214**

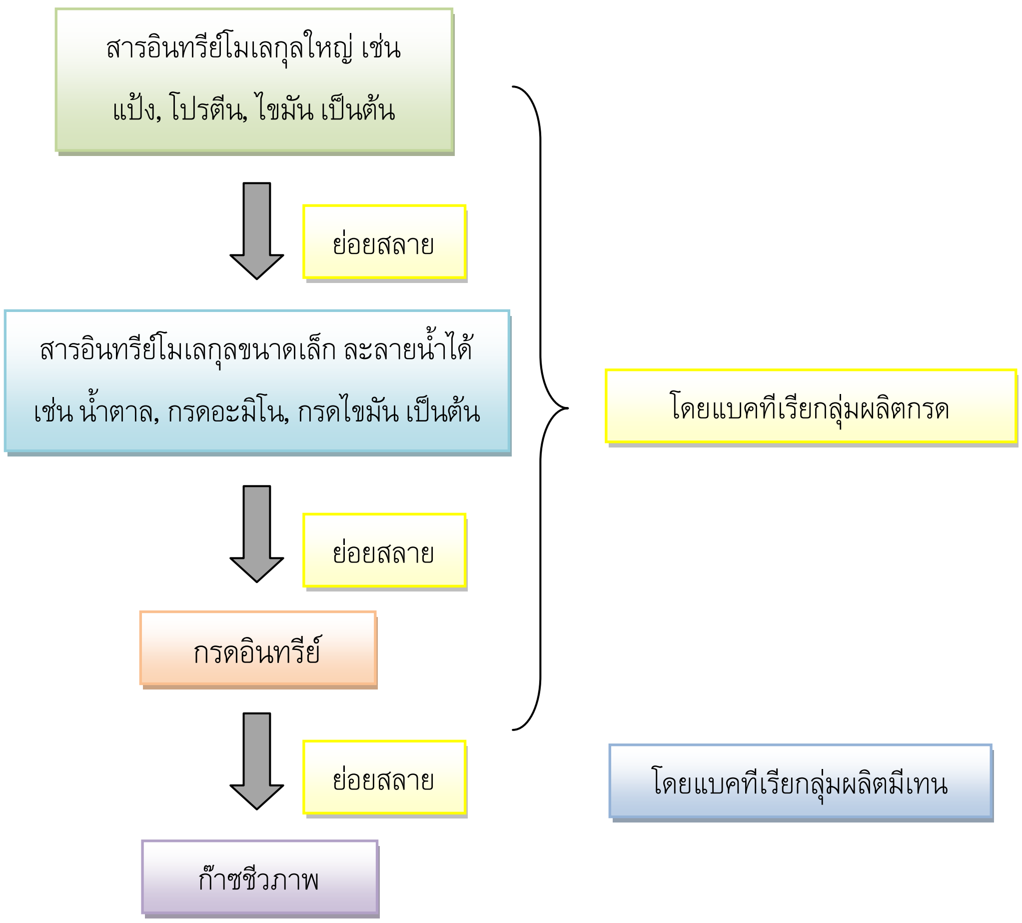
ที่มา: รวบรวมจากหน่วยงานรัฐที่เกี่ยวข้องกับการส่งเสริมและดำเนินงานระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ได้แก่ สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน และกรมพัฒนาพลังงานทดแทน รวมถึงหน่วยงานที่ปรึกษาด้านก๊าซชีวภาพ โดยเป็นข้อมูลถึงเดือนมิถุนายน 2553

บทที่ 2 ขั้นตอนการเกิดก๊าซชีวภาพ

2.1 กระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพ (Biogas) หมายถึง ก๊าซที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้อากาศด้วยแบคทีเรีย 2 กลุ่ม คือ แบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด* (Acid forming bacteria) และแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทน (Methane producing bacteria) โดยแบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด จะทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลใหญ่ ให้กลายเป็นสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลเล็กลง จากนั้นแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทนจะใช้สารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลเล็กเป็นสารอาหารและย่อยสลายให้ผลผลิตหลักเป็นก๊าซมีเทน (CH_4) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) โดยมีก๊าซอื่นๆ เกิดขึ้นในปริมาณเล็กน้อย เช่น ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) หรือก๊าซไข่เน่า และก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) เป็นต้น กระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพต้องระวังไม่ให้อากาศเข้าไปสัมผัสกับแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทน เพราะจะทำให้ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนลดลง ก๊าซชีวภาพสามารถเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติ เมื่อมีแบคทีเรีย สารอินทรีย์ และอยู่ในสิ่งแวดล้อมที่เหมาะสมในสภาวะที่ไม่มีอากาศ ในธรรมชาตินั้นก๊าซชีวภาพมักจะเกิดขึ้นบริเวณที่มีการหมักเช่น ก้นบ่อ ก้นแม่น้ำ ก้นทะเลสาบ หนองน้ำ บึงและนาข้าวที่มีน้ำท่วมขัง เป็นต้น กระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพแสดงได้ตามรูปที่ 2.1

* ในที่นี้ กรดหมายถึง กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile fatty acid)



รูปที่ 2.1 แสดงกระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพ

2.2 กระบวนการย่อยสลายในสภาวะไม่ใช้อากาศ (Anaerobic Digestion)

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ เป็นระบบที่มีความสำคัญต่อการบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์ (Organic matter) ปริมาณความเข้มข้นสูง ภายในระบบจะมีการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่มีอากาศซึ่งประกอบด้วย การย่อยสลายหลายขั้นตอนที่มีความซับซ้อน โดยการทำงานร่วมกันของแบคทีเรียหลายกลุ่ม แต่ละกลุ่มก็จะทำหน้าที่ต่างกันในแต่ละขั้นตอนของการย่อยสลาย เพื่อให้ได้ก๊าซชีวภาพซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานได้

2.2.1 ขั้นตอนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้อากาศ

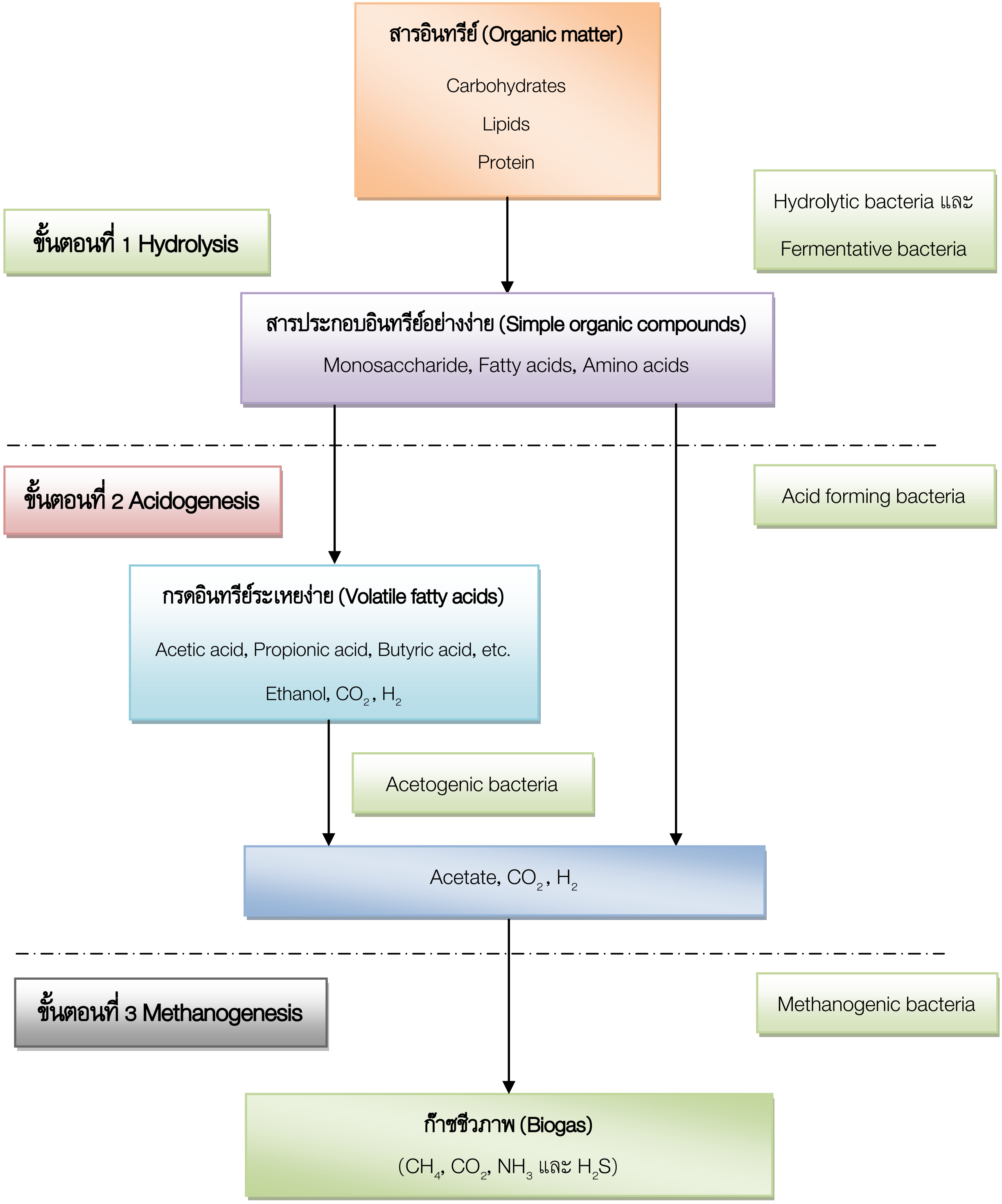
ในขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กระบวนการไฮโดรไลซีส (Hydrolysis)

เป็นขั้นตอนของการย่อยสลายสารอินทรีย์โครงสร้างโมเลกุลใหญ่ ทั้งที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีนและไขมัน เป็นต้น ให้มีขนาดโครงสร้างโมเลกุลเล็กที่สามารถละลายน้ำได้ ผลของปฏิกิริยาจะได้สารประกอบอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลเล็ก เช่น น้ำตาลกลูโคส กรดอะมิโน กรดไขมัน เป็นต้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรด–ด่าง (pH) ระยะเวลากักเก็บน้ำเสียและองค์ประกอบของสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ แบคทีเรียกลุ่มที่เกี่ยวข้องในขั้นตอนนี้คือ แบคทีเรียกลุ่มไฮโดรไลติค (Hydrolytic bacteria) และกลุ่มเฟอร์เมนเตทีฟ (Fermentative bacteria)

ขั้นตอนที่ 2 กระบวนการอะซิโดเจนีซีส (Acidogenesis)

สารประกอบอินทรีย์โครงสร้างโมเลกุลเล็กที่ละลายน้ำซึ่งถูกสร้างโดยกระบวนการไฮโดรไลซีส จะถูกแบคทีเรียที่ดำรงชีพอยู่ได้ทั้งสภาพที่มีและไม่มีอากาศ (Facultative bacteria) ใช้เป็นแหล่งอาหารและพลังงาน โดยในช่วงแรกของการย่อยสลายขั้นตอนนี้ ผลของปฏิกิริยาจะได้กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile fatty acid) ซึ่งที่โมเลกุลมีอะตอมของคาร์บอนไม่เกิน 5 ตัว เช่น กรดอะซิติก (CH_3COOH) กรดโพรพิออนิก (C_2H_5COOH) กรดบิวทีริก (C_3H_7COOH) เป็นต้น และสารอื่นๆ เช่น เอทานอล (C_2H_5OH) ไฮโดรเจน (H_2) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นต้น แบคทีเรียกลุ่มนี้เรียกว่า แบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด (Acid forming bacteria) ซึ่งชนิดของแบคทีเรียจะถูกเรียกแตกต่างกันไปตามชนิดของสารอินทรีย์นั้นๆ ขั้นตอนต่อมากรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่เกิดขึ้นดังกล่าวข้างต้นจะถูกแบคทีเรียกลุ่มอะซิโตเจนนิค (Acetogenic bacteria) เปลี่ยนให้เป็นอะซิเตต ฟอร์เมต ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นสารประกอบที่สำคัญในการผลิตก๊าซมีเทน ปฏิกิริยานี้ถือเป็นปฏิกิริยาสำคัญในการหลีกเลี่ยงไม่ให้มีการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายและก๊าซไฮโดรเจนในปริมาณที่สูงพอที่จะยับยั้งกระบวนการผลิตก๊าซมีเทน แบคทีเรียกลุ่มนี้อาจเรียกว่าแบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogen forming bacteria) เนื่องจากแบคทีเรียกลุ่มผลิตไฮโดรเจนมักสร้างกรดอินทรีย์ด้วย แต่ตัวที่ผลิตกรดได้อาจไม่สามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ จึงถือว่าแบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซไฮโดรเจนเป็นชนิดของแบคทีเรียกลุ่มผลิตกรดด้วย แบคทีเรียทั้ง 2 ชนิดอาจรวมเรียกว่าเป็นแบคทีเรียกลุ่มที่ไม่ผลิตก๊าซมีเทน (Non–methanogenic bacteria)



รูปที่ 2.2 ลำดับขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้อากาศ

ที่มา: Breure, A.M. and Andel, J.G., 1987.

ขั้นตอนที่ 3 กระบวนการผลิตก๊าซมีเทน (Methanogenesis)

กระบวนการผลิตก๊าซมีเทน เป็นขั้นตอนสุดท้ายของการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะแบบไม่ใช้อากาศ ผลผลิตสุดท้ายคือ ก๊าซมีเทน (CH_4) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และก๊าซอื่นๆ ในปริมาณเล็กน้อย เช่น ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) สารตั้งต้นของขั้นตอนนี้เป็นผลผลิตที่ได้มาจากขั้นตอนการผลิตกรด โดยสารตั้งต้นที่มีความสำคัญมากที่สุดคือกรดอะซิติก และก๊าซไฮโดรเจนกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ปฏิกิริยาดังสมการ

$$CH_3COOH \xrightarrow{\text{Acetophilic methanogen}} CH_4 + CO_2$$

$$CO_2 + 4H_2 \xrightarrow{\text{Hydrogenophilic methanogen}} CH_4 + 2H_2O$$

แบคทีเรียที่เกี่ยวข้องในขั้นตอนนี้มีความเฉพาะเจาะจงสูง คือ แบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทน (Methanogenic producing bacteria) ได้แก่ กลุ่ม Acetoclastic methanogenic bacteria (Acetophilic methanogen) และ Hydrogenophilic methanogen

ในระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้อากาศนี้ แบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทน มีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อมมาก และมีอัตราการเจริญเติบโตต่ำกว่า แบคทีเรียกลุ่มอื่นๆ ดังนั้นการเจริญเติบโตและปริมาณของแบคทีเรียกลุ่มนี้จึงเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ ลำดับขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้อากาศแสดงดังรูปที่ 2.2

2.2.2 แบคทีเรียที่เกี่ยวข้อง

ในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้อากาศ ต้องอาศัยการทำงานของแบคทีเรียหลายชนิดร่วมกัน ซึ่งแบคทีเรียที่มีบทบาทต่อกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้อากาศแบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ แบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด (Acid forming bacteria) และแบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทน (Methane producing bacteria)

1) แบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด (Acid forming bacteria)

แบคทีเรียส่วนใหญ่ในกลุ่มนี้คือ Facultative anaerobic bacteria ซึ่งสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ทั้งในสภาวะแวดล้อมที่มีและไม่มีอากาศ โดยได้รับพลังงานที่ใช้ในการเจริญเติบโตจากการย่อยสลายสารอินทรีย์โครงสร้างโมเลกุลใหญ่ให้เป็นกรดไขมัน กรดอินทรีย์ระเหยง่าย แอลกอฮอล์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซแอมโมเนียและก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ สภาวะที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตได้ดีในช่วงค่าความเป็นกรด-ด่าง 4.0-6.5 และทนต่อการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อมได้ดี มีอัตราการเจริญเติบโตสูง แบคทีเรียกลุ่มผลิตกรดแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มดังนี้

1.1) อะซิโดเจนนิคแบคทีเรีย

แบคทีเรียกลุ่มนี้เป็นกลุ่มใหญ่ที่สุดในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศ เนื่องจากสามารถใช้อาหารได้หลายชนิดและมีอัตราการเจริญเติบโตสูง แบคทีเรียกลุ่มนี้ทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์โครงสร้างโมเลกุลใหญ่ ให้เป็นสารโมเลกุลเดี่ยวที่ละลายน้ำได้ ผลผลิตที่ได้จากการย่อยสลายเป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่าย ได้แก่ กรดอะซิติก กรดโพรพิออนิก กรดบิวทีริก กรดฟอร์มิก เป็นต้น นอกจากนี้ยังได้สารประกอบพวกแอลกอฮอล์ คีโตน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจน แบคทีเรียในกลุ่มนี้ประกอบด้วยแบคทีเรียกลุ่มที่ไม่ชอบอากาศและแบคทีเรียกลุ่มที่เจริญได้ทั้งที่มีและไม่มีอากาศ (Facultative anaerobic bacteria)

1.2) อะซิโตเจนนิคแบคทีเรีย

แบคทีเรียกลุ่มนี้เป็นพวกย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ได้จากการย่อยสลายในกระบวนการไฮโดรไลซีสและอะซิโดเจนีซีส แล้วเปลี่ยนเป็นให้กรดอะซิติก สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มย่อย คือ

ก) Hydrogen producing acetogenic bacteria

แบคทีเรียในกลุ่มนี้ทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในขั้นตอนไฮโดรไลซีส ซึ่งได้แก่ แอลกอฮอล์และกรดอินทรีย์ที่มีอะตอมของคาร์บอนเป็นส่วนประกอบหลายตัว แล้วได้เป็นกรด อะซิติกและก๊าซไฮโดรเจน หรือกรดอะซิติก ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนเป็นผลผลิต ดังสมการ

$$C_2H_5OH + H_2O \longrightarrow CH_3COOH + 2H_2$$

$$C_2H_5COOH + 2H_2O \longrightarrow CH_3COOH + CO_2 + 3H_2$$

$$C_3H_7COOH + 2H_2O \longrightarrow 2CH_3COOH + 2H_2$$

ข) Homoacetogenic bacteria แบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม ได้แก่

ข1) Autotroph ได้แก่ แบคทีเรียที่ใช้สารประกอบที่มีคาร์บอน 1 อะตอม เช่นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจน ในการเจริญเติบโต และได้ผลผลิตสุดท้ายเป็น อะซิเตต (หรือกรดอะซิติก) ดังสมการ

$$4H_2 + 2CO_2 \longrightarrow CH_3COOH + 2H_2O$$

ข2) Heterotroph ได้แก่ แบคทีเรียที่ใช้สารประกอบที่มีคาร์บอนหลายอะตอมในการเจริญเติบโต ผลผลิตที่ได้มีทั้งอะซิเตตและโพรพิออเนตซึ่งเป็นสารตัวกลางที่สำคัญในการผลิตก๊าซมีเทน ดังสมการ

$$3C_6H_{12}O_6 \longrightarrow 4C_2H_5COOH + 2CH_3COOH + 2CO_2 + 2H_2O$$

*หมายเหตุ: การที่กรดอินทรีย์ซึ่งเป็นกรดอ่อน เมื่อละลายน้ำแล้วจะอยู่ในรูปเกลือของกรด เรียกเป็น–เอต เช่น กรดอะซิติก เมื่อแตกตัวได้ เป็นอะซิเตต และไฮโดรเจนไอออน

2) แบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทน (Methane producing bacteria)

แบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทนสามารถใช้สารอาหารได้ไม่กี่ชนิด แบคทีเรียกลุ่มนี้สามารถแบ่งตามชนิดการใช้สารอาหารตั้งต้นได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

2.1) Hydrogenotrophic methanogens หรือ Hydrogen utilizing chemolithotrophs

ซึ่งเปลี่ยนก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปเป็นก๊าซมีเทน ดังสมการ

$$CO_2 + 4H_2 \longrightarrow CH_4 + 2H_2O$$

แบคทีเรียกลุ่มนี้มีบทบาทสำคัญคือจะใช้ก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้อากาศขั้นตอนที่ 2 โดยช่วยคงสภาวะให้มีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนต่ำลง ซึ่งมีผลต่อการเกิด อะซิเตตอย่างต่อเนื่อง

2.2) Acetotrophic methanogens หรือ Acetoclastic bacteria

ซึ่งจะเปลี่ยนอะซิเตตไปเป็นก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการ

$$CH_3COOH \longrightarrow CH_4 + CO_2$$

ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์ประมาณ 2 ใน 3 เกิดจากการเปลี่ยน อะซิเตตไปเป็นก๊าซมีเทนโดยแบคทีเรียกลุ่ม Acetotrophic methanogens และที่เหลือเป็นผลของปฏิกิริยาระหว่างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนโดยแบคทีเรียกลุ่ม Hydrogenotrophic methanogens

ตัวอย่างปฏิกิริยาการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์กลุ่มต่างๆ

A. ปฏิกิริยาการย่อยสลายกลูโคส (Fermentative reactions) :

$$C_6H_{12}O_6 + 2H_2O \longrightarrow 2CH_3COOH + 2CO_2 + 4H_2$$

$$3C_6H_{12}O_6 \longrightarrow 4C_2H_5COOH + 2CH_3COOH + 2CO_2 + 2H_2O$$

$$C_6H_{12}O_6 \longrightarrow C_3H_7COOH + 2CO_2 + 2H_2$$

$$C_6H_{12}O_6 \longrightarrow 2C_3H_6O_3$$

$$C_6H_{12}O_6 \longrightarrow 2C_2H_5OH + 2CO_2$$

B. ปฏิกิริยาการเกิดกรดอะซิติก (Syntrophic acetogenic reactions) :

$$C_3H_8O_3 + H_2O \longrightarrow CH_3COOH + 3H_2 + CO_2$$

$$CH_3CHOHCOO^- + 2H_2O \longrightarrow CH_3COO^- + HCO_3^- + H^+ + 2H_2$$

$$C_2H_5OH + H_2O \longrightarrow CH_3COOH + 2H_2$$

$$C_3H_7COO^- + 2H_2O \longrightarrow 2CH_3COO^- + H^+ + 2H_2$$

$$C_2H_5COOH + 2H_2O \longrightarrow CH_3COOH + CO_2 + 3H_2$$

$$2CO_2 + 4H_2 \longrightarrow CH_3COO^- + H^+ + 2H_2O$$

C. ปฏิกิริยาการเกิดก๊าซมีเทน (Methanogenic reactions) :

$$4CH_3OH \longrightarrow 3CH_4 + HCO_3^- + H^+ + H_2O$$

$$CH_3OH + H_2 \longrightarrow CH_4 + H_2O$$

$$4H_2 + HCO_3^- + H^+ \longrightarrow CH_4 + 3H_2O$$

$$CH_3COOH \longrightarrow CH_4 + CO_2$$

$$CO_2 + 4H_2 \longrightarrow CH_4 + 2H_2O$$

$$4HCOO^- + H_2O + H^+ \longrightarrow CH_4 + 3HCO_3^-$$

$$HCOOH \longrightarrow H_2 + CO_2$$

D. ปฏิกิริยาการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Sulfidogenic reactions) :

$2C_3H_6O_3 + SO_4^{2-} \longrightarrow HS^- + 2CH_3COOH + CO_2 + HCO_3^- + H_2O$

$4H_2 + SO_4^{2-} + H^+ \longrightarrow 4H_2O + HS^-$

$CH_3COOH + SO_4^{2-} \longrightarrow HS^- + CO_2 + HCO_3^- + H_2O$

$4C_2H_5COOH + 3\,SO_4^{2-} \longrightarrow 4CH_3COOH + 4HCO_3^- + 3HS^- + H^+$

2.2.3 สภาวะแวดล้อมและปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายในสภาวะไม่ใช้อากาศ

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ จำเป็นต้องอาศัยการทำงานของแบคทีเรียหลายชนิดที่เจริญเติบโตร่วมกัน ดังนั้นในการเริ่มต้นเดินระบบจึงต้องมีสภาวะแวดล้อมและปัจจัยในระบบที่เหมาะสม หากสภาวะแวดล้อมเปลี่ยนแปลงไปทำให้แบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทนไม่เจริญเติบโต ก็จะทำให้เกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายจนอาจทำให้ระบบล้มเหลวได้ ดังนั้นจึงต้องเข้าใจถึงสภาวะแวดล้อมต่างๆ ที่มีผลต่อการทำงานของแบคทีเรีย สภาวะแวดล้อมและปัจจัยดังกล่าวมีดังนี้

1) อุณหภูมิ

อุณหภูมิมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีหรือปฏิกิริยาชีวเคมีจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น และอุณหภูมิที่แบคทีเรียเจริญเติบโตได้เป็นอุณหภูมิที่มีผลต่อองค์ประกอบของเซลล์และกิจกรรมของเอนไซม์ภายในเซลล์ อุณหภูมิถูกแบ่งเป็น 3 ช่วง คือ

ก) ช่วงไซโครฟิลิค (Psychrophilic) เป็นช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 20 องศาเซลเซียส

ข) ช่วงมีโซฟิลิค (Mesophilic) เป็นช่วงอุณหภูมิระหว่าง 20 – 45 องศาเซลเซียส

ค) ช่วงเทอร์โมฟิลิค (Thermophilic) เป็นช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่า 45 องศาเซลเซียส

สำหรับระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศจะมีช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ 2 ช่วงที่ทำให้เกิดก๊าซมีเทนขึ้นในระบบได้ดี คือ ช่วง 30 – 38 องศาเซลเซียส และช่วง 48 – 57 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามการเดินระบบที่ช่วงอุณหภูมิสูง มีข้อเสียที่ Thermophilic bacteria ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ไม่ดีเท่ากับ Mesophilic bacteria จึงมีความเสี่ยงต่อการล้มเหลวของระบบสูง และการเดินระบบที่อุณหภูมิสูงยังสิ้นเปลืองพลังงานในการควบคุมอุณหภูมิของถังปฏิกรณ์อีกด้วย

2) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ค่าความเป็นกรด-ด่าง เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ เป็นตัวที่วัดค่าความเป็นกรดหรือด่างในระบบ สำหรับระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ ค่าความเป็นกรด-ด่างที่

เหมาะสมควรอยู่ในช่วง 6.6–7.4 ซึ่งเป็นค่าความเป็นกรด-ด่างของระบบที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทน ซึ่งพบว่าในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศนั้นมีการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่างเกิดขึ้นอยู่เป็นประจำ โดยสาเหตุหลักของการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างภายในถังปฏิกรณ์ คือ ปริมาณสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ โดยถ้ามีการป้อนสารอินทรีย์เข้าในปริมาณมากเกินไป ก็จะทำให้แบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด ผลิตกรดอินทรีย์ระเหยง่ายในปริมาณมาก จนแบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทนไม่สามารถใช้ได้ทัน จึงเกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายในระบบ ส่งผลทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของระบบลดลง ดังนั้นระบบจะต้องมีความสามารถในการควบคุมการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่างที่ดี เพื่อรับมือกับกรดอินทรีย์ระเหยง่ายและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในระบบ หากระบบมีค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) ที่มากพอ ก็จะสามารถป้องกันการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่างในระบบได้

3) ค่าความเป็นด่าง (Alkalinity: Alk)

ค่าความเป็นด่างเป็นค่าที่บอกถึงปริมาณบัพเฟอร์ (Buffering capacity) ของระบบ ซึ่งมีความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่าง และยังเป็นตัวบ่งชี้เสถียรภาพของระบบ กล่าวคือถ้าระบบมีค่าความเป็นด่างสูง แสดงว่าระบบมีปริมาณบัพเฟอร์สูง สามารถรักษาค่าความเป็นกรด-ด่างของระบบให้คงตัวอยู่ได้นาน โดยไม่เกิดการแปรปรวนของค่าความเป็นกรด-ด่าง ได้ง่ายเมื่อมีปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายเพิ่มขึ้นในระบบ โดยพบว่าค่าความเป็นด่างภายในระบบควรมีอยู่ในช่วง 1,000 – 3,000 มิลลิกรัมของ $CaCO_3$/ลิตร ค่าความเป็นด่างที่มีในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศไม่ควรจะต่ำกว่า 1,000 มิลลิกรัมของ $CaCO_3$/ลิตร ที่จะช่วยต้านทานกับการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่าง ดังนั้นในการควบคุมระบบให้ทำงานเป็นปกติ จำเป็นต้องรักษาค่าความเป็นด่างไม่ให้มีค่าต่ำจนเกินไป เพื่อรักษาระดับค่าความเป็นกรด-ด่างในระบบบำบัด

4) กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile fatty acids: VFA)

ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายมีความสำคัญในการตรวจสอบสถานะสมดุลของระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ กรดอินทรีย์ระเหยง่าย ได้แก่ กรดอะซิติก กรดบิวทีริกและกรดโพรพิออนิก เป็นต้น ผลผลิตเหล่านี้เป็นสารตัวกลางส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้อากาศของแบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด หากพบว่าปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายมีมากขึ้น มักเป็นสัญญาณเตือนถึงความล้มเหลวของระบบ ในระบบที่มีการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายในปริมาณมาก (> 2,000 มิลลิกรัมของกรดอะซิติก/ลิตร) ช่วงแรกจะทำให้ค่าความเป็นด่างของระบบลดลง และถ้ายังไม่มีการกำจัดปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายให้น้อยลง ต่อมาค่าความเป็นกรด-ด่างของระบบก็จะลดต่ำลง และถ้าค่าความเป็นกรด-ด่างมีค่าต่ำกว่า 6.5 จะเป็น

อันตรายต่อแบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทน หากยังไม่ได้ทำการแก้ไขปล่อยให้ค่าความเป็นกรด-ด่างลดต่ำลงถึง 4.5 – 5.0 ก็จะทำให้ระบบเสียสมดุลเป็นผลให้ระบบล้มเหลวได้ ในสภาวะปกติปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายภายในถังปฏิกรณ์ไม่ควรเกิน 2,000 มิลลิกรัมของกรดอะซิติก/ลิตร และวิธีการควบคุมระบบที่ดีที่สุดควรให้มีค่าสัดส่วนระหว่างปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายต่อค่าความเป็นด่างไม่ควรเกิน 0.3 – 0.4

วิธีการแก้ไขให้ระบบกลับสู่สภาพสมดุล อาจทำได้ดังนี้

- ตรวจสอบที่มาของการป้อนสารอินทรีย์ที่มากเกิน
- การแก้ไขอาจเป็นการลดการป้อนสารอินทรีย์เข้าระบบ และควรมีบ่อเก็บน้ำเสียสำรอง
- กรณีฉุกเฉินถ้าต้องการควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่างให้เหมาะสมกับระบบ อาจจะใช้วิธีการเติมสารเคมี เช่น โซเดียมไบคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) โซเดียม ไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) เป็นต้น ไม่ควรใช้ปูนขาว $Ca(OH)_2$ เนื่องจากอาจจะทำให้เกิดการอุดตันในระบบได้

5) อัตราภาระการรับสารอินทรีย์ (Organic loading rate: OLR)

อัตราภาระการรับสารอินทรีย์ มีหน่วยเป็นน้ำหนักของซีโอดีที่อยู่ในน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบบำบัดต่อปริมาตรของบ่อบำบัดต่อวัน (kg COD/m^3.วัน) อัตราภาระการรับสารอินทรีย์มีความสัมพันธ์กับอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าสู่ระบบบำบัด (Feeding rate) ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดในการรักษาเสถียรภาพของระบบให้คงที่ การเปลี่ยนอัตราภาระการรับสารอินทรีย์สามารถทำได้ 2 วิธี คือ

ก) ทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าสู่ระบบบำบัด ซึ่งวิธีนี้จะมีผลต่อระยะเวลาการกักเก็บน้ำเสีย (Hydraulic retention time: HRT) ภายในระบบบำบัดด้วย

ข) การเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบของน้ำเสีย ซึ่งวิธีนี้ค่อนข้างทำได้ยาก เนื่องจากน้ำทิ้งของโรงงานแต่ละประเภทมีองค์ประกอบที่แตกต่างกัน

ดังนั้นในทางปฏิบัติ การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าสู่ระบบบำบัดทำได้ง่ายกว่า โดยต้องมีการควบคุมอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าสู่ระบบบำบัดให้สัมพันธ์กับระยะเวลาที่เหมาะสมในการสัมผัสกันระหว่างแบคทีเรียกับสารอินทรีย์ในน้ำเสีย เพื่อให้ระบบบำบัดสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

6) สารพิษ (Toxic substances)

โดยทั่วไปในน้ำเสียมักมีสารพิษหลายชนิดปะปนเป็นองค์ประกอบอยู่ ซึ่งระดับความเป็นพิษจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสารนั้นๆ หากมีการสะสมของสารบางอย่างภายในถังปฏิกรณ์ในปริมาณที่มากเกินจะเป็นพิษต่อแบคทีเรียได้ โดยอาจมีผลต่อการยับยั้ง (Inhibition) การเจริญเติบโต จนถึงทำให้แบคทีเรีย

ตายได้ และจะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพหรือเสถียรภาพของระบบลดลง

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศได้แบ่งสารพิษที่มีผลต่อแบคทีเรีย เช่น พิษของกรดอินทรีย์ระเหยง่าย ซึ่งมีผลต่อแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทน พิษของสารโลหะหนักชนิดต่างๆ พิษของแอมโมเนียมอิออน (NH_4^+) เป็นต้น ระดับความเข้มข้นของสารพิษที่เป็นอันตรายต่อแบคทีเรียในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้อากาศ แสดงดังตารางที่ 2.1

สำหรับโลหะหนักบางชนิดเช่น นิเกิล (Ni) โคบอลท์ (Co) เหล็ก (Fe) สังกะสี (Zn) ทองแดง (Cu) นั้นจัดเป็นธาตุอาหาร (trace element) ที่จำเป็นต่อแบคทีเรียด้วย ซึ่งมีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทน โดยแบคทีเรียมีความต้องการในปริมาณที่ต่ำมาก

ตารางที่ 2.1 ระดับความเข้มข้นของสารต่างๆ ที่เป็นอันตรายต่อแบคทีเรีย ในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้อากาศ

สารพิษ	**ความเข้มข้นสูงสุด ที่ไม่เป็นอันตรายต่อแบคทีเรีย** (มิลลิกรัมต่อลิตร)
Cu	1
Zn	5
Cr^{6+}	5
Cr^{3+}	2,000
Total chromium (Cr)	5
Ni	2
Cd	0.02
S^-	100
SO_4^{2-}	500
Ammonia	1,500
Na^+	3,500
K^+	2,50
Ca^{2+}	2,500
Mg^{2+}	1,000
Acrylonitrile	5

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

สารพิษ	**ความเข้มข้นสูงสุด ที่ไม่เป็นอันตรายต่อแบคทีเรีย** (มิลลิกรัมต่อลิตร)
Benzene	50
CCl_4	10
Chloroform	0.1
Pentachlorophenol	0.4
Cyanide	1

ที่มา: ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2525.

เอกสารอ้างอิง

1. Breure, A.M. and Andel, J.G., 1987, **Bioenvironmental Systems,** CRC Press, Cambridge Scientific, Florida, p. 97.
2. ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2525, **คู่มือวิเคราะห์น้ำทิ้ง,** จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, หน้า 89–121

บทที่ 3 สมบัติของก๊าซชีวภาพ

3.1 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพประกอบไปด้วยก๊าซหลายชนิด ส่วนใหญ่เป็นก๊าซมีเทน ประมาณ 50-70% และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ประมาณ 20-50% ส่วนที่เหลือเป็นก๊าซอื่นๆ เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ แอมโมเนีย (NH_3) และไอน้ำ (H_2O) นอกจากนี้ยังมีสิ่งปนเปื้อนอื่นๆ เช่น ไซลอกเซน (Siloxane) โฟม คราบ (Scum) เมือกและตะกอน เป็นต้น บางครั้งอาจพบปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) สูงถึง 1% (10,000 part per million (ppm)) ในกรณีที่น้ำเสียนั้นมีองค์ประกอบของสารซัลเฟต (SO^{2-}) สูง ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

องค์ประกอบ	ความเข้มข้น
CH_4	50 – 70 %(v/v)
CO_2	20 – 50 %(v/v)
H_2O (vapor)	0 –10 %(v/v)
N_2	0 – 5 %(v/v)
O_2	0 – 2 %(v/v)
NH_3	0 – 1 %(v/v)
H_2S	50 – 10,000 ppm

ที่มา: PROFITING FROM THE USE OF BIOGASTHE PANVITA CASE, Roland Tusar, www.intering.si

หมายเหตุ: ในตารางนี้ยังไม่ได้รวมถึงสิ่งปนเปื้อนอื่นๆ ที่มีในก๊าซชีวภาพ เช่น ไซลอกเซน โฟม คราบ ตะกอนต่างๆ เป็นต้น ซึ่งความเข้มข้นของสิ่งปนเปื้อนเหล่านี้ มากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับลักษณะของน้ำเสีย และการผลิตก๊าซชีวภาพ

มีเทนเป็นก๊าซที่ให้พลังงานหลัก ส่วนออกซิเจนและไนโตรเจนนั้น อาจจะเกิดขึ้นได้ในกรณีที่มีการเติมอากาศในท่อเพื่อกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ ขณะที่ไฮโดรเจนซัลไฟด์นั้น แม้จะให้พลังงานแต่ก็มีผลเสียต่อระบบการใช้งาน เพราะเมื่อไฮโดรเจนซัลไฟด์รวมกับน้ำหรือความชื้นก็จะมีฤทธิ์เป็นกรด เกิดการกัดกร่อนอุปกรณ์ได้ นอกจากนั้น ความชื้นยังทำให้เกิดคราบตะกรัน เมือกหรือตะกอนจุลินทรีย์ที่อุปกรณ์ต่างๆ เช่น Safety Valve ซึ่งมีผลต่อระบบความปลอดภัยของเครื่องจักร

ก๊าซชีวภาพที่มาจากขยะชุมชน จะมี Trace gas เช่น ไซลอกเซน เจือปนอยู่บ้าง ซึ่งไซลอกเซน ก็จะทำให้เกิดคราบตะกรันซิลิกอน และเกิดการกัดกร่อนในเครื่องจักร เช่น ที่ลูกสูบของเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้า ทำให้เครื่องจักรเกิดความเสียหาย และเป็นอันตรายต่อการใช้งาน

ในบทนี้จะกล่าวถึง สมบัติของก๊าซแต่ละชนิดในก๊าซชีวภาพ (ตารางที่ 3.2) และวิธีการคำนวณหาสมบัติของก๊าซชีวภาพซึ่งเป็นก๊าซผสม เพื่อเข้าใจสมบัติของก๊าซชีวภาพและใช้ในการออกแบบ เลือกอุปกรณ์ เครื่องจักรที่ใช้ในการลำเลียง การปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพให้เหมาะสม และนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์

ตารางที่ 3.2 แสดงสมบัติของก๊าซบางชนิดในก๊าซชีวภาพ

	CH_4	CO_2	H_2S
มวลโมเลกุล [กก./โมล]	16.04	44.01	34.08
ความหนาแน่น (@ 1.013 บาร์สมบูรณ์, 15°ซ) [กก./ลบ.ม.]	0.68	1.87	1.45
Critical Temperature [°ซ]	-82.7	31	100
Critical Pressure [บาร์สมบูรณ์]	45.96	73.825	89.37
Compressibility Factor (Z) (@ 1.013 บาร์สมบูรณ์, 15°ซ)	0.998	0.9942	0.9915
Sp. Gr. (เทียบกับอากาศ = 1) (@ 1.013 บาร์สมบูรณ์, 15°ซ)	0.55	1.521	1.189
Specific volume (@ 1.013 บาร์สมบูรณ์, 21°ซ) [ลบ.ม./กก.]	1.48	0.547	0.699
Heat capacity at constant pressure (Cp) (@ 1.013 บาร์สมบูรณ์, 25°ซ) [กิโลจูล/(โมล.เคลวิน)]	0.035	0.037	0.034
Heat capacity at constant volume (Cv) (@ 1.013 บาร์สมบูรณ์, 25°ซ) [กิโลจูล/(โมล.เคลวิน)]	0.027	0.028	-
Ratio, Cp/Cv (@ 1.013 บาร์สมบูรณ์, 25°ซ)	1.3054	1.2938	-

ตารางที่ 3.2 (ต่อ)

	CH_4	CO_2	H_2S
Thermal conductivity (@ 1.013 บาร์สมบูรณ์ , 0°ซ) [มิลลิวัตต์/เมตร เคลวิน]	32.81	14.65	12.98
High Heating Value (@ 1.013 บาร์สมบูรณ์ , 15.6°ซ) [เมกกะจูล/ลบ.ม.]	37.63	–	12
Lower Heating Value (@ 1.013 บาร์สมบูรณ์, 15°ซ) [เมกกะจูล/ลบ.ม.]	33.91	–	–
Solubility in water (@ 1.013 บาร์สมบูรณ์ , 2°ซ) vol/vol	0.054	1.7163	4.67
Auto-ignition temperature [°ซ]	595	–	270

ที่มา: http://encyclopedia.airliquide.com

3.2 สมบัติก๊าซชีวภาพ

3.2.1 สมการสถานะ

ในการระบุถึงสถานะของสารต่างๆ จะต้องระบุจากสมบัติที่วัดได้ เช่น ความดัน อุณหภูมิ ปริมาตรต่อโมล ซึ่งสมบัติดังกล่าวมีความสัมพันธ์กัน สมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติเหล่านี้เรียกว่า สมการสถานะ

ก๊าซเมื่ออยู่ในสถานะที่ความดันต่ำ (น้อยกว่า 4 บาร์สมบูรณ์) และอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤติ โมเลกุลของก๊าซไม่เกิดแรงดึงดูดหรือแรงผลักระหว่างกัน พฤติกรรมของก๊าซจะเป็นก๊าซอุดมคติ (Ideal gas) ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าว ถ้าเป็นก๊าซอุดมคติ จะสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$PV = nRT \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (3.1)$$

โดยที่
- P = ความดัน (กิโลพาสคาล)
- V = ปริมาตร (ลบ.ม.)
- n = จำนวนโมล ของก๊าซ (โมล)
- R = ค่าคงที่ของก๊าซ (universal gas constant)
- T = อุณหภูมิสัมบูรณ์ (เคลวิน) (อุณหภูมิเคลวิน = +273.75 องศาเซลเซียส)

แต่ถ้าก๊าซในระบบมีความดันสูงมาก และอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤติ ก๊าซจะมีพฤติกรรมที่เป็นก๊าซจริง (Real gas) ซึ่งเราสามารถจัดรูปสมการสถานะให้คล้ายกับสมการสถานะของก๊าซอุดมคติ โดยจะมีค่าแฟกเตอร์การอัดได้ (Compressibility factor, Z) มาคูณ

$$PV = ZRT \qquad \text{.........................} (3.2)$$

แต่ในที่นี้สภาวะการใช้งานของก๊าซชีวภาพในระบบผลิตก๊าซชีวภาพอยู่ในสภาวะความดันไม่เกิน 50 กิโลพาสคาล เกจ (500 มิลลิบาร์เกจ) ดังนั้นสามารถที่จะใช้สมการก๊าซอุดมคติ (Ideal gas) หรือ Z=1 มาอธิบายพฤติกรรมของก๊าซชีวภาพได้

3.2.2 ค่าแฟกเตอร์การอัดได้ (Compressibility factor, Z)

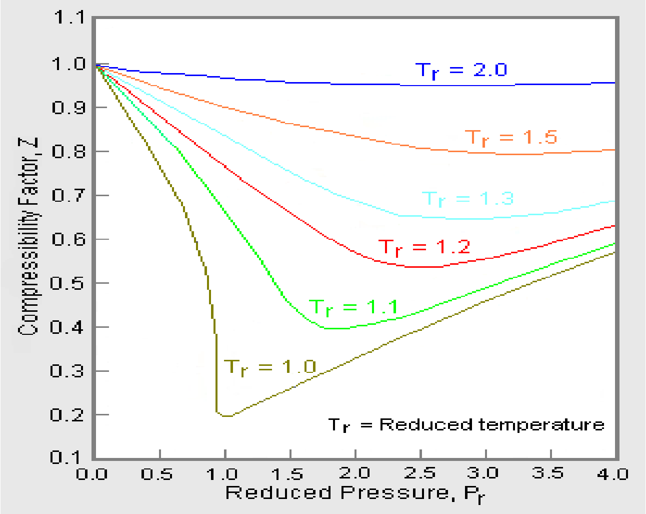
ค่าแฟกเตอร์การอัดได้ (Z) จะบ่งบอกถึงการเบี่ยงเบนของพฤติกรรมของก๊าซจากสภาพของก๊าซอุดมคติ ถ้าค่า Z ของก๊าซที่สภาวะใดๆ มีค่าเป็น 1 หมายถึง ก๊าซจะมีพฤติกรรมตามกฎของก๊าซอุดมคติ โดยทั่วไปค่า Z จะเพิ่มขึ้นเมื่อความดันสูงขึ้นและอุณหภูมิลดลง ขณะที่ถ้าความดันต่ำลงก็จะทำให้ค่า Z มีค่าน้อยกว่า 1 และยิ่งก๊าซอยู่ในสภาวะใกล้จุดวิกฤตของก๊าซนั้นๆ ก็จะมีค่า Z เบี่ยงเบนออกไป โดยค่า Z จะมีความสัมพันธ์กับค่าความดันลดส่วน (Reduced pressure, P_r) และอุณหภูมิลดส่วน (Reduced temperature, T_r)

$$P_r = \frac{P}{P_c} \qquad \text{.........................} (3.3)$$

$$T_r = \frac{T}{T_c} \qquad \text{.........................} (3.4)$$

เมื่อ P และ T คือ ความดัน และอุณหภูมิของก๊าซในสภาวะนั้นๆ

P_c และ T_c คือ ความดันวิกฤต และอุณหภูมิวิกฤตของก๊าซนั้นๆ



รูปที่ 3.1 แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างค่าแฟกเตอร์การอัดได้ (สำหรับก๊าซบริสุทธิ์)

ที่มา: http://en.citizendium.org/wiki/Compressibility_factor_(gases)

การหาค่า Z ของก๊าซผสม เช่น ก๊าซธรรมชาติ ก๊าซชีวภาพ หารายละเอียดเพิ่มเติมในหนังสือเทอร์โมไดนามิคทั่วไป

3.2.3 ความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะ

ความหนาแน่นของก๊าซชนิดต่างๆ สามารถหาได้โดยสมการ

$$\rho^{\cdot} = \frac{M}{MW \times V} = \frac{P}{RT} \qquad \text{...(3.5)}$$

เมื่อ $\rho^{\cdot}$ = ความหนาแน่นเชิงโมล (โมล/ลบ.ม)

R (universal gas constant) = 8.314 x 10^{-5} (ลบ.ม –บาร์ / โมล เคลวิน)

T = อุณหภูมิ (เคลวิน)

P = ความดัน (บาร์สมบูรณ์)

M = มวลของก๊าซ (กก.)

MW = มวลโมเลกุลของก๊าซ

จากนิยาม ก๊าซ 1 โมล มีปริมาตร 22.4 ลิตร ที่ 1.013 บาร์สมบูรณ์ และ 0°ซ ดังนั้นถ้าอุณหภูมิก๊าซเปลี่ยนเป็น 25°ซ ก๊าซ 1 โมล จะมีปริมาตรเปลี่ยนเป็นตามสมการ

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

$$V_2 = V_1 \frac{T_2}{T_1}$$

$$V_2 = 22.4 \times \frac{(273.15 + 25)}{(273.15)} = 24.45 \text{ ลิตร}$$

ตัวอย่างที่ 1

ก๊าซมีเทน 1 โมลโมเลกุล ที่ 1.013 บาร์สมบูรณ์, 0°ซ มีปริมาตร 22.4 ลิตร หรือมีมวล 16.04 กรัม ดังนั้น คำนวณค่าความหนาแน่นของก๊าซมีเทน คือ

16.04/22.4 = 0.716 กิโลกรัม / ลบ.ม.

หรือ ถ้าคำนวณเป็นค่า Specific volume (@1.013 บาร์สมบูรณ์, 0°ซ) เท่ากับ

1/0.716 = 1.3965 ลบ.ม./กิโลกรัม

ดังนั้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 25°ซ ปริมาตรก๊าซเปลี่ยนเป็น 24.45 ลิตร

ความหนาแน่นของก๊าซ จะเปลี่ยนเป็น

16.04/24.45 = 0.656 กิโลกรัม / ลบ.ม.

หรือมีค่า Specific volume (@1.013 บาร์สมบูรณ์, 25°ซ) เท่ากับ

1/0.656 = 1.5243 ลบ.ม./กิโลกรัม

ในการหาความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะของก๊าซชีวภาพซึ่งเป็นก๊าซผสมนั้น จะต้องใช้สมบัติของก๊าซแต่ละชนิดในก๊าซชีวภาพมาทำการคำนวณหาค่าสมบัติของก๊าซผสม โดยใช้กฎของการผสม ที่นิยามว่า สมบัติของก๊าซผสมเท่ากับผลรวมของสมบัติของก๊าซแต่ละชนิดคูณด้วยสัดส่วนของก๊าซนั้นๆ

$$[\text{Property}]_{\text{mix}} = \Sigma_{\text{i}}^{\text{n}}(\text{y}_{\text{i}} \times [\text{Property}]_{\text{i}}) \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (3.6)$$

โดยที่ i คือ ชนิดของก๊าซผสมในก๊าซชีวภาพ

y_i คือ อัตราส่วนโดยโมลของก๊าซผสมในก๊าซชีวภาพ

ตัวอย่างที่ 2

ก๊าซชีวภาพ 1 ลบ.เมตรที่ 1.013 บาร์สมบูรณ์, 25°ซ มีองค์ประกอบของก๊าซเป็น CH_4 64% และ CO_2 36% ก๊าซชีวภาพจะมีความหนาแน่นเท่าใด

จากตัวอย่างที่ 1 ก๊าซมีเทนมีความหนาแน่น 0.656 กิโลกรัม / ลบ.ม. (@1.013 บาร์สมบูรณ์, 25°ซ) ในทำนองเดียวกัน เราสามารถหาค่าความหนาแน่นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ได้เท่ากับ 1.7999 กิโลกรัม/ลบ.ม. (@1.013 บาร์สมบูรณ์, 25°ซ)

ก๊าซ	สัดส่วน y_i	ความหนาแน่น @1.013 บาร์สมบูรณ์ , 25°ซ	$(y_i \times [Property]_i)$
CH_4	0.64	0.656	0.4198
CO_2	0.36	1.7999	0.6480
	1		$\sum$ = **1.0678**

จากตาราง ผลรวมของค่าความหนาแน่นของก๊าซแต่ละชนิดคูณด้วยสัดส่วนของก๊าซนั้นๆ คือ ค่าความหนาแน่นของก๊าซชีวภาพเป็น 1.0678 กก./ลบ.ม. (ที่ 1.013 บาร์สมบูรณ์, 25°ซ)

ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity, Sp.gr) ของก๊าซโดยทั่วไปจะเป็นการเทียบความหนาแน่นของก๊าซผสมต่อความหนาแน่นของอากาศ ที่อุณหภูมิและความดันเดียวกัน เมื่อกำหนดให้ก๊าซชีวภาพมีพฤติกรรมเป็นก๊าซอุดมคติ สามารถหาค่าความถ่วงจำเพาะ ได้ดังสมการ (3.7)

$$Sp.gr = \frac{\rho_{gas}}{\rho_{air}} = \frac{M_g P_g T_{air} Z_{air}}{M_{air} P_{air} T_g Z_g} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (3.7)$$

อากาศแห้งที่สภาวะของ IUPAC standard temperature and pressure (0°ซ และ 1.013 บาร์สมบูรณ์), มีความหนาแน่น 1.2754 กก./ลบ.ม. เมื่อคำนวณความหนาแน่นของอากาศแห้ง ที่ 25°ซ และ 1.013 บาร์สมบูรณ์ จะได้เท่ากับ 1.19 กก./ลบ.ม.

IUPAC : องค์กร International Union of Pure and Applied Chemistry

ดังนั้น Sp.gr. ของก๊าซชีวภาพที่มีองค์ประกอบของก๊าซเป็น CH_4 64% และ CO_2 36% ที่ความดัน 1.013 บาร์สมบูรณ์และอุณหภูมิ 25°ซ

Sp.gr. ของก๊าซชีวภาพ = 1.0678/1.19 = 0.8973

3.2.4 ความหนืดของก๊าซ

ค่าความหนืดของก๊าซมีผลต่อการไหลของก๊าซ โดยจะมีผลต่อความดันลดในท่อก๊าซ ค่าความหนืดมีหน่วยเป็น poise หรือ กรัม/ซม. วินาที ความหนืดของก๊าซมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ โดยก๊าซที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะมีความหนืดสูงขึ้น ดังสมการ

$$\mu_g = A + BT + CT^2 \qquad \text{………………………… (3.8)}$$

เมื่อ μ_g : ความหนืดของก๊าซ, ไมโครปอยส์ (μP)

A,B,C : ค่าคงที่ของสมการ (regression coefficient) สำหรับก๊าซแต่ละชนิด

T : อุณหภูมิของก๊าซ (เคลวิน)

สำหรับไฮโดรเจนซัลไฟด์

$$\mu_g = (1 \times 10^7) \times \frac{AT^B}{1+\frac{C}{T}} \qquad \text{………………………… (3.9)}$$

และเมื่อต้องการคำนวณความหนืดของก๊าซผสมสามารถคำนวณได้จาก

$$\mu_m = \frac{\sum MF_i \mu_i (MW_i)^{0.5}}{\sum MF_i (MW_i)^{0.5}} \qquad \text{………………………… (3.10)}$$

เมื่อ μ_m : ความหนืดของก๊าซผสม, ไมโครปอยส์ (μP)

MF_i : Mole fraction ขององค์ประกอบใดๆ

μ_i : ความหนืดของก๊าซใดๆ , ไมโครปอยส์ (μP)

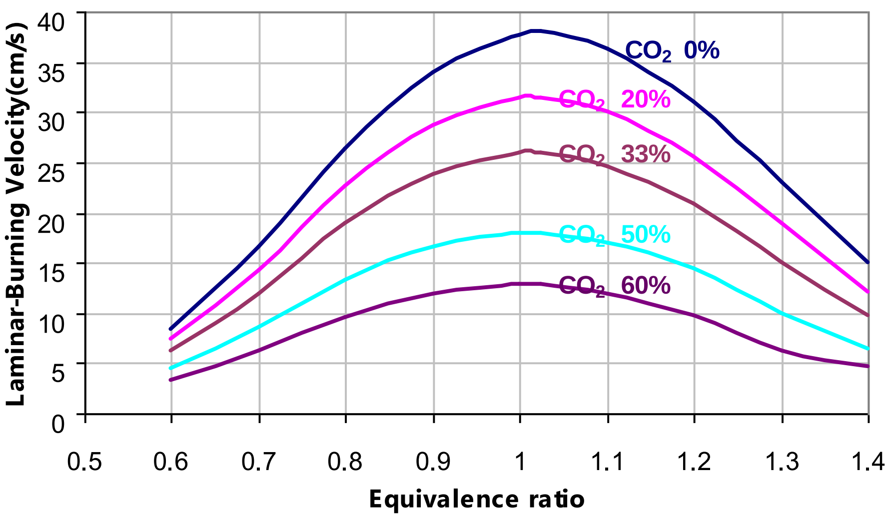
MW_i : มวลโมเลกุลขององค์ประกอบใดๆ

ตารางที่ 3.3 แสดงค่าคงที่ของสมการ (regression coefficient)สำหรับก๊าซ

ก๊าซ	A	B	C	T_{min}	T_{max}
มีเทน	3.844	4.0112×10^{-1}	-1.4303×10^{-4}	91	850
คาร์บอนไดออกไซด์	11.8111	4.9838×10^{-1}	-1.0851×10^{-4}	195	1000
ไฮโดรเจนซัลไฟด์	3.9314×10^{-8}	1.0134	0	250	480

3.2.5 ความเร็วเปลวไฟ (Flame velocity)

ความเร็วเปลวไฟ คือ ความเร็วของโซนเปลวไฟจากการเผาไหม้ที่ลุกลามเทียบกับความเร็วในการไหลของส่วนผสมเชื้อเพลิง ความเร็วเปลวไฟเป็นตัวแปรที่สำคัญในการออกแบบระบบจุดระเบิดในห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์ การเผาไหม้ที่หัวเผาในห้องเผาไหม้ของหม้อน้ำหรือหม้อน้ำมันร้อน และ อุปกรณ์ด้านความปลอดภัยต่างๆ ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเปลวไฟ (Laminar-burning velocity)กับความเข้มข้นของมีเทนในก๊าซชีวภาพ ดังแสดงตามกราฟรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 กราฟแสดงผลของ CO_2 ที่มีต่อความเร็วเปลวไฟของการเผาไหม้มีเทนกับอากาศที่ความดัน 1 บาร์สมบูรณ์ อุณหภูมิ 298 เคลวิน

(**ที่มา;** R. STONE, A. CLARKE, P. BECKWITH, COMBUSTION AND FLAME, 1998)

จากรูปที่ 3.2 เส้นกราฟแต่ละเส้น คือ ก๊าซชีวภาพที่มีเปอร์เซ็นต์ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่างๆ แกนแนวตั้งเป็นความเร็วของการเผาไหม้ แกนแนวนอนเป็นค่า Equivalence ratio คือ อัตราส่วนของเชื้อเพลิงต่ออากาศที่ใช้เผาไหม้จริงเทียบกับเชื้อเพลิงต่ออากาศที่ใช้เผาไหม้ทางทฤษฎี จะเห็นว่า ความเร็วเปลวไฟมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของมีเทนด้วย โดยที่ความเร็วเปลวไฟจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น ดังนั้นในทางปฏิบัติของการใช้งานก๊าซชีวภาพเมื่อความเข้มข้นของมีเทนลดลง ซึ่งจะเป็นสัดส่วนกับการเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จะส่งผลต่อเสถียรภาพของเปลวไฟและการเผาไหม้ กรณีที่ความเข้มข้นของมีเทนลดลง จนความเร็วเปลวไฟใกล้เคียง หรือต่ำกว่าความเร็วของส่วนผสม เปลวไฟก็จะลอยหรือหลุดดับจากหัวเผาได้ การปรับปรุงและควบคุมคุณภาพก๊าซชีวภาพให้มีเทนมีความเข้มข้นสูงและสม่ำเสมอและมีการตรวจวัดความเข้มข้นของมีเทนเป็นประจำ จึงจำเป็นสำหรับการควบคุมการเผาไหม้ เพื่อนำมาใช้ในการปรับแต่งให้การเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์และมีเสถียรภาพ อันส่งผลต่อความปลอดภัยโดยตรง สำหรับค่าความเร็วเปลวไฟ ดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 แสดงผลของคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซชีวภาพต่อความเร็วเปลวไฟ

%CH_4 : %CO_2	100 : 0	80 : 20	67 : 33	50 : 50	40 : 60
ความเร็วเปลวไฟ (เซนติเมตร/วินาที)	38.0	31.5	26.0	18.0	12.8

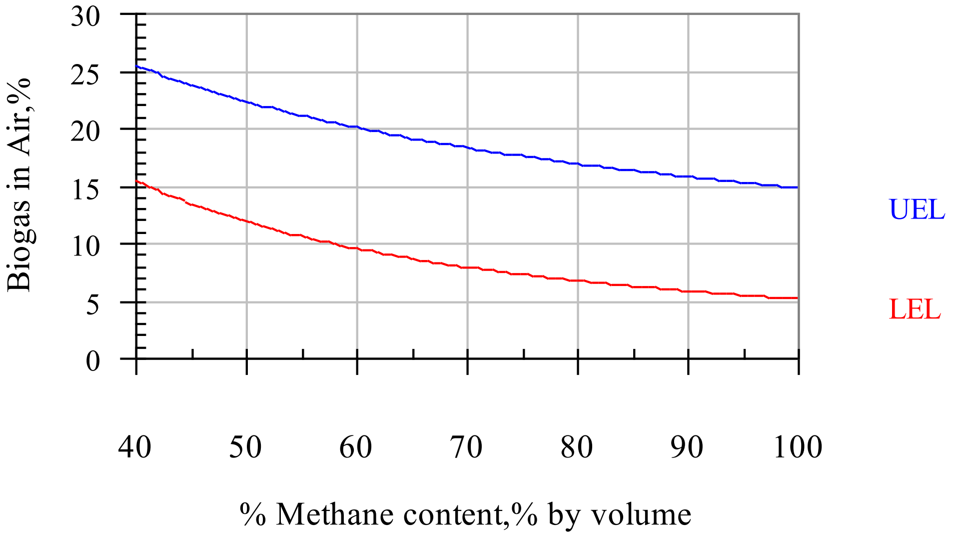
(**ที่มา**; R. STONE, A. CLARKE, P. BECKWITH, COMBUSTION AND FLAME, 1998)

3.2.6 ขีดจำกัดการติดไฟ (Flammability limit) หรือขีดจำกัดการระเบิด (Explosive limit)

ขีดจำกัดการติดไฟ หรือ ขีดจำกัดการระเบิด หมายถึง ความเข้มข้นของเชื้อเพลิงในอากาศที่ติดไฟหรือระเบิดได้ ซึ่งจะอยู่ระหว่างความเข้มข้นต่ำสุดของเชื้อเพลิงในอากาศที่ติดไฟหรือระเบิดได้ (Lower Flammability Limit; LFL หรือ Lower Explosive Limit, LEL) กับความเข้มข้นสูงสุดของเชื้อเพลิงในอากาศที่ติดไฟหรือระเบิดได้ (Upper Flammability Limit; UFL หรือ Upper Explosive Limit, UEL) สำหรับก๊าซมีเทน LFL หรือ LEL กับ UFL หรือ UELจะอยู่ระหว่าง 5-15 % (v/v)

สำหรับก๊าซเชื้อเพลิงผสม เช่น ก๊าซชีวภาพนั้น ขีดจำกัดการติดไฟจะเป็นตัวแปรปัจจัยสำคัญ เนื่องจากความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซชีวภาพจะมีผลต่อขีดจำกัดการติดไฟ ความสัมพันธ์ของขีดจำกัดการติดไฟ กับความเข้มข้นของก๊าซมีเทนแสดงตามกราฟรูปที่ 3.3 จากกราฟแกนแนวนอนเป็นความเข้มข้นของมีเทน

ในก๊าซชีวภาพ และแกนแนวตั้งเป็นเปอร์เซ็นต์ของก๊าซชีวภาพในส่วนผสมกับอากาศ ซึ่งจะเห็นว่า มีเทนบริสุทธิ์ขีดจำกัดการระเบิดอยู่ในช่วง 5-15% ในส่วนผสมกับอากาศ เมื่อมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากขึ้น ขีดจำกัดการระเบิดจะสูงขึ้น ตัวอย่างจากรูปที่ 3.3 ก๊าซชีวภาพที่ความเข้มข้นของมีเทนอยู่ที่ 60% ช่วงการระเบิดจะอยู่ในช่วงโดยประมาณระหว่าง 9-20%



รูปที่ 3.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของขีดจำกัดการระเบิดกับความเข้มข้นของมีเทน

(**ที่มา;** HANDBOOK ON BIOGAS UTILIZATION, 1988)

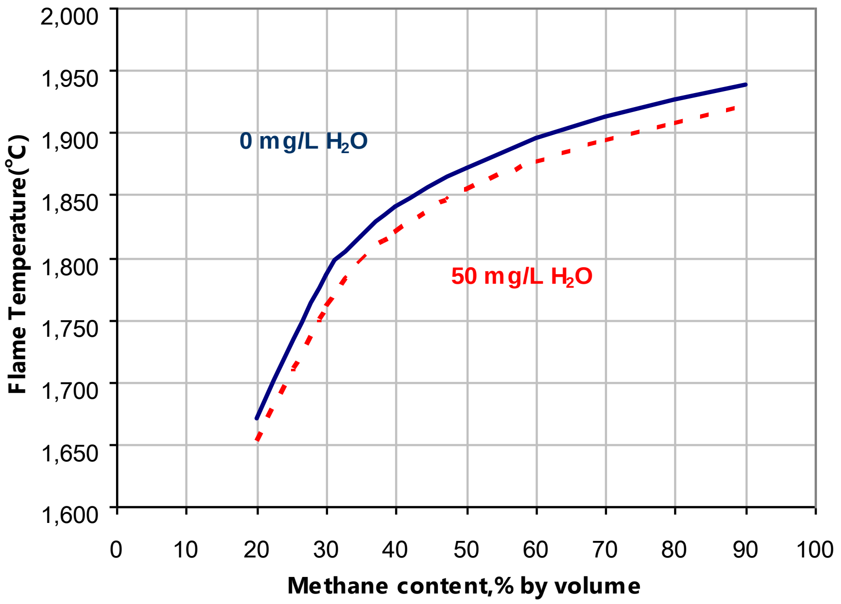
3.2.7 การจุดติดไฟอัตโนมัติ (Auto Ignition)

การที่ก๊าซเชื้อเพลิงจะเกิดการติดไฟได้นั้นจะต้องมีองค์ประกอบร่วม 3 อย่าง คือ ก๊าซเชื้อเพลิง อากาศ (หมายถึง ออกซิเจน) และแหล่งจุดติดไฟ (Ignition source) ในกรณีถ้ามีสภาวะที่ก๊าซเชื้อเพลิงและอากาศผสมกันในระดับที่สามารถติดไฟได้ และอุณหภูมิบริเวณนั้นสูงถึง อุณหภูมิจุดติดไฟอัตโนมัติ (Auto Ignition Temperature) ของก๊าซ จะทำให้สามารถเกิดการติดไฟได้เอง ซึ่งค่าอุณหภูมิจุดติดไฟอัตโนมัติของก๊าซที่เป็นองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพแสดงในตารางที่ 3.2

3.2.8 อุณหภูมิเปลวไฟ (Flame temperature)

อุณหภูมิเปลวไฟเป็นตัวแปรสำคัญที่จะชี้ให้เห็นถึงประสิทธิภาพของระบบเผาไหม้ และคุณภาพด้านการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง ซึ่งจะมีอิทธิพลต่อความสามารถด้านการถ่ายเทความร้อนและคุณภาพไอเสีย อุณหภูมิ

เปลวไฟจะเพิ่มขึ้นเมื่อก๊าซชีวภาพมีส่วนผสมของมีเทนเพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเปลวไฟ กับความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพแสดงตามรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเปลวไฟกับความเข้มข้นของมีเทนและความชื้น

(**ที่มา**; HANDBOOK ON BIOGAS UTILIZATION, 1988)

3.2.9 ค่าความร้อนและการเผาไหม้ (Heating Value and Combustion)

ในการใช้ประโยชน์จากก๊าซชีวภาพทั้งในด้านการเผาไหม้ หรือการเดินเครื่องยนต์ จำเป็นที่จะต้องรู้เกี่ยวกับปริมาณพลังงานที่ให้ออกมาจากการสันดาป

3.2.9.1 ค่าความร้อน (Heating Value)

คือ ปริมาณความร้อนที่เชื้อเพลิงให้ออกมาหลังจากการสันดาปที่สมบูรณ์ ในสภาวะความดัน 1.013 บาร์สมบูรณ์ และอุณหภูมิ 15.6°ซ ซึ่งค่าความร้อนนั้นสามารถที่จะระบุได้ 2 รูปแบบด้วยกัน ขึ้นอยู่กับสถานะของน้ำที่เกิดขึ้นหลังการสันดาป ได้แก่

- ค่าความร้อนรวม (Gross Heating Value หรือ High Heating Value, HHV) คือ ค่าความร้อนที่สถานะของน้ำที่เกิดจากการสันดาปเป็นของเหลว
- ค่าความร้อนสุทธิ (Net Heating Value หรือ Lower Heating Value, LHV) คือ ค่าความร้อนที่สถานะของน้ำที่เกิดจากการสันดาปเป็นไอ

ค่า HHV ซึ่งส่วนใหญ่จะหาได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Calorimeter (ซึ่งใน Chamber จะมีอุณหภูมิต่ำ ดังนั้นน้ำจะอยู่ในสภาวะของเหลว) เช่น Cutler–Hammer type

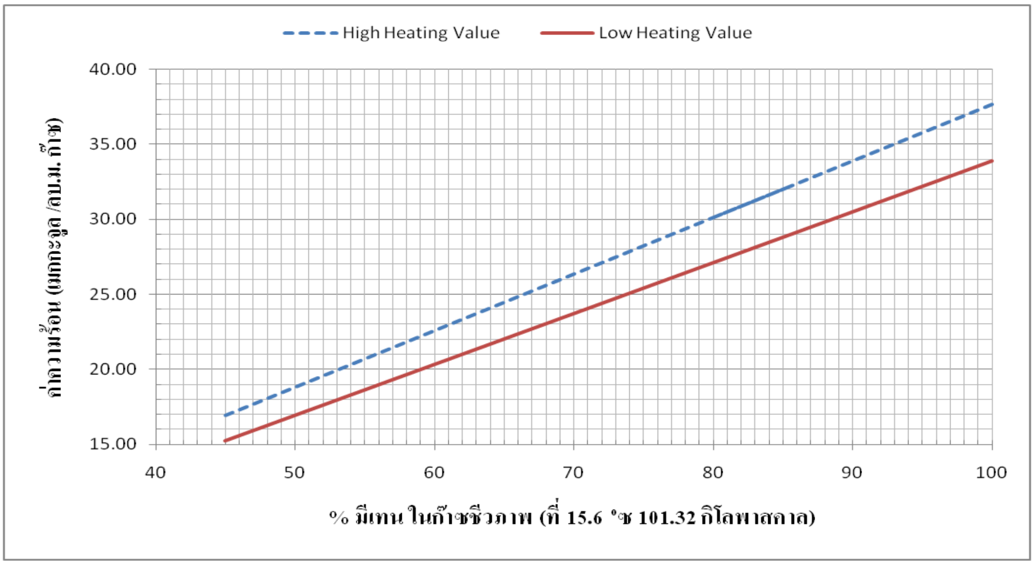
โดยจากสมการการสันดาป

$$CH_4 + 2O_2 \xrightarrow{\Delta} CO_2 + 2H_2O \qquad \text{.......................................(3.11)}$$

มีเทน 16.04 กรัม → น้ำ 2 x 18 กรัม

นั่นคือ การสันดาปก๊าซมีเทน 1 ลบ.ม. (ที่ 15.6°ซ, 101.32 กิโลพาสคาล) ได้น้ำที่อยู่ในรูปไอ 2.246 กรัม หรือคิดเป็นพลังงานความร้อนของไอน้ำที่เกิดขึ้นเท่ากับ 3,720 กิโลจูล เมื่อนำค่าความร้อนนี้ไปหักลบจากค่า HHV ของมีเทน ทำให้สามารถหาค่า LHV มีเทนได้ ดังรูปที่ 3.5

<u>ดังนั้นในการคิดถึงปริมาณความร้อนหรือพลังงานที่จะใช้งาน จึงควรที่จะใช้ค่า LHV มาคำนวณ เนื่องจากในการใช้งานจริงหลังจากก๊าซชีวภาพถูกสันดาปหรือเผาไหม้แล้ว น้ำที่ได้จะอยู่ในสภาพของไอน้ำไม่ได้อยู่ในสภาพหยดน้ำ</u>



รูปที่ 3.5 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าความร้อนของก๊าซชีวภาพที่ %มีเทนต่างๆ (ที่ 15.6 °ซ ความดัน 101.32 กิโลพาสคาล)

จะเห็นว่าความเข้มข้นของมีเทนที่ต่ำลงส่งผลให้ค่าความร้อนของก๊าซชีวภาพลดลง ก๊าซชีวภาพที่มีความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้นนั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์จะทำให้ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ใช้ประโยชน์ต่ำลงด้วย เนื่องจากเมื่อก๊าซชีวภาพเผาไหม้ และหลังจาก

ถ่ายเทความร้อนให้กับอุปกรณ์แล้ว ยังมีความร้อนที่เหลืออีกส่วนหนึ่งที่อยู่ในไอเสียที่ต้องทิ้งไปทางปล่อง มวลของก๊าซในไอเสียที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นนั้น จะรับและพาความร้อนออกไปทิ้งที่ปล่องได้มากขึ้นนั่นเอง จากการประเมินโดยสมมุติก๊าซชีวภาพเผาไหม้กับอากาศที่พอดีทางทฤษฎี จะทำให้ความร้อนสูญเสียไปกับไอเสียที่ปล่องมากขึ้น ดังตัวอย่างที่แสดงในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนสูญเสียในไอเสียกับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซชีวภาพ

% CH_4:CO_2 V/ V	% ความร้อนที่สูญเสียไปกับไอเสีย (คำนวณจากการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ทางทฤษฎี) อุณหภูมิไอเสียที่แตกต่างจากอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (องศาเซลเซียส)										
	120	130	140	150	160	170	180	190	200	250	300
100:00	4.93	5.35	5.77	6.20	6.62	7.04	7.47	7.89	8.32	10.47	12.66
70:30	5.19	5.63	6.08	6.52	6.97	7.42	7.86	8.31	8.76	11.04	13.34
60:40	5.34	5.79	6.25	6.70	7.16	7.62	8.08	8.55	9.01	11.35	13.73
55:45	5.43	5.89	6.35	6.82	7.29	7.75	8.22	8.69	9.17	11.55	13.97
50:50	5.54	6.01	6.48	6.96	7.43	7.91	8.39	8.87	9.36	11.79	14.26
45:55	5.67	7.05	6.64	7.13	7.62	8.11	8.60	9.09	9.59	12.08	14.62

เนื่องจากค่าความร้อนทั้งสองค่า เป็นค่าที่มาจากการคำนวณ และในความเป็นจริงสำหรับสภาวะก๊าซที่เกิดขึ้นเป็นก๊าซที่มีน้ำรวมอยู่ด้วย โดยที่บางส่วนอยู่ในรูปของเหลวและบางส่วนอยู่ในสภาวะไอ ดังนั้นโดยทั่วไปการคำนวณค่าความร้อนของก๊าซซึ่งสมมุติฐานว่าเป็นก๊าซอุดมคติก็จะถูกรายงานเพื่อเป็นค่าความร้อนของก๊าซนั้นๆ แต่อย่างไรก็ควรระลึกไว้เสมอว่า ค่านั้นอาจจะไม่เท่ากับค่าพลังงานที่เกิดจากการเผาไหม้จริง

ในการคำนวณค่าพลังงานความร้อนของก๊าซ สำหรับการขายเป็นเชื้อเพลิงนั้น สามารถที่จะใช้ค่าความร้อนจากการวิเคราะห์โดยตรง หรืออาจใช้จากการคำนวณค่าความร้อนจากการองค์ประกอบของก๊าซที่วิเคราะห์ได้ โดยที่วิธีการคำนวณต้องถูกระบุในสัญญาการซื้อขาย ซึ่งสูตรการคำนวณสำหรับ Ideal gas gross heating value เชิงปริมาตร เป็นดังนี้ (Gas Processors Association, 1996)

ค่าความร้อนรวม (ก๊าซแห้งหรือก๊าซไม่มีความชื้น)

$$H_v^{id}(dry) = \sum_{i=1}^{n} x_i H_{vi}^{id} \qquad \text{.................................(3.12)}$$

เมื่อ H_{vi}^{id} = ค่า Ideal gas gross heating value ของก๊าซแต่ละชนิด

x_i = ค่าสัดส่วนโดยปริมาตรของก๊าซแต่ละชนิด

โดยสมการมีสมมติฐานว่า องค์ประกอบของก๊าซที่ได้มานั้นอยู่บนพื้นฐานที่ไม่มีความชื้น (Dry basis) ดังนั้น H_v^{id} คือ ค่า Ideal gas gross heating value และสามารถหาค่าความร้อนรวม (ก๊าซที่ไอน้ำอิ่มตัว)

$$H_v^{id}(sat) = (1 - x_w) \sum_{i=1}^{n} x_i H_{iv}^{id} \qquad \text{...(3.13)}$$

และค่าสัดส่วนของไอระเหยน้ำ, x_w สามารถหาได้จากสมการ

$$x_w = \frac{p_{water}}{P} \qquad \text{...(3.14)}$$

เมื่อ p_{water} = ค่าความดันย่อยของไอน้ำที่สภาวะนั้น

P = ความดันรวม (กิโลพาสคาล, kPa)

โดยที่ p_{water} นั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ซึ่งสามารถหาค่าได้จากตารางที่ 3.6

เนื่องจากส่วนใหญ่การวัดองค์ประกอบของก๊าซ จะเป็นการวัดบนฐานก๊าซแห้ง แม้ว่าในก๊าซดังกล่าวจะเป็นก๊าซที่มีความชื้นอยู่ จากการใช้วิธีคำนวณเราก็สามารถคำนวณได้ทั้งที่เป็นค่าความร้อนบนฐานก๊าซแห้ง (Dry gas) หรือบนฐานที่คิดความชื้นที่อิ่มตัว (Saturated gas) หรือกรณีที่ทราบค่าความชื้น ก็สามารถหาค่าความร้อนแบบ Actual ก็ได้

ตารางที่ 3.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของก๊าซ และความดันไอที่อิ่มตัวของน้ำ ที่ความดัน 101.3 กิโลพาสคาล สมบูรณ์ (ความดันบรรยากาศ)

อุณหภูมิ (°ซ)	**ความดันไอที่อิ่มตัว** (กิโลพาสคาล สมบูรณ์)
0	**0.6**
12	**1.4**
15.6	**1.8**
20	**2.3**
25	**3.2**
30	**4.2**
32	**4.8**
35	**5.6**
40	**7.4**
50	**12.3**
60	**19.9**
70	**31.2**
80	**47.3**
90	**70.1**
100	**101.3**

ดังนั้น เราสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของก๊าซแห้ง ($1-x_w$) หรือค่าตัวปรับ ค่าความร้อนของก๊าซที่ไอน้ำอิ่มตัวจากสมการที่ 3.13 กับค่าความดันรวม(ความดันในท่อส่งที่อุณหภูมิ 15.6°ซ) ได้ดังตารางที่ 3.7

<u>ตัวอย่างการคำนวณ</u> สำหรับค่าในตารางที่ 3.5

ก๊าซที่อุณหภูมิ 15.6 °ซ มีความดันไอที่อิ่มตัวของน้ำ 1.8 กิโลพาสคาล สมบูรณ์ และที่ความดันในท่อเท่ากับ 120 กิโลพาสคาล สมบูรณ์ เราสามารถหาค่าสัดส่วนของไอระเหยน้ำ ได้เท่ากับ

$$x_w = 1.8 / 120 = 0.015$$

ดังนั้น สัดส่วนของก๊าซแห้ง ($1-x_w$) = $1- x_w$ = 1−0.015 = 0.985

ตารางที่ 3.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันรวม และสัดส่วนของก๊าซแห้ง ($1-x_w$) ที่อุณหภูมิ 15.6°ซ

ความดัน (กิโลพาสคาล สมบูรณ์)	**สัดส่วนของก๊าซแห้ง** ($1-x_w$)
99.9	0.9820
101.3	0.9822
103.0	0.9825
110	0.9836
120	0.9850
125	0.9856
130	0.9862

ตัวอย่าง ถ้าเราต้องการขายก๊าซชีวภาพ 1000 ลบ.ม/วัน ที่อุณหภูมิ 25°ซ ในท่อส่งที่มีความดัน 25 กิโลพาสคาล เกจ (หรือ ~250 มิลลิบาร์เกจ) เมื่อคิดเป็นความดันสมบูรณ์ คือ 125 กิโลพาสคาล สมบูรณ์ โดยวัดองค์ประกอบก๊าซเป็น %(v/v) ได้เป็น CH_4 64% CO_2 36% เราสามารถคำนวณได้ว่า ก๊าซปริมาณดังกล่าวมีค่าความร้อนรวมเท่าใด ที่สภาวะมาตรฐานของการซื้อขาย (โดยส่วนใหญ่การซื้อขายก๊าซธรรมชาติใช้ปริมาตรสภาวะมาตรฐาน ที่อุณหภูมิ 15.6 °ซ และความดัน 101.3 กิโลพาสคาล สมบูรณ์ หรือ 1.013 บาร์สมบูรณ์)

1) การหาค่าความร้อนของก๊าซชีวภาพ โดยที่ค่าความร้อนรวมของมีเทน 100% มีค่าเท่ากับ 37.6317 เมกกะจูล/ลบ.ม

ตารางที่ 3.8 แสดงการหาค่าความร้อนรวมของก๊าซชีวภาพ (บนฐานก๊าซแห้ง)

ก๊าซ	สัดส่วน (A)	H_{vi}^{id} [เมกกะจูล/ลบ.ม*] (B)	H_{v}^{id} [เมกกะจูล/ลบ.ม*] (C=AxB)
CH_4	0.64	37.6317	24.0842
CO_2	0.36	0	0
	1		24.0842

* ปริมาตรที่ความดัน 101.325 กิโลพาสคาล อุณหภูมิ 15.6°ซ

H_{vi}^{id} คือค่าความร้อนของก๊าซแต่ละชนิด เช่น ในแถวแรกเป็นค่าความร้อนของมีเทน 100% ในแถวที่ 2 ค่าความร้อนของคาร์บอนไดออกไซด์เป็นศูนย์

H_{v}^{id} คือค่าความร้อนจากก๊าซแต่ละชนิดในก๊าซชีวภาพ หามาจากเอาคอลัมน์ A คูณกับคอลัมน์ B ในแต่ละแถว และเมื่อรวมกันในคอลัมน์ C จะได้เป็นค่าความร้อนของก๊าซชีวภาพ ที่ความเข้มข้นดังกล่าว

2) ค่าความร้อนรวมของก๊าซชีวภาพ (ก๊าซแห้ง) (ที่ อุณหภูมิ 15.6°ซ ความดัน 101.32 กิโลพาสคาล สมบูรณ์) มีค่าเท่ากับ 24.08 เมกกะจูล/ลบ.ม ก๊าซชีวภาพ (ที่ 15. 6°ซ)

<u>ถ้าต้องการหาค่าความร้อนรวมของก๊าซชีวภาพ (บนฐานความชื้นอิ่มตัว)</u>

จากตารางที่ 3.4 ที่อุณหภูมิ 15.6°ซ เราได้ความดันไอน้ำอิ่มตัว p_{water} มีค่าเท่ากับ 1.8 กิโลพาสคาล ดังนั้นค่า $(1-x_w)$ เท่ากับ 0.9822 ดังนั้น ค่าความร้อนรวมของก๊าซชีวภาพ (บนฐานความชื้นอิ่มตัว) (ที่อุณหภูมิ 15.6°ซ ความดัน 101.32 กิโลพาสคาล) มีค่าเท่ากับ

24.08 x 0.9822 = 23.65 เมกกะจูล/ลบ.ม (บนฐานความชื้นอิ่มตัว)

3) การเปลี่ยนปริมาตรก๊าซชีวภาพ 1 ลบ.ม. (V_1) ที่อุณหภูมิ 25°ซ (T_1) ในท่อส่งที่มีความดัน 125 กิโลพาสคาล สมบูรณ์ (P_1) ให้เป็น ปริมาตรก๊าซชีวภาพที่อุณหภูมิ 15.6°ซ (T_2)

ความดัน 101.32 กิโลพาสคาล สมบูรณ์(P_2)

$$V_2 = V_1 \frac{P_1}{P_2}\frac{T_2}{T_1} = 1 \times \frac{125 \times (273.15 + 15.6)}{101.32 \times (273.15 + 25)} = 1.19$$

** ความดันที่ใช้ในการคำนวณนั้นใช้ค่าความดันสมบูรณ์*

ทำให้เราทราบได้ว่า ก๊าซชีวภาพ 1 ลบ.ม. ที่อุณหภูมิ 25°ซ ในท่อส่งที่มีความดัน 125 กิโลพาสคาล สมบูรณ์ เมื่อคิดที่สภาวะมาตรฐาน (อุณหภูมิ 15.6°ซ ความดัน 101.32 กิโลพาสคาล สมบูรณ์) จะมีปริมาตร 1.19 ลบ.ม.

ดังนั้น เมื่อเราส่งก๊าซชีวภาพ 1000 ลบ.ม./วัน ในท่อ (ที่อุณหภูมิ 25°ซ ในท่อส่งที่มีความดัน 125 กิโลพาสคาล สมบูรณ์) แสดงว่าเราส่งก๊าซชีวภาพไป 1,190 ลบ.ม./วัน ที่สภาวะมาตรฐาน

หรือเราส่งพลังงานความร้อนรวม = 1,190 x 24.08 เมกกะจูล/ลบ.ม ก๊าซชีวภาพ

= 28,655.2 เมกกะจูล/วัน (บนฐาน ถ้าเป็นก๊าซแห้ง)

แต่ถ้าเป็นก๊าซชื้นอิ่มตัว เราส่งพลังงานความร้อน

= 1,190 x 23.65 เมกกะจูล/ลบ.ม ก๊าซชีวภาพ

= 28,146.1 เมกกะจูล/วัน (บนฐาน ความชื้นอิ่มตัว)

3.2.9.2 ค่า Wobbe Index (WI)

Wobbe Index หรือ Wobbe Number เป็นสมบัติของเชื้อเพลิงก๊าซ ที่บ่งบอกคุณลักษณะของการเผาไหม้ โดยบอกถึงพลังงานที่ส่งเข้าหัว Burner หรือ Gas Injector ซึ่งจะแตกต่างจากค่าความร้อน (Heating Value) ตรงที่ Wobbe Index นั้นจะเกี่ยวข้องกับการไหลของเชื้อเพลิงก๊าซผ่าน Nozzle หรือ Injector ของหัว Burner ด้วย ซึ่ง WI สามารถคำนวณจากสมการ (3.15)

$$WI = \frac{High\ Heating\ value}{\sqrt{Sp.gr}} \qquad \text{......................(3.15)}$$

เครื่องจักรสำหรับใช้ประโยชน์จากก๊าซเชื้อเพลิงต่างๆ เช่น หัวเผา ถูกออกแบบให้มีขนาดหัว Nozzle หรือ Injection ให้ก๊าซเข้าไปให้ได้ปริมาณพลังงานที่ต้องการ โดยสามารถใช้กับก๊าซเชื้อเพลิงได้หลายชนิด โดยที่ไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนอุปกรณ์ ตราบใดที่ก๊าซเชื้อเพลิงมีค่าของ Wobbe Index เท่ากัน และโดยทั่วไปเครื่องจักรแต่ละประเภท มีการออกแบบหัว Nozzle หรือ Injection เพื่อใช้ในแต่ละอุตสาหกรรม จะรองรับการเปลี่ยนแปลงของ Wobbe Index ได้ต่างกัน แต่โดยทั่วไปแล้วจะอยู่ที่ ± 5% ของค่า Wobbe Index

ตารางที่ 3.9 แสดง Wobbe Index ของก๊าซเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ

เชื้อเพลิง	Upper Index (MJ/m^3)	Lower Index (MJ/m^3)
ไฮโดรเจน	48.23	40.65
มีเทน	53.28	47.91
อีเทน	68.19	62.47
โพรเพน	81.07	74.54
ก๊าซธรรมชาติ	53.71	48.52
LPG	86.84	79.94
CO	12.8	12.8

ที่มา: en.wikipedia.org/wiki/Wobbe_index

ตัวอย่าง การคำนวณค่า Wobbe Index ของก๊าซชีวภาพ ที่มี CH_4 64% และ CO_2 36% ที่อุณหภูมิ 25°ซ และความดัน 1.013 บาร์ โดยก๊าซชีวภาพ มี Sp.Gr เท่ากับ 0.8973 และ ค่าความร้อนรวม (HHV) ของก๊าซชีวภาพ (แห้ง) เท่ากับ 29.0955 เมกะจูล ดังนั้น

$$WI = \frac{High\ Heating\ value}{\sqrt{Sp.gr}} = \frac{29.0955}{\sqrt{0.8973}} = 30.72$$

ในการที่ใช้ก๊าซเชื้อเพลิงต่างชนิดที่มีค่า Wobbe Index ต่างกันมาใช้ทดแทนนั้นต้องมีการปรับเปลี่ยนอุปกรณ์ เช่น ต้องการนำหัวเตาเผาสำหรับ LPG มาใช้กับก๊าซชีวภาพ จากตารางที่ 3.9 ค่า

WI ของ LPG มีค่าสูงกว่า ค่า Wobbe Index ของก๊าซชีวภาพที่มีมีเทน 64% (30.72 เมกะจูล/ลบ.ม). ดังนั้นจะพบว่าขนาดของ Nozzle หรือนมหนูของหัวเผาของเตาสำหรับ LPG จะมีขนาดเล็ก ไม่สามารถให้ความร้อนได้เท่าเดิมเมื่อมาใช้กับก๊าซชีวภาพ ดังนั้นส่วนใหญ่ถ้าจะนำมาใช้ จะต้องทำการปรับปรุงหัวเผา เช่น ขยายขนาดรู Nozzle

จากสมการอธิบายการไหลของก๊าซผ่านรู Nozzle (ธนรักษ์ และคณะ,2543)

$$Q = 12.55 \times C \times A \times \sqrt{\frac{\Delta P}{Sp.gr.}} \quad \text{.............................. (3.16)}$$

และเมื่อคำนวณเป็นพลังงาน (H) ที่เข้าสู่เครื่องจักรหรือหัวเผา ทำได้โดยการคูณด้วยค่าความร้อน จะได้ดังสมการ

$$H = Q \times HHV = 12.55 \times C \times A \times HHV \times \sqrt{\frac{\Delta P}{Sp.gr.}} \quad \text{.............................. (3.17)}$$

ซึ่งเมื่อนำค่า WI ไปแทนในสมการ 3.17 จะได้เป็น

$$H = 12.55 \times C \times A \times \sqrt{\Delta P} \times WI \quad \text{.............................. (3.18)}$$

เมื่อ Q = อัตราการไหลของก๊าซ

H = ปริมาณพลังงานที่เข้าสู่เครื่องจักรหรือหัวเผา (วัตต์)

C = สัมประสิทธิ์การขยายตัวของ Nozzle (Coefficient of discharge) โดยทั่วไปอยู่ระหว่าง 0.85–0.95

ΔP = ความดันแตกต่างของ Nozzle (มิลลิบาร์)

A = พื้นที่หน้าตัดรู Nozzle (ตารางมิลลิเมตร)

จากสมการ 3.18 ในกรณีที่ใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง % มีเทน ค่าพลังงานความร้อนและค่า WI จะเกิดการเปลี่ยนแปลง เช่นในกรณีที่ % มีเทนลดลง ค่าพลังงานความร้อนและ WI จะลดลง เพื่อให้พลังงานขาเข้าคงเดิมจะต้องป้อนก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นซึ่งจะต้องปรับสัดส่วนการป้อนอากาศให้เหมาะสมกับ % มีเทนที่ลดลง และในกรณีที่ % มีเทนเพิ่มขึ้น ค่าพลังงานความร้อนและ WI จะเพิ่มขึ้น เพื่อให้พลังงานขาเข้าคงเดิมจะต้องป้อนก๊าซชีวภาพลดลงและจะต้องปรับสัดส่วนการป้อนอากาศให้เหมาะสมกับ % มีเทนที่เพิ่มขึ้นด้วย การปรับส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศที่ไม่ถูกต้อง อาจทำให้เปลวไฟดับและเกิดการระเบิดในห้องเผาไหม้ได้

3.2.10 ความชื้นของก๊าซ

เนื่องจากก๊าซชีวภาพเป็นก๊าซที่อิ่มตัวด้วยน้ำ แต่ในการวิเคราะห์ความเข้มข้นของก๊าซชนิดต่างๆ ด้วยเครื่องมือ จะเป็นการวัดแบบที่ไม่ได้รวมน้ำที่ปนอยู่ในก๊าซด้วย หรือเป็นการวิเคราะห์แบบพื้นฐานแห้ง (Dry basis) โดยปริมาณน้ำที่เจือปนกับก๊าซสามารถที่จะระบุได้สองแบบด้วยกัน คือ

- ความชื้นสมบูรณ์ (Absolute Humidity) หมายถึง มวลไอของน้ำที่มีอยู่ในก๊าซหนึ่งหน่วยปริมาตรก๊าซชื้น (มก.น้ำ/ลบ.ม.ก๊าซ) หรืออาจจะบอกเป็น ความชื้นจำเพาะ(Specific Humidity) ซึ่งหมายถึง มวลไอของน้ำต่อมวลของก๊าซแห้ง 1 กก (มก.น้ำ/กก.ก๊าซแห้ง) ซึ่งในการคำนวณ จะมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าการระบุเป็นความชื้นสมบูรณ์

ความชื้นจำเพาะ = $\frac{MW_{water}}{MW_{Biogas}}\left(\frac{p_{water}}{P-p_{water}}\right)$ .... (3.19)

ตัวอย่าง ก๊าซชีวภาพ (มี CH_4 64% และ CO_2 36% มี MW =26.11) ที่อุณหภูมิ 25°ซ ในท่อส่งที่ 25 กิโลพาสคาล เกจ (หรือ ~250 มิลลิบาร์เกจ) เมื่อคิดเป็นความดันสมบูรณ์ คือ 125 กิโลพาสคาล สมบูรณ์ เนื่องจากก๊าซชีวภาพจากบ่อผลิตเป็นก๊าซอิ่มตัวด้วยไอระเหยน้ำ เราสามารถหาค่าความชื้นจำเพาะ ของก๊าซชีวภาพดังนี้

จากตารางที่ 3.6 อุณหภูมิ 25°ซ ได้ p_{water}^{sat} มีค่าเท่ากับ 3.2 กิโลพาสคาลสมบูรณ์

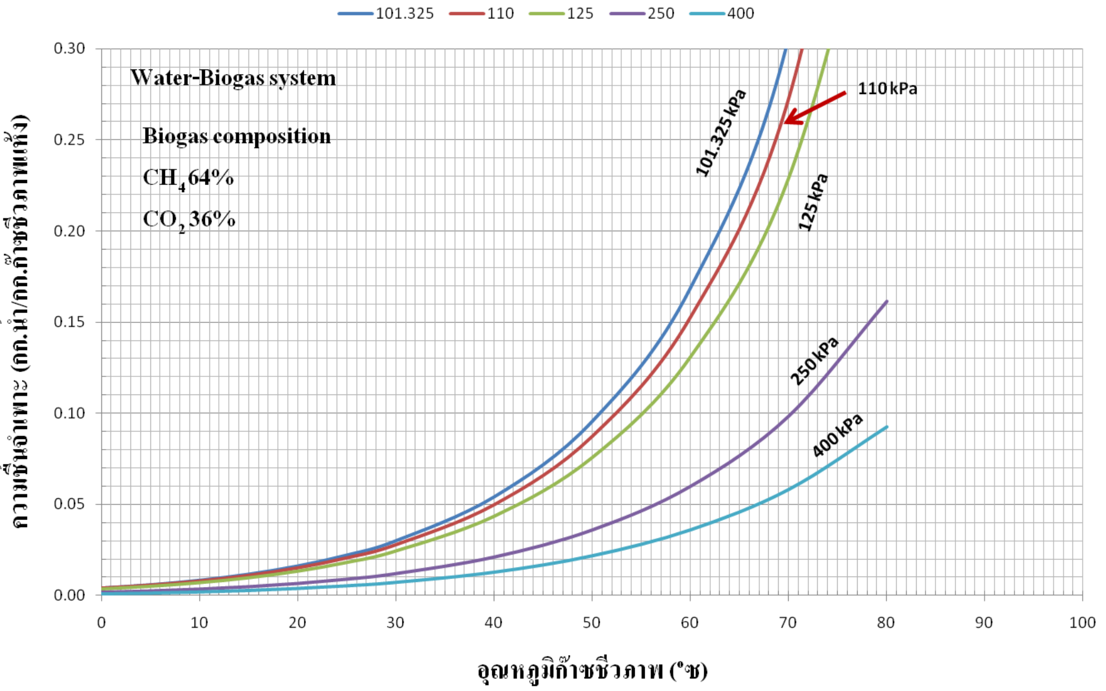
ดังนั้นความชื้นจำเพาะ = $\frac{18.01}{26.11}\left(\frac{3.2}{125-3.2}\right)$ = 0.018 กก.น้ำ/กก.ก๊าซชีวภาพแห้ง

จากตัวอย่างการคำนวณความหนาแน่นของก๊าซชีวภาพ (CH_4 64% และ CO_2 36%) ที่อุณหภูมิ 25°ซ ที่ 101.3 กิโลพาสคาล สมบูรณ์ มีค่าเท่ากับ 1.068 กก./ลบ.ม.

ดังนั้นเราสามารถหาค่าความหนาแน่นของก๊าซชีวภาพ (CH_4 64% และ CO_2 36%) ที่อุณหภูมิ 25°ซ ที่ 125 กิโลพาสคาล สมบูรณ์ได้เท่ากับ 1.068 x (125/101.3) = 1.318 กก.ก๊าซชีวภาพ/ลบ.ม.ก๊าซชีวภาพ

ที่อุณหภูมิ 25°ซ ความดัน 125 กิโลพาสคาล สมบูรณ์ เราหาค่าความชื้นจำเพาะ ได้เท่ากับ 0.018 กก.น้ำ/กก.ก๊าซชีวภาพแห้ง

จากสมการดังกล่าว สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความชื้นสมบูรณ์ในก๊าซชีวภาพที่อิ่มตัวได้ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นจำเพาะของก๊าซชีวภาพกับอุณหภูมิก๊าซชีวภาพที่ความดันต่างๆ

- ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity, %RH) คือ อัตราส่วนของความดันย่อยของไอระเหยต่อความดันย่อยที่อิ่มตัวที่สภาวะเดียวกัน

$$\%RH = \frac{p_{water}}{p_{water}^{sat}} \qquad \text{...(3.17)}$$

หรือระบุเป็น ระดับของการอิ่มตัว (Degree of Saturated) คือ อัตราส่วนโดยมวลไอของน้ำในก๊าซต่อไออิ่มตัวของน้ำในก๊าซ (ที่สภาวะเดียวกัน)

เราสามารถระบุเป็นความชื้นสมบูรณ์ ของก๊าซชีวภาพ ได้เท่ากับ

0.018 x 1.318 = 0.0237 กก.น้ำ/ลบ.ม.ก๊าซชีวภาพ

ในการกำจัดความชื้นด้วยวิธีการลดอุณหภูมิ ให้อยู่ที่ 12 °ซ เราหาค่า p_{water}^{sat} จากตารางที่ 3.6 ได้ 1.4 กิโลพาสคาล สมบูรณ์ ซึ่งจะสามารถหาความชื้นจำเพาะ

$$= \frac{18.01}{26.11}\left(\frac{1.4}{125-1.4}\right)$$ = 0.0078 กก.น้ำ/กก.ก๊าซชีวภาพแห้ง

และเมื่อก๊าซชีวภาพถูกทำให้มีอุณหภูมิกลับไปที่ 25 °ซ ก๊าซจะมีความชื้นสมบูรณ์

= 0.0078 x 1.318 = 0.0103 กก.น้ำ/ลบ.ม.ก๊าซชีวภาพ

หรือระบุเป็นระดับของการอิ่มตัว ได้เท่ากับ

$$\%\ Degree\ of\ Staurated = 100 \times \frac{0.0103}{0.0237} = 43.3\%$$

ในการกำจัดความชื้นนี้จะได้น้ำที่กลั่นตัวออกมา

= 0.018–0.0078 = 0.0102 กก.น้ำ/กก.ก๊าซชีวภาพแห้ง หรือ

= 0.0102 x 1.318 = 0.0134 กก.น้ำ/ลบ.ม.ก๊าซชีวภาพ

นั่นคือ ทุก 1 ลบ.เมตร ของก๊าซชีวภาพที่เราขจัดความชื้นออก จะมีน้ำที่ต้องระบายออกเท่ากับ 13.4 มิลลิลิตร (ถ้าอัตราการไหลก๊าซชีวภาพ 100 ลบ.ม./ชม. จะมีน้ำที่ต้องระบายออก 1.34 ลิตร/ชม.)

STORAGE PRESSURE – DENSITY – ENERGY CONTENT @TEMPERATURE = 60°F

PRESSURE	COMPRESSIBILITY FACTOR	DENSITY METHANE	DENSITY BIOGAS	ENERGY CONTENT METHANE	ENERGY CONTENT BIOGAS
Psi		lb/ft³	lb/ft³	BTU/ft³	BTU/ft³
14.7 (atm)	1.0	0.0423	0.0690	1,008	616
15	1.0	0.0432	0.0704	1,029	629
20	1.0	0.0575	0.0939	1,372	839
25	1.0	0.0719	0.117	1,715	1,049
30	1.0	0.0863	0.141	2,058	1,258
35	1.0	0.101	0.164	2,401	1,468
40	1.0	0.115	0.188	2,744	1,678
45	1.0	0.129	0.211	3,088	1,888
50	1.0	0.144	0.235	3,431	2,098
60	1.0	0.173	0.282	4,117	2,517
70	1.0	0.201	0.329	4,803	2,937
80	1.0	0.230	0.376	5,489	3,357
90	1.0	0.259	0.423	6,176	3,776
100	1.0	0.288	0.470	6,862	4,196
125	1.0	0.360	0.587	8,577	5,245
150	1.0	0.432	0.704	10,293	6,294
175	1.0	0.504	0.822	12,008	7,343
200	0.99	0.581	0.949	13,863	8,477
250	0.98	0.732	1.19	17,452	10,672
300	0.98	0.885	1.44	21,114	12,911
350	0.97	1.04	1.69	24,760	15,141
400	0.97	1.19	1.94	28,395	17,364
450	0.96	1.36	2.21	32,335	19,773
500	0.94	1.52	2.48	36,269	22,179
600	0.93	1.85	3.02	44,114	26,976
700	0.92	2.19	3.57	52,212	31,978
800	0.91	2.53	4.13	60,327	36,891
900	0.89	2.91	4.75	69,393	42,435
1000	0.88	3.27	5.34	77,979	47,686
1500	0.82	5.26	8.59	125,528	76,762
2000	0.78	7.38	12.04	175,954	107,599
2500	0.79	9.11	14.86	217,158	132,796
3000	0.81	10.66	17.39	254,156	155,421
3500	0.84	11.99	19.56	285,925	174,848
4000	0.88	13.08	21.34	311,918	190,744
4500	0.92	14.07	22.97	335,651	205,257
5000	0.96	14.99	24.46	357,407	218,561

สมบัติก๊าซ (GAS PROPERTIES)

	METHANE	BIOGAS
COMPOSITION, by volume	Methane –100%	Methane – 60%
		Carbon Dioxide – 35%
		Hydrogen Sulfide – 1.67%
		Ammonia – 1.67%
		Water Vapor – 1.67%
MOLECULAR WEIGHT, lbm/lb-mole	16.04	26.18
SPECIFIC GRAVITY, air = 1	0.554	0.904
DENSITY @ STP, lbm/ft^3	0.0447	0.073
HEAT VALUE, BTU/lbm	23,850.	8,937.
ENERGY CONTENT @ STP, BTU/ft^3	1,066.	652.
GAS CONSTANT, ft-lbf/lbm-^{o}R	96.3	59.0
CRITICAL TEMPERATURE, ^{o}R	343.6	-
CRITICAL PRESSURE, lbf/in^2	673.	-
CRITICAL SPECIFIC VOLUME, ft^3/lbm	0.099	-
OCTANE RATING	130.	-
IGNITION TEMPERATURE, ^{o}F	1250.	-
AIR-TO-METHANE RATIO FOR COMPLETE COMBUSTION, by volume	10:1	-
EXPLOSION LIMITS IN AIR, by volume	5% - 15%	-

ที่มา; Methane Fuel Gas from Livestock Wastes A Summary, Last Electronic Revision: March 14, 2001

เอกสารอ้างอิง:

1. Roland Tusar, เอกสารการบรรยาย เรื่อง "PROFITING FROM THE USE OF BIOGASTHE PANVITA CASE," (http://www.intering.si)
2. จาก encyclopedia.airliquide.com
3. R. STONE, A. CLARKE, P. BECKWITH, Correlations for the Laminar-Burning Velocity of Methane/Diluent/Air Mixtures Obtained in Free-Fall Experiments, The Combustion Institute, Elsevier Science Inc. , COMBUSTION AND FLAME 114:546—555, 1998
4. James L Waish. Jr., P.E.Charles C. Ross., P.E. M i r h d S. Smith., Stephen R. Harper., W. Allen Wllklnr (1988) HANDBOOK ON BIOGAS UTILIZATION, U. S. Department of Energy Southeastern Regional Biomass Energy Program, Tennessee Valley Authority Muscle Shoals, Alabama.
5. จาก: en.citizendium.org/wiki/Compressibility_factor_(gases)
6. ธนรักษ์ วาสนะสุขะ, ยุทธนา สิทธิสันต์ และ ปรีชา แก้วพันธ์. "คู่มือการเปลี่ยนก๊าซ LPG มาเป็น NG". Petroleum Authority of Thailand, 2543
7. จาก: en.wikipedia.org/wiki/Wobbe_index
8. James C. Barker, Professor and Extension Specialist , Biological and Agricultural Engineering , North Carolina State University, Raleigh, NC , Last Electronic Revision: March 14, 2001

บทที่ 4
เทคโนโลยีการออกแบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

4.1 การจำแนกประเภทและเปรียบเทียบเทคโนโลยีระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

ชนิดของถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพสามารถจำแนกได้หลายแบบ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับแนวทางที่ใช้ในการจำแนก อาทิเช่น สภาพของจุลินทรีย์ที่อยู่ในถัง ปริมาณความเข้มข้นของของแข็งในถัง หรือสภาวะอุณหภูมิที่ควบคุมในถัง เป็นต้น (ถังปฏิกรณ์ อาจมีลักษณะเป็นถังที่มีโครงสร้างผนังและพื้นเป็นโลหะ เป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก หรืออาจเป็นบ่อดิน ก็ได้)

ตารางที่ 4.1 แสดงแนวทางที่ใช้ในการจำแนกชนิดของระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ

แนวทางที่ใช้จำแนก	ชนิดของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ	
สภาพของจุลินทรีย์อยู่ในถัง	Suspended growth	Attached growth
ความเข้มข้นของของแข็ง ในถัง (กรณีอินทรีย์สารมีความชื้นต่ำ เช่น Solid waste เป็นต้น)	Wet system	Dry system
อุณหภูมิภายในถังปฏิกรณ์	Mesophilic (20 – 45°C)	Thermophilic (45 – 60°C)
ลักษณะการป้อนอินทรีย์สาร(น้ำเสีย)	Batch	Continuous
ตามขั้นตอนการย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศ	Single-stage reactor	Two-stage reactor
จำนวนประเภทน้ำเสีย/ของเสียที่ป้อน	Single substrate	Co-substrate

สำหรับในคู่มือการปฏิบัติงานนี้ จะแบ่งชนิดของถังปฏิกรณ์บำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศและผลิตก๊าซชีวภาพตามสภาพของจุลินทรีย์ที่อยู่ในถังปฏิกรณ์ ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

1) ถังปฏิกรณ์ที่มีเชื้อจุลินทรีย์อยู่ในสภาพแขวนลอย (Suspended growth)

2) ถังปฏิกรณ์ที่เชื้อจุลินทรีย์เกาะอยู่บนวัสดุตัวกลาง (Attached growth)

ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.1.1 ถังปฏิกรณ์ที่เชื้อจุลินทรีย์อยู่ในสภาพแขวนลอย (Suspended growth)

ถังปฏิกรณ์ของระบบประเภทนี้ เชื้อจุลินทรีย์ที่อยู่ภายในถังจะอาศัยอยู่ และเจริญเติบโตในสภาพแขวนลอย โดยจุลินทรีย์ที่แขวนลอยในถังจะมีการกระจายตัวทั่วกันทั้งถัง ด้วยการกวนผสม หรือตะกอนจุลินทรีย์มีความเข้มข้นไล่ระดับ (Sludge profile) ไปตามการไหลของน้ำ เช่น ความเข้มข้นของเชื้อจุลินทรีย์บริเวณด้านล่างถังปฏิกรณ์สูงกว่าด้านบนถังปฏิกรณ์ เนื่องจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้อากาศนั้น เชื้อจุลินทรีย์ที่เจริญเติบโตช้าคือพวกเชื้อจุลินทรีย์ที่ผลิตมีเทน ดังนั้นการรักษาเชื้อจุลินทรีย์กลุ่มนี้ให้อยู่ในระบบได้นานเป็นเรื่องที่สำคัญ ซึ่งการรักษาจุลินทรีย์ให้อยู่ในระบบได้นานทำได้โดย

1) การมีปริมาตรของเหลวในระบบมาก ทำให้ระยะเวลากักเก็บน้ำ (Hydraulic Retention Time, HRT) สูง
2) การแยกตะกอนจุลินทรีย์ออกจากน้ำ และวนตะกอนจุลินทรีย์กลับเข้าไปในถังปฏิกรณ์ ซึ่งกรณีนี้ทำให้ระยะเวลากักเก็บของแข็ง (Solid Retention Time, SRT) นานกว่าระยะเวลากักเก็บน้ำ (HRT)
3) การสร้างให้ตะกอนจุลินทรีย์เกาะตัวกันเป็นเม็ด (granule) และแยกออกจากน้ำได้ง่าย ซึ่งกรณีนี้ก็ทำให้ระยะเวลากักเก็บของแข็ง (SRT) นานกว่า ระยะเวลากักเก็บน้ำ (HRT) เช่นกัน

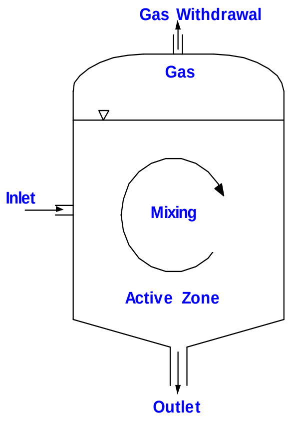
ตัวอย่างถังบำบัดแบบไม่ใช้อากาศที่มีลักษณะของเชื้อจุลินทรีย์แขวนลอยอยู่ภายในถังปฏิกรณ์ ที่นิยมโดยเฉพาะเพื่อบำบัดน้ำเสียและผลิตก๊าซชีวภาพจากโรงงานอุตสาหกรรม ได้แก่

1) ถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์ CSTR / ถังแบบ AC
2) ถังปฏิกรณ์แบบตะกอนลอย UASB
3) ระบบบ่อปิดแบบไม่ใช้อากาศ Anaerobic covered lagoon
4) ระบบบ่อปิดแบบไม่ใช้อากาศดัดแปลง Modified covered lagoon
5) ระบบแผ่นกั้นแบบไม่ใช้อากาศ ABR
6) ระบบบ่อแบบราง Plug flow anaerobic digester

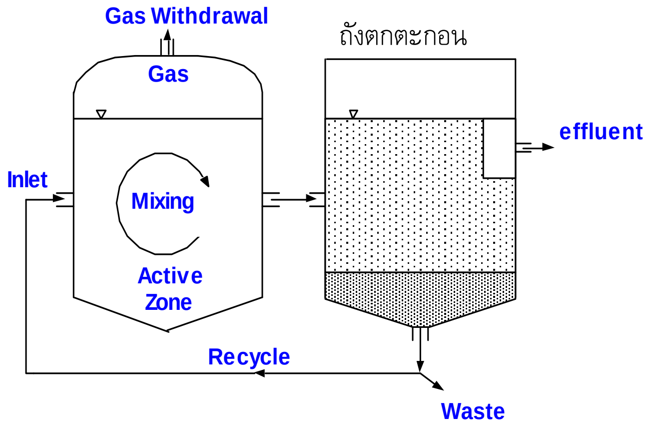
โดยรายละเอียดของถังปฏิกรณ์ในกลุ่มจุลินทรีย์แขวนลอย มีดังนี้

4.1.1.1 ถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์ (Continuously Stirred Tank Reactor; CSTR) และถังแบบ Anaerobic Contact (AC)

ถังปฏิกรณ์ในรูปแบบนี้ เป็นถังปฏิกรณ์ที่ของเหลวและของแข็งภายในถังเกิดการกวนผสมอย่างดี วิธีการกวนผสมมักทำโดยการติดตั้งใบกวน ซึ่งใบกวนที่ใช้จะมีรูปทรงต่างๆ เช่น แบบ Paddle แบบ Impeller หรือสกรู (Screw) การติดตั้งใบกวนอาจจะมีทั้งการติดตั้งในแนวดิ่ง แนวราบ หรือเอียง อย่างไรก็ตามการกวนด้วยใบกวนนั้นมักจะมีปัญหาเรื่องการบำรุงรักษา ดังนั้นจึงมีการใช้ปั๊มของเหลวหมุนวน หรือการปั๊มก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น วนกลับเข้ามาเพื่อช่วยในการกวนผสม ในการหมุนวนน้ำหรือก๊าซชีวภาพ (Gas diffuser) ที่เกิดขึ้นโดยใช้หัวพ่น (Jet mixer) กรณีของการใช้ปั๊มเพื่อหมุนวนของเหลวหรือก๊าซเพื่อกวนผสมนี้อาจจะสิ้นเปลืองพลังงานมากกว่าการกวนด้วยใบกวน แต่จะช่วยลดปัญหาเรื่องการบำรุงรักษาใบกวนภายในถังปฏิกรณ์ได้ โดยหลักการแล้วการกวนผสมที่เกิดขึ้น ทำให้ภายในถังปฏิกรณ์มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์และเชื้อจุลินทรีย์เท่ากันทั่วทั้งถัง (Completely mixed) ทำให้มีการสัมผัสระหว่างจุลินทรีย์และสารอินทรีย์ของน้ำเสียในถังปฏิกรณ์ได้ดี ปฏิกิริยาการย่อยสลายจึงเกิดได้ดี รูปที่ 4.1A แสดงลักษณะถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ (Continuously Stirred Tank Reactor; CSTR) และรูปที่ 4.1B แสดงลักษณะถังปฏิกรณ์แบบ Anaerobic Contact (AC) ซึ่งก็คือถังกวนสมบูรณ์ ที่เพิ่มถังตกตะกอนจุลินทรีย์ เพื่อนำเชื้อจุลินทรีย์กลับเข้าในถังปฏิกรณ์หลักอีก เป็นการรักษาปริมาณจุลินทรีย์ในระบบไว้



รูปที่ 4.1A ; Continuously Stirred Tank Reactor; CSTR



รูปที่ 4.1B ; Anaerobic contact; AC

รายละเอียดจุดเด่นและข้อจำกัด ตลอดจนปัญหาอุปสรรคในด้านการใช้งานของถังปฏิกรณ์ในรูปแบบนี้ คือ

จุดเด่นของถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์และ Anaerobic contact มีดังนี้

- ด้วยรูปแบบของถังกวนสมบูรณ์ ทำให้การกวนผสมของสารอินทรีย์และจุลินทรีย์ภายในถังเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ เหมาะกับน้ำเสียหรือของเสียที่มีความเข้มข้นของของแข็งสูง จึงสามารถป้อนน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูง (High concentration) ได้ และหากน้ำเสียนั้นมีสารแขวนลอยสูง (High suspended solid content) ก็ไม่จำเป็นต้องมีขั้นตอนแยกตะกอนออกมาก่อนเข้าถังปฏิกรณ์
- ช่วยลดการเกิดปัญหาในกรณีที่มีการปนเปื้อนของสารที่มีผลยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ เช่น กรณีน้ำเสียที่มีสารพิษเป็นองค์ประกอบในน้ำเสีย ใน Solid digester, ขยะมูลฝอย, ของเสียจากฟาร์ม, น้ำเสียจากเอทานอล (ที่ใช้โมลาสเป็นวัตถุดิบ) เป็นต้น แต่เนื่องจากการกวนผสมภายในถังเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ จึงจะมีการเจือจางความเข้มข้นของสารเหล่านี้ได้
- การตรวจวัดและควบคุมระบบไม่ยุ่งยากซับซ้อน เพียงแต่ต้องให้เกิดการกวนผสมสมบูรณ์จริง (Completely mixed) และไม่เกิด Dead zone ตรงจุดที่การกวนเข้าไม่ถึงซึ่งมีผลทำให้เกิดการตกตะกอนของของแข็งและส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบ

ข้อจำกัดและอุปสรรคของถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์และ Anaerobic Contact มีดังนี้

- เนื่องจากความเข้มข้นภายในถังเท่ากัน ดังนั้นระยะเวลากักเก็บของแข็ง (Solid Retention Time; SRT) ซึ่งรวมถึงเชื้อจุลินทรีย์ในถังจะเท่ากับระยะเวลากักเก็บน้ำเสีย (Hydraulic

Retention Time; HRT) ทำให้ต้องออกแบบถังปฏิกรณ์ให้มีขนาดใหญ่ ถ้าของเสียหรือน้ำเสียนั้นเป็นวัตถุดิบย่อยสลายได้ยาก

- ความเข้มข้นของแข็งในถังไม่ควรเกิน 10%TS (โดยทั่วไปจะรักษาอยู่ที่ไม่เกิน 5%TS) เนื่องจากหากความเข้มข้นของแข็งสูง จะไม่สามารถทำให้เกิดการกวนผสมที่ดีได้
- ปัญหาเชื้อจุลินทรีย์ในระบบลดลงอย่างรวดเร็ว ถ้าหาก SRTและ HRT ไม่สูงพอที่จะให้จุลินทรีย์ในกลุ่มสร้างมีเทน ซึ่งมีอัตราการเจริญเติบโตที่ช้า สามารถเจริญเติบโตและเพิ่มปริมาณได้มากเทียบเท่ากับที่หลุดออกจากระบบไปกับน้ำเสียขาออก (Wash out) ซึ่งอาจแก้ปัญหาโดยการมีถังตกตะกอนซึ่งเรียกว่า Anaerobic Contact; AC (รูปที่ 4.1B) เพื่อวนตะกอนจุลินทรีย์กลับเข้ามาในถัง แต่ในกรณีนี้ต้องมีระบบแยกก๊าซ (Degasing) ออกก่อนที่จะเข้าถังตกตะกอน
- จากการที่ถังปฏิกรณ์มีลักษณะการกวนผสมภายในถัง ทำให้ความเข้มข้นของสารอินทรีย์และเชื้อจุลินทรีย์เท่ากันทุกจุด ซึ่งลักษณะดังกล่าวทำให้น้ำเสียที่ออกจากระบบและตะกอนจุลินทรีย์ที่หลุดออกมายังคงมีค่าความสกปรกสูงอยู่ ไม่สามารถปล่อยทิ้งได้โดยตรง ทำให้ยังคงต้องทำการบำบัดด้วยระบบบำบัดขั้นต่อไป ทั้งนี้สำหรับกรณีระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศรูปแบบ Two-stage reactor อาจจะใช้ CSRT เป็นถังปฏิกรณ์ใบแรก (1st stage AD reactor)
- มักพบปัญหาเรื่องการชำรุดของอุปกรณ์ใบกวน อยู่เป็นประจำ ดังนั้นจึงต้องการการดูแลและซ่อมบำรุงอย่างสม่ำเสมอ

การตรวจสอบบำรุงรักษาถังกวนสมบูรณ์และ Anaerobic Contact

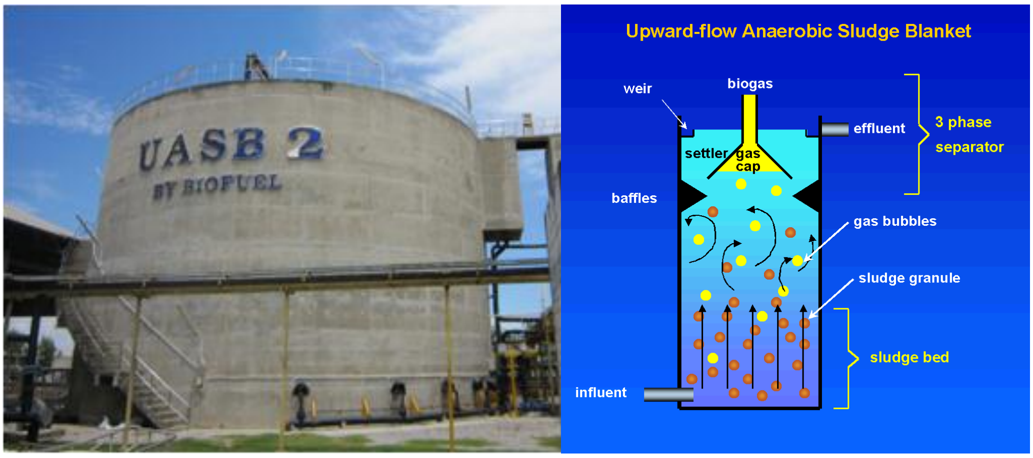
1) ควรมีการตรวจสอบการทำงานของใบกวนอย่างสม่ำเสมอ เพื่อให้ใบกวนมีสภาพพร้อมใช้งานตลอดเวลา
2) ถ้าใช้การกวนที่มีเพลาออกจากถัง ควรมั่นตรวจการรั่วซึมของก๊าซ
3) ควรทำการตรวจสอบปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ในถังอย่างสม่ำเสมอ เนื่องจากปริมาณตะกอนจุลินทรีย์มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียของระบบ

4.1.1.2 ถังปฏิกรณ์แบบตะกอนลอย หรือถังยูเอเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket, UASB)

รูปแบบของถังและการทำงานของระบบยูเอเอสบี จะถูกออกแบบให้เชื้อจุลินทรีย์เกิดการยึดเกาะกันเองจนเป็นเม็ดตะกอนที่เรียกว่า Granule ซึ่งลักษณะเม็ดตะกอนที่ดี ควรจะมีความหนาแน่นสูงและมีความสามารถตกตะกอนได้ดี การควบคุมการไหลของน้ำเสียเข้าถังปฏิกรณ์ที่เหมาะสม จะทำให้เม็ดตะกอนจุลินทรีย์ลอยตัวอยู่เป็นชั้นสลัดจ์ไม่จมลงก้นถังหรือไหลหลุดออกจากระบบ ดังนั้น

ความเร็วในการป้อนน้ำเสียที่เป็นลักษณะไหลขึ้น (Upflow) ควรจะมีอัตราเร็วสูง (อยู่ในช่วง 0.5-5 เมตร/ชั่วโมง) ซึ่งเป็นระดับที่สามารถทำให้ชั้นสลัดจ์ยกตัวขึ้น นอกจากนี้ความเร็วในการป้อนน้ำเสียยังเป็นปัจจัยสำคัญ สำหรับการคัดเลือกจุลินทรีย์ที่มีคุณภาพไว้ในระบบ และช่วยในการเกิดเม็ดตะกอนอีกด้วย การเก็บรักษาเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ไว้ภายในถังปฏิกรณ์ไม่ให้หลุดออกจากระบบ (Wash out) เนื่องจากตะกอนจุลินทรีย์เหล่านี้จะถูกแยกออกจากน้ำเสียด้วยอุปกรณ์แยกก๊าซชีวภาพ-ของเหลว-ตะกอน จุลินทรีย์ (Gas-Liquid-Solid Separator หรือเรียกว่า 3 Phase Separator) ที่ภายในถังปฏิกรณ์ ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญของถังในรูปแบบนี้

ส่วนการกวนผสมภายในถัง จะอาศัยการไหลของน้ำเสียที่ป้อนเข้าถังปฏิกรณ์ จากด้านล่างไหลขึ้นสู่ด้านบน รวมถึงเกิดจากการเคลื่อนที่ของฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมการย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยเช่นกัน รูปที่ 4.2 แสดงรูปถ่ายถังปฏิกรณ์และสภาพภายในถังปฏิกรณ์แบบยูเอเอสบี



รูปที่ 4.2 แสดงรูปถังปฏิกรณ์แบบ UASB และภาพจำลองภายในถัง

(**ที่มา;** http://www.uasb.org/discover/agsb.htm)

ภายในถังปฏิกรณ์ UASB ประกอบด้วย 4 ส่วน ได้แก่

1) ส่วนของตะกอนชั้นล่าง (Sludge Bed)
2) ส่วนชั้นตะกอนลอย (Sludge Blanket)
3) ส่วนของอุปกรณ์แยกเม็ดตะกอนและก๊าซชีวภาพออกจากของเหลว (Gas-Liquid-Solid Separator; GLSS)
4) ส่วนของอุปกรณ์ในการตกตะกอน (Settlement Compartment)

ถังปฏิกรณ์แบบ UASB (ส่วน 3 และ 4) รวมเรียกว่า 3 Phase Separator)

เนื่องจากลักษณะการป้อนน้ำเสียจะป้อนแบบล่างขึ้นบน (Up flow) ทำให้ส่วน Sludge bed ได้รับสารอาหารสูงกว่าส่วนอื่น ดังนั้นส่วนนี้จะเป็นชั้นตะกอนจุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์สูง และมีความสามารถในการตกตะกอนสูง (High setting velocity) โดยความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ควรจะอยู่ในช่วง 40-100 kg VSS/m^3 ส่วนชั้น Sludge blanket ซึ่งเป็นชั้นที่ตะกอนที่มีความหนาแน่นต่ำกว่าและมีความเร็วในการจมตัวต่ำกว่า จุลินทรีย์จะลอยฟุ้งกระจายด้วยแรงของน้ำเสียและก๊าซชีวภาพที่เกิดจากการย่อยสลาย

สำหรับด้านบนของถัง จะเป็นส่วนสำคัญต่อประสิทธิภาพการทำงานของถังปฏิกรณ์ชนิดนี้ โดยเป็นส่วนของ Gas-Liquid-Solid Separator หรือ 3 Phase Separator และ Settlement Compartment ซึ่งเป็นแผ่นเอียงทำมุมประมาณ 45-60 องศา อุปกรณ์ดังกล่าวจะทำหน้าที่แยกก๊าซชีวภาพออกจากน้ำเสียและเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ ซึ่งเป็นการป้องกันไม่ให้เม็ดตะกอนจุลินทรีย์เกิดการหลุดออกจากระบบ โดยอาศัยหลักการ คือ เม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่มีคุณภาพจะถูกแยก และตกกลับเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ลงที่ส่วน Settlement compartment ซึ่งอาศัยแรงโน้มถ่วงที่เกิดจากน้ำหนักของเม็ดตะกอนเอง และเมื่อเม็ดตะกอนคายก๊าซที่เป็นตัวพาให้เคลื่อนที่ขึ้นสู่ด้านบนของถังปฏิกรณ์ออกไปแล้ว จะเกิดการสูญเสียแรงดันที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของก๊าซไป ทำให้แรงโน้มถ่วงที่เกิดจากเม็ดตะกอนเองมากกว่าแรงลอยตัว เม็ดตะกอนจึงตกกลับเข้าสู่ส่วนล่างของถังปฏิกรณ์ตามเดิม ส่วนน้ำเสียจะไหลออกสู่ส่วนระบายน้ำเสียด้านบนและก๊าซชีวภาพจะถูกรวบรวมแยกออกไป

รายละเอียดจุดเด่นจุดด้อย (ข้อดี/ข้อเสีย) และปัญหาอุปสรรคในด้านการใช้งานของถังปฏิกรณ์ในรูปแบบนี้ คือ

จุดเด่นของถังปฏิกรณ์แบบ UASB มีดังนี้

- จัดเป็นระบบที่สามารถรับอัตรารองรับภาระสารอินทรีย์สูง (High rate anaerobic digestion) โดยสามารถรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ได้มากถึง 20 kg COD/m^3/d
- เนื่องจากไม่มีการใช้ตัวกลางจึงไม่มีการสูญเสียพื้นที่ในถัง และเม็ดตะกอนจะมีอัตราส่วนของจุลินทรีย์ต่อปริมาตรสูง ดังนั้นถังปฏิกรณ์จึงมีขนาดเล็ก รวมทั้งมีระยะเวลาในการเก็บกักน้ำเสียสั้นกว่าระบบอื่น
- ไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายสำหรับวัสดุตัวกลาง อุปกรณ์ในการกวนผสมและถังตกตะกอนทำให้ค่าก่อสร้างถังปฏิกรณ์ถูกลง
- เหมาะกับน้ำเสียที่มีของแข็งแขวนลอยต่ำ น้ำเสียที่สารอินทรีย์ย่อยสลายง่าย เช่น น้ำเสียจากโรงงานเบียร์ น้ำหวาน เป็นต้น

ข้อจำกัดและอุปสรรคของถังปฏิกรณ์แบบ UASB มีดังนี้

- ใช้ระยะเวลานานในการเริ่มต้นระบบ (Start up) เนื่องจากต้องสร้างเม็ดตะกอน และชั้นสลัดจ์ก่อน โดยจะต้องทำการเติมเชื้อจุลินทรีย์เข้าสู่ถัง UASB ให้มีความเข้มข้นประมาณ 40-100 kg VSS/m^3 และรักษาสภาวะที่เอื้อให้เกิดการรวมตัวเป็นเม็ดตะกอนจุลินทรีย์จึงเป็นเรื่องยากและมีความซับซ้อน
- การควบคุมดูแลระบบยุ่งยาก เนื่องจากต้องพยายามรักษาตะกอนจุลินทรีย์ในระบบให้เหมาะสม และไม่ให้ตะกอนจุลินทรีย์หลุดออกจากระบบ (Wash Out) รวมทั้งปัญหา Mass transfer resistance และหากเกิดสภาวะ Shock load อาจจะมีปัญหาในการลอยตัวของเม็ดตะกอน และถ้าดำเนินการไม่เหมาะสมจะส่งผลต่อประสิทธิภาพและเสถียรภาพของระบบ
- ต้องการบุคลากรที่มีทักษะการควบคุมดูแลระบบสูง

ข้อแนะนำ

- อาจจะต้องมีขั้นตอนปรับสภาพน้ำเสียก่อนเข้าระบบ (Pretreatment) ถ้าน้ำเสียมีของแข็งแขวนลอยสูง (High suspended solid content) โดยทั่วไปค่าของแข็งแขวนลอยที่เข้าระบบ UASB ควรน้อยกว่า 1,500 mg/l
- โดยทั่วไปอาจจะมีการทำเป็นระบบแบบสองขั้นตอน โดยมีการแยกให้มีบ่อ/ถังหมักกรด (Acid tank) ก่อน แล้วจึงป้อนเข้าสู่ถัง UASB เพื่อผลิตมีเทน

การตรวจสอบบำรุงรักษาถังปฏิกรณ์แบบ UASB

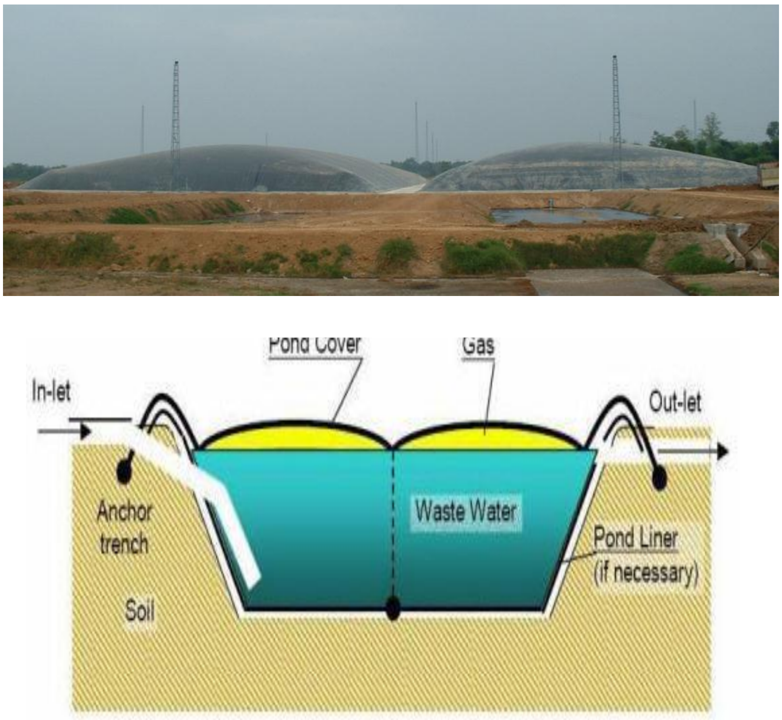
1) ระบบท่อลำเลียงน้ำเสียเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ จะต้องหมั่นตรวจสอบให้ระบบท่อมีการกระจายน้ำอย่างสม่ำเสมอและทั่วถึงทั้งถังปฏิกรณ์ เพื่อให้จุลินทรีย์ได้สัมผัสกับน้ำเสียอย่างทั่วถึง และควรควบคุมอัตราการไหลของน้ำเสีย และค่าความเร็วไหลขึ้นของน้ำเสียภายในถังปฏิกรณ์ให้เหมาะสม
2) หมั่นตรวจสอบ และระมัดระวังไม่ให้ท่อลำเลียงน้ำเสียมีการอุดตัน
3) ควรทำการตรวจสอบปริมาณตะกอนและกิจกรรมของกลุ่มจุลินทรีย์ผลิตมีเทน (Methanogenic activity) ในถังอย่างสม่ำเสมอ เนื่องจากปริมาณตะกอนจุลินทรีย์มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียของระบบ

4) หมั่นตรวจสอบและทำความสะอาดแผ่นช่วยตกตะกอน (ถ้ามี) ไม่ให้อุดตัน เพราะอาจจะทำให้ประสิทธิการตกตะกอนลดลง และถ้ามีน้ำหนักมากจะทำให้ชุดช่วยตกตะกอนเสียหายได้

4.1.1.3 ระบบบ่อปิดแบบไม่ใช้อากาศ (Anaerobic Covered Lagoon)

ระบบนี้ตัวถังปฏิกรณ์มีลักษณะเป็นบ่อดินขุดขนาดใหญ่ โดยปกติบ่อควรมีความลึกไม่ต่ำกว่า 6 เมตร และปิดคลุมด้วยแผ่นพลาสติกทำด้วย PVC หรือ HDPE ที่ด้านบน เพื่อเก็บกักก๊าซชีวภาพโดยเก็บก๊าซภายใต้ความดันสูงกว่าความดันบรรยากาศเล็กน้อย (ทำให้แผ่นโป่งขึ้น) ตัวผนังและพื้นบ่อดินจะมีการปูพื้นเพื่อป้องกันน้ำเสียปนเปื้อนสู่น้ำใต้ดิน วัสดุที่ใช้ปูพื้น เช่น พลาสติกทำด้วย PVC หรือ HDPE เป็นต้น ในการยึดแผ่นพลาสติกทำได้ทั้งการใช้ดินกดทับปลายขอบแผ่นพลาสติก หรือใช้น้ำ Seal ไว้โดยที่ปลายขอบพลาสติกถูกยึดจมในรางน้ำ องค์ประกอบภายในบ่อทำอย่างไม่ซับซ้อน คือประกอบด้วยท่อป้อนน้ำเสีย (น้ำเสียไหลเข้าบ่อ) และท่อที่น้ำเสียไหลออกซึ่งอยู่ด้านตรงข้ามกัน โดยอาจจะมีรางต่อออกมาจากบ่อเตรียมไว้สำหรับดึงกากตะกอนก็ได้ การก่อสร้างและติดตั้งอุปกรณ์ค่อนข้างง่ายและมีราคาถูกเมื่อเทียบกับกับระบบอื่น ดังนั้นระบบนี้จึงนิยมใช้หากไม่มีข้อจำกัดเรื่องพื้นที่และกฎหมายสิ่งแวดล้อมที่เข้มงวด รูปที่ 4.3 แสดงลักษณะของระบบบ่อปิดแบบไม่ใช้อากาศ (Anaerobic Covered Lagoon)

ในระบบ Anaerobic Covered Lagoon ท่อป้อนน้ำเสียจะถูกต่อลงด้านล่างของบ่อ ซึ่งบ่อจะมีความลึกประมาณ 3-5 เมตรหรือมากกว่านั้น น้ำเสียที่ป้อนเข้าบ่อเกิดการตกตะกอนบริเวณก้นบ่อรวมทั้งเกิดการย่อยเป็นกรดอินทรีย์และผลิตก๊าซชีวภาพตามลำดับ เนื่องจากความเข้มข้นของเชื้อจุลินทรีย์ต่ำกว่าระบบอื่นและบ่อมีขนาดใหญ่ ทำให้ระยะเวลาในการกักเก็บน้ำเสียของระบบนี้ค่อนข้างนาน ดังนั้นระบบนี้จึงจัดเป็นระบบที่มีอัตรารองรับภาระสารอินทรีย์ต่ำ (Low rate anaerobic digestion) แต่เนื่องจากระบบเป็นบ่อขนาดใหญ่ ดังนั้นเมื่อรับน้ำเสียที่มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติอย่างรวดเร็ว เช่น COD, SS, pH, สารพิษ หรือปริมาณน้ำเสียที่สูงขึ้น (Volumetric shock load) จึงไม่เกิดผลกระทบต่อระบบมากนัก



รูปที่ 4.3 แสดงลักษณะของระบบบ่อปิดแบบไม่ใช้อากาศ (Anaerobic Covered Lagoon)

อย่างไรก็ตามปัญหาสำคัญที่มักเกิดขึ้นในการใช้งานระบบดังกล่าว ได้แก่ ปัญหาการสะสมของตะกอนภายในบ่อ เนื่องจากบ่อเป็นบ่อขนาดใหญ่ มีระยะเวลากักเก็บน้ำเสียนาน ทำให้มีการตกตะกอนของแข็งภายในบ่อ ทำให้ปริมาณของแข็งที่ออกมากับน้ำเสียขาออกจะมีเพียงร้อยละ 2 เท่านั้น แม้ว่าน้ำเสียขาเข้าจะมีปริมาณของแข็งสูง เช่น น้ำเสียจากฟาร์มปศุสัตว์ ซึ่งมีสัดส่วนของของแข็งที่ย่อยสลายยากสูงประมาณร้อยละ 10–20 ดังนั้นจึงเกิดการสะสมตะกอนภายในบ่อจนทำให้ปริมาตรของบ่อลดลง ประสิทธิภาพการทำงานลดลง นอกจากนี้จากการที่ตะกอนสะสมมาก อาจทำให้เกิดการกีดขวางการไหลของน้ำและเนื่องจากบ่อมีพื้นที่หน้าตัดมากทำให้ความเร็วไหลขึ้นของก๊าซ (Gas upflow velocity) จะต่ำทำให้มีการกวนผสมต่ำและถ้าเกิด Scum จะทำให้มีการขัดขวางการคลายตัวออกจากผิวน้ำและส่งผลต่อการดึงก๊าซออกจากระบบ

รายละเอียดจุดเด่นจุดด้อย (ข้อดี/ข้อเสีย) และปัญหาอุปสรรคในด้านการใช้งานของถังปฏิกรณ์ในรูปแบบนี้ คือ

จุดเด่นของถังปฏิกรณ์แบบบ่อปิดแบบไม่ใช้อากาศ มีดังนี้

- การก่อสร้างได้ง่าย รวดเร็ว และเงินลงทุนต่ำ
- เนื่องจากมีบ่อขนาดใหญ่ ปริมาตรของระบบมาก เมื่อน้ำเสียที่ป้อนเข้ามีการเปลี่ยนแปลงสมบัติอย่างรวดเร็ว เช่น COD, SS, pH หรือสารพิษ และความเข้มข้นสารอินทรีย์ที่สูงขึ้น (Organic shock load) จึงทำให้ได้รับผลกระทบต่ำ
- เหมาะกับน้ำเสียหรือของเสียที่มีความเข้มข้นของแข็งสูง หรือของเสียที่มีสิ่งที่เป็นพิษเจือปน ซึ่งโดยปกติจะใช้กันในกรณีที่เป็นของเสียจากฟาร์ม น้ำเสียจากเอทานอล (ที่ใช้โมลาสเป็นวัตถุดิบ) เป็นต้น
- ประสิทธิภาพในการบำบัดสูง (โดยเฉพาะของแข็งแขวนลอย)

ข้อจำกัดและอุปสรรคของถังปฏิกรณ์แบบบ่อปิดแบบไม่ใช้อากาศ มีดังนี้

- ต้องการพื้นที่ก่อสร้างมากที่สุดในบรรดาระบบผลิตก๊าซชีวภาพทุกประเภท เนื่องจากอัตราภาระการรับสารอินทรีย์เชิงปริมาตร (Organic loading rate) ต่ำ
- การกวนผสมไม่ดี เนื่องจากใช้การกวนเป็นไปโดยธรรมชาติ (อาศัยก๊าซที่เกิดขึ้น)
- การใช้งานบ่อไม่เต็มประสิทธิภาพ โดยมีโอกาสที่มีการไหลลัดวงจรของน้ำเสียสูงจากการกองสะสมของตะกอน ทำให้เกิดบริเวณที่เป็น Dead zone ได้มาก
- การกำจัดตะกอนที่สะสมในบ่อทำได้ยาก
- ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพของระบบ เช่น ระบบล้มเหลวหรือความเข้มข้นของมีเทนลดลง จะรับรู้ได้ช้า (ถ้าไม่มีการตรวจวิเคราะห์สม่ำเสมอ) และการแก้ไขระบบกลับมาสู่สภาวะปกติทำได้ช้า
- อาจจะมีปัญหาเรื่องการฉีกขาดของแผ่นพลาสติกที่คลุมบ่อหรือการขวางการดูดก๊าซออกจากบ่อ กรณีที่มีก๊าซไม่มากพอและมีน้ำท่วมขัง ดังนั้นควรมีการดูแลแผ่นพลาสติกที่คลุมบ่อให้ตึงอยู่ตลอดเวลา

การตรวจสอบบำรุงรักษาระบบบ่อปิดแบบไม่ใช้อากาศ

1) ตรวจสอบการชำรุดของแผ่นพลาสติกที่ปิดคลุมบ่อ รวมทั้งการรั่วซึมของก๊าซจากการยึดขอบแผ่นพลาสติก (ไม่ว่าจะเป็นแบบใช้น้ำหรือใช้ดินทับ) และบริเวณ seal ต่างๆ
2) หมั่นตรวจวัดความดันภายในแผ่นพลาสติกที่คลุมบ่อไม่ให้สูงเกินความทนทานของแผ่นพลาสติก
3) เนื่องจากท่อก๊าซส่วนใหญ่ออกจากถังใต้ระดับผิวดิน ควรหมั่นตรวจสอบการระบายน้ำในท่อก๊าซเพื่อป้องกันการขัดขวางการไหลของก๊าซ

4) เนื่องจากปัญหาการสะสมของตะกอนภายในบ่อ ดังนั้นการแก้ปัญหาการสะสมของตะกอนทั้งที่อยู่ทางด้านล่างของบ่อและที่ผิวน้ำ สามารถทำได้โดยการขุดลอกบ่อซึ่งต้องเปิดพลาสติกคลุมบ่อออก หรือการติดตั้งท่อระบายตะกอนเพื่อดึงกากตะกอนขึ้นมาจากบ่อ หลักการทำงานของท่อระบายตะกอนจะอาศัยแรงดันก๊าซที่อยู่ด้านในซึ่งกดลงที่ผิวน้ำกากตะกอนแข็งจะไหลออกจากท่อที่ติดตั้งไว้ อย่างไรก็ตามเนื่องจากบ่อมีขนาดใหญ่มากการดึงตะกอนแข็งออกจากบ่ออาจจะทำไม่ได้ทั่วทั้งบ่อแม้ว่าจะทำการติดตั้งท่อระบายตะกอนไว้หลายๆ จุดรอบบ่อ ซึ่งในที่สุดอาจจะต้องเปิดพลาสติกคลุมบ่อเพื่อขุดลอกตะกอนออก

4.1.1.4 ระบบบ่อปิดแบบไม่ใช้อากาศดัดแปลง (Modified Anaerobic Covered Lagoon)

ระบบนี้ ตัวถังปฏิกรณ์มีลักษณะเป็นบ่อเช่นเดียวกับบ่อปิดแบบไม่ใช้อากาศ (Anaerobic Covered Lagoon) แต่มีการปรับปรุง/ดัดแปลง เพื่อแก้ไขข้อจำกัดของบ่อปิดแบบไม่ใช้อากาศ ทำให้บ่อมีประสิทธิภาพสูงขึ้น/มีปริมาตรบ่อเล็กลง (รูปที่ 4.4) การดัดแปลงทำได้หลายรูปแบบ เช่น

- การเพิ่มบ่อและให้มีการไหลเป็นแบบอนุกรมกัน ตามขั้นตอนการย่อยสลายในสภาวะไม่ใช้อากาศ (เช่น เป็นบ่อหมักกรด บ่อผลิตมีเทน เป็นต้น)
- การเพิ่มบ่อเพื่อวัตถุประสงค์ของการดึงตะกอนย้อนกลับ (การเพิ่มบ่อตกตะกอน และมีท่อปั๊มตะกอนย้อนกลับ)
- การเพิ่มท่อกระจายน้ำเข้าไปทั่วบ่อ เพิ่มการกระจายน้ำและมีการวนน้ำย้อนกลับเพื่อเพิ่มการกวนผสม
- การเพิ่มจุดรวบรวมกากตะกอนและท่อระบายตะกอน

รูปที่ 4.4 แสดงลักษณะของบ่อปิดแบบไม่ใช้อากาศดัดแปลง

(Modified Anaerobic Covered Lagoon)

รายละเอียดจุดเด่นจุดด้อย (ข้อดี/ข้อเสีย) และปัญหาอุปสรรคในด้านการใช้งานของถังปฏิกรณ์ในรูปแบบนี้ คือ

จุดเด่นของถังปฏิกรณ์แบบบ่อปิดแบบไม่ใช้อากาศดัดแปลง มีดังนี้

- การก่อสร้างได้ง่าย แต่เงินลงทุนสูงขึ้นในการปรับปรุงแบบการออกแบบเพิ่มเติมจากบ่อปิดแบบไม่ใช้อากาศดั้งเดิม
- ระบบมีต่อผลกระทบต่ำ เมื่อน้ำเสียที่ป้อนเข้ามีการเปลี่ยนแปลงสมบัติอย่างรวดเร็ว เช่น COD, SS, pH หรือสารพิษ
- เหมาะกับน้ำเสียหรือของเสียที่มีความเข้มข้นของแข็งสูง หรือของเสียที่มีสิ่งที่เป็นพิษเจือปน ซึ่งโดยปกติจะใช้กันในของเสียจากฟาร์ม น้ำเสียจากเอทานอล (ที่ใช้โมลาสเป็นวัตถุดิบ) เป็นต้น
- ประสิทธิภาพในการบำบัดสูง (โดยเฉพาะของแข็งแขวนลอย)

ข้อจำกัดและอุปสรรค ของถังปฏิกรณ์แบบบ่อปิดแบบไม่ใช้อากาศดัดแปลง มีดังนี้

- อัตราภาระการรับสารอินทรีย์ต่ำ ต้องการพื้นที่ระบบมาก
- ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพของระบบ เช่น ระบบล้มเหลวหรือความเข้มข้นของมีเทนลดลง จะรับรู้ได้ช้า (ถ้าไม่มีการตรวจวิเคราะห์สม่ำเสมอ) และการแก้ไขระบบกลับมาสู่สภาวะปกติทำได้ช้า
- อาจจะมีปัญหาเรื่องการฉีกขาดของแผ่นพลาสติก หรือกรณีที่มีก๊าซไม่มากพอ แผ่นพลาสติกอาจมีการกีดขวางการดูดก๊าซออกจากบ่อ ควรมีการดูแลแผ่นพลาสติกที่คลุมบ่อให้ตึงอยู่ตลอดเวลา
- ต้องการพื้นที่ก่อสร้างขนาดใหญ่ รองจากบ่อปิดแบบไม่ใช้อากาศดั้งเดิม

การตรวจสอบบำรุงรักษาระบบบ่อปิดแบบไม่ใช้อากาศดัดแปลง

1) ตรวจสอบการชำรุดของแผ่นพลาสติกที่ปิดคลุมบ่อ รวมทั้งการรั่วซึมของก๊าซจากการยึดขอบแผ่นพลาสติก (ไม่ว่าจะเป็นแบบใช้น้ำ หรือใช้ดินทับ) และบริเวณ seal ต่างๆ
2) หมั่นตรวจวัดความดันภายในแผ่นพลาสติกที่คลุมบ่อไม่ให้สูงเกินความทนทานของแผ่นพลาสติก
3) เนื่องจากท่อก๊าซส่วนใหญ่ออกจากถังใต้ระดับผิวดิน ควรหมั่นตรวจสอบการระบายน้ำในท่อก๊าซเพื่อป้องกันการขัดขวางการไหลของก๊าซ

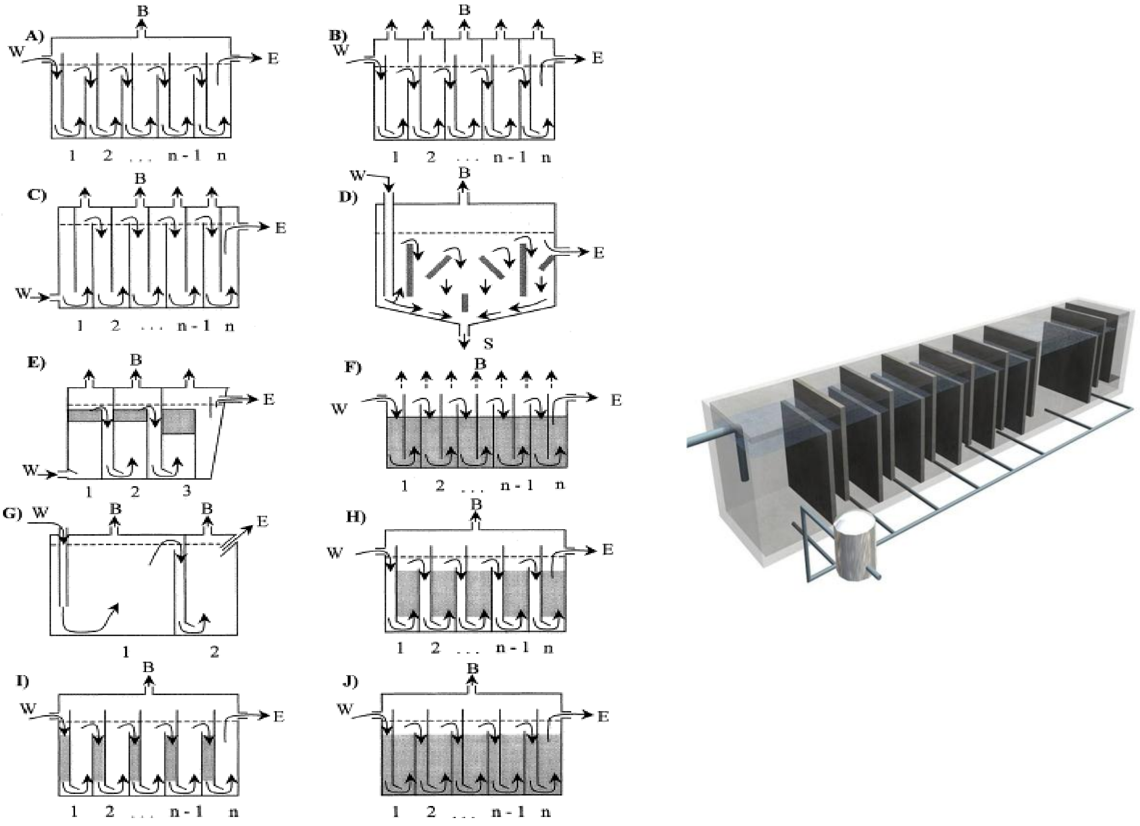
4) ควรหมั่นตรวจสอบท่อกระจายน้ำเข้าบ่อไม่ให้มีการอุดตัน เพื่อให้การกระจายน้ำเข้าบ่อบำบัดเป็นไปอย่างทั่วถึง และตรวจสอบท่อวนน้ำย้อนกลับไม่ให้มีการอุดตัน ซึ่งจะทำให้เกิดการกวนผสมภายในบ่อบำบัดดียิ่งขึ้น
5) อาจมีการสะสมของตะกอนภายในบ่อได้เช่นเดียวกับระบบบ่อปิดแบบไม่ใช้อากาศ ดังนั้นควรหมั่นตรวจสอบระบบท่อดึงตะกอนไม่ให้มีการอุดตัน เพื่อให้การดึงตะกอนออกเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้สามารถแก้ไขปัญหาการสะสมของตะกอนทั้งที่อยู่ทางด้านล่างของบ่อและที่ผิวน้ำได้ดียิ่งขึ้น

4.1.1.5 ระบบแผ่นกั้นแบบไม่ใช้อากาศ (Anaerobic Baffle Reactor; ABR)

ลักษณะของระบบบำบัดน้ำเสียแบบแผ่นกั้นไม่ใช้อากาศ คือ มีแผ่นกั้น (Baffle) ทางกายภาพหรือห้อง เพื่อเป็นการบังคับให้น้ำเสียไหลขึ้น ไหลลงตามแผ่นกั้น การออกแบบให้มีแผ่นกั้นมีวัตถุประสงค์ คือ เพื่อให้มีการกวนผสมเฉพาะในแนวตั้งฉากกับทิศทางการไหลของน้ำ ดังนั้นจะทำให้ส่วนห้องต้นทางของบ่อเกิดการย่อยสลายอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ยังช่วยลดการหลุดออกจากระบบของจุลินทรีย์ (Wash out) ซึ่งจุลินทรีย์ในระบบนี้มีเจริญเติบโตในลักษณะตะกอนแขวนลอย โดยตะกอนของจุลินทรีย์จะลอยขึ้นและจมตัวลง เนื่องจากลักษณะการไหลและก๊าซที่เกิดขึ้นในแต่ละห้องโดยจะเคลื่อนไปตามถังปฏิกรณ์จากทางเข้าไปทางออกของถังปฏิกรณ์ด้วยอัตราต่ำมากๆ จึงทำให้ถูกกักอยู่ในแต่ละห้องของถังปฏิกรณ์ได้นาน น้ำเสียที่ออกจากระบบจะมีคุณภาพดี

นอกจากนี้บ่อแบบแผ่นกั้นแบบไม่ใช้อากาศสามารถที่จะแยกชนิดของกลุ่มจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นแตกต่างกันไปในแต่ละห้อง เช่น ในห้องแรกๆ ของถังปฏิกรณ์จะเป็นกลุ่มที่ผลิตกรด ส่วนห้องท้ายๆ ของถังปฏิกรณ์จะเป็นจุลินทรีย์กลุ่มที่ผลิตก๊าซมีเทน โดยทั้งสองกลุ่มนี้มีสภาวะแวดล้อมที่เอื้อต่อการเจริญต่างกัน ซึ่งลักษณะดังกล่าวจะมีลักษณะคล้ายระบบ Multi-stage anaerobic digestion

แผ่นกั้นและการวางของแผ่นในถังปฏิกรณ์มีหลายรูปแบบ ดังรูปที่ 4.5 ทั้งนี้ความแตกต่างของแต่ละแบบนั้นอยู่ที่ลักษณะและตำแหน่งของน้ำเสียที่ไหลเข้าหรือออกจากระบบ ตลอดจนการรวบรวมก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น นอกจากนี้ยังอาจจะมีการออกแบบโดยใช้การควบคุมการไหลของน้ำที่ถูกวนและฉีดเข้าไปในบ่อในทิศทางที่ต่างกัน เพื่อบังคับการกวนผสมของน้ำให้มีลักษณะเช่นเดียวกับการมีแผ่นกั้นทางกายภาพ



รูปที่ 4.5 แสดงรูปแบบการวางแผ่นกั้น (Baffle) ของระบบ Anaerobic Baffle Reactor

รายละเอียดจุดเด่นจุดด้อย(ข้อดี/ข้อเสีย) และปัญหาอุปสรรคในด้านการใช้งานของถังปฏิกรณ์ในรูปแบบนี้ คือ

จุดเด่นของระบบ ABR มีดังนี้

- ไม่เกิดปัญหาการหลุดออกจากระบบของจุลินทรีย์ (Wash out) แม้เชื้อจุลินทรีย์จะเจริญแบบตะกอนแขวนลอยและไม่เป็นเม็ดตะกอน (Granule)
- สามารถลดระยะเวลาการกักเก็บน้ำ (HRT) ได้น้อยเท่าที่ต้องการ โดยที่ระยะเวลาการกักเก็บของแข็ง (SRT) ยังสูงอยู่
- ไม่จำเป็นต้องมีระบบแยก Sludge และ Gas

ข้อจำกัดและอุปสรรคของระบบ ABR มีดังนี้

- ไม่เหมาะกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นและสารแขวนลอยสูง เนื่องจากอาจจะเกิดการสะสมของตะกอนในแต่ละห้องโดยแขวนลอยบริเวณด้านหน้าของแผ่นกั้น ทำให้กีดขวางการไหลของน้ำเสียและก๊าซ

- กรณีน้ำเสียที่ป้อนเข้ามีการเปลี่ยนแปลงสมบัติอย่างรวดเร็ว เช่น COD, SS, pH หรือสารพิษ และปริมาณน้ำเสียที่สูงขึ้น (Volumetric shock load) อาจจะเกิดผลกระทบต่อจุลินทรีย์ในห้องแรกๆ ของบ่อ เป็นเหตุให้ระบบล้มเหลวได้
- สำหรับระบบที่ไม่มีการใช้แผ่นกั้นทางกายภาพแต่ใช้การควบคุมการไหลของน้ำนั้นต้องมีการออกแบบระบบควบคุมการป้อนน้ำและการจัดวางท่อน้ำที่ดี ดังนั้นจึงต้องการบุคลากรที่ออกแบบและควบคุมต้องมีความรู้ในระบบพอสมควร

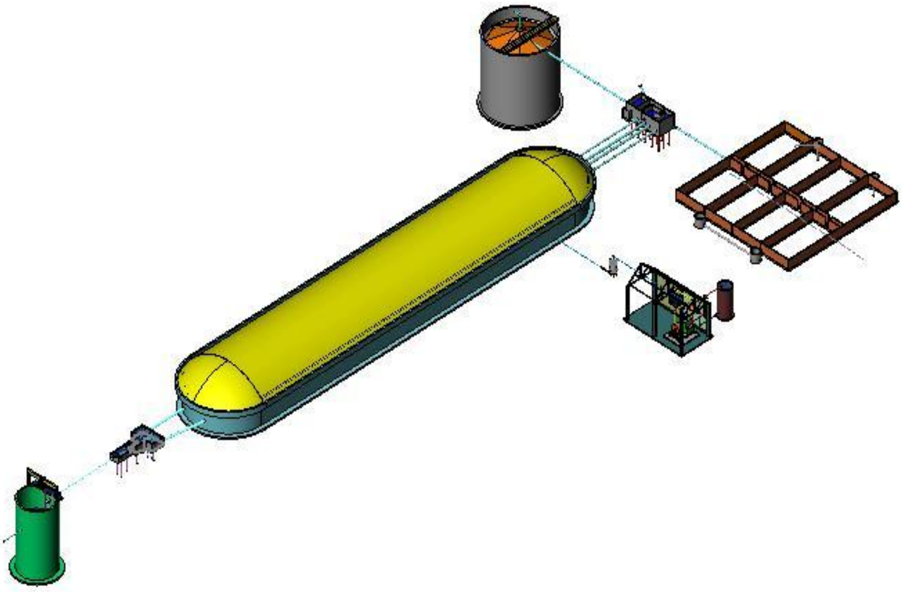
การตรวจสอบบำรุงรักษาระบบบ่อแบบ ABR

1) ตรวจสอบการชำรุดของแผ่นพลาสติกที่ปิดคลุมบ่อ รวมทั้งการรั่วซึมของก๊าซจากการยึดขอบแผ่นพลาสติก (ไม่ว่าจะเป็นแบบใช้น้ำหรือใช้ดินทับ) และบริเวณ seal ต่างๆ
2) หมั่นตรวจวัดความดันภายในแผ่นพลาสติกที่คลุมบ่อไม่ให้สูงเกินความทนทานของแผ่นพลาสติก
3) เนื่องจากท่อก๊าซส่วนใหญ่ออกจากถังใต้ระดับผิวดิน ควรหมั่นตรวจสอบการระบายน้ำในท่อก๊าซเพื่อป้องกันการขัดขวางการไหลของก๊าซ
4) ตรวจสอบการกระจายของท่อน้ำเข้า ป้องกันการอุดตัน
5) อาจจะเกิดการสะสมของตะกอนในแต่ละห้องโดยแขวนลอยบริเวณด้านหน้าของแผ่นกั้น ทำให้กีดขวางการไหลของน้ำเสียและก๊าซชีวภาพ ดังนั้นควรการหมั่นตรวจสอบระบบท่อดึงตะกอนไม่ให้มีการอุดตัน แล้วทำการการดึงตะกอนออกบ้างก็จะทำให้สามารถแก้ไขปัญหาการสะสมของตะกอนภายในบ่อได้

4.1.1.6 บ่อแบบราง (Plug Flow Anaerobic Digester) หรือ Channel Digester

ลักษณะของระบบบำบัดน้ำเสียแบบราง เป็นลักษณะบ่อที่มีการไหลในแนวระดับ (Horizontal flow) ลักษณะทางกายภาพส่วนใหญ่จะมีอัตราส่วนหน้าตัด (ที่ตั้งฉากกับการไหล) ต่อความยาวของบ่อต่ำ เพื่อให้มีการกวนผสมเฉพาะในแนวตั้งฉากกับทิศทางการไหลของน้ำไม่มีผนังกั้นเหมือนกับบ่อแบบ ABR ส่วนห้องต้นทางของบ่อจะเกิดการย่อยสลายอย่างรวดเร็ว ตะกอนของแข็งจะค่อยๆ ตกลงตามระยะความยาวของบ่อ ซึ่งจะช่วยลดการหลุดออกจากระบบของจุลินทรีย์ซึ่งเจริญเติบโตในลักษณะตะกอนแขวนลอย น้ำเสียที่ออกจากระบบจะมีคุณภาพดี การเคลื่อนที่ของของแข็งและน้ำใสไม่ได้เคลื่อนที่ไปพร้อมกัน ดังนั้น SRT จึงนานกว่า HRT ซึ่งก็ทำให้สามารถออกแบบบ่อมีขนาดเล็กกว่าถังปฏิกรณ์แบบกวนผสม โดยทั่วไปบ่อแบบรางจะมีผนังและพื้นเป็น

คอนกรีตเสริมเหล็ก ด้านบนคลุมด้วยพลาสติกทำด้วย PVC หรือ HDPE เพื่อทำหน้าที่เก็บก๊าซชีวภาพ ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แสดงบ่อแบบรางหรือ Channel Digester

รายละเอียดจุดเด่นจุดด้อย (ข้อดี/ข้อเสีย) และปัญหาอุปสรรคในด้านการใช้งานของถังปฏิกรณ์ในรูปแบบนี้ คือ

จุดเด่นของบ่อแบบราง มีดังนี้

- ก่อสร้างง่าย ไม่ต้องมีอุปกรณ์ติดตั้งภายในบ่อ

- ไม่เกิดปัญหาการหลุดออกจากระบบของจุลินทรีย์ (Wash out) ของระบบแม้เชื้อจุลินทรีย์จะเจริญแบบตะกอนแขวนลอย และไม่เป็นเม็ดตะกอน (granule) มีการควบคุมอายุตะกอนจุลินทรีย์ได้
- ไม่จำเป็นต้องมีระบบแยก Sludge และ Gas
- การดูแลรักษาไม่ยุ่งยาก
- เหมาะกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของของแข็งสูง (TS มากกว่า 10%) หรือไขมันสูง (ไขมัน 1%)

ข้อจำกัดและอุปสรรค ของบ่อแบบราง มีดังนี้

- การกวนผสมของบ่อและการกระจายน้ำเสีย ขึ้นอยู่กับการไหลของน้ำและก๊าซที่เกิดขึ้นในบ่อเท่านั้น
- กรณีที่น้ำเสียที่ป้อนเข้ามีการเปลี่ยนแปลงสมบัติอย่างรวดเร็ว เช่น COD, SS, pH หรือสารพิษ และปริมาณน้ำเสียที่สูงขึ้น (Volumetric shock load) อาจจะเกิดผลกระทบต่อจุลินทรีย์ในบริเวณแรกๆ ของบ่อ เป็นเหตุให้ระบบล้มเหลวได้ ควรมีบ่อ Equalization เพื่อปรับสมบัติน้ำเสีย

การตรวจสอบบำรุงรักษาระบบบ่อแบบราง

1) ตรวจสอบการชำรุดของแผ่นพลาสติกที่ปิดคลุมบ่อ รวมทั้งการรั่วซึมของก๊าซจากการยึดขอบแผ่นพลาสติก (ไม่ว่าจะเป็นแบบใช้น้ำ หรือใช้ดินทับ) และบริเวณ seal ต่างๆ
2) หมั่นตรวจวัดความดันภายในแผ่นพลาสติกที่คลุมบ่อไม่ให้สูงเกินความทนทานของแผ่นพลาสติก
3) เนื่องจากท่อก๊าซส่วนใหญ่ออกจากถังใต้ระดับผิวดิน ควรหมั่นตรวจสอบการระบายน้ำในท่อก๊าซเพื่อป้องกันการขัดขวางการไหลของก๊าซ
4) ตรวจสอบการกระจายของท่อน้ำเข้า ป้องกันการอุดตัน
5) อาจมีการสะสมของตะกอนภายในบ่อได้เช่นเดียวกัน ดังนั้นควรหมั่นตรวจสอบระบบท่อดึงตะกอนไม่ให้มีการอุดตัน เพื่อให้การดึงตะกอนออกเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้สามารถแก้ไขปัญหาการสะสมของตะกอนภายในบ่อได้
6) การควบคุม SRT ของบ่อแบบราง ทำได้โดยมีการดึงตะกอนในบ่อที่ผ่านการย่อยสลายแล้วที่ท้ายบ่อทุกวัน ทำให้แก้ปัญหาเรื่องการสะสมของตะกอนของแข็งที่เป็น inert ออก

4.1.2 ถังปฏิกรณ์ที่เชื้อจุลินทรีย์เกาะอยู่บนวัสดุตัวกลาง (Attached growth)

ระบบนี้พัฒนาขึ้นตามแนวคิดของ Yong และ McCarty บนแนวคิดที่ว่า ประสิทธิภาพของกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศมีความสัมพันธ์กับระยะเวลาเก็บกักเชื้อจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ (เทียบเท่ากับการมีจุลินทรีย์ปริมาณมากอยู่ในถัง) ดังนั้นเพื่อเพิ่มความสามารถในการเก็บกักเชื้อจุลินทรีย์ให้ดียิ่งขึ้น จึงทำการใส่ตัวกลางลงในถังปฏิกรณ์ เพื่อให้จุลินทรีย์ยึดเกาะหรือตรึงอยู่บนผิววัสดุของตัวกลางเป็นแผ่นฟิล์มหนา เพื่อทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย

ตัวกลางในถังปฏิกรณ์สามารถแบ่งได้ 2 กลุ่มตามลักษณะที่อยู่ในถัง คือ 1) ตัวกลางที่ถูกยึดติดอยู่กับที่ (Fixed Bed) และ 2) ตัวกลางที่เคลื่อนที่ (Mobile Bed) ในถังปฏิกรณ์

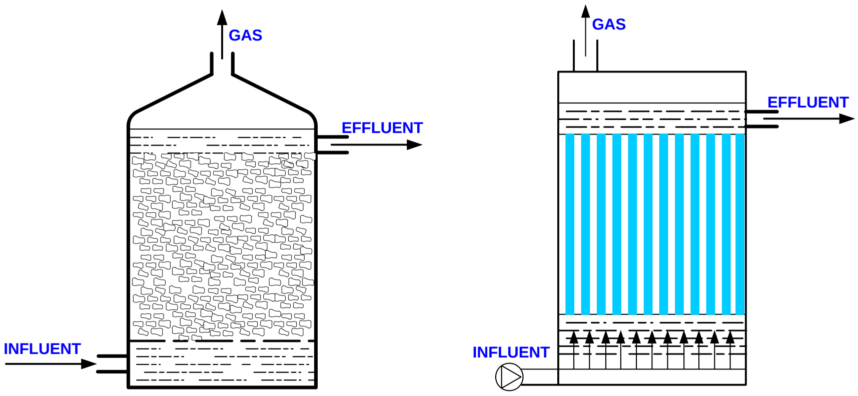
ถังปฏิกรณ์ชนิดที่วัสดุตัวกลางถูกยึดอยู่กับที่ มีการใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม ได้แก่ ระบบแบบถังกรองไม่ใช้อากาศ (Anaerobic Filter) และระบบแบบตรึงฟิล์มจุลินทรีย์ชนิดไม่ใช้อากาศ (Anaerobic Fixed Film) รายละเอียดของระบบดังกล่าวมีดังนี้

4.1.2.1 ถังกรองไม่ใช้อากาศ (Anaerobic Filter; AF)/ ถังแบบตรึงฟิล์มจุลินทรีย์ชนิดไม่ใช้อากาศ (Anaerobic Fixed Film; AFF)

การมีวัสดุตัวกลางให้เชื้อจุลินทรีย์ยึดเกาะ จะช่วยให้เก็บรักษาเชื้ออยู่ในระบบได้มาก ซึ่งเป็นผลดีต่อประสิทธิภาพของระบบอย่างแน่นอน โดยความแตกต่างของถังปฏิกรณ์ที่วัสดุตัวกลางถูกยึดติดอยู่กับที่ทั้ง 2 รูปแบบดังกล่าว คือ การจัดเรียงตัวกลางในถังปฏิกรณ์ โดยถังกรองแบบไม่ใช้อากาศจะบรรจุตัวกลางในลักษณะสุ่ม (Random packed) ทำให้ตัวกลางจัดเรียงไม่สม่ำเสมอ ส่วนถังปฏิกรณ์แบบตรึงฟิล์มจุลินทรีย์ชนิดไม่ใช้อากาศ ออกแบบให้วัสดุตัวกลางจัดเรียงอย่างเป็นระเบียบ การจัดเรียงตัวกลางที่ต่างกันของถังกรองไร้อากาศและถังแบบตรึงฟิล์มจุลินทรีย์ ทำให้ลักษณะการยึดเกาะของจุลินทรีย์ในระบบทั้ง 2 รูปแบบแตกต่างกัน กล่าวคือ ในถังกรองไร้อากาศ แม้การมีตัวกลางจะช่วยเก็บรักษาเชื้อได้ดีขึ้น แต่ผลจากลักษณะตัวกลางที่จัดเรียงไม่เป็นระเบียบ ทำให้ช่องว่างระหว่างตัวกลางในถังกรองไร้อากาศไม่สม่ำเสมอ และจุลินทรีย์ในระบบส่วนใหญ่จะเจริญแบบที่แขวนลอยอยู่ในสารละลายระหว่างช่องว่างของวัสดุตัวกลาง ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการอุดตัน (Clogging) และเกิดการไหลลัดวงจร (Short Circuit) ของน้ำเสียหากเดินระบบในระยะยาว ส่วนในถังปฏิกรณ์แบบตรึงฟิล์มที่ตัวกลางมีการจัดเรียงอย่างเป็นระเบียบ ช่องว่างระหว่างตัวกลางภายในถังสม่ำเสมอ จุลินทรีย์ในระบบตรึงฟิล์มส่วนใหญ่จะเจริญเติบโตแบบยึดเกาะบนผิววัสดุตัวกลาง

(Surface Attachment) สามารถลดปัญหาการอุดตันได้เป็นอย่างดี และยังคงความสามารถในการเก็บกักเชื้อจุลินทรีย์ไว้ด้วย

ชนิด/ลักษณะตัวกลางมีหลายแบบ เช่น Glass bead, Red drain clay, Sand, พลาสติกชนิดต่างๆ วัสดุมีรูพรุน, Needle punched polyesters, Polyurethane foam, Sintered glass, Waste tire rubber, Poly (Acrylonitrile-acrylamide), Corrugated plastic เป็นต้น โดยตัวกลางที่ดีจะต้องมีพื้นที่ผิวสูง เพราะทำให้มีบริเวณที่ให้จุลินทรีย์ยึดเกาะได้มาก โดยทั่วไปตัวกลางที่ใช้จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific Surface Area) อยู่ในช่วง 90-300 m^2/m^3 ระบบนี้อาจมีการป้อนน้ำเสียจากด้านล่างของถังปฏิกรณ์ (Up-flow) หรือป้อนจากด้านบน (Down-flow) การป้อนแบบล่างขึ้นบนจะนิยมมากกว่าเนื่องจากจะลดปัญหาการอุดตันลงได้ รูปที่ 4.7 แสดงลักษณะของถังกรองไร้อากาศ (Anaerobic Filter) และระบบแบบตรึงฟิล์มจุลินทรีย์ (Anaerobic Fixed Film) เมื่อน้ำเสียป้อนเข้าถังปฏิกรณ์ผ่านตัวกลาง ตัวกลางก็จะทำหน้าที่กระจายการไหลเข้าของน้ำเสียให้เข้าสู่ระบบอย่างสม่ำเสมอ และท่วมตัวกลางอยู่ตลอดเวลา ทำให้น้ำเสียสัมผัสกับจุลินทรีย์ที่เกาะอยู่กับตัวกลางอย่างทั่วถึง และจุลินทรีย์จับเอาสารอินทรีย์ในน้ำเสียไปย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศ ทำให้น้ำที่ไหลออกจากระบบมีความใสโดยไม่ต้องใช้ถังตกตะกอน ดังนั้นระบบนี้จึงสามารถรับน้ำเสียที่มีสารแขวนลอยสูงได้ดี อย่างไรก็ตามข้อเสียของระบบนี้ก็คือต้นทุนที่เพิ่มขึ้นจากค่าวัสดุตัวกลางที่ใช้



A: ถังกรองไร้อากาศ B: ถังแบบตรึงฟิล์มจุลินทรีย์

รูปถ่ายระบบตรึงฟิล์มจุลินทรีย์

รูปที่ 4.7 แสดงลักษณะของ A: ถังกรองไร้อากาศ (Anaerobic Filter) และ
B: ถังแบบตรึงฟิล์มจุลินทรีย์ (Anaerobic Fixed Film) และรูปถ่ายระบบตรึงฟิล์มจุลินทรีย์

รายละเอียดจุดเด่นจุดด้อย(ข้อดี/ข้อเสีย) และปัญหาอุปสรรคในด้านการใช้งานของถังปฏิกรณ์ในรูปแบบนี้ คือ

จุดเด่นของระบบกรองไม่ใช้อากาศ (Anaerobic Filter; AF)/ระบบแบบตรึงฟิล์มจุลินทรีย์ (Anaerobic Fixed Film; AFF) มีดังนี้

- มีอัตราภาระการรับสารอินทรีย์สูง
- จุลินทรีย์ในระบบซึ่งยึดเกาะอยู่บนวัสดุตัวกลางอย่างแน่นหนา ทำให้ไม่หลุดออกนอกถังปฏิกรณ์ได้ง่ายเหมือนระบบจุลินทรีย์แขวนลอย
- ฟิล์มจุลินทรีย์สามารถทนต่อสารพิษได้ดี (Toxicity resistance) เนื่องจากจุลินทรีย์ที่อยู่ชั้นในของฟิล์มจะไม่ได้สัมผัสกับสารพิษ หรือได้รับสารพิษที่ความเข้มข้นต่ำกว่าฟิล์มที่ผิวนอก จึงสามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหันของน้ำเสียได้ดี เช่น ปริมาณน้ำเสียที่เพิ่มขึ้น, pH, ความเข้มข้นของสารอาหารและน้ำเสียที่มีสารที่เป็นพิษ เป็นต้น

- Re-startup หรือ Recovery ภายหลังจากที่ระบบล้มเหลวได้เร็ว

ข้อจำกัดและอุปสรรคของระบบกรองไม่ใช้อากาศ (Anaerobic Filter; AF)/ ระบบแบบตรึงฟิล์มจุลินทรีย์ (Anaerobic Fixed Film; AFF) มีดังนี้

- ต้องลงทุนในส่วนของวัสดุตัวกลางเพิ่มมากขึ้น
- ในกรณีของการใส่ตัวกลางแบบสุ่ม หรือระบบแบบกรองไม่ใช้อากาศ จะเกิดปัญหาอุดตันได้ง่าย ทำให้เกิดการไหลลัดวงจร
- การเริ่มต้นระบบอาจจะทำได้ช้า เนื่องจากต้องมีการเลี้ยงให้เชื้อจุลินทรีย์ไปติดที่ตัวกลาง
- การตรวจสอบกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่ผิวตัวกลางทำได้ยาก ควรมีการเตรียมการช่องสำหรับเก็บตัวอย่างเชื้อจุลินทรีย์บนตัวกลาง

การตรวจสอบบำรุงรักษาถังกรองไม่ใช้อากาศ/ ถังแบบตรึงฟิล์มจุลินทรีย์

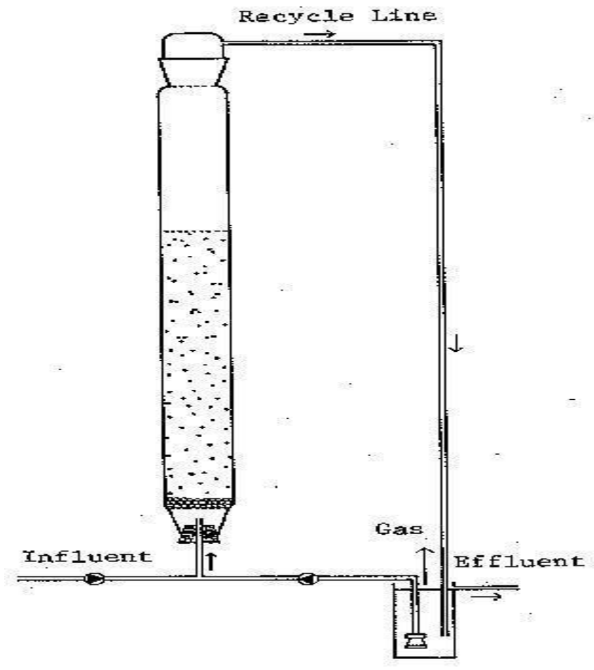
1) โดยระบบท่อลำเลียงน้ำเสียเข้าสู่ถังปฏิกรณ์เป็นส่วนสำคัญที่จะต้องหมั่นตรวจสอบ เพื่อให้ระบบท่อมีการกระจายน้ำอย่างสม่ำเสมอและทั่วถึง เพื่อให้ จุลินทรีย์ได้สัมผัสกับน้ำเสียได้อย่างทั่วถึง
2) หมั่นตรวจสอบและระมัดระวังไม่ให้ท่อลำเลียงน้ำเสียมีการอุดตัน
3) ควรทำการตรวจสอบปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ในถังอย่างสม่ำเสมอ เนื่องจากปริมาณตะกอนจุลินทรีย์มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียของระบบ และเพื่อป้องกันการไหลลัดวงจรของน้ำเสีย
4) ควรทำการตรวจสอบการอุดตันของตัวกลางในถังปฏิกรณ์ด้วย ถ้าหากพบว่า เกิดการอุดตันของตัวกลางขึ้น จะทำให้น้ำเสียเกิดการไหลลัดวงจรขึ้นได้ ซึ่งมีผลทำให้น้ำเสียไหลออกจากถังปฏิกรณ์ไม่สม่ำเสมอ

ถังปฏิกรณ์ชนิดที่วัสดุตัวกลางเคลื่อนที่ ได้แก่ ถังปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไดซ์เบด รายละเอียดระบบดังกล่าว มีดังนี้

4.1.2.2 ถังปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไดซ์เบด (Anaerobic fluidized bed)

ถังปฏิกรณ์ชนิดนี้จะมีตัวกลางขนาดเล็กเพื่อให้จุลินทรีย์ที่เกิดเป็นฟิล์มชีวะยึดเกาะ โดยตัวกลางสามารถเคลื่อนที่แขวนลอยอยู่ในน้ำเสีย ตัวกลางเป็น inert เคลื่อนไหวโดยอาศัยแรงยกของน้ำที่เข้าสู่ถังปฏิกรณ์ทางด้านล่าง ดังรูปที่ 4.8 ตัวกลางที่นิยมใช้ได้แก่ กรวด แอนทราไซต์ ตัวกลางที่ทำจากพลาสติก เป็นต้น โดยตัวกลางที่ใช้ควรมีพื้นที่ผิวมากเพื่อให้จุลินทรีย์ยึดเกาะได้ดีและควรมีน้ำหนักเบา

เนื่องจากถังปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไดซ์เบด จะต้องใช้พลังงานสูงมากในการทำให้ตัวกลางมีการเคลื่อนไหวลอยอยู่ในน้ำเสีย ดังนั้นในประเทศไทยถังปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไดซ์เบดจึงยังไม่มีการนำมาใช้บำบัดน้ำเสียในระดับอุตสาหกรรมจริง



รูปที่ 4.8 แสดงถังปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไดซ์เบด (Anaerobic fluidized bed)

4.1.3 จุดเด่น–ข้อจำกัดของเทคโนโลยีและการเปรียบเทียบทางเทคโนโลยี

การนำเทคโนโลยีแต่ละรูปแบบมาเปรียบเทียบกัน และให้ระบุว่าเทคโนโลยีใดดีที่สุด หรือเทคโนโลยีใดที่เหมาะสมกับน้ำเสียของโรงงานประเภทนั้นๆ เป็นเรื่องยากและอาจจะไม่ถูกต้องนัก หากจะระบุลงไปทันทีโดยไม่นำข้อมูลอื่นๆ มาพิจารณาด้วย เนื่องจากแม้ในอุตสาหกรรมประเภทเดียวกัน น้ำเสียของแต่ละโรงงานยังมีลักษณะสมบัติที่แตกต่างกันไปเฉพาะตัว นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวเนื่องกับสภาพการดำเนินงานและความพร้อมของโรงงานเอง รวมถึงรายละเอียดของเทคโนโลยีที่ผู้ออกแบบระบบในแต่ละรายเลือกใช้ ที่มีความแตกต่างกัน ดังนั้นการที่จะชี้ชัดว่า เทคโนโลยีนี้ดีกว่าอีกเทคโนโลยีนั้น โดยไม่คำนึงถึงปัจจัยเรื่องสภาพของโรงงานและความแตกต่างของเทคโนโลยีเนื่องจากผู้ออกแบบระบบ จึงเป็นเรื่องที่ไม่ถูกต้องนัก

อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศและผลิตก๊าซชีวภาพ แต่ละประเภทก็มีข้อมูลจุดเด่น และข้อจำกัดของเทคโนโลยีที่สามารถระบุได้และเป็นที่ยอมรับโดยทั่วไป ดังแสดงในตารางที่ 4.2 โดยได้สรุปข้อเด่นและข้อจำกัดของเทคโนโลยีระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศที่ใช้ผลิตก๊าซชีวภาพ ตามประเภทของเทคโนโลยีที่มีการใช้งานอยู่ในโรงงานอุตสาหกรรมในประเทศไทยมาสรุปรวมไว้ ส่วนตารางที่ 4.3

แสดงการเปรียบเทียบระหว่างเทคโนโลยี โดยข้อมูลที่เปรียบเทียบ ได้แก่ อัตราภาระการรับสารอินทรีย์ พื้นที่ก่อสร้างที่ต้องการ ทักษะของผู้ดูแลระบบ และความต้องการในการบำรุงรักษา ซึ่งสามารถใช้ข้อมูลจากตาราง ทั้ง 2 นี้ เป็นส่วนหนึ่งของข้อมูลเบื้องต้นในการพิจารณาเลือกรูปแบบของเทคโนโลยีที่เหมาะสมสำหรับโรงงาน และตารางที่ 4.4 แสดงจำนวนของระบบก๊าซชีวภาพแยกตามประเภทของเทคโนโลยีที่มีใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมของประเทศไทยในปัจจุบัน โดยระบุแยกตามประเภทของอุตสาหกรรมด้วย ซึ่งระบบถังปฏิกรณ์แบบตะกอนลอย หรือที่เรียกกันง่ายๆ ว่า ถังยูเอเอสบีเป็นรูปแบบของเทคโนโลยีก๊าซชีวภาพที่นิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมในประเทศไทย คือ ประมาณร้อยละ 40 ของจำนวนระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่มีอยู่ทั้งหมด ส่วนเทคโนโลยีในอีก 6 รูปแบบที่เหลือ มีจำนวนการใช้อยู่ใกล้เคียงกันคือเฉลี่ยประมาณร้อยละ 7 – 11 จากจำนวนระบบผลิตก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่มีอยู่ในโรงงานอุตสาหกรรมของประเทศไทย

ตารางที่ 4.2 แสดงสรุปข้อเด่น-ข้อจำกัดของระบบบำบัดน้ำเสียและผลิตก๊าซชีวภาพรูปแบบต่างๆ

ลำดับ	ชนิดระบบ	ข้อเด่น	ข้อจำกัด
1.	ถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์ (Continuously Stirred Tank Reactor; CSTR)	● การกวนผสมของสารอินทรีย์และจุลินทรีย์ภายในถังเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ สามารถรับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูงได้ดี ● รับน้ำเสียหรือของเสียที่มีความเข้มข้นของของแข็งสูงได้ดี ● รับของเสียที่มีสิ่งที่เป็นพิษเจือปนได้ดี เนื่องจากการกวนผสมช่วยเจือจางสารพิษนั้น ● การตรวจวัดและควบคุมระบบไม่ยุ่งยาก	● ความเข้มข้นของของแข็งไม่ควรเกิน 10%TS มิฉะนั้นการกวนผสมอาจเกิดขึ้นได้ไม่ดี ● ถังปฏิกรณ์ต้องมีขนาดใหญ่ เพื่อแก้ปัญหาเชื้อจุลินทรีย์ในระบบลดลงเนื่องจากเกิดการหลุดออกนอกระบบได้ง่าย ● มีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นในการใช้พลังงานในการกวนผสม ● น้ำเสียที่ออกจากระบบยังคงมีค่าความสกปรกสูงอยู่ ● มักมีปัญหาเรื่องการชำรุดของอุปกรณ์ใบกวน
2.	ถังปฏิกรณ์แบบตะกอนลอยหรือถังยูเอเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket, UASB)	● สามารถรับอัตราภาระการรับสารอินทรีย์ได้สูง และระยะเวลาเก็บกักน้ำเสียสั้นดังนั้นถังปฏิกรณ์ผลิตมีเทนจึงมีขนาดเล็ก ● เหมาะกับน้ำเสียที่มีของแข็งแขวนลอยต่ำ น้ำเสียที่สารอินทรีย์ย่อยสลายง่าย	● ใช้ระยะเวลานานในการเริ่มต้นระบบ (Start up) เนื่องจากต้องสร้างเม็ดตะกอน และชั้นสลัดจ์ก่อน ● การควบคุมดูแลระบบยุ่งยาก ต้องใช้ผู้ดูแลที่มีความเชี่ยวชาญ เพื่อควบคุมให้จุลินทรีย์เกาะตัวเป็นเม็ดตะกอน ● ไม่เหมาะกับน้ำเสียที่มีของแข็งแขวนลอยสูง หรือต้องมีขั้นตอนเพิ่มเพื่อปรับสภาพน้ำเสียก่อน ● หากออกแบบส่วนแยกก๊าซชีวภาพ/น้ำเสียและเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ได้ไม่ดี จะเกิดปัญหาจุลินทรีย์หลุดออกนอกระบบได้

ตารางที่ 4.2 (ต่อ)

ลำดับ	ชนิดระบบ	ข้อดี	ข้อเสีย
3.	ระบบบ่อปิดแบบไม่ใช้อากาศ (Anaerobic Covered Lagoon)	● การก่อสร้างได้ง่าย รวดเร็ว ● เงินลงทุนต่ำ ● บ่อมีต่อผลกระทบต่ำ ถึงแม้ว่าน้ำเสียที่ป้อนเข้ามีการเปลี่ยนแปลงสมบัติอย่างรวดเร็ว ● เหมาะกับน้ำเสียหรือของเสียที่มีความเข้มข้นของแข็งสูง	● อัตราภาระการรับสารอินทรีย์ต่ำ ● ต้องการพื้นที่ระบบมาก ● ประสิทธิภาพต่ำ การกวนผสมเกิดขึ้นไม่ดี ● มีปัญหาการไหลลัดวงจรของน้ำเสียสูง เกิดบริเวณที่เป็น Dead zone ได้มาก ● การจัดการตะกอนที่สะสมในบ่อทำได้ยาก
4.	ระบบบ่อปิดแบบไม่ใช้อากาศดัดแปลง (Modified Anaerobic Covered Lagoon)	● การก่อสร้างทำได้ง่าย ● บ่อมีผลกระทบต่ำ ถึงแม้ว่าน้ำเสียที่ป้อนเข้ามีการเปลี่ยนแปลงสมบัติอย่างรวดเร็ว ● เหมาะกับน้ำเสียหรือของเสียที่มีความเข้มข้นของแข็งสูง	● อัตราภาระการรับสารอินทรีย์ต่ำ ● ต้องการพื้นที่ระบบมาก ● ประสิทธิภาพต่ำ การกวนผสมเกิดขึ้นไม่ดี ● อาจเกิดปัญหาเรื่องการฉีกขาดหรือการขวางการดูดก๊าซออกจากบ่อ กรณีที่มีก๊าซไม่มากพอ ควรมีการดูแลแผ่นพลาสติกที่คลุมบ่อให้ตึงอยู่ตลอดเวลา
5	ระบบแผ่นกั้นแบบไม่ใช้อากาศ (Anaerobic Baffle Reactor; ABR)	● ไม่มีปัญหาการหลุดออกของเชื้อจุลินทรีย์ แม้เชื้อจุลินทรีย์จะเจริญเติบโตแบบตะกอนแขวนลอยและไม่เป็นเม็ดตะกอน (Granule) ● สามารถลด HRT ได้น้อยเท่าที่ต้องการโดยที่ SRT ยังสูงอยู่ ● ไม่จำเป็นต้องมีระบบแยก Sludge และ Gas	● ไม่เหมาะกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นและสารแขวนลอยสูง เนื่องจากอาจจะเกิดการสะสมของตะกอนในแต่ละห้อง ทำให้กีดขวางการไหลของน้ำเสียและก๊าซชีวภาพ ● กรณีน้ำเสียที่ป้อนเข้ามีการเปลี่ยนแปลงสมบัติอย่างรวดเร็ว อาจจะเกิดผลกระทบต่อจุลินทรีย์ในบริเวณห้องแรกๆ ของบ่อ ทำให้ระบบล้มเหลวได้

ตารางที่ 4.2 (ต่อ)

ลำดับ	ชนิดระบบ	ข้อดี	ข้อเสีย
6	บ่อแบบราง (Plug Flow Anaerobic Digester) หรือ Channel Digester	● ก่อสร้างง่ายไม่ต้องมีอุปกรณ์ติดตั้งภายในบ่อ ● ไม่เกิดปัญหาการหลุดของจุลินทรีย์ออกนอกระบบ ● การดูแลรักษาไม่ยุ่งยาก ● สามารถบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของของแข็งสูงหรือไขมันสูงได้ดี	● อาจมีปัญหาการกวนผสมและการกระจายน้ำเสียได้เนื่องจากการกวนผสมขึ้นอยู่กับการไหลของน้ำและก๊าซที่เกิดขึ้นในบ่อเท่านั้น ● กรณีที่น้ำเสียที่ป้อนเข้ามีการเปลี่ยนแปลงสมบัติอย่างรวดเร็ว อาจจะเกิดผลกระทบต่อจุลินทรีย์ในบริเวณแรกๆ ของบ่อ เป็นเหตุให้ระบบล้มเหลวได้ ● ต้องมีการเพิ่มพื้นที่ส่วนลานตากตะกอนเพื่อดึงตะกอนออกอย่างสม่ำเสมอ
7.	ถังกรองไม่ใช้อากาศ (Anaerobic Filter; AF)/ ถังแบบตรึงฟิล์มจุลินทรีย์ (Anaerobic Fixed Film; AFF)	● มีอัตราภาระการรับสารอินทรีย์ (Organic loading rate) ได้สูง ● จุลินทรีย์หลุดออกนอกถังปฏิกรณ์ได้ยาก ● สามารถรองรับชนิดน้ำเสียที่มีการเปลี่ยนแปลงกะทันหันได้ดี	● มีเงินลงทุนในส่วนของตัวกลาง ● เกิดปัญหาอุดตันได้ง่ายและเกิดการไหลลัดวงจร ในกรณีที่มีการจัดเรียงตัวกลางแบบไม่เป็นระเบียบ ● การเริ่มต้นระบบอาจทำได้ช้ากว่าเนื่องจากต้องมีการเลี้ยงให้เชื้อจุลินทรีย์ไปติดที่ตัวกลาง

ตารางที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบเทคโนโลยีระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

ถังปฏิกรณ์	อัตราภาระการรับสารอินทรีย์*	ความต้องการพื้นที่	ความต้องการทักษะในการเดินระบบ	ความต้องการการบำรุงรักษา	เงินลงทุน	ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ
ถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์ (CSTR)	*ปานกลาง*	*น้อย/ปานกลาง*	*ปานกลาง*	*ปานกลาง*	*สูง*	*ปานกลาง/สูง*
ถังปฏิกรณ์แบบตะกอนลอยยูเอเอสบี (UASB)	สูง	น้อย	สูง	สูง	สูง	ปานกลาง/สูง
ระบบบ่อปิดแบบไม่ใช้อากาศ (Anaerobic Covered Lagoon)	ต่ำ	มาก	น้อย	ต่ำ	ต่ำ	ต่ำ
ระบบบ่อปิดแบบไม่ใช้อากาศดัดแปลง (Modified Anaerobic Covered Lagoon)	ต่ำ/ปานกลาง	มาก	น้อย	ต่ำ	ต่ำ/ปานกลาง	ต่ำ/ปานกลาง
บ่อแผ่นกั้นแบบไม่ใช้อากาศ (Anaerobic Baffle reactor)	ต่ำ/ปานกลาง	มาก	ปานกลาง	ต่ำ	ปานกลาง	ต่ำ/ปานกลาง
บ่อแบบราง(Anaerobic Plug flow reactor)	ต่ำ/ปานกลาง	ปานกลาง/มาก	ปานกลาง	ต่ำ	ปานกลาง	ต่ำ/ปานกลาง
ถังกรองไร้อากาศ และถังแบบตรึงฟิล์มจุลินทรีย์ (Filtered bed / Fixed film Reactor)	สูง	น้อย	ปานกลาง	ปานกลาง	สูง	ปานกลาง

***อัตราภาระการรับสารอินทรีย์ (kg COD/m^3 reactor /day)** ต่ำ : < 2 kg COD/m^3 reactor /day ; ปานกลาง : 2 – 4 kg COD/m^3 reactor /day ; สูง : > 4 kg COD/m^3 reactor /day

ความต้องการพื้นที่ (คิดที่ความลึก 6 เมตร) น้อย : <42 ตร.ม./ตัน COD ที่ป้อน/วัน, ปานกลาง : 42–84 ตร.ม./ตัน COD ที่ป้อน/วัน, มาก : >84 ตร.ม./ตัน COD ที่ป้อน/วัน

ความต้องการทักษะของผู้เดินระบบ น้อย : อย่างน้อยต้องเข้าใจหลักการของกระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพ

ปานกลาง ; ต้องเข้าใจหลักการของกระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพและหลักการทำงานของอุปกรณ์ในระบบ

สูง : เข้าใจหลักการของกระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพ การทำงานของอุปกรณ์ในระบบ และการตรวจสอบและจัดการจุลินทรีย์ในระบบ

ความต้องการการบำรุงรักษา ต่ำ : ต้องการการดูแลอุปกรณ์/เครื่องจักร (ท่อ ปั๊มพ์ วาล์ว) ไม่บ่อย ไม่มาก ปานกลาง : ต้องการการดูแลอุปกรณ์/เครื่องจักร สม่ำเสมอแต่ไม่ซับซ้อน

สูง : ต้องการการดูแลอุปกรณ์/เครื่องจักรมากและซับซ้อน เช่น Solidnoid valve ระบบควบคุมการป้อนและน้ำย้อนกลับ ระบบควบคุมแรงดันก๊าซ เป็นต้น

ตารางที่ 4.4 แสดงจำนวนระบบก๊าซชีวภาพในแต่ละประเภทของเทคโนโลยีที่ปัจจุบันมีการใช้ในประเทศไทย

จำนวนระบบก๊าซชีวภาพ

ประเภทของเทคโนโลยี	โรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังและผลิตภัณฑ์แป้ง	โรงงานสกัดน้ำมันพืชหรือผลิตน้ำมันพืช	โรงงานผลิตเอทธานอล	โรงงานสุรา / เบียร์	โรงงานผลิตภัณฑ์อาหารเครื่องดื่ม/แปรรูปอาหาร/แช่แข็ง	โรงงานประเภทอื่นๆ *	รวม
ถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์ (CSTR)	2	12	2	-	2	2	20
ถังปฏิกรณ์แบบตะกอนลอยยูเอเอสบี (UASB)	31	-	6	15	26	7	85
ระบบบ่อปิดแบบไม่ใช้อากาศ (Anaerobic Covered Lagoon)	10	2	-	1	1	-	14
ระบบบ่อปิดแบบไม่ใช้อากาศดัดแปลง (Modified Anaerobic Covered Lagoon)	9	6	3	-	2	2	22
ระบบบ่อแผ่นกั้นแบบไม่ใช้อากาศ (Anaerobic Baffle reactor)	10	2	3	-	3	2	20
บ่อแบบราง (Anaerobic Plug flow reactor)	3	10	1	-	1	9	24
ถังกรองไม่ใช้อากาศ และถังแบบตรึงฟิล์มจุลินทรีย์ (Filtered bed / Fixed film Reactor)	7	1	-	-	6	-	14
ไม่มีข้อมูล / ไม่ระบุ	-	2	1	-	1	11	15
รวม	**72**	**35**	**16**	**16**	**42**	**33**	**214**

หมายเหตุ: *ข้อมูลโรงงานอุตสาหกรรมที่ติดตั้งระบบผลิตก๊าซชีวภาพ นับรวมที่อยู่ในระหว่างขั้นตอนการออกแบบและก่อสร้างด้วย ณ มิถุนายน 2553*

** โรงงานประเภทอื่นๆ ได้แก่ โรงงานผลิตภัณฑ์ยาง 4 แห่ง โรงงานผลิตไฟฟ้าจากวัสดุเกษตรเหลือทิ้งหรือน้ำเสีย 10 แห่ง บ่อขยะฝังกลบ 6 แห่ง โรงฆ่าสัตว์ 9 แห่ง โรงงานผลิตกระดาษ/กรดมะนาว/สารให้ความหวาน และPTA อย่างละแห่ง*

4.1.4 การประเมินค่าใช้จ่ายในการลงทุนและการเดินระบบเบื้องต้น

ประมาณการค่าใช้จ่ายในการลงทุนการก่อสร้างของระบบในตารางที่ 4.5 ได้มาจากการสอบถามเงินลงทุนและหารด้วยปริมาตรระบบหลักจากโรงงานที่มีระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบต่างๆ ในช่วงปี พ.ศ. 2546-2553 (ไม่รวมปริมาตรของระบบบำบัดขั้นหลัง) ซึ่งระบบผลิตก๊าซชีวภาพออกแบบให้มีประสิทธิภาพการกำจัด COD มากกว่า 85% ในการลงทุนสร้างระบบนั้น ขึ้นอยู่กับลักษณะของน้ำเสียอันจะมีผลต่อการกำหนดค่าอัตราภาระการรับสารอินทรีย์ ซึ่งมีหน่วยเป็น kg COD/m^3day นั่นก็คือการกำหนดขนาดของถังปฏิกรณ์หลักในแต่ละเทคโนโลยีนั่นเอง ส่วนค่าใช้จ่ายในการเดินระบบนั้นเป็นค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี พลังงานไฟฟ้า ค่าพนักงาน และการซ่อมบำรุงรักษา

ตารางที่ 4.5 แสดงการประมาณค่าใช้จ่ายในการลงทุนและค่าเดินระบบ

ระบบถังปฏิกรณ์	**เงินลงทุน** (บาท/ ลบ.ม.ระบบ)	**ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ** (บาท/ลบ.ม.น้ำเสีย)
ระบบถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์ (CSTR)	5,400-8,000	2 – 5
ระบบถังปฏิกรณ์แบบตะกอนลอยยูเอเอสบี (UASB)	4,000-30,000	4 – 6
ระบบบ่อปิดแบบไม่ใช้อากาศ (Anaerobic Covered Lagoon)	190-400	0.6 – 1.3
ระบบบ่อปิดแบบไม่ใช้อากาศดัดแปลง (Modified Anaerobic Covered Lagoon)	250-1,300	0.9 – 3
ระบบบ่อแผ่นกั้นแบบไม่ใช้อากาศ (Anaerobic Baffle reactor)	1,700-2,500	2 – 4
ระบบบ่อแบบราง (Anaerobic Plug flow reactor)	1,900-4,200	0.5 – 3
ระบบถังกรองไม่ใช้อากาศ และระบบถังแบบตรึงฟิล์มจุลินทรีย์ (Filtered bed / Fixed film Reactor)	3,200-5,400	2- 3.8

หมายเหตุ: เงินลงทุนที่ UASB สูงถึง 30,000 บาทนั้น เป็นข้อมูลที่ได้จากบริษัทจากต่างประเทศบางราย

4.2 แนวทางการเลือกเทคโนโลยีที่เหมาะสม

ระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ตามความเป็นจริงแล้วหากจะเรียกให้ครบถ้วนคือ ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศและผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งในอดีตเราเน้นในเรื่องการบำบัดน้ำเสียเป็นหลักและได้ก๊าซชีวภาพเป็นผลพลอยได้ แต่ในปัจจุบัน ผู้บริหารโรงงานหลายแห่งมีความเห็นที่ตรงกันข้ามกัน คือ มุ่งเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพสำหรับเป็นพลังงานทดแทนเป็นหลัก ดังนั้นเพื่อที่จะได้ทราบว่า เทคโนโลยีหรือรูปแบบของระบบประเภทใดที่เหมาะสมกับน้ำเสีย/ของเสียของโรงงาน จะต้องทำความเข้าใจก่อนว่า อะไรคือสิ่งที่ต้องการได้จากระบบผลิตก๊าซชีวภาพและความสำเร็จในการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพคืออะไร

4.2.1 ลักษณะของระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่ต้องการ

1) มีประสิทธิภาพสูง คือ สามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้สูง หรือประสิทธิภาพการบำบัด COD สูง (ดูจาก % การลดลงของ COD ในถังปฏิกรณ์ผลิตมีเทน)
2) สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ปริมาณมาก อัตราส่วนมีเทนในก๊าซชีวภาพสูง (% มีเทนสูง) และมีสารเจือปนที่ต้องกำจัดออก เช่น H_2S ในปริมาณต่ำ
3) มีเสถียรภาพสูง ทนทานสารพิษและความแปรปรวนของน้ำเสีย
4) ราคาลงทุนต่ำ (สมเหตุสมผล) ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบต่ำ การติดตามดูแลการเดินระบบไม่ต้องการผู้เชี่ยวชาญมากนัก และรวมถึงบำรุงรักษาได้ง่ายด้วย
5) เริ่มเดินระบบใหม่ได้เร็ว(รับน้ำเสียได้เต็มที่) หากหยุดเดินระบบเป็นเวลานาน เมื่อหยุดการผลิตหรือกรณีโรงงานมีการผลิตเป็นฤดูกาล

หัวข้อ 1) และ 2) มีความสัมพันธ์กัน คือ หากระบบกำจัดสารอินทรีย์ได้ดี สามารถลดค่า COD ของน้ำเสียได้มาก ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้ก็มักจะสูงตามไปด้วย แต่มีข้อแม้คือ ค่า COD ที่ลดลงไปนั้นต้องถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซชีวภาพด้วย (สภาวะของการเลี้ยงจุลินทรีย์ที่ไม่เหมาะสม COD ที่ลดลงอาจเปลี่ยนเป็นสารอื่น ซึ่งพบได้บ่อย) ทั้งนี้ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพประสิทธิภาพสูงที่ออกแบบได้ดี ค่าประสิทธิภาพการกำจัด COD และปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้น่าจะใกล้เคียงกัน ทั้งนี้ประเภทและลักษณะสมบัติของน้ำเสียเป็นปัจจัยสำคัญต่อการกำหนดประสิทธิภาพการบำบัด COD และปริมาณของก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้

เสถียรภาพของระบบสูง หมายถึง ความสามารถในการเดินระบบอย่างต่อเนื่องได้ดี (ระบบมีประสิทธิภาพดีและผลิตก๊าซชีวภาพสม่ำเสมอ) ซึ่งสัมพันธ์กับความสามารถในการเก็บกักเชื้อจุลินทรีย์ให้อยู่ในถังปฏิกรณ์ รวมถึงความสามารถในการรับสารอินทรีย์มากเกิน (Shock Load) และทนต่อสารพิษได้ในช่วงระยะหนึ่งได้ดี

ค่าลงทุน ได้แก่ ราคาของโครงสร้างถังปฏิกรณ์ องค์ประกอบ และอุปกรณ์ต่างๆ เครื่องมือห้องปฏิบัติรวมถึงค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับเชื้อจุลินทรีย์ตั้งต้น ที่ประกอบรวมเป็นระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่สามารถดำเนินการได้ ซึ่งต้องรวมถึงราคาค่าที่ดินด้วย (ที่อาจเป็นเงินลงทุนแฝง เนื่องจากบางโรงงานมีที่ดินว่างอยู่จำนวนมาก) แต่โรงงานสามารถนำที่ดินไปใช้ประโยชน์อื่นได้ หากระบบก๊าซชีวภาพใช้พื้นที่น้อย การเลือกประเภทของระบบที่มีค่าลงทุน

ก่อสร้างต่ำ ก็ต้องพิจารณาว่า จะต้องเสียค่าใช้จ่ายการเดินระบบ/ค่าดูแลระบบสูงหรือไม่ ตลอดจนการคงอยู่ของประสิทธิภาพและเสถียรภาพระบบในระยะยาว และในข้อสุดท้าย กรณีของโรงงานมีการผลิตไม่ต่อเนื่องหรือมีการผลิตเป็นฤดูกาล และต้องหยุดเดินระบบในบางช่วงเวลา อาจจะ 1 – 6 เดือน ระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่ดีควรใช้ระยะเวลาสั้นในการกระตุ้นให้เชื้อจุลินทรีย์ ฟื้นสภาพเพื่อรับน้ำเสียให้ได้ทั้งหมดโดยเร็ว และที่สำคัญคือต้องสามารถเก็บรักษาเชื้อจุลินทรีย์ให้คงอยู่ในระบบไว้ โดยไม่จำเป็นต้องเติมจุลินทรีย์เพิ่มเข้าในระบบเมื่อถังปฏิกรณ์รับน้ำเสียอีกครั้งหลังจากหยุดเดินระบบมาเป็นเวลานาน

จาก 5 ข้อที่กล่าวมา เป็นคุณลักษณะโดยรวมที่ต้องการในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ไม่ว่าของเสียของเราจะเป็นอะไรก็ตาม ซึ่งเมื่อเรารู้ถึงลักษณะของระบบก๊าซชีวภาพที่ต้องการแล้ว ก็ต้องกลับมาดูที่โรงงานของเราซึ่งมีคำถามที่ต้องตอบก่อนที่จะพิจารณาเลือกว่า จะใช้เทคโนโลยีระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศรูปแบบใดจึงเหมาะสม

4.2.2 ปัจจัยที่ควรพิจารณาก่อนเลือกเทคโนโลยี

1) ลักษณะสมบัติน้ำเสีย / ของเสีย
2) ขนาดพื้นที่ ที่โรงงานมีอยู่
3) งบประมาณที่มี
4) ต้องการนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์อะไร
5) ความสามารถในการจัดหาบุคลากรของโรงงาน

ปัจจัยแรกที่โรงงานจะต้องพิจารณาก่อนเลือกเทคโนโลยีนั้น ได้แก่ ลักษณะสมบัติของน้ำเสีย โดยพิจารณาว่า น้ำเสียของโรงงานต้องเหมาะกับการใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ ซึ่งเบื้องต้นพิจารณาจากค่า COD ของน้ำเสีย โดยค่า COD ของน้ำเสียควรสูงกว่า 2,000 mg/l ทั้งนี้เมื่อพิจาณาถึงเรื่องความคุ้มค่าในการได้ก๊าซชีวภาพมาใช้ประโยชน์ด้วย แนะนำว่า ค่า COD ควรมากกว่า 4,000 mg/l ขึ้นไป นอกจากนี้ต้องคำนึงถึง สารเคมีจากการผลิตที่เจือปนในน้ำเสีย ตลอดจนสภาพปริมาณตะกอนของแข็งแขวนลอยเจือปนในน้ำเสียด้วย ทั้งนี้หากต้องการทราบว่า น้ำเสียของโรงงานมีความเหมาะสมกับการใช้ระบบแบบไม่ใช้อากาศเพียงใดสามารถทำการทดสอบหา “ศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของน้ำเสีย” ได้จากห้องปฏิบัติการของมหาวิทยาลัยหรือหน่วยงานวิจัยที่มีการศึกษาเรื่องเทคโนโลยีก๊าซชีวภาพในประเทศ

คำถามเกี่ยวกับขนาดพื้นที่และงบประมาณ จะให้คำตอบเรื่องรูปแบบของเทคโนโลยีได้ส่วนหนึ่ง เช่น ถ้าหากโรงงานมีพื้นที่จำกัด แต่น้ำเสียมีปริมาณมาก ระบบในรูปแบบของบ่อปิดแบบไม่ใช้อากาศ (Anarobic Covered Lagoon) ก็ไม่เหมาะสมอย่างแน่นอน ส่วนจุดประสงค์ของการนำก๊าซชีวภาพไปใช้งาน จะให้คำตอบเรื่องการคืนทุน และองค์ประกอบของระบบที่จำเป็น เช่น การนำก๊าซชีวภาพไปใช้ทดแทนน้ำมันเตา หรือก๊าซ LPG ในหม้อน้ำ จะให้มูลค่าการทดแทนพลังงานสูงกว่าการใช้ก๊าซชีวภาพผลิตเป็นกระแสไฟฟ้า ตลอดจนเงินลงทุนอุปกรณ์และองค์ประกอบเช่นระบบกำจัด H_2S ก็ต่ำกว่าด้วยเช่นกัน

สำหรับความสามารถในการจัดหาบุคลากรของโรงงานนั้น อาจเป็นประเด็นที่ส่งผลต่อความสำเร็จในการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพ เนื่องจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่จะประสบความสำเร็จในทุกเทคโนโลยีต้องการการติดตามดูแลจากเจ้าหน้าที่ที่ผ่านการอบรมแล้วเป็นประจำอย่างสม่ำเสมอ โดยทุกโรงงานที่มีระบบผลิตก๊าซชีวภาพจำเป็นต้องมีห้องปฏิบัติการทดสอบ เพื่อวิเคราะห์คุณภาพน้ำเบื้องต้นที่ใช้ในการติดตามผลการทำงานของถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพ กรณีโรงงานที่ไม่สามารถหาคนงานที่มีวุฒิการศึกษาสูงได้ หรือบุคลากรที่ดูแลระบบมักเปลี่ยนงานบ่อย ก็ไม่ควรที่จะเลือกระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่มีความซับซ้อน หรือระบบที่ต้องการเจ้าหน้าที่ดูแลที่มีความเชี่ยวชาญเฉพาะสูง แต่ทั้งนี้ต้องระลึกอยู่เสมอว่า ระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่ประสบความสำเร็จในทุกเทคโนโลยี ต้องการการติดตามดูแลจากเจ้าหน้าที่ที่ผ่านการอบรมแล้วเป็นประจำอย่างสม่ำเสมอ

นอกเหนือจากนี้ โรงงานควรต้องพิจารณาเลือกผู้ออกแบบระบบที่มีประสบการณ์ และความชำนาญที่แท้จริง ทั้งในเรื่องของการก่อสร้างและการติดตั้งอุปกรณ์ระบบก๊าซชีวภาพ ตลอดจนความรู้ในการเดินระบบหลังจากก่อสร้างแล้วเสร็จ ซึ่งทางผู้ออกแบบระบบจะต้องถ่ายทอดความรู้ในการดูแลและเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพให้แก่เจ้าหน้าที่ของโรงงานจนมีความชำนาญ ก่อนที่จะส่งมอบงานทั้งหมดได้

4.2.3 ลักษณะของระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่ประสบผลสำเร็จ

1) มีเชื้อจุลินทรีย์อยู่ในถังปฏิกรณ์ปริมาณมาก (และมีสัดส่วนของกลุ่มเชื้อที่เกี่ยวข้องอย่างเหมาะสม)
2) ออกแบบหรือจัดการให้มีการสัมผัสกันระหว่างเชื้อจุลินทรีย์ และน้ำเสียอย่างทั่วถึง และสม่ำเสมอตลอดทุกจุดของถังปฏิกรณ์ (ทุกจุดของปริมาตรใช้งานต้องทำงานได้เต็มที่)
3) ควบคุมสภาวะภายในถังปฏิกรณ์ได้อย่างเหมาะสม กับการที่เชื้อจุลินทรีย์จะย่อยสลายน้ำเสียให้เป็นก๊าซมีเทน

จากที่กล่าวมาทั้ง 3 หัวข้อ ประกอบกับข้อมูลในบทที่ 4 เรื่องชนิดของเทคโนโลยี จุดเด่นและข้อจำกัด น่าจะพอใช้เป็นข้อมูล/แนวทางในการพิจารณาเลือกประเภทของเทคโนโลยีหรือรูปแบบ องค์ประกอบของระบบที่จะใช้เพื่อบำบัดน้ำเสียและผลิตก๊าซชีวภาพให้เหมาะสมกับโรงงานได้ การเลือกประเภทและรูปแบบของระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่เข้ากันได้กับปริมาณ/ลักษณะสมบัติของน้ำเสีย ตลอดจนการดูแลเอาใจใส่ในการติดตามการดำเนินงานระบบก๊าซชีวภาพของโรงงาน จะส่งให้ผลการดำเนินงานระบบผลิตก๊าซชีวภาพ เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ มีเสถียรภาพ และให้ผลตอบแทนได้ตามที่คาดหวังไว้ ทั้งนี้ ต้องอาศัยความร่วมมือกันระหว่างผู้ออกแบบ/ผู้ก่อสร้างระบบ และเจ้าหน้าที่ผู้ดูแลระบบของโรงงาน ในการรับถ่ายทอดความรู้ในการติดตามดูแลระบบอย่างถูกต้อง โดยสิ่งสำคัญที่ควรคำนึงคือ ระบบผลิตก๊าซชีวภาพนี้ ไม่ใช่ระบบอัตโนมัติ(หมายถึงเมื่อสร้างเสร็จแล้ว จะเดินระบบได้ด้วยการกดปุ่มเปิด/ปิดเท่านั้น) หากแต่เป็นระบบที่ต้องอาศัยเจ้าหน้าที่ที่มีความรู้ความเข้าใจในการติดตาม ตรวจสอบ ควบคุมดูแล จากเจ้าหน้าที่ที่ผ่านการอบรมอย่างสม่ำเสมอด้วย

ดังนั้น จึงสรุปได้ว่า หลักสำคัญที่ต้องคำนึงในการนำเทคโนโลยีระบบผลิตก๊าซชีวภาพไปใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม มีดังนี้

1) รู้จักลักษณะสมบัติของน้ำเสีย/ของเสียของโรงงาน
2) พิจารณาเลือกเทคโนโลยี/รูปแบบ และองค์ประกอบของระบบ ให้เหมาะสมกับสภาพน้ำเสียของโรงงาน โดยคำนึงถึงสภาพการดำเนินงานจริงตลอดจนข้อจำกัดต่างๆ ของโรงงานด้วย
3) เลือกผู้ออกแบบระบบที่มีประสบการณ์และมีความรู้จริงเรื่องของเทคโนโลยีการผลิตก๊าซชีวภาพที่พร้อมถ่ายทอดความรู้/อบรมเจ้าหน้าที่ของโรงงานให้ดำเนินงานเองได้ และสามารถเป็นที่ปรึกษาได้อย่างต่อเนื่อง กรณีเกิดปัญหาขึ้นภายหลัง
4) ลงทุนบุคลากร รับถ่ายทอดความรู้การดูแลการเดินระบบ การบำรุงรักษา และดำเนินการอย่างต่อเนื่องสม่ำเสมอ
5) พัฒนาการทำงาน ถ่ายทอดความรู้ และประสบการณ์ ภายในโรงงานอย่างต่อเนื่อง
6) ระลึกเสมอว่า ระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ไม่ใช่ระบบอัตโนมัติ
7) คำนึงถึงกฎความปลอดภัย การทำงานในพื้นที่เสี่ยงอยู่เสมอ

บทที่ 5
การเริ่มต้นระบบและเดินระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ

การที่จะทำให้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศมีประสิทธิภาพในการทำงานสูงสุด ไม่เกิดปัญหาขึ้นในขณะเดินระบบนั้น การดูแลระบบบำบัดน้ำเสียในช่วงเริ่มต้นเดินระบบ (Start up) และในขณะเดินระบบบำบัด (Operation) จึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง ดังนั้นการตรวจสอบและติดตามสภาวะแวดล้อมและปัจจัยที่มีผลต่อการเดินระบบน้ำเสียจึงเป็นสิ่งสำคัญ โดยปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเดินระบบน้ำเสียมีดังนี้

5.1 ช่วงเริ่มต้นเดินระบบ (Start up)

5.1.1 คุณภาพและปริมาณของเชื้อจุลินทรีย์ตั้งต้น

ในการเริ่มต้นเดินระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศนั้น คุณภาพและปริมาณของเชื้อจุลินทรีย์ที่นำมาใช้ในระบบบำบัดมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง เชื้อจุลินทรีย์ที่นำมาใช้ควรมาจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศที่มีลักษณะและองค์ประกอบใกล้เคียงกันกับน้ำเสียที่ต้องการบำบัด ซึ่งทำให้เชื้อจุลินทรีย์สามารถปรับสภาพเข้ากับน้ำเสียชนิดใหม่ที่ป้อนเข้าสู่ระบบบำบัดได้อย่างรวดเร็ว และสามารถทนต่อสารที่เป็นพิษหรือสารที่ยับยั้งการเจริญเติบโตที่มีอยู่ในน้ำเสียได้ หากไม่สามารถหาได้ก็สามารถใช้มูลสัตว์ต่างๆ เช่น มูลโค มูลสุกร เป็นต้น ซึ่งอาจจะต้องใช้ระยะเวลาในการเริ่มต้นเดินระบบนานกว่าวิธีการนำเชื้อจุลินทรีย์ที่ได้จากระบบบำบัดน้ำเสียที่มีลักษณะและองค์ประกอบใกล้เคียงกันกับน้ำเสียที่เราต้องการบำบัดมาใช้ นอกจากนั้นแล้วปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่ใส่ลงในบ่อบำบัดในช่วงเริ่มต้นเดินระบบบำบัดก็มีความสำคัญเช่นเดียวกัน ซึ่งอาจต้องเติมเชื้อจุลินทรีย์เข้าไปในระบบบำบัดอย่างต่อเนื่อง หรือควรเติมเชื้อจุลินทรีย์เมื่อเริ่มต้นเดินระบบให้มีปริมาณมากๆ หรือทำการวนเชื้อจุลินทรีย์กลับเข้าสู่บ่อบำบัดให้เพียงพอเพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบบำบัด ซึ่งจะสามารถช่วยลดระยะเวลาที่ใช้ในการเริ่มต้นเดินระบบให้ลดลงได้

5.1.2 ลักษณะและองค์ประกอบของน้ำเสีย

ลักษณะและองค์ประกอบของน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบบำบัดมีความสำคัญต่อการทำงานของเชื้อจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียและการผลิตก๊าซชีวภาพเป็นอย่างมาก โดยมีผลต่อการเพิ่มกิจกรรมหรือยับยั้งกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบ หากน้ำเสียนั้นมีองค์ประกอบเป็นสารอินทรีย์ที่จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายได้ดี ก็จะทำให้มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูง ทำให้ได้ปริมาณก๊าซชีวภาพของระบบบำบัดเกิดขึ้นมากด้วย แต่ถ้าน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบนั้นมีองค์ประกอบเป็นพวกที่ย่อยสลายได้ยากหรือมีสารพิษและโลหะหนักที่เป็นอันตรายต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียก็จะทำให้มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่ำ ทำให้ได้ปริมาณก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นน้อยเช่นเดียวกัน

5.1.3 ธาตุอาหาร (Nutrients)

โดยทั่วไปจุลินทรีย์นอกจากจะต้องการสารอาหารหลักในการเจริญเติบโตแล้ว ยังต้องการธาตุอาหารอื่นเพื่อช่วยในการสร้างเซลล์ใหม่ด้วย ธาตุอาหารที่มีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ได้แก่ ไนโตรเจน (N) และฟอสฟอรัส (P) นอกจากนี้ยังมีธาตุอาหารอื่นๆ (Trace element) ที่มีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กลุ่มผลิตมีเทนด้วย แต่มีความต้องการในปริมาณที่ต่ำมาก เช่น นิเกิล (Ni) โคบอลท์ (Co) เหล็ก (Fe) สังกะสี (Zn) ทองแดง (Cu) แมกนีเซียม (Mg) แคลเซียม (Ca) โบรอน (B) เซลีเนียม (Se) ซัลเฟอร์ (S) โปแตสเซียม (K) และโมลิบดีเนต (Mo) เป็นต้น

ดังนั้นในช่วงเริ่มต้นเดินระบบบำบัด หากเชื้อจุลินทรีย์มีการเจริญเติบโตช้า อาจเป็นผลเนื่องมาจากขาดธาตุอาหารธาตุใดธาตุหนึ่ง หากขาดธาตุอาหารเป็นเวลานานก็จะมีผลต่อการเพิ่มปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ในระบบบำบัดได้

5.1.4 ระยะเวลากักเก็บน้ำเสีย (Hydraulic Retention Time: HRT) และระยะเวลาที่เชื้อจุลินทรีย์อยู่ในถังปฏิกรณ์ (Solid Retention time: SRT)

ระยะเวลากักเก็บน้ำเสีย คือ ระยะเวลาที่น้ำเสียอยู่ในระบบบำบัดสามารถคำนวณได้จากการนำค่าปริมาตรของบ่อบำบัดหารด้วยอัตราการไหลของน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่บ่อบำบัด (Feeding Rate)

$$\text{HRT (วัน)} = \frac{\text{ปริมาตรของบ่อบำบัด } (m^3)}{\text{อัตราการไหลของน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่บ่อบำบัด } (m^3/\text{วัน})}$$

การเพิ่มระยะเวลากักเก็บน้ำเสียเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบบำบัดได้อีกวิธีหนึ่ง ซึ่งจะทำให้จุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบบำบัด มีระยะเวลาที่สามารถสัมผัสกับสารอินทรีย์ในน้ำเสียได้นานขึ้น ทำให้สามารถใช้สารอินทรีย์ในน้ำเสียนั้นมาผลิตเป็นก๊าซชีวภาพได้มากขึ้น ในการเพิ่มระยะเวลากักเก็บน้ำเสียนั้น ทำได้โดยการออกแบบให้บ่อบำบัดมีขนาดใหญ่ขึ้น แต่ก็เกิดปัญหาทำให้ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบสูงขึ้นด้วย หรืออีกวิธีหนึ่งโดยการปรับลดอัตราการไหลของน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่บ่อบำบัด ซึ่งก็จะทำให้ระยะเวลากักเก็บน้ำเสียสูงขึ้นได้ แต่จะมีผลต่อปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในระบบ ในการลดระยะเวลากักเก็บน้ำเสียให้สั้นลงจนเกินไปก็อาจทำให้เชื้อจุลินทรีย์หลุดออกจากระบบได้มากขึ้น อาจส่งผลกระทบต่อระบบบำบัดทำให้ระบบล้มเหลวได้ เนื่องจากมีจำนวนเชื้อจุลินทรีย์หลงเหลืออยู่ในระบบบำบัดน้อยเกินไป

ในช่วงเริ่มต้นการเดินระบบบำบัดควรใช้อัตราการป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบต่ำ และควรมีระยะเวลากักเก็บน้ำเสียสูง เพื่อทำให้เชื้อจุลินทรีย์มีเวลาสัมผัสกับสารอินทรีย์ในน้ำเสียได้นานขึ้นและสามารถกักเก็บเชื้อจุลินทรีย์ให้อยู่ในระบบบำบัดได้นานขึ้นด้วย จากนั้นจึงค่อยๆ เพิ่มปริมาณสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบบำบัดให้มากขึ้นและค่อยๆ ลดระยะเวลากักเก็บน้ำเสียลง

ระยะเวลาที่เชื้อจุลินทรีย์อยู่ในถังปฏิกรณ์ (Solid Retention Time: SRT) เป็นตัวแปรที่สำคัญอีกตัวแปรหนึ่ง ในการเดินระบบบำบัดควรมีค่า SRT ไม่น้อยกว่า 10 วัน เพื่อให้จุลินทรีย์กลุ่มผลิตมีเทนที่เกิดขึ้นใหม่ในระบบซึ่งมีอัตราในการเจริญเติบโตช้า สามารถเจริญเติบโตได้ทันกับจุลินทรีย์เดิมที่หลุดออกจากระบบ การมีค่า SRT ที่นานขึ้นจะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียมากขึ้น โดยลดผลกระทบจากสภาวะแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมที่เกิดขึ้นในระบบ และลดผลกระทบจากสารพิษที่อยู่ในน้ำเสียได้

วิธีการในการรักษาและเพิ่มปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ให้แก่ระบบทำได้โดย

ก. ทำการแยกเชื้อจุลินทรีย์ออกจากน้ำเสียที่ออกจากระบบบำบัด แล้วนำเชื้อจุลินทรีย์กลับเข้าสู่ถังปฏิกรณ์อีกครั้ง

ข. การเพิ่มแผ่นตัวกลางไว้ในระบบบำบัด เพื่อให้เชื้อจุลินทรีย์เกาะติดอยู่บนตัวกลางไม่หลุดออกจากระบบ

5.1.5 การป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบ

การป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ มีความสำคัญมากโดยเฉพาะในช่วงการเริ่มต้นระบบ ปริมาณสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบในช่วงการเริ่มต้นระบบควรมีการป้อนสารอาหารให้เหมาะสมกับจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ที่มีอยู่ภายในระบบบำบัด ทั้งนี้ก็เพื่อให้เกิดความสมดุลระหว่างจุลินทรีย์ทั้ง 2 กลุ่ม ได้แก่ จุลินทรีย์กลุ่มผลิตกรดกับจุลินทรีย์กลุ่มผลิตมีเทน เนื่องจากในการย่อยสลายสารอินทรีย์ไปเป็นก๊าซชีวภาพนั้น

ต้องอาศัยการทำงานร่วมกันของจุลินทรีย์ทั้ง 2 กลุ่ม ซึ่งจะต้องมีสัดส่วนที่พอดีกัน ถ้ามีปริมาณจุลินทรีย์กลุ่มผลิตกรดสูงกว่า มักทำให้เกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายและก๊าซชีวภาพที่ได้มักมีองค์ประกอบเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในปริมาณที่สูง

ดังนั้น การเติมสารอินทรีย์ในช่วงเริ่มต้นระบบจึงมีความสำคัญต่อสมดุลของจุลินทรีย์ทั้งสองกลุ่ม การเติมสารอินทรีย์ในช่วงเริ่มต้นระบบในระยะแรกๆ ควรมีการเติมสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบอย่างช้าๆ เพื่อเป็นการปรับสมดุลให้กับระบบ ให้สามารถรักษาสมดุลของจุลินทรีย์ทั้งสองกลุ่มในระบบไว้ได้ และทำให้ระบบบำบัดสามารถรับภาระการเติมสารอินทรีย์ในระดับที่สูงในระยะเวลาต่อมาได้ดียิ่งขึ้น แต่ถ้ามีการเพิ่มสารอินทรีย์อย่างรวดเร็วเกินไปก็จะทำให้ปริมาณของจุลินทรีย์กลุ่มผลิตกรดที่สามารถเจริญเติบโตได้ดีกว่ามีจำนวนมากกว่าจุลินทรีย์กลุ่มผลิตมีเทนมาก จึงทำให้เกิดกรดอินทรีย์ระเหยง่ายขึ้นในระบบจำนวนมาก จุลินทรีย์กลุ่มผลิตมีเทนซึ่งเจริญเติบโตได้ช้ากว่าไม่สามารถใช้กรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่เกิดขึ้นได้ทัน ทำให้เกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายขึ้นในระบบ เป็นผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่าง ในระบบลดต่ำลง จนไม่เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มผลิตมีเทน ในที่สุดก็จะทำให้ระบบล้มเหลวได้

5.2 ช่วงเดินระบบ (Operation)

ในการตรวจสอบการทำงานของระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศในขณะเดินระบบนั้น มีปัจจัยสำคัญที่จำเป็นในการตรวจสอบและดูแลระบบให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพดังนี้คือ

5.2.1 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ค่าความเป็นกรด-ด่าง เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ ซึ่งจะมีผลต่อการทำงานของจุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบบำบัดจุลินทรีย์แต่ละชนิดจึงมีช่วงค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตที่แตกต่างกัน ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ทั้ง 2 กลุ่มร่วมกันคือ จุลินทรีย์กลุ่มผลิตกรดและจุลินทรีย์กลุ่มผลิตมีเทน ดังนั้นค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมภายในระบบบำบัดจึงเป็นช่วงของค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมของจุลินทรีย์ทั้งสองกลุ่ม คือ มีค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ในช่วงระหว่าง 6.6-7.4 หากค่าความเป็นกรด-ด่างสูงหรือต่ำกว่านี้ ประสิทธิภาพของระบบบำบัดจะลดลงเนื่องจากในสภาวะที่เป็นกรดหรือด่างจะเป็นอันตรายต่อจุลินทรีย์

5.2.2 ค่าความเป็นด่าง (Alkalinity: Alk)

ค่าความเป็นด่างมีหน่วยเป็น มิลลิกรัมของแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$)/ลิตร ค่าความเป็นด่างเป็นตัวบ่งบอกถึงเสถียรภาพของระบบ ถ้าระบบบำบัดมีค่าความเป็นด่างสูงแสดงว่าระบบบำบัดมีความสามารถในการเป็นบัฟเฟอร์สูง สามารถรักษาค่าความเป็นกรด-ด่างของระบบบำบัดให้คงตัวอยู่ได้นาน เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายในระบบ ก็ไม่ทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างเปลี่ยนแปลงได้ง่าย ค่าความเป็นด่างที่เหมาะสมกับระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศควรมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 1,000-3,000 มิลลิกรัมของ $CaCO_3$/ลิตร ค่าความเป็นด่างเป็นปัจจัยที่สำคัญในการดูแลระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช่อากาศ โดยจะทำการวิเคราะห์ควบคู่ไปกับปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย แล้วจึงคำนวณหาอัตราส่วนของความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (มิลลิกรัมของกรดอะซิติก/ลิตร) ต่อค่าความเป็นด่าง (มิลลิกรัมของ $CaCO_3$/ลิตร) โดยหาก

ก. อัตราส่วนนี้มีค่าน้อยกว่า 0.4 แสดงว่า ระบบมีความสามารถในการเป็นบัฟเฟอร์สูง

ข. อัตราส่วนนี้สูงกว่า 0.8 แสดงว่า ถ้ามีการเพิ่มขึ้นของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายเพียงเล็กน้อย ค่าความเป็นกรด-ด่าง ของน้ำเสียในระบบจะลดลงอย่างรวดเร็ว

วิธีการควบคุมระบบที่ดีที่สุดควรให้มีอัตราส่วนระหว่างปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายต่อค่าความเป็นด่างไม่เกิน 0.3-0.4

5.2.3 กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Fatty Acids: VFA)

กรดอินทรีย์ระเหยง่าย เช่น พวกกรดอะซิติก กรดบิวทีริก กรดโพรพิโอนิก กรดฟอร์มิก หากพบว่ามีการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายในระบบอยู่ปริมาณมาก มักเป็นสัญญาณเตือนถึงความล้มเหลวของระบบบำบัด เนื่องจากกรดเหล่านี้เป็นผลิตภัณฑ์สารตัวกลางที่เกิดขึ้นในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้อากาศ ระบบที่มีกรดอินทรีย์ระเหยง่ายสะสมในปริมาณมาก ในช่วงแรกกรดอินทรีย์ระเหยง่ายจะมีผลทำให้ค่าความเป็นด่างของระบบลดลง ต่อมาหากยังไม่มีการใช้หรือกำจัดกรดอินทรีย์ระเหยง่ายให้มีปริมาณลดน้อยลง ค่าความเป็นกรด-ด่าง ของระบบก็จะลดต่ำลง และถ้าค่าความเป็นกรด-ด่าง ลดลงต่ำกว่า 6.6 จะเป็นอันตรายต่อจุลินทรีย์กลุ่มผลิตมีเทน

ถ้าระบบล้มเหลว เนื่องจากมีความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายสะสมอยู่ภายในระบบบำบัดสูง วิธีการแก้ไขที่ดีที่สุดเพื่อให้ระบบบำบัดกลับมาทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพเหมือนเดิมอีกครั้งคือ ควรหยุดป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบบำบัดก่อน รอจนกระทั่งความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายในระบบบำบัดลดลงมาอยู่ในระดับปกติก่อน แล้วจึงค่อยเริ่มต้นป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบบำบัดใหม่อีกครั้ง หรืออาจค่อยๆ เพิ่มอัตราการป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบ โดยในช่วงแรกควรป้อนน้ำเสียที่มีค่าซีโอดีต่ำๆ ในปริมาณน้อยๆ เข้าสู่ระบบก่อน เมื่อระบบเริ่มฟื้น

ตัวแล้วจึงค่อยๆ เพิ่มอัตราการป้อนน้ำเสียในปริมาณที่มากขึ้นได้ หากต้องการควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่าง ให้เหมาะสมกับระบบ อาจใช้วิธีการเติมสารเคมี เช่น โซเดียมไบคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) เป็นต้น ไม่ควรใช้ปูนขาว $Ca(OH)_2$ เนื่องจากอาจจะทำให้เกิดการอุดตัน

5.2.4 อัตราการผลิตก๊าซมีเทนและองค์ประกอบก๊าซชีวภาพ

อัตราการผลิตก๊าซมีเทนทำให้ทราบถึงความสามารถของเชื้อจุลินทรีย์และประสิทธิภาพของระบบบำบัด การเปลี่ยนแปลงของอัตราการผลิตก๊าซมีเทนมีความสำคัญมาก เนื่องจากเป็นตัวแปรที่สามารถบอกได้ว่าเกิดความผิดปกติกับจุลินทรีย์กลุ่มผลิตมีเทน หากพบว่า อัตราการผลิตก๊าซมีเทนลดลง จุลินทรีย์กลุ่มผลิตมีเทนอาจถูกยับยั้งการทำงาน และในองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพควรมีก๊าซมีเทนในช่วง 60-65% ซึ่งจากทฤษฎีแล้วในการผลิตก๊าซมีเทนที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสนั้น จะได้ก๊าซมีเทน 0.35 ลูกบาศก์เมตร/ กิโลกรัมซีโอดีที่ถูกกำจัด

5.2.5 ประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีโอดี (COD)

ประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีโอดี ทำให้ทราบถึงความสามารถของเชื้อจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย โดยปกติแล้วกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศจะสามารถลดค่าซีโอดีได้ หากพบว่าในระบบบำบัดมีประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีโอดีลดต่ำลงเรื่อยๆ และน้อยกว่าร้อยละ 70 แสดงว่า ระบบเริ่มมีปัญหาเกิดขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากสภาวะแวดล้อมในระบบบำบัดไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ ทำให้การย่อยสลายสารอินทรีย์เกิดขึ้นต่ำ ทั้งนี้ในระบบบำบัดที่ดีควรมีประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีโอดีมากกว่าร้อยละ 85

5.2.6 การตรวจสอบและวิเคราะห์ผลระบบบำบัดน้ำเสีย

การตรวจสอบประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสีย โดยทั่วไปแล้วจะต้องทำการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อระบบเป็นประจำทุกวัน ตำแหน่งที่ควรเก็บตัวอย่างน้ำเสียเพื่อนำมาทำการตรวจวิเคราะห์และตำแหน่งที่จะต้องทำการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพและวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ รวมถึงปัจจัยต่างๆ ที่ควรทำการตรวจสอบและวิเคราะห์ผล แสดงไว้ในตัวอย่างตารางการวิเคราะห์ผลน้ำเสีย ชุดที่ 1 และชุดที่ 2 ดังตารางที่ 5.1 และ 5.2 ส่วนวิธีการวิเคราะห์สามารถดูได้จากคู่มือวิเคราะห์น้ำเสียได้

โดยปัจจัยที่สำคัญที่ต้องทำการตรวจวิเคราะห์ได้แก่

1) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

2) ค่าความเป็นด่าง (Alkalinity)

3) ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile fatty acids)

4) ประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีโอดี (COD)

5) ปริมาณก๊าซชีวภาพ

6) องค์ประกอบก๊าซชีวภาพ

7) ปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์

ควรมีการตรวจสอบปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ ซึ่งจะทำให้ทราบว่า ในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพนั้นมีปริมาณตะกอนจุลินทรีย์อยู่ในปริมาณมากน้อยแค่ไหน เนื่องจากปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียและการผลิตก๊าซชีวภาพ ถังปฏิกรณ์ควรมีการติดตั้งจุดเก็บตัวอย่างตะกอนจุลินทรีย์ไว้ที่ระดับความสูงต่างๆ ของถังปฏิกรณ์ เพื่อความสะดวกในการเก็บตัวอย่างตะกอนจุลินทรีย์ การตรวจสอบปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ ทำได้โดยการเก็บตัวอย่างของตะกอนจุลินทรีย์ที่ระดับความสูงต่างๆ ของถังปฏิกรณ์ แล้วนำมาทำการวิเคราะห์หาค่า Total Solids (TS), Total Volatile Solids (TVS) หรือทำการวิเคราะห์หาค่า Suspended Solids (SS), Volatile Suspended Solids (VSS)

การวิเคราะห์ปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการบำบัดน้ำเสียและการผลิตก๊าซชีวภาพดังกล่าวข้างต้น ดังนั้นจึงต้องมีอุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์ที่จำเป็นไว้ในห้องปฏิบัติการ เช่น

1) เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH มิเตอร์)

2) เครื่องมือและอุปกรณ์วิเคราะห์ค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) และปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile fatty acids)

3) เครื่องมือวิเคราะห์ค่าซีโอดี (COD)

4) เครื่องมือวัดองค์ประกอบก๊าซชีวภาพ

5) เครื่องมือและอุปกรณ์วิเคราะห์ปริมาณตะกอน เป็นต้น

สภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมสำหรับระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ ดังแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 แสดงสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมสำหรับระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ

สภาวะแวดล้อม	ช่วงค่าที่เหมาะสม	ช่วงค่าที่ยอมรับได้
อุณหภูมิ (°C)	30-35	25-40
pH	6.8-7.2	6.6-7.4
ค่าความเป็นด่าง (มก.ของ $CaCO_3$/ล.)	2000-3000	1000-4000
ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (มก.ของกรดอะซิติก/ล.)	50-500	2000
ประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีโอดี (COD)	>85%	75-85%
ค่าอัตราส่วนระหว่างปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายต่อค่าความเป็นด่าง (VFA/Alk ratio)	< 0.3	0.03-0.3
%CH_4	60-65	55-60
H_2S ที่ละลายน้ำเสีย (ppm)	< 30	< 200
อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C : N ratio)	40-50	< 100

ตารางที่ 5.2 ตารางการวิเคราะห์ผลน้ำเสีย ชุดที่ 1

ประจำเดือน................................... พ.ศ. ....

วันที่	อุณหภูมิ (°C)				pH				ความเป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (มก.ของกรดอะซิติก/ล.)			ความเป็นด่าง (มก.ของ$CaCO_3$/ล.)			ค่า VFA/Alk	
	บ่อสูบ	บ่อพักน้ำเสีย	ภายในบ่อบำบัด	ออกจากบ่อบำบัด	บ่อสูบ	บ่อพักน้ำเสีย	ภายในบ่อบำบัด	ออกจากบ่อบำบัด	บ่อพักน้ำเสีย	ภายในบ่อบำบัด	ออกจากบ่อบำบัด	บ่อพักน้ำเสีย	ภายในบ่อบำบัด	ออกจากบ่อบำบัด	ภายในบ่อบำบัด	ออกจากบ่อบำบัด
1																
2																
3																
4																
5																
6																
7																
8																
9																
10																
11																
12																

ตารางที่ 5.2 ตารางการวิเคราะห์ผลน้ำเสีย ชุดที่ 1 (ต่อ)

วันที่	อุณหภูมิ (°C)				pH				ความเป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (มก.ของกรดอะซิติก/ล.)			ความเป็นด่าง (มก.ของ $CaCO_3$/ล.)			ค่า VFA/Alk	
	บ่อสูบ	บ่อพักน้ำเสีย	ภายในบ่อบำบัด	ออกจากบ่อบำบัด	บ่อสูบ	บ่อพักน้ำเสีย	ภายในบ่อบำบัด	ออกจากบ่อบำบัด	บ่อพักน้ำเสีย	ภายในบ่อบำบัด	ออกจากบ่อบำบัด	บ่อพักน้ำเสีย	ภายในบ่อบำบัด	ออกจากบ่อบำบัด	ภายในบ่อบำบัด	ออกจากบ่อบำบัด
13																
14																
15																
16																
17																
18																
19																
20																
21																
22																
23																
24																
25																

ตารางที่ 5.2 ตารางการวิเคราะห์ผลน้ำเสีย ชุดที่ 1 (ต่อ)

วันที่	อุณหภูมิ (°C)				pH				ความเป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (มก.ของกรดอะซิติก/ล.)			ความเป็นด่าง (มก.ของ$CaCO_3$/ล.)			ค่า VFA/Alk	
	บ่อสูบ	บ่อพักน้ำเสีย	ภายในบ่อบำบัด	ออกจากบ่อบำบัด	บ่อสูบ	บ่อพักน้ำเสีย	ภายในบ่อบำบัด	ออกจากบ่อบำบัด	บ่อพักน้ำเสีย	ภายในบ่อบำบัด	ออกจากบ่อบำบัด	บ่อพักน้ำเสีย	ภายในบ่อบำบัด	ออกจากบ่อบำบัด	ภายในบ่อบำบัด	ออกจากบ่อบำบัด
26																
27																
28																
29																
30																
31																

ตารางที่ 5.3 ตารางการวิเคราะห์ผลน้ำเสีย ชุดที่ 2

ประจำเดือน................................... พ.ศ. ....

วันที่	COD (มก./ล.)				ปริมาณก๊าซชีวภาพจากบ่อบำบัด ($ม^3$/วัน)	องค์ประกอบก๊าซชีวภาพจากบ่อบำบัด (%)			ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เข้าส่วนกำจัด H_2S ($ม^3$/วัน)	ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ออกจากส่วนกำจัด H_2S ($ม^3$/วัน)	องค์ประกอบก๊าซชีวภาพที่ออกจากส่วนกำจัด H_2S (%)		
	บ่อสูบ	บ่อพักน้ำเสีย	ภายในบ่อบำบัด	ออกจากบ่อบำบัด		CH_4	CO_2	H_2S			CH_4	CO_2	H_2S
1													
2													
3													
4													
5													
6													
7													
8													
9													
10													
11													
12													

ตารางที่ 5.3 ตารางการวิเคราะห์ผลน้ำเสีย ชุดที่ 2 (ต่อ)

วันที่	COD (มก./ล.)				ปริมาณก๊าซชีวภาพ (ม³/วัน) จากบ่อบำบัด	องค์ประกอบก๊าซชีวภาพจากบ่อบำบัด (%)			ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เข้าส่วนกำจัด H_2S (ม³/วัน)	ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ออกจากส่วนกำจัด H_2S (ม³/วัน)	องค์ประกอบก๊าซชีวภาพที่ออกจากส่วนกำจัด H_2S (%)		
	บ่อสูบ	บ่อพักน้ำเสีย	ภายในบ่อบำบัด	ออกจากบ่อบำบัด		CH_4	CO_2	H_2S			CH_4	CO_2	H_2S
13													
14													
15													
16													
17													
18													
19													
20													
21													
22													
23													
24													
25													

ตารางที่ 5.3 ตารางการวิเคราะห์ผลน้ำเสีย ชุดที่ 2 (ต่อ)

วันที่	COD (มก./ล.)				ปริมาณก๊าซชีวภาพ ($ม^3$/วัน) จากบ่อบำบัด	องค์ประกอบก๊าซชีวภาพจากบ่อบำบัด (%)			ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เข้าส่วนกำจัด H_2S ($ม^3$/วัน)	ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ออกจากส่วนกำจัด H_2S ($ม^3$/วัน)	องค์ประกอบก๊าซชีวภาพที่ออกจากส่วนกำจัด H_2S (%)		
	บ่อสูบ	บ่อพักน้ำเสีย	ภายในบ่อบำบัด	ออกจากบ่อบำบัด		CH_4	CO_2	H_2S			CH_4	CO_2	H_2S
26													
27													
28													
29													
30													
31													

บทที่ 6
การเก็บก๊าซ การลำเลียง และอุปกรณ์ความปลอดภัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงรูปแบบการเก็บก๊าซชีวภาพ ระบบท่อ และเครื่องจักรที่ใช้ในการลำเลียงก๊าซชีวภาพจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพไปยังระบบใช้ประโยชน์ รวมทั้งกล่าวถึงอุปกรณ์ด้านความปลอดภัยที่ควรมีในระบบก๊าซชีวภาพ

6.1 การเก็บก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายน้ำเสีย จะถูกเก็บไว้ที่ถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพเอง หรือมีการสร้างบ่อ/ถังเก็บเพิ่มเติมขึ้นมา ทำให้ทั้งปริมาณก๊าซและคุณภาพมีความสม่ำเสมอ เพียงพอต่อการใช้ประโยชน์ โดยทั่วไปการเก็บก๊าซชีวภาพในถังเก็บก๊าซไม่ควรมีขนาดใหญ่เกินไป เนื่องจากต้องใช้พื้นที่ เงินลงทุนสูง และมีความเสี่ยงในการเกิดอุบัติเหตุ แต่ถ้าปริมาตรการเก็บก๊าซเล็กเกินไป ในกรณีที่มีการผลิตก๊าซชีวภาพมากเกินการใช้งาน จำเป็นต้องระบายก๊าซออกผ่านระบบเผาไหม้ก๊าซทิ้ง (Flare System)

ในการเก็บก๊าซชีวภาพทั้งที่ถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพและบ่อ/ถังเก็บก๊าซชีวภาพ ต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์ความปลอดภัย โดยจำแนกการเก็บก๊าซตามระดับของความดันและปริมาตร ดังแสดงในตาราง 6.1

ตารางที่ 6.1 แสดงการจำแนกการเก็บก๊าซ

ความดัน	ระดับความดัน	ปริมาตรการเก็บก๊าซ (โดยทั่วไป) (ลบ.ม.)
ต่ำ	0.05 – 5 มิลลิบาร์ เกจ	10 -5000
	10-50 มิลลิบาร์ เกจ	2 -100
ปานกลาง	5 -20 บาร์ เกจ	1 -100
สูง	200-300 บาร์ เกจ	0.1 – 0.5

ที่มา : Biogas from waste and Renewable Resources และ เอกสารของบริษัท Settler

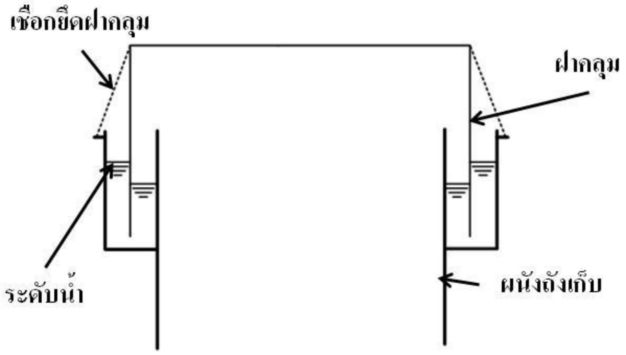
6.1.1 การเก็บก๊าซที่ความดันต่ำ

การเก็บก๊าซที่ความดันต่ำ (0.05 – 50 มิลลิบาร์เกจ) มีทั้งที่เก็บก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นเหนือผิวน้ำภายในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพ และการเก็บในบ่อ/ถังเก็บก๊าซชีวภาพ โดยที่มีวัสดุมาคลุมด้านบนของถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพหรือบ่อ/ถังเก็บก๊าซชีวภาพ โดยจำแนกรูปแบบการคลุม ได้แก่

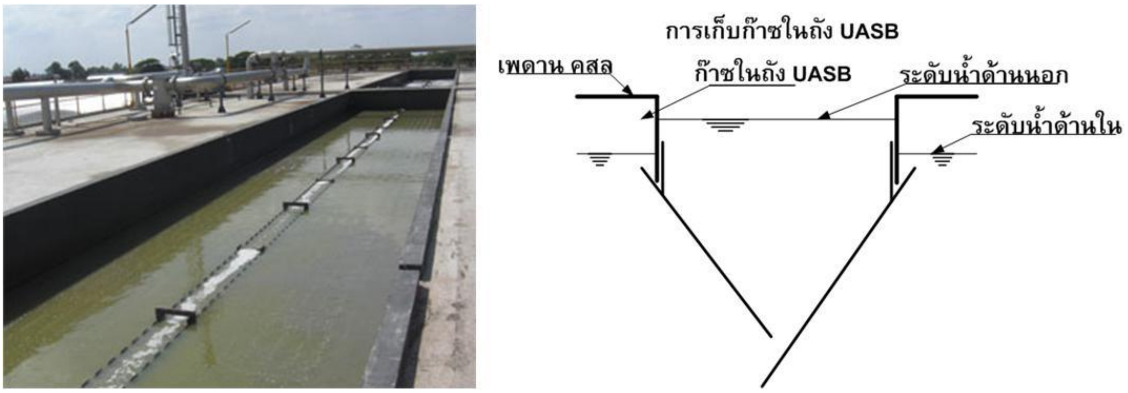
6.1.1.1 การคลุมด้วยโครงสร้างคงตัว (Fixed Covered)

เป็นการใช้วัสดุจำพวกโลหะหรือคอนกรีตเสริมเหล็ก ในการทำโครงสร้างของฝาที่คลุมถัง/บ่อที่มีฝาคลุมถูกยึดแน่นติดกับบ่อ/ถังด้านบน ถูกเรียกว่า บ่อ/ถังแบบโดมคงที่ (Fixed Dome) เช่น การเก็บก๊าซในถังผลิตก๊าซชีวภาพแบบถังกวนสมบูรณ์ ดังรูปที่ 6.1 และการใช้ฝาคลุมที่ยึดไว้และป้องกันการรั่วของก๊าซด้วยน้ำ (Water Seal) ดังรูปที่ 6.2 และ 6.3

รูปที่ 6.1 แสดงการเก็บก๊าซในถังปฏิกรณ์แบบโดมคงที่

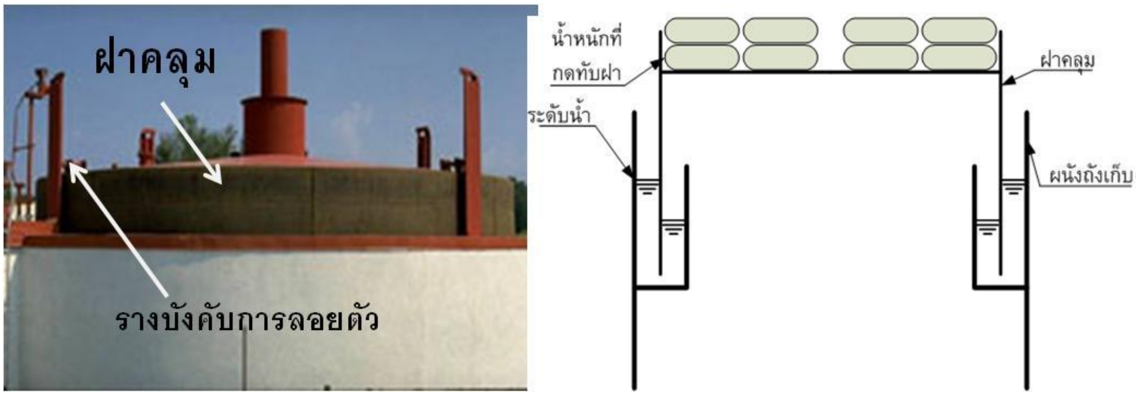


รูปที่ 6.2 แสดงการเก็บก๊าซในถังปฏิกรณ์ใช้ฝาคลุมสแตนเลส และใช้น้ำหล่อป้องกันก๊าซรั่ว



รูปที่ 6.3 แสดงการเก็บก๊าซในถังปฏิกรณ์ UASB เพดาน คสล. และใช้น้ำหล่อป้องกันก๊าซรั่ว

ถังหรือบ่อที่มีฝาคลุมด้านบน สามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงได้ตามปริมาณก๊าซที่ถูกเก็บ เรียกว่า แบบโดมลอยตัว (Floating Dome) ดังรูปที่ 6.4



รูปที่ 6.4 แสดงการเก็บก๊าซในถังแบบโดมลอยตัว และใช้น้ำหล่อป้องกันก๊าซรั่ว

ปริมาตรการเก็บก๊าซในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพนั้นขึ้นอยู่กับระดับช่องว่างระหว่างฝาคลุมและระดับน้ำในถัง ดังนั้นปริมาตรการเก็บก๊าซชีวภาพแบบโครงสร้างคงตัว จึงมีปริมาตรการเก็บน้อย

> **<u>คำเตือน:</u>** การเก็บก๊าซภายใต้โครงสร้างที่คงตัว ต้องติดตั้งอุปกรณ์ระบายความดันแบบ Pressure & Vacuum Relief ที่หัวถัง

ความดันในการเก็บก๊าซภายใต้โครงสร้างคงตัวนี้ ขึ้นอยู่กับน้ำหนักของฝาคลุม หรือความแข็งแรงของฝาที่ถูกยึดไว้ โดยทั่วไปความดันในการเก็บก๊าซไม่เกิน 50 มิลลิบาร์ การควบคุมความดันที่หัวถังนั้นทำโดยติดตั้ง Level switch (กรณีที่เป็นแบบโดมลอยตัว) หรือ Pressure switch (กรณีแบบโดมคงที่) เพื่อสั่งให้มีการส่งก๊าซไปยังระบบเผาก๊าซทิ้ง เมื่อปริมาณก๊าซในถัง/บ่อเก็บก๊าซ มากเกินความจุที่กำหนดไว้

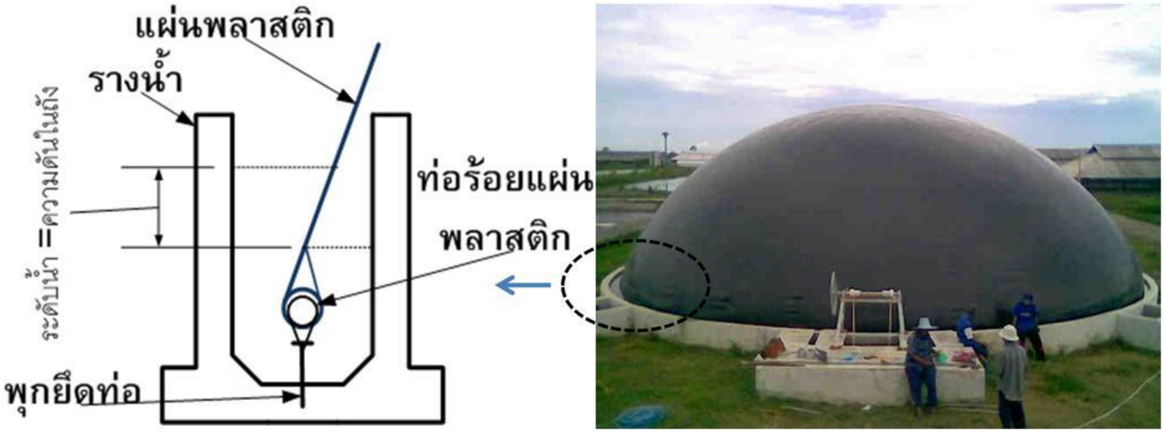
6.1.1.2 การคลุมบ่อแบบบัลลูน (Balloon Covered) ด้วยแผ่นพลาสติก

การเก็บก๊าซแบบบัลลูน จะขุดบ่อให้มีพื้นที่หน้าตัดขนาดใหญ่ แล้วใช้วัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูง เช่น แผ่นพลาสติกชนิด High Density Polyethylene (HDPE) หรือแผ่น Polyvinylchloride (PVC) ที่มีการเติมสารป้องกันรังสี Ultra Violet (UV) เป็นต้น มาปิดคลุมด้านบนบ่อ/ถังผลิตหรือเก็บก๊าซชีวภาพ แผ่นพลาสติกที่ปิดคลุม จะต้องออกแบบให้รองรับความดันก๊าซและแรงลมภายนอก การติดตั้งควรเสริมความแข็งแรงของแผ่นพลาสติก (Reinforce) ให้สามารถลดการกระเพื่อมจากแรงลมเพื่อป้องกันการล้าตัว (Fatigue) ความดันในการเก็บก๊าซ 0.05 – 5 มิลลิบาร์เกจ ปริมาตรการเก็บก๊าซทั่วไป 10 – 5000 ลบ.ม. การเก็บก๊าซปริมาณมากเกินไป อาจมีความเสี่ยงสูงจากอัคคีภัยร้ายแรงจากการรั่วไหลของก๊าซชีวภาพเนื่องจากการฉีกขาดของแผ่นพลาสติก

บ่อเก็บก๊าซแบบบัลลูน สามารถจำแนกได้เป็น

ก) บ่อเก็บก๊าซที่มีการยึดขอบแผ่นพลาสติกในรางน้ำ

บ่อแบบที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปทรงเรขาคณิต มีการสร้างรางน้ำรอบขอบบ่อ เพื่อสำหรับยึดขอบแผ่น PVC (ส่วนใหญ่การคลุมบ่อแบบนี้นิยมใช้แผ่น PVC) ดังรูปที่ 6.5



รูปที่ 6.5 แสดงการเก็บก๊าซในบ่อที่มีการยึดขอบแผ่นพลาสติกในรางน้ำ

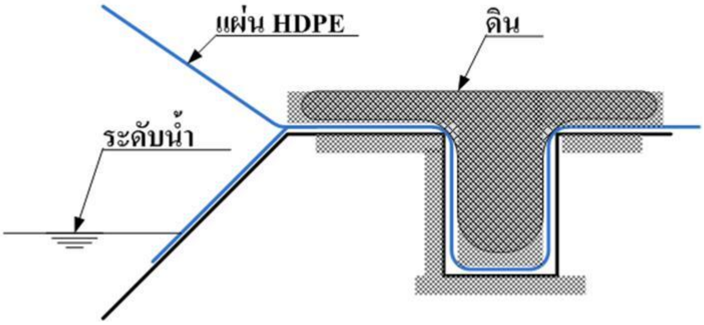
ขอบแผ่น PVC จะถูกม้วนเป็นช่องให้มีขนาดพอให้ท่อ PVC สอดผ่านได้ การติดตั้งแผ่นคลุมโดยการยึดท่อ PVC กับพุกที่ติดกับรางน้ำ การติดตั้งแบบนี้สามารถที่จะเปิดแผ่นที่คลุมบ่อได้ง่าย โดยที่แผ่นพลาสติกเสียหายน้อย กรณีที่พื้นบ่ออยู่ลึกเกินกว่าความยาวของแผ่น PVC จะมีการขึงเชือกรองรับแผ่น PVC เพื่อป้องกันการฉีกขาดของแผ่น PVC เนื่องจากการรับน้ำหนักตัวเองเมื่อไม่มีก๊าซ

ความดันในบ่อเก็บก๊าซไม่ควรสูงเกินค่าที่ผู้ผลิตแผ่น PVC กำหนด โดยทั่วไปความดันสูงสุดไม่เกิน 5 มิลลิบาร์เกจ (หรือความแตกต่างระหว่างระดับน้ำด้านนอกกับระดับน้ำด้านในไม่เกิน 5 ซม.)

ความแตกต่าง 5 ซม. วัดจากรูตาไก่ของแผ่นพลาสติกที่เจาะ ไว้ร้อยเชือกยึดกับพุกกับระดับน้ำภายนอกที่กำหนดไว้

ข) บ่อเก็บก๊าซที่มีการยึดขอบแผ่นพลาสติกโดยใช้ดินกลบทับ

บ่อแบบนี้ไม่จำเป็นต้องมีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปทรงเรขาคณิต ทำโดยการขุดร่องรอบบ่อ ปูแผ่น HDPE ไว้ในร่องดินใช้ดินกลบทับแผ่น HDPE ดังรูปที่ 6.6 การติดตั้งแบบนี้ถ้าจะเปิดแผ่นที่คลุมบ่อจะต้องขุดดินที่กลบทับออกก่อน ซึ่งมีโอกาสที่แผ่นพลาสติกเสียหายได้มาก ในการป้องกันการฉีกขาดของแผ่น HDPE เนื่องจากรับน้ำหนักตัวเองเมื่อไม่มีก๊าซภายในบ่อ กรณีที่พื้นบ่ออยู่ลึกเกินกว่าความยาวของแผ่น HDPE จะมีการขึงเชือกเพื่อรองรับแผ่น HDPE



รูปที่ 6.6 แสดงการเก็บก๊าซในบ่อที่ยึดขอบแผ่นพลาสติกโดยใช้ดินกลบทับ

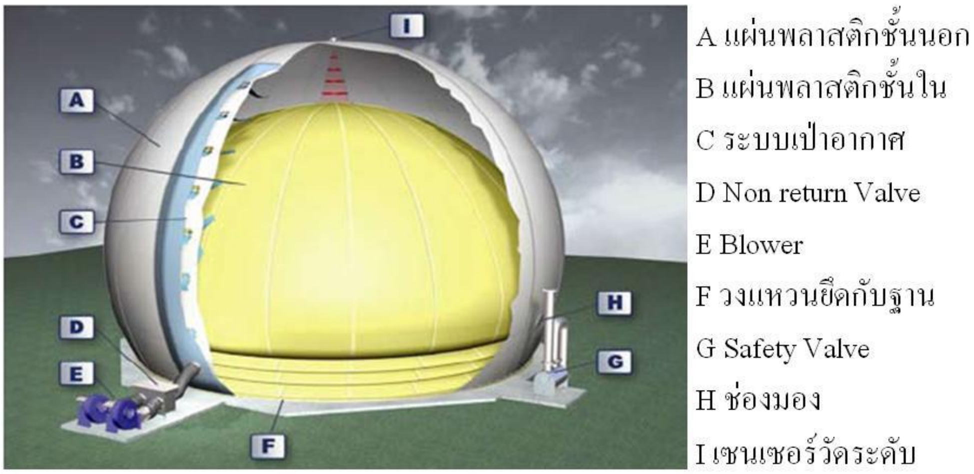
คำเตือน:

- การกระพือเนื่องจากลมจะทำให้แผ่นพลาสติกเกิดการล้าตัว เสื่อมสภาพเร็ว ฉีกขาดง่าย การรักษาแผ่นพลาสติกให้คงทนทำได้โดยการติดตั้งอุปกรณ์เสริมความแข็งแรงหรือคลุมด้วยตาข่าย
- ความสูงของบัลลูนไม่ควรเกิน 10 เมตร ความแข็งแรงของแผ่นพลาสติกต้องได้รับการคำนวณอย่างถูกต้องตามหลักวิศวกรรม
- ควรมีการติดตั้งอุปกรณ์ระบายความดันแบบ Pressure Relief ที่ท่อก๊าซใกล้บ่อเก็บก๊าซ

ค) ถังเก็บก๊าซแบบโดมสองชั้น

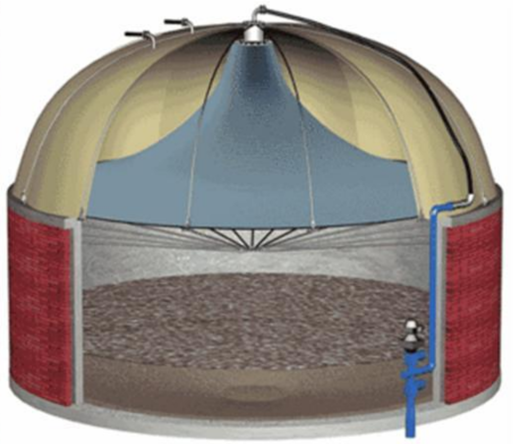
ถังเก็บก๊าซแบบนี้ประกอบด้วยโดมที่ทำด้วยแผ่นพลาสติก (แผ่นโพลีเอสเตอร์ และ PVC ที่เคลือบด้วย acrylate) สองชั้น ชั้นนอกจะมีลักษณะเป็นรูปทรงกลม และถูกยึดกับฐานคอนกรีตด้วยตัวยึดวงแหวน (Anchor ring) ชั้นในเชื่อมเป็นถุง (Bag) เก็บก๊าซชีวภาพ ช่องว่างระหว่างแผ่นชั้นในและชั้นนอกจะมีอากาศที่เป่าเข้าไป เพื่อทำให้โดมชั้นนอกโป่ง ตึงตลอดเวลา ป้องกันการเสียหายของแผ่นพลาสติกเนื่องจากกระแสลม รูปที่ 6.7 แสดงการเก็บก๊าซชีวภาพในถังเก็บก๊าซแบบโดมสองชั้นและอุปกรณ์ประกอบ นอกจากนี้ยังเป็นการทำให้ความดันของก๊าซชีวภาพในโดมคงที่ ท่อก๊าซจากบ่อผลิตและท่อก๊าซที่ไปใช้ประโยชน์ ต่อผ่านฐานคอนกรีตที่ด้านล่างของโดม ปริมาตรการเก็บแบบนี้ สามารถเก็บได้ตั้งแต่ 100 – 5,000 ลบ.ม. โดยที่โดมอาจมีความสูงถึง 12.7 เมตร

> ถ้าใช้ถังเก็บก๊าซแบบโดมสองชั้นต้องติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดออกซิเจนในท่อก๊าซชีวภาพ เพื่อตรวจสอบอากาศที่อาจการรั่วเข้าไปปนกับก๊าซชีวภาพในกรณีที่แผ่นพลาสติกชั้นในขาดและความดันในถุงชั้นในต่ำกว่าความดันชั้นนอก



รูปที่ 6.7 แสดงการเก็บก๊าซในถังเก็บก๊าซแบบโดมสองชั้น และอุปกรณ์ประกอบ

การเก็บในถังแบบโดมสองชั้น สามารถที่จะเก็บรักษาที่ความดันได้สูงกว่าการเก็บแบบบัลลูนชั้นเดียว และมีทั้งแบบที่ติดตั้งบนถังผลิตก๊าซชีวภาพ (รูปที่ 6.8 ขวามือ) และแบบที่ติดตั้งบนฐานคอนกรีต (รูปที่ 6.8 ซ้ายมือ)



รูปที่ 6.8 แสดงการเก็บก๊าซในถังแบบโดมสองชั้นรูปแบบต่างๆ

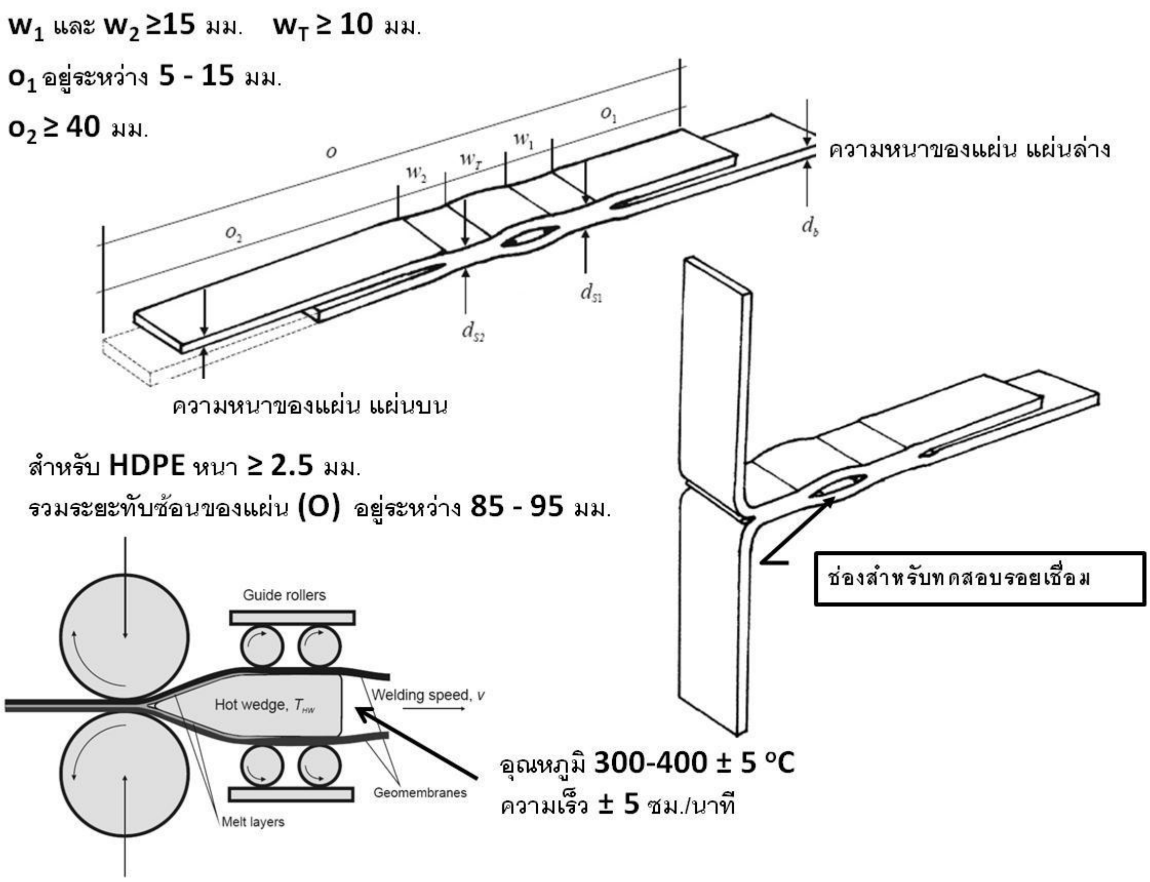
6.1.1.3 การเชื่อมแผ่นพลาสติก

การเชื่อมแผ่น HDPE หรือ PVC ควรใช้ผู้มีความชำนาญในการเชื่อม ติดตั้งและซ่อมแซมเท่านั้น จากสมบัติของ HDPE ที่มีค่าอุณหภูมิหลอมละลาย (Melting point) สูงกว่า 140°ซ. หรือกรณีที่ทำให้มีการอ่อนตัวจนสามารถฉีด (Extruded) ได้ต้องมีอุณหภูมิสูงถึง 200°ซ. ซึ่งวิธีการเชื่อมแผ่น HDPE มี 2 แบบด้วยกัน ได้แก่

ก) การเชื่อมด้วยความร้อนระบบตะเข็บคู่ (Dual hot wedge welding) ซึ่งมีความแข็งแรงสูง วิธีนี้เป็นการเชื่อมต่อแผ่น

ข) การเชื่อมด้วยลวดเชื่อมพลาสติก (HDPE extrusion welding) เป็นการเชื่อมที่มีการใช้ลวด HDPE เติมลงไปในการเชื่อม วิธีนี้ใช้สำหรับเชื่อมตามมุมและการซ่อมเฉพาะบางจุดเท่านั้น

การเชื่อมด้วยความร้อนระบบตะเข็บคู่ อุณหภูมิในการเชื่อมจะต้องสม่ำเสมอต่อเนื่อง โดยสามารถปรับอุณหภูมิสูงสุดไม่เกิน 400°ซ. และในขณะเชื่อม ต้องควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ระหว่าง ±5°ซ. โดยการทาบแผ่นที่ต้องการเชื่อม ต้องมีระยะไม่น้อยกว่า 85 มม รูปที่ 6.9 แสดงการเชื่อมแบบระบบตะเข็บคู่ที่มีช่องสำหรับทดสอบรอยเชื่อม

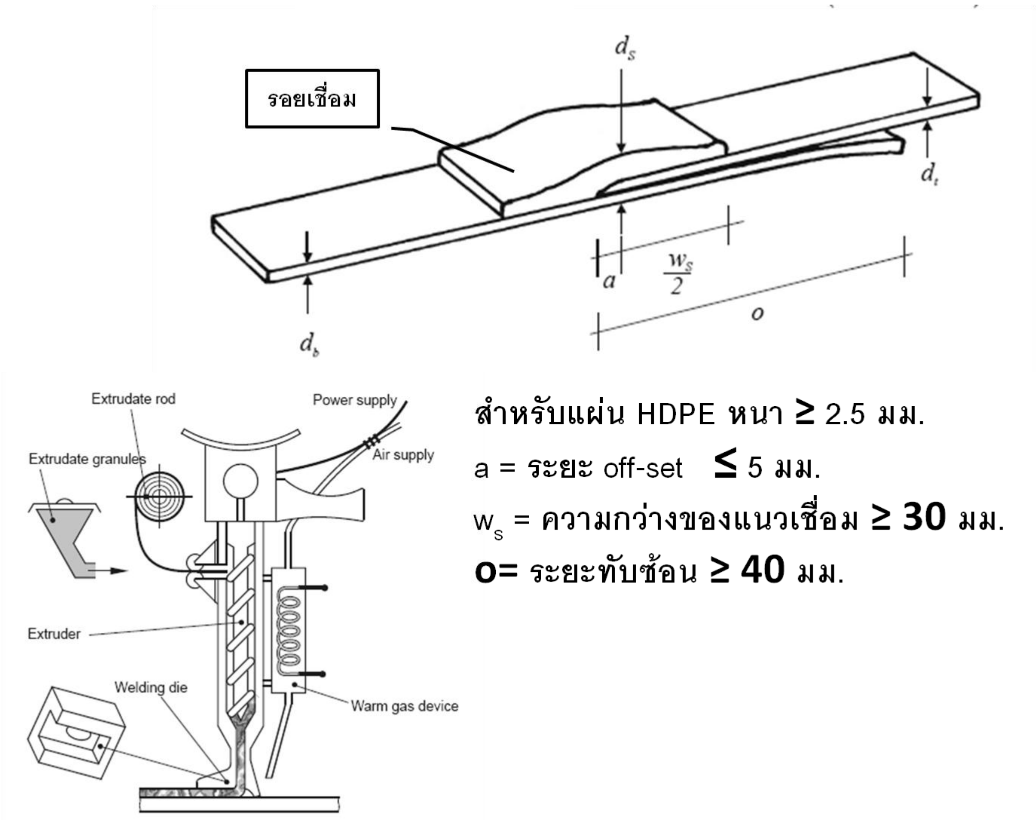


รูปที่ 6.9 แสดงการเชื่อมแบบระบบตะเข็บคู่ (Dual Hot Wedge seam) ที่มีช่องสำหรับทดสอบรอยเชื่อม

(**ที่มา :** 10 Welding of HDPE Geomembranes)

รายละเอียดเกี่ยวกับมาตรฐานการเชื่อมและการทดสอบ สามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จาก Guideline DVS 2225-4:1992 Welding of Geomembranes from PE for lining landfills and Contaminated land (www.dvs-ev.de) หรือ EPA/600/2-88/052:1991-05 : Technical Guideline Document: Inspection Techniques for the Fabrication of Geomembrane Field Seams of US-EPA.

การเชื่อมโดยลวดเชื่อม ตาม DVS 2211:1979 Filler Materials for thermoplastics-Scope, Designation, Requirements and test. เป็นการใช้ลวดพลาสติกที่มีสมบัติเช่นเดียวกับ HDPE ที่ต้องการเชื่อม โดยพิจารณาจากค่าอัตราการไหลของพลาสติกที่ละลาย (Melt mass-flow rate) ซึ่งมีค่าระหว่าง 0.3-1.7 กรัม/10 นาที การเชื่อมแบบลวดเชื่อมพลาสติกและเครื่องเชื่อม แสดงดังรูปที่ 6.10



รูปที่ 6.10 แสดงการเชื่อมแบบลวดเชื่อมพลาสติก (EXTRUSION WELDING)

และเครื่องเชื่อม (**ที่มา :** 10 Welding of HDPE Geomembranes)

การเชื่อมแบบนี้นอกจากความร้อนที่ละลายลวดเชื่อมที่ Extruder แล้ว ยังต้องมีลมร้อนเป่าไปที่แผ่น HDPE ที่ต้องการเชื่อมด้วย โดยอุณหภูมิลมร้อน ควรอยู่ระหว่าง 350 ± 20°ซ. และการทาบแผ่นที่ต้องการเชื่อมต้องมีระยะไม่น้อยกว่า 40 มม.

ข้อควรระวัง: การซ่อมแซมแผ่นพลาสติกที่ชำรุดอย่างปลอดภัย

- ต้องหยุดการป้อนน้ำเสียเข้าระบบ และรอให้ไม่มีการผลิตก๊าซชีวภาพในบ่อนั้น
- ทำการระบายก๊าซชีวภาพออกจากบ่อ ให้ความเข้มข้นต่ำกว่าขีดจำกัดล่างของการติดไฟ (LFL)
- อุปกรณ์ในการเชื่อม/ซ่อมบำรุง ส่วนที่ก่อให้เกิดประกายไฟ เช่น ขดลวดความร้อน แปลงถ่าน เป็นต้น ต้องป้องกันไม่ให้สัมผัสกับก๊าซ
- อุณหภูมิของแผ่นความร้อน หรือลมร้อนในการเชื่อม ไม่ควรสูงเกิน 400°ซ.

6.1.2 การเก็บก๊าซที่ความดันปานกลางและสูง

การเก็บก๊าซที่ความดันปานกลาง (5-20 บาร์เกจ) และความดันสูง (200-300 บาร์เกจ) ถังเก็บจะมีขนาดเล็กลง เนื่องจากต้องการความแข็งแรงมาก วัสดุที่ใช้จะเป็นโลหะ เช่น เหล็ก เหล็กอัลลอย สแตนเลส เป็นต้น ถังเก็บก๊าซชีวภาพที่ความดันสูงแสดงดังรูปที่ 6.11

ในการเก็บก๊าซชีวภาพที่ความดันสูงนั้นจะต้องปรับปรุงคุณภาพของก๊าซชีวภาพ โดยการกำจัดความชื้น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ให้ได้ตามมาตรฐาน เทียบเท่าก๊าซธรรมชาติอัด (Compressed Natural Gas, CNG) ตามประกาศของกรมการขนส่งทางบก เรื่อง “กำหนดมาตรฐานส่วนควบและเครื่องอุปกรณ์ของรถที่ใช้ก๊าซธรรมชาติอัดเป็นเชื้อเพลิง ตามกฎหมายว่าด้วยรถยนต์ พ.ศ.2550” โดยให้ถังเก็บก๊าซต้องเป็นไปตามมาตรฐาน เช่น มอก. 2333, ISO 15501, ECER 110 หรือ ANSI/CSA NGV 2 เป็นต้น และต้องจัดให้มีอุปกรณ์ส่วนควบเพื่อความปลอดภัยที่สำคัญครบถ้วน ได้แก่ ถังก๊าซชนิดทนความดันสูง อุปกรณ์ปรับความดัน อุปกรณ์ระบายความดัน อุปกรณ์แสดงค่าความดัน ลิ้นหัวถังเปิดปิดด้วยมือ (สำหรับกรณีที่มีการติดตั้งถังมากกว่าหนึ่งถัง) ลิ้นเปิดปิดอัตโนมัติ ลิ้นป้องกันการไหลเกิน ลิ้นกันกลับ อุปกรณ์ผสมก๊าซกับอากาศ ตัวกรองก๊าซ เรือนกักก๊าซ ท่อนำก๊าซ ท่อระบายก๊าซ ข้อต่อและอุปกรณ์รับเติมก๊าซ

* มอก: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

ISO: มาตรฐานขององค์กรระหว่างประเทศว่าด้วยมาตรฐาน

ECER: ข้อกำหนดของคณะกรรมการเศรษฐกิจแห่งยุโรป

ANSI/CSA : มาตรฐานของสถาบันมาตรฐานแห่งชาติอเมริกา/สมาคมมาตรฐานแห่งคานาดา

รูปที่ 6.11 แสดงถังเก็บก๊าซชีวภาพที่ความดันสูง

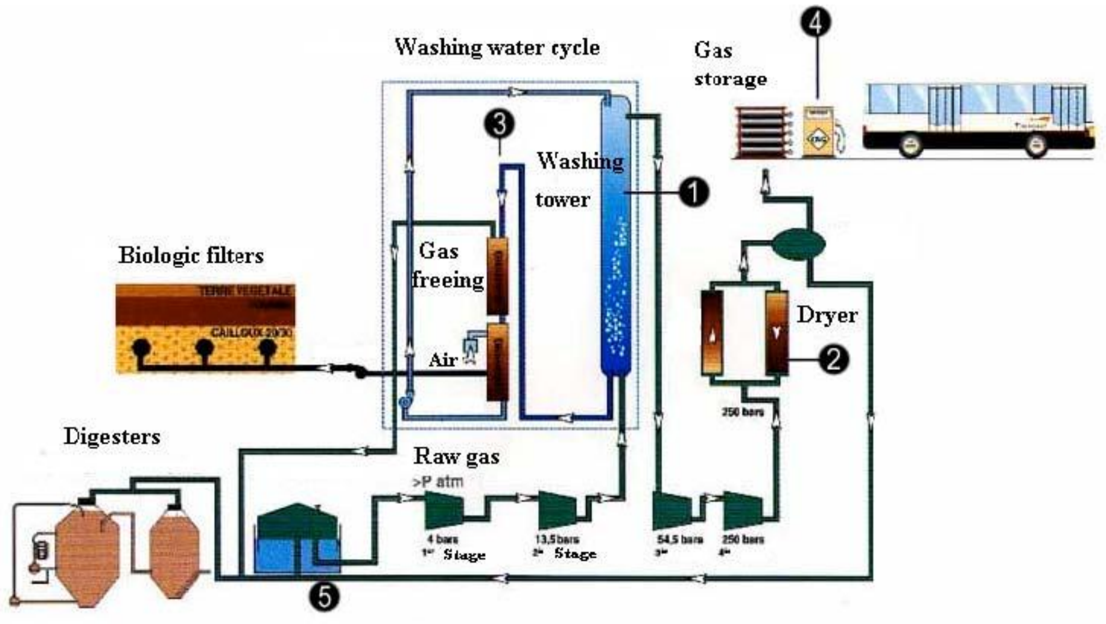
6.1.3 การอัดก๊าซชีวภาพเพื่อเป็นเชื้อเพลิงสำหรับยานยนต์

การใช้ก๊าซชีวภาพเพื่อเป็นเชื้อเพลิงสำหรับยานยนต์ต้องมีการปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพ (ซึ่งจะกล่าวในบทที่ 7) ให้ได้ตามมาตรฐานเทียบเท่าก๊าซธรรมชาติอัด (CNG) แล้วจึงทำการเพิ่มความดันก๊าซชีวภาพเพื่อบรรจุลงถัง โดยความดันในถังก๊าซประมาณ 200-250 บาร์เกจ สำหรับกระบวนการเพิ่มความดันของก๊าซชีวภาพนั้นจะเพิ่มความดันเป็นขั้นๆ อาจจะเป็น 3 ขั้น (stages) หรือ 4 ขั้นก็ได้ ในระหว่างการเพิ่มความดันนั้น จะมีการทำให้ก๊าซชีวภาพให้มีความบริสุทธิ์ขึ้น โดยมีลำดับการกำจัด เช่น กำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ กำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นออกจากก๊าซชีวภาพตามลำดับ ตัวอย่างเช่น กระบวนการอัดก๊าซชีวภาพเพื่อเป็นเชื้อเพลิงสำหรับรถยนต์ จากรูปที่ 6.12 แสดงตัวอย่างของโรงงาน Lille-Marquette ผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อเป็นเชื้อเพลิงสำหรับยานยนต์ ในประเทศฝรั่งเศส

> การอัดก๊าซชีวภาพโดยที่ไม่มีการกำจัดก๊าซเจือปนอื่นๆ เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และความชื้นออก มีผลทำให้เกิดการกัดกร่อนถังความดันและเกิดการระเบิดได้ ดังนั้นไม่ควรดำเนินการโดยผู้ไม่ชำนาญ

ขั้นตอนการเพิ่มความดันจะเป็น 4 ขั้น โดยเริ่มจากก๊าซชีวภาพในถังเก็บ (5) ที่ความดันประมาณ 0-0.02 บาร์ จะถูกเพิ่มความดันไปถึงประมาณ 4 บาร์ ในขั้นแรก และในขั้นที่ 2 จะถูกเพิ่มความดันเป็น 13.5 บาร์ ก่อนที่ถูกส่งเข้าไปยังที่ด้านล่างหอดูดซึม (1) เพื่อกำจัดก๊าซ CO_2 และ H_2S โดยใช้น้ำเย็นเป็นสารดูดซึม spray จากด้านบน เมื่อก๊าซชีวภาพสัมผัสกับน้ำเย็น ก๊าซ CO_2 และ H_2S จะละลายน้ำ (มากกว่ามีเทน) ซึ่งทำให้ก๊าซชีวภาพที่ออกจากหอดูดซึมทางด้านบนจะมีความเข้มข้นของมีเทนสูงขึ้นและอิ่มตัวด้วยน้ำ สำหรับน้ำที่มีก๊าซ CO_2 และ H_2S ละลายอยู่มาก จะถูกส่งไปยัง หอ stripping (3) ที่ความดันบรรยากาศ และที่หอ stripping นี้จะมีการเป่าอากาศเข้าไป เพื่อช่วยไล่ก๊าซ CO_2 และ H_2S ออกจากน้ำ อากาศที่มี H_2S จะเข้าไประบบ Bio-filters เพื่อกำจัดก๊าซ H_2S อีกทอดหนึ่ง ส่วนน้ำที่ CO_2 และ H_2S ถูกไล่ออกไปแล้ว จะถูกนำกลับไปละลายก๊าซ CO_2 และ H_2S อีกครั้งที่หอดูดซึม

ก๊าซที่ผ่านการกำจัด CO_2 และ H_2S แล้ว จะถูกเพิ่มความดันเป็น 54.5 บาร์เกจ ในขั้นที่ 3 และ เพิ่มอีกครั้งในขั้นที่ 4 จนถึง 250 บาร์เกจ ก่อนที่จะผ่านหน่วยลดความชื้น (2) เพื่อดึงน้ำออกกลายเป็นก๊าซมีเทนแห้ง (ยังไม่ได้เป็นของเหลว) และส่งไปยังถังเก็บ (4)



รูปที่ 6.12 แสดงตัวอย่างกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อเป็นเชื้อเพลิงสำหรับรถยนต์

(**ที่มา :** Lille–Marquette biogas plant)

6.2 ระบบท่อก๊าซ

6.2.1 อุณหภูมิที่ออกแบบและอุณหภูมิใช้งาน

เพื่อเป็นการเลือกใช้วัสดุให้เหมาะสม ดังนั้นควรทราบถึงอุณหภูมิของก๊าซชีวภาพ ซึ่งโดยทั่วไปอุณหภูมิของก๊าซจะประมาณเท่ากับอุณหภูมิของน้ำในบ่อผลิตก๊าซชีวภาพ และอุณหภูมิของก๊าซในช่วงเวลากลางวันของประเทศไทย จะสูงไม่เกิน 50°ซ. (ซึ่งในกรณีนี้ ครอบคลุมช่วงอุณหภูมิการหมักที่เป็นแบบ Thermophillic ถ้ามีการเลือกใช้ช่วงการหมักที่อุณหภูมิสูง) ขณะเดียวกันในท่อก๊าซด้านหลังจากเครื่องอัดความดันหรือ Blower จะมีอุณหภูมิสูงเนื่องมาจากการใส่พลังงานในการเพิ่มความดันเข้าไป ดังนั้นอุณหภูมิของก๊าซที่ท่อทางส่งจะขึ้นอยู่กับความดันที่อัด

โดยสามารถคำนวณอุณหภูมิที่ออกจากเครื่องอัดความดันหรือ Blower ได้โดยสมการ

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \qquad \text{...(6.1)}$$

เมื่อ k = Cp/Cv (biogas = 1.3)

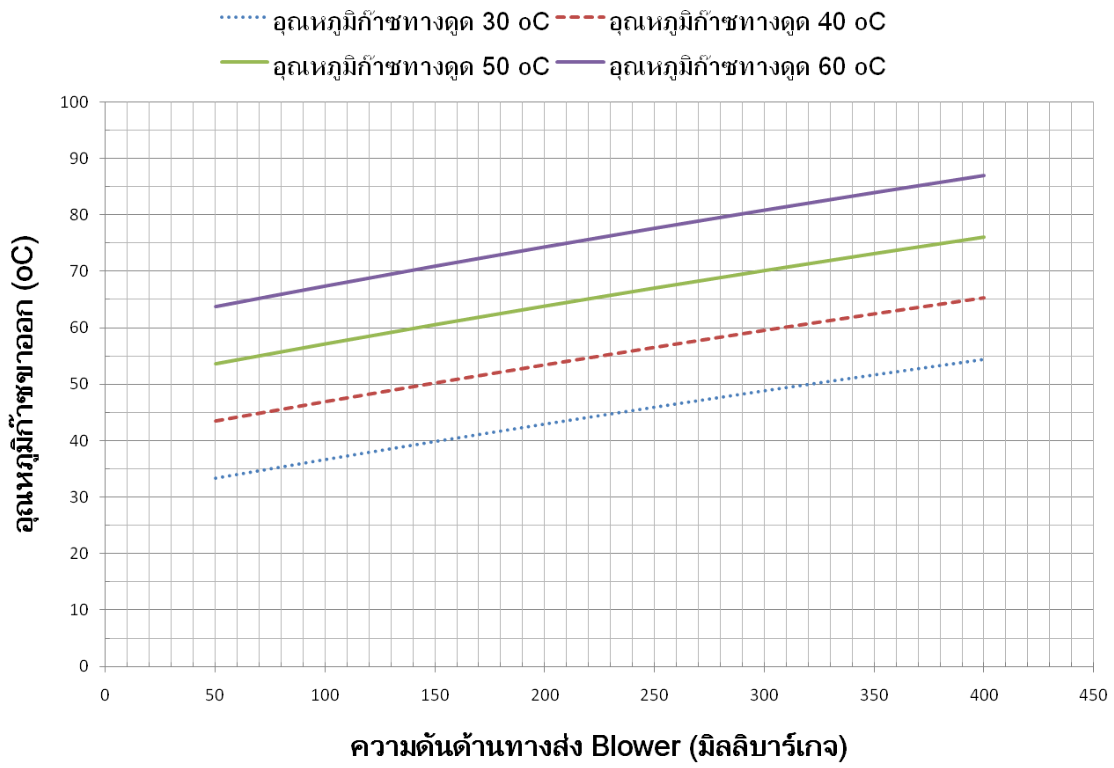
T_1 = อุณหภูมิขาเข้า Blower (เคลวิน)

T_2 = อุณหภูมิขาออกจาก Blower (เคลวิน)

P_1 = ความดันด้านทางดูด Blower (กิโลพาสคาล)

P_2 = ความดันด้านทางส่ง Blower (กิโลพาสคาล)

ดังนั้น ค่าอุณหภูมิที่จะใช้ในการเลือกวัสดุของท่อก๊าซและใช้ในการเลือกขนาดของท่อร่วมกับความดันใช้งานของระบบท่อ โดยอุณหภูมิสำหรับการออกแบบท่อ ควรคิดเป็น 1.5 เท่าของอุณหภูมิใช้งาน รูปที่ 6.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิก๊าซขาออก (°C) กับความดันด้านทางส่ง Blower (มิลลิบาร์เกจ) ที่ค่าอุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 6.13 แสดงอุณหภูมิของก๊าซที่ท่อทางส่งของ Blower

6.2.2 ความดันที่ออกแบบและความดันใช้งาน

สำหรับระบบผลิตก๊าซชีวภาพนั้น การลำเลียงก๊าซชีวภาพในระบบท่อ ทำในสภาวะที่ความดันไม่เกิน 680 มิลลิบาร์เกจ (หรือความสูงน้ำ 680 เซนติเมตร.) ซึ่งในระบบท่อลำเลียงก๊าซชีวภาพควรมีการติดตั้งวาล์วระบายความดันไว้เพื่อป้องกันท่อเสียหายเมื่อมีความดันเกิน ในการตั้งค่าความดันเพื่อการระบายก๊าซให้ตั้งที่ค่าความดันสูงสุดของความดันใช้งาน

การกำหนดคุณลักษณะของท่อนั้น จะระบุเป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อและและความหนาของท่อตามความดันที่ใช้งาน เช่น ตัวเลขระดับความหนาของท่อ (Schedule number) หรือ อาจจะระบุเป็น Standard Diameter Ratio (SDR) หรือ Pressure Nominal (PN)

โดยที่ Standard Dimension Ratio, SDR คือ

$$SDR = \frac{OD}{t} \qquad \text{...(6.2)}$$

เมื่อ *OD* = เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อ (นิ้ว)

t = ความหนาต่ำสุดของท่อ (นิ้ว)

ในการเลือกท่อสำหรับใช้ในการลำเลียงก๊าซชีวภาพนั้น ควรใช้ท่อสแตนเลสมากกว่าท่อที่เป็นโลหะอื่นๆ (เช่น ท่อเหล็ก ทองแดง) เนื่องจากทนการกัดกร่อนจากก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพได้สูง ส่วนท่อที่เป็นพลาสติก ได้แก่ ท่อ HDPE และ CPVC หรือ UPVC ก็เป็นที่นิยมใช้กัน

ระดับความดันใช้งานของท่อตามมาตรฐานของยุโรป ระบบ PN (สำหรับน้ำที่อุณหภูมิ 20°ซ.) คือ

- PN 2.5 – max pressure 2.5 bar
- PN 4 – max pressure 4 bar
- PN 6 – max pressure 6 bar
- PN 10 – max pressure 10 bar
- PN 16 – max pressure 16 bar

สำหรับท่อ HDPE ควรใช้วัสดุไม่ต่ำกว่าเกรด PE80 ซึ่งเป็นเกรดสำหรับการใช้งานกับระบบท่อก๊าซธรรมชาติที่ความดันไม่เกิน 4 บาร์เกจ นอกจากนี้การเลือกขนาดความหนาของท่อโดยดูจากค่า pressure rating ซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิ ดังตารางที่ 6.2 ที่แสดงสมบัติด้านความดันใช้งานของท่อ HDPE PE100 และ PE 80 จะเห็นว่าควรใช้ท่ออย่างต่ำ PN 6 เมื่ออุณหภูมิในท่อไม่เกิน 40°ซ. หรือจากตารางที่ 6.3 แสดงขนาดท่อ HDPE ที่นิยมใช้ในระบบก๊าซชีวภาพซึ่ง ถ้าใช้ค่าตัวเลขสัดส่วน SDR ในการระบุความหนาท่อ ควรใช้ SDR 11–17 ไม่ควรเลือก SDR ที่สูงกว่า 17 เนื่องจากผนังท่อบางเกินไปและหาข้อต่อยาก

ตารางที่ 6.2 แสดงสมบัติด้านความดันใช้งานของท่อ HDPE PE100 และ PE80

HDPE Pipe (PE/PN)	Allowable working pressure at various temperature (bars)				
	20 °C	25 °C	30 °C	35 °C	40 °C
PE100 PN 6.3	6.3	5.86	5.48	5.04	4.66
PE100 PN 8	8.0	7.44	6.96	6.40	5.92
PE100 PN 10	10.0	9.30	8.70	8.00	7.40
PE100 PN 12.5	12.5	11.63	10.88	10.00	9.25
PE100 PN 16	16.0	14.88	13.92	12.80	11.84
PE80 PN 6.3	6.3	5.67	5.10	4.54	3.91
PE80 PN 8	8.0	7.20	6.48	5.76	4.96
PE80 PN 10	10.0	9.00	8.10	7.20	6.20
PE80 PN 12.5	12.5	11.25	10.13	9.00	7.75
PE80 PN 16	16.0	14.40	12.96	11.52	9.92

ที่มา: เอกสารของ บริษัท KWH pipe

ตารางที่ 6.3 แสดงขนาดท่อ HDPE ที่นิยมใช้ในระบบก๊าซชีวภาพ

ท่อ HDPE งานรับแรงดัน ผลิตตามมาตรฐาน DIN 8075/75-1999 PE100									
HDPE pipes manufactured according to DIN 8074/75-1999 PE100									
ขนาด O.D.(Size)		**PN 10** *[SDR 17]*		**PN 16** *[SDR 11]*		**PN 20** *[SDR 9]*		**PN 25** *[SDR 7.4]*	
ม.ม. (mm.)	นิ้ว (inch)	หนา (ม.ม.) T (mm.)	น้ำหนัก (กก./ม.) W (kg/m)	หนา (ม.ม.) T (mm.)	น้ำหนัก (กก./ม.) W (kg/m)	หนา (ม.ม.) T (mm.)	น้ำหนัก (กก./ม.) W (kg/m)	หนา (ม.ม.) T (mm.)	น้ำหนัก (กก./ม.) W (kg/m)
32	1″	1.9	0.190	2.9	0.270	3.6	0.330	4.4	0.390
40	1 ¼″	2.4	0.300	3.7	0.430	4.5	0.510	5.5	0.600
50	1 ½″	3.0	0.450	4.6	0.670	5.6	0.790	6.9	0.940
63	2″	3.8	0.720	5.8	1.050	7.1	1.260	8.6	1.470
75	2 ½″	4.5	1.020	6.8	1.470	8.4	1.760	10.3	2.090
90	3″	5.4	1.460	8.2	2.120	10.1	2.540	12.3	3.000
110	4″	6.6	2.170	10.0	3.140	12.3	3.780	15.1	4.490
140	5″	8.3	3.460	12.7	5.080	15.7	6.110	19.2	7.250
160	6″	9.5	4.520	14.6	6.670	17.9	7.960	21.9	9.440
225	8″	13.4	8.930	20.5	13.100	25.2	15.800	30.8	18.600
280	10″	16.6	13.700	25.4	20.300	31.3	24.300	38.3	28.900
315	12″	18.7	17.400	28.6	25.600	35.2	30.800	43.1	36.500
400	16″	23.7	28.000	36.3	41.300	44.7	49.600	54.7	58.800

มีค่าความเค้นตามแนวเส้นรอบวงเท่ากับ 8.0 เมกะพาสคัล

การตรวจสอบรอยรั่วด้วยวิธีอัดด้วยแรงดันน้ำที่ความดัน 1.5 เท่าของความดันที่ออกแบบ แต่ไม่ต่ำกว่า 1 บาร์เกจ ระยะเวลาไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง โดยระดับความดันคงที่ และตรวจสอบรอยรั่วซึม การทดสอบด้วยการใช้น้ำอัดด้วยความดัน เป็นวิธีที่ปลอดภัยหาจุดรั่วซึมได้ง่าย แต่ต้องระวังน้ำเข้าเครื่องจักรและอุปกรณ์ เช่น Blower, Flame Arrester เป็นต้น ควรมีหน้าแปลนปิดกั้นไว้

กรณีที่ทดสอบด้วยวิธีอัดด้วยอากาศที่ความดัน 1.1 เท่าของความดันออกแบบ แต่ไม่ต่ำกว่า 1 บาร์เกจ ระยะเวลาไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง โดยระดับความดันคงที่ และตรวจสอบรอยรั่วซึม โดยอาจใช้ฟองน้ำชุบสารละลายที่มีฟอง (เช่น น้ำยาล้างจาน น้ำสบู่ หรือ gas detector) เพื่อสังเกตจุดรั่วซึม ก่อนที่จะทำการแก้ไขจุดรั่วซึมให้ระบายความดันให้เท่ากับความดันบรรยากาศก่อน และก่อนใช้งานก๊าซชีวภาพ ต้องไล่อากาศออกจากท่อก่อน

ที่มา : ปรับปรุงจากข้อแนะนำการทดสอบความดันในท่อก๊าซธรรมชาติของ บริษัท ปตท. จำกัด(มหาชน)

6.2.3 การกำหนดขนาดท่อสำหรับก๊าซชีวภาพ

โดยทั่วไปการกำหนดขนาดท่อก๊าซนั้น จะขึ้นอยู่กับปริมาณก๊าซชีวภาพที่ต้องการขนถ่าย ทั้งนี้ในการเลือกขนาดของท่อควรคำนึงในเรื่องเงินลงทุนและค่าใช้จ่ายไฟฟ้าในการลำเลียงก๊าซชีวภาพ ถ้าเลือกท่อขนาดใหญ่จะมีราคาสูงแต่ความดันในท่อต่ำ ทำให้เสียค่าไฟฟ้าสำหรับส่งก๊าซชีวภาพต่ำ ในขณะที่ถ้าเลือกท่อขนาดเล็กแม้จะใช้เงินลงทุนในช่วงแรกต่ำ แต่จะต้องเสียค่าไฟฟ้าในการส่งก๊าซสูง ดังนั้นควรเลือกขนาดของท่อให้เหมาะสมตั้งแต่เริ่มต้นโครงการ โดยการกำหนดขนาดของท่อควรที่จะ

- ให้สามารถรองรับอัตราการไหลได้ 1.3 เท่าของอัตราการไหลเฉลี่ย หรือ
- ให้สามารถรองรับอัตราการไหลได้ 1.1 เท่าของอัตราการไหลสูงสุด

โดยการหาขนาดของท่อ หาได้โดยความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและความดันลดในเส้นท่อ จากสมการของ Spitzglass ซึ่งโดยทั่วไปใช้สมการนี้ในช่วงความดัน $\leq$ 68 มิลลิบาร์เกจ

$$Q = \frac{3350}{Sp.gr_{gas}^{0.5}}\left(\frac{h_1-h_2}{L}\right)^{0.5}\left(\frac{d^5}{1+\frac{3.6}{d}+0.03d}\right)^{0.5} \qquad \text{........................(6.3)}$$

เมื่อ Q = อัตราการไหลของก๊าซ (ลบ.ฟุต./ชม.)

$Sp.gr_{gas}$ = ค่าความถ่วงจำเพาะของก๊าซผสม

h_1-h_2 = ความแตกต่างความดัน(ความดันลด) ระหว่างจุดที่ 1 และ 2 (นิ้ว น้ำ)

d = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ (นิ้ว)

L = ความยาวท่อ (ฟุต)

โดยส่วนใหญ่ กำหนดให้ความดันลดในเส้นท่อจากต้นทางถึงปลายทางที่ใช้งาน (ไม่รวมความดันลดของอุปกรณ์ เช่น อุปกรณ์ดักละอองน้ำ อุปกรณ์กำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ เป็นต้น) ไม่ควรเกิน 10% ของความดันที่ท่อทางส่ง Blower ดังนั้น จากตารางที่ 6.4 แสดงอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพที่ขนาดท่อต่างๆ ทำให้สามารถเลือกขนาดท่อให้เหมาะสมตามอัตราการไหลที่ต้องการ

ตารางที่ 6.4 แสดงอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพที่ขนาดท่อต่างๆ

ท่อHDPE (SDR11) (นิ้ว)	**อัตราการไหล** (ลบ.ม./ชม.) **ในท่อยาว 100 เมตร เมื่อความดันที่ทางส่งของ Blower 250 mbar**		
	ที่ความดันลด 12 mbar	**ที่ความดันลด 23 mbar**	**ที่ความดันลด 32 mbar**
2	39	54	63
3	127	176	207
4	300	414	488
6	910	1,258	1,483
8	1,875	2,594	3,058
10	3,358	4,645	5,476
12	5,553	7,681	9,055
16	11,699	16,185	19,078

เมื่อเลือกขนาดท่อได้แล้ว ควรพิจารณาตรวจสอบความเร็วของก๊าซชีวภาพในท่อที่เลือกให้เหมาะสม ซึ่งความเร็วในท่อควรที่จะไม่สูงเกินข้อแนะนำ เนื่องจากอาจจะทำให้เกิดการสึกกร่อนจากการเสียดสี ท่อชำรุด และก่อให้เกิดเสียงดังในท่อได้ โดยควร

- ให้มีความเร็วของก๊าซในท่อประธาน ประมาณ 5 – 10 เมตร/วินาที
- ให้มีความเร็วของก๊าซในท่อย่อย ประมาณ 10 – 15 เมตร/วินาที
- ความเร็วในท่อก๊าซชีวภาพไม่ควรเกิน ความเร็ว sonic คือ 357 เมตร/วินาที เพราะจะทำให้เกิดเสียงดัง

การกำหนดความเร็วในท่อก๊าซที่เป็นท่อระบาย (Vent) หรือท่อทางดูดก่อนเข้า Blower ควรกำหนดความเร็วก๊าซชีวภาพให้ต่ำประมาณครึ่งหนึ่งของความเร็วของก๊าซในท่อทางส่ง

6.2.4 การหาความดันลดหรือความดันสูญเสีย (Pressure drop/Head lose) ในระบบท่อ

การหาความดันลดในท่อก๊าซ เพื่อเป็นการคำนวณถึงพลังงานที่ต้องใช้ในการส่งก๊าซในท่อ ซึ่งใช้ในการออกแบบระบบท่อก๊าซและเครื่องเพิ่มความดัน โดยการคำนวณจะเป็นเช่นเดียวกับการหาความดันลดในท่อสำหรับของเหลว โดยความดันลดในระบบท่อ จำแนกออกเป็น

- การสูญเสียหลัก (Major loss) เป็นการสูญเสียพลังงานเนื่องจากการไหลของของไหลในท่อตรง โดยใช้สมการของ Spitzglass หาความดันลด (h_f) จากการที่รู้ค่าอัตราการไหลของก๊าซ

$$h_f = L \times Sp.gr_{gas} \left(\frac{Q}{3350}\right)^2 \left(\frac{1+\frac{3.6}{d}+0.03d}{d^5}\right) \qquad \text{.......................(6.4)}$$

โดยกรณีนี้จากสมการ h_f มีหน่วยเป็น นิ้วน้ำ ให้คูณด้วย 0.025 เพื่อเปลี่ยนเป็น เมตรน้ำ หรือใช้ค่าจากกราฟในรูปที่ 6.14 แสดงความสัมพันธ์ความดันลดในท่อตรงกับอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ

- การสูญเสียรอง (Minor loss) เป็นการสูญเสียพลังงานเนื่องจากการไหลของของไหลในข้อต่อ วาล์ว และอุปกรณ์ ต่างๆ

โดยเราสามารถหาค่าความดันสูญเสียรองโดยสมการ

$$h_f = \sum K \frac{v^2}{2g} \qquad \text{...............................(6.5)}$$

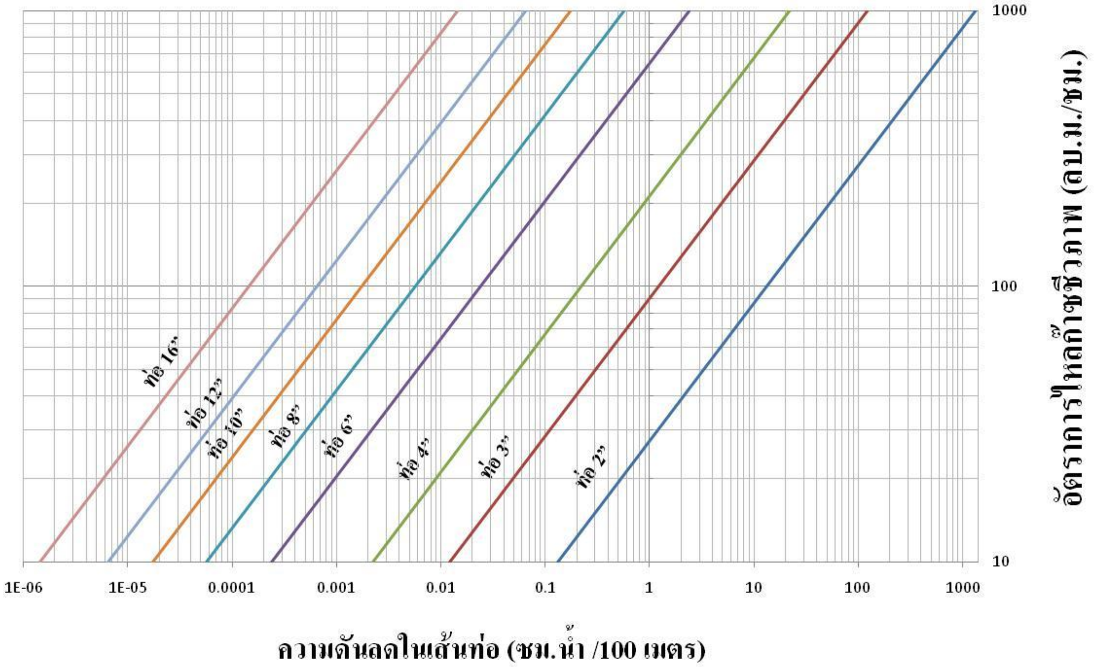
โดย h_f = Head loss (เมตร น้ำ)

v = ความเร็วของก๊าซในท่อ (เมตร/วินาที)

g = ค่าความเร่ง = 9.8 (เมตร/วินาที^{2})

K = Minor loss coefficient ของข้อต่อ

(ตารางที่ 6.5 แสดงค่า K ของ วาล์วและข้อต่อแบบต่างๆ)



รูปที่ 6.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความดันลดในท่อตรงกับอัตราการไหลก๊าซชีวภาพ

ตารางที่ 6.5 แสดงค่า Minor Loss Coefficient (ไม่มีหน่วย)

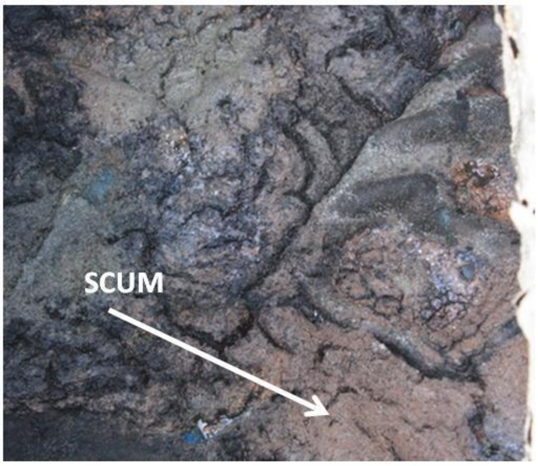
Fitting	K	Fitting	K
Valves:		***Elbows:***	
Globe, fully open	10	Regular 90°, flanged	0.3
Angle, fully open	2	Regular 90°, threaded	1.5
Gate, fully open	0.15	Long radius 90°, flanged	0.2
Gate 1/4 closed	0.26	Long radius 90°, threaded	0.7
Gate, 1/2 closed	2.1	Long radius 45°, threaded	0.2
Gate, 3/4 closed	17	Regular 45°, threaded	0.4
Swing check, forward flow	2		
Swing check, backward flow	Infinity	***Tees:***	
		Line flow, flanged	0.2
180° return bends:		Line flow, threaded	0.9
Flanged	0.2	Branch flow, flanged	1.0
Threaded	1.5	Branch flow, threaded	2.0
Suddenly enlargement	0.16-0.92	Suddenly Contraction	0.18-0.49

ที่มา : www.lmnoeng.com/surface.htm

ความดันลดในระบบท่อก๊าซชีวภาพทั้งหมด คือ ผลรวมของการสูญเสียหลัก การสูญเสียรอง และความดันสูญเสียในอุปกรณ์ต่างๆ

6.2.5 การกำหนดจุดดึงก๊าซออกจากบ่อผลิตก๊าซชีวภาพ

โดยทั่วไปการวางท่อก๊าซออกจากบ่อ/ถังผลิตก๊าซชีวภาพนั้น จะใช้ท่อวางในแนวดิ่งหรือแนวนอนก็ได้ แต่ให้ปลายท่ออยู่เหนือระดับน้ำ อย่างน้อย 50 ซม. เพื่อป้องกันการที่โฟม (Foam) หรือคราบ (scum) ที่ผิวหน้าติดเข้ามาขวางการไหลของก๊าซชีวภาพ แสดงดังรูปที่ 6.15 นอกจากนี้ การติดตั้งในแนวนอนจะต้องคำนึงถึงการที่อาจจะมีน้ำมาขวางทางการไหลหรือการที่แผ่นพลาสติกตกลงมาคลุมปากท่อ



รูปที่ 6.15 แสดงลักษณะของโฟมและคราบ (scum) ภายในบ่อก๊าซชีวภาพ

นอกจากนี้จุดที่ดึงก๊าซออกจากบ่อ/ถังผลิตก๊าซชีวภาพ ควรมีหลายจุดตามรูปที่ 6.16 หรือขนาดท่อต้องใหญ่พอ เพื่อไม่ให้มีความดันลดมากเกินไป ตัวอย่างเช่น ถ้าด้านบนของบ่อผลิตก๊าซชีวภาพที่ถูกคลุมด้วยแผ่นพลาสติก ซึ่งโดยทั่วไปจะยอมให้มีความดันได้ไม่เกิน 5 mbar หรือ 5 ซม.น้ำ เพื่อที่จะให้ก๊าซไหลไปที่ทางดูดของ Blower ได้ โดยที่ความดันบริเวณทางดูดของ Blower ไม่เป็นศูนย์หรือสูญญากาศ ดังนั้น ความดันลดรวมของก๊าซในท่อด้านฝั่งทางดูด (จากบ่อไปถึง Blower) ไม่ควรที่จะมีความดันลดมากเกิน 5 มิลลิบาร์เกจ (หรือ 5 ซม.น้ำ) ถ้าคำนวณเฉพาะตรงส่วนของท่อที่ก๊าซออกจากบ่อ ควรที่จะมีความเร็วของก๊าซในท่อประมาณ 1-2 เมตร/วินาที ดังนั้นสามารถนำค่าความเร็วในท่อไปกำหนดขนาดท่อและจำนวนท่อที่ออกจากบ่อได้

รูปที่ 6.16 แสดงการต่อท่อออกจากบ่อผลิตก๊าซชีวภาพหลายท่อ

6.2.6 วัสดุที่ใช้ทำท่อก๊าซชีวภาพ

วัสดุที่ใช้สำหรับท่อนั้นต้องเลือกให้เหมาะสมกับความดันและอุณหภูมิของก๊าซในการขนถ่าย โดยวัสดุที่มีใช้กันโดยไม่มีการกัดกร่อน ได้แก่ ท่อ HDPE CPVC และท่อสแตนเลส เป็นต้น โดยท่อที่เป็นพลาสติกจะมีราคาที่ถูกกว่าท่อสแตนเลส แต่จะมีความแข็งแรงทนทานน้อยกว่า มีโอกาสแตกหรือหัก เนื่องจากอุบัติเหตุง่ายกว่า และในส่วนใหญ่ในส่วนของท่อก๊าซที่มีอุณหภูมิสูงหรือความดันสูง ควรที่จะใช้ท่อที่เป็นสแตนเลส

ข้อแนะนำ:

- ท่อ PVC ไม่เหมาะกับการใช้งานสำหรับท่อก๊าซ เนื่องจากไม่มีการใส่สารต้าน UV และทนต่ออุณหภูมิได้ไม่สูง
- ท่อ HDPE จะสามารถใช้งานกับท่อก๊าซได้ดีกว่าท่อ PVC เนื่องจากสามารถทำงานในช่วงอุณหภูมิสูงกว่า
- ท่อบริเวณที่อยู่ด้านทางส่งของ Blower (ที่ใกล้ Blower) จะมีอุณหภูมิสูงควรที่จะใช้ท่อสแตนเลส

6.2.7 การกำหนดสีของท่อ

เพื่อให้เกิดความเป็นระเบียบและง่ายสำหรับการแยกแยะท่อ ซึ่งจะช่วยเพิ่มความปลอดภัยในการปฏิบัติงานซ่อมบำรุงต่างๆ ท่อที่เกี่ยวข้องกับระบบก๊าซชีวภาพควรจะมีการทาสี หรือคาดแถบสี เพื่อระบุชนิดของก๊าซหรือของเหลวที่อยู่ในท่อ พร้อมระบุตัวหนังสือ เช่น ถ้าเป็นก๊าซชีวภาพ อาจจะระบุ "Biogas" ด้วยสีดำ และมีลูกศรบอกทิศทางการไหลของก๊าซทุก ๆ ระยะ 6 เมตร หรือทุก ๆ ที่ที่มีการเปลี่ยนทิศของท่อหรือท่อแยกย่อย ไว้ที่ท่อ ตามคำแนะนำดังตารางที่ 6.6

ตารางที่ 6.6 แสดงตัวอย่างการกำหนดสีและระบุตัวอักษรของท่อ

ท่อสำหรับ	สีของท่อ	การระบุตัวอักษร
ท่อน้ำเสียเข้าระบบ	สีเทา	น้ำเสียเข้า
ท่อวนน้ำเสีย	สีเทา คาดเหลือง	วนน้ำเสีย
ท่อน้ำเสียออกจากถังผลิตก๊าซชีวภาพ	สีเทา	น้ำเสียออก
ท่อดึงตะกอนทิ้ง	น้ำตาล คาดส้ม	ตะกอนทิ้ง
ท่อวนตะกอน	น้ำตาล คาดเหลือง	วนตะกอน
ท่อก๊าซชีวภาพ	สีเหลือง/ส้ม/แดง	ก๊าซชีวภาพ หรือ Biogas

ที่มา ; ปรับปรุงจาก Recommended Standards for Water Works and Recommended Standards for Wastewater Facilities (The "Ten States Standards")
www.dep.state.pa.us/dep/deputate/waterops/redesign/TablesNFormulas/Pages/plantpipecolor.htm

โดยขนาดของแถบสีและตัวอักษรใช้ตามตารางที่ 6.7

ตารางที่ 6.7 แสดงตัวอย่างการกำหนดขนาดของแถบสี และตัวอักษร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ	ขนาดความหนาของแถบสี	ความสูงของตัวอักษร
1-2 นิ้ว	20 เซนติเมตร	ใช้ป้ายแขวนตามความเหมาะสม
2-4 นิ้ว	20 เซนติเมตร	3 เซนติเมตร
มากกว่า 4 นิ้ว	40 เซนติเมตร	6.5 เซนติเมตร

ที่มา : ข้อกำหนดสัญลักษณ์มาตรฐานสีของระบบท่อของ ปตท.

6.2.8 การวางท่อ และการกำหนดระยะของ Support

ในการวางท่อก๊าซชีวภาพส่วนใหญ่ควรที่จะวางอยู่เหนือพื้นดิน เพื่อความสะดวกในการตรวจสอบ ซ่อมบำรุง และการระบายน้ำออกจากท่อ สำหรับท่อก๊าซในแนวนอน ควรมีการวางท่อให้มีความลาดเอียง (Slope) 1:100 และต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์ระบายน้ำในจุดที่ต่ำที่สุด ท่อที่วางเหนือพื้นดินควรวางอยู่บนตัวรองรับ (Support) แสดงดังรูปที่ 6.17 หรือที่แขวน (Hanger) ในระดับที่เหมาะสม

ถ้าอยู่ข้างทางสัญจร จำเป็นต้องมีแผงป้องกันและติดป้ายสัญญาณเตือนหรือกรณีที่แขวนท่อ (Hangers) หรือยกระดับให้สูงพ้นจากการสัญจรของยานพาหนะ และมีป้ายสัญญาณบอก/เตือนระดับ ช่วงระยะห่างสำหรับการรองรับหรือแขวนท่อควรมีระยะที่เหมาะสม เพื่อป้องกันการที่ท่อตกท้องช้างแล้วก่อให้เกิดการท่วมขังของน้ำไปขัดขวางการไหลของก๊าซ ดังแสดงในตารางที่ 6.8

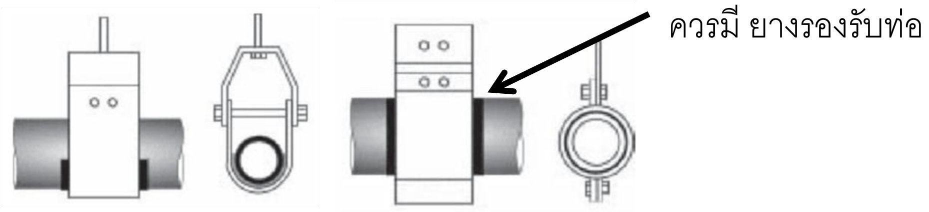
รูปที่ 6.17 แสดงการวางท่อที่มี Support

ตารางที่ 6.8 แสดงช่วงระยะห่างของตัวรองรับที่เหมาะสมสำหรับท่อก๊าซ

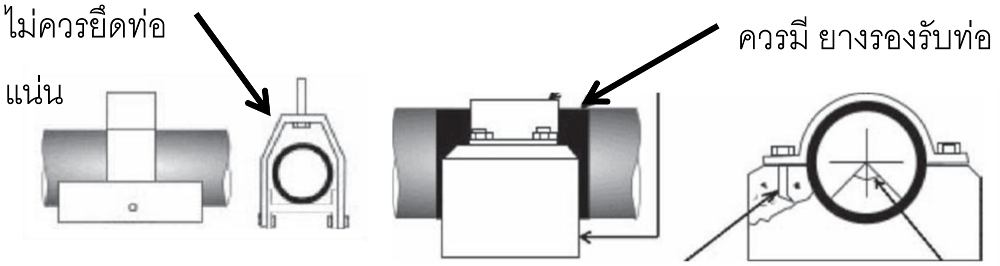
ขนาดท่อ (นิ้ว)	**ระยะห่างของตัวรองรับ** (เมตร)		
	ท่อสแตนเลส	**ท่อ PVC** (ที่ 37°ซ.)	**ท่อ HDPE** (SDR11)
1/2 – 3/4	2.5	1.3	0.7
1 – 2	3.5	1.6	1.0
4	4.5	2	1.8
6	5.9	2.4	2.2
8	7.3	2.9	2.5
10	8.4	No data	2.8
12	9.0	No data	3.0
14	10.4	No data	3.2
16	11.1	No data	3.4

ที่มา : Plastic Piping Handbook และ www.engineeringtoolbox.com

ในการยึดท่อกับตัวรองรับทำได้หลายรูปแบบด้วยกัน ดังรูปที่ 6.18 โดยในการยึดท่อนั้นต้องไม่ทำการยึดแน่นมาก เนื่องจากท่อจะมีการยืดหดตัวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยควรมีแผ่นยางรองรับตัวยึดท่อ



ลักษณะของตัวยึดแขวน **(Hangers)**



ลักษณะของตัวรองรับ **(Support)**

รูปที่ 6.18 แสดงลักษณะการยึดท่อ

6.2.7.1 การป้องกันความเสียหายจากการยืดและหดตัวของท่อ

ในการวางท่อที่มีความยาวมากและมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ทำให้ท่อมีการยืดและหดตัว อาจทำให้ท่อหรือช่วงข้อต่อเกิดการฉีกขาดได้ ดังนั้นในการวางท่อควรป้องกันความเสียหายของท่อก๊าซชีวภาพ นอกจากการที่ไม่ยึดท่อให้แน่นเกินไปแล้ว ควรมีการติดตั้งข้อต่อรองรับการขยายตัว (Expansion joint) ในบริเวณท่อที่มีการยืดหรือหดตัวในแนวท่อ และควรเลือกข้อต่ออ่อน (Flexible joint) ในบริเวณท่อที่มีการยืดหรือหดตัวที่มีการเยื้องศูนย์ สำหรับวัสดุของข้อต่อรองรับการขยายตัว หรือข้อต่ออ่อนที่ใช้กับก๊าซ ควรเป็นสแตนเลสหรือยางไนไตร์ล (NBR) เป็นต้น

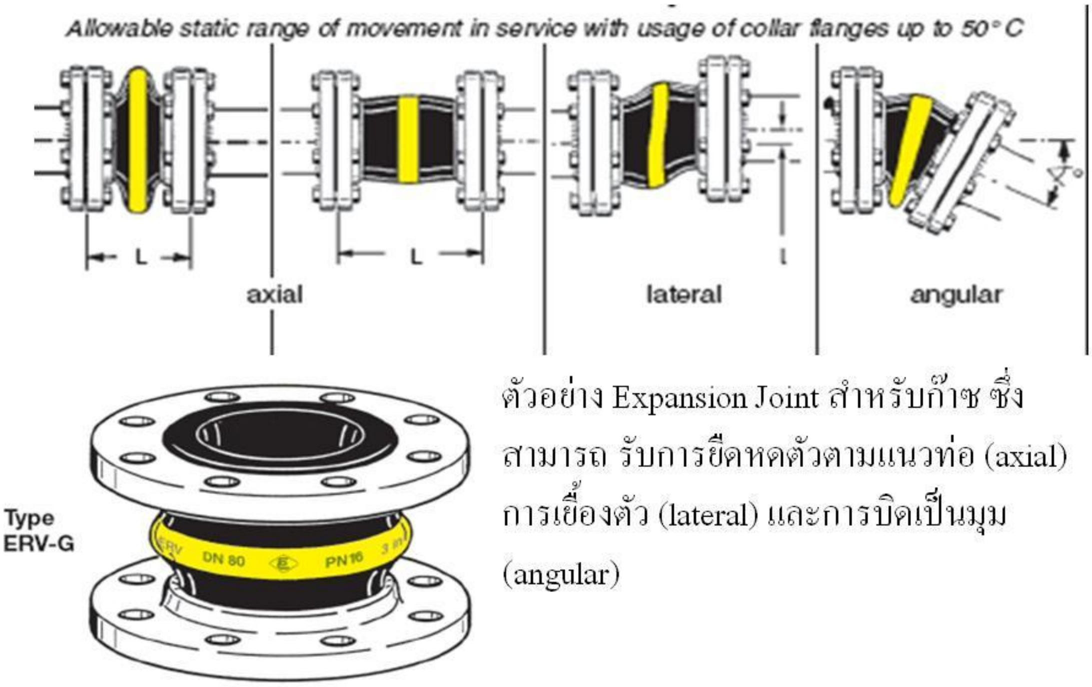
เพื่อป้องกันปัญหาการสั่นสะเทือนและการดึงรั้งกันของท่อ การติดตั้งข้อต่อรองรับการขยายตัวระหว่างอุปกรณ์ที่มีการสั่นสะเทือน และระหว่างท่อที่ถูกยึดกับโครงสร้างที่อยู่กันคนละฐานราก กรณีที่ลดปัญหาการยืดหดตัวของท่อเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแล้วไปกดหรือรั้งท่อ ควรมีการข้อต่อรองรับการขยายตัวที่บริเวณดังกล่าว ดังรูปที่ 6.19 ส่วนรูปที่ 6.20 แสดงการติดตั้งข้อต่อรองรับการขยายตัวที่ Blower และแนวของท่อทางแยก

โดยเราสามารถที่จะคำนวณการยืดหรือหดตัวได้ดังตารางที่ 6.9 ตัวอย่างเช่น ท่อ HDPE เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของท่อ 10 °ซ ในระหว่างเวลากลางวันและกลางคืน จะทำให้ท่อระยะ 100 เมตร สามารถขยับตัวถึง 12 ซม. ซึ่งถ้ายึดท่อแน่นมาก และไม่มีการติดตั้ง Expansion joint ในแนวตรงที่มีสมบัติในการยืดหดตัวในแนว Axial ให้ครอบคลุมระยะที่ท่อยืดและหดตัว จะทำให้ท่อเสียหายได้

ตารางที่ 6.9 แสดง Thermal Expansion ของท่อ

ชนิดของท่อ	ระยะยืด/หดตัวของท่อ (มม./100 เมตร) เมื่ออุณหภูมิต่างกัน 10°ซ
PVC	50
HDPE	120
CPVC	79
Stainless steel	17.8

CPVC: Chlorinated polyvinyl chloride



รูปที่6.19 แสดง Expansion joint

รูปที่ 6.20 แสดงการติดตั้ง Expansion joint ที่ Blower และในแนวท่อแยก

6.2.7.2 การวางท่อใต้ดิน

การวางท่อใต้ดินควรที่จะทำในกรณีที่มีความจำเป็น เช่น เนื่องจากพื้นที่จำกัด หรือต้องลอดถนน ซึ่งการวางท่อจำเป็นจะต้องมีการสำรวจพื้นที่ที่จะวางท่อและการเจาะสำรวจดิน นอกจากนี้ยังต้องมีการพิจารณาเกี่ยวกับขนาดท่อที่จะวาง ชั้นแรงดันของท่อ ระดับความลึกในการวางท่อ และเส้นทางที่จะวางท่อ โดยอาจจำเป็นจะต้องมีการใช้ Sheet pile เพื่อป้องกันการพังทลายของดิน และแนวของท่อควรที่จะมีป้ายสัญญาณเตือน

วิธีการวางท่อใต้ดิน

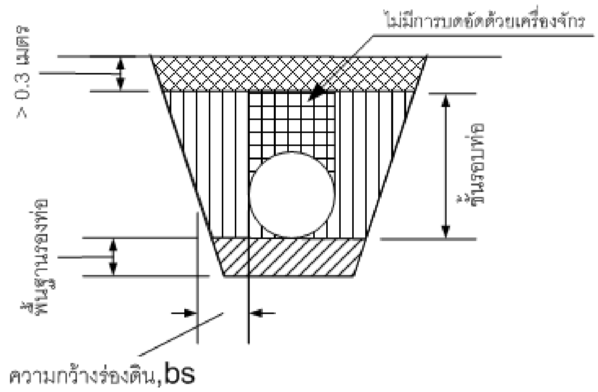
การเตรียมพื้นร่องดินมีความจำเป็นในกรณีที่ดินเดิมไม่แข็งแรงพอที่จะวางท่อและการถมวัสดุรองท่อ หากพื้นร่องดินเป็นชั้นดินอ่อน (Soft soil) ไม่สามารถรับน้ำหนักได้ จำเป็นจะต้องมีการขุดลอกชั้นดินอ่อนนั้นออกไป แล้วใช้ทรายหรือวัสดุอื่นที่เหมาะสมถมจนถึงระดับความลึกร่องดินที่กำหนด แล้วจึงเกลี่ยหรือบดอัดให้เรียบตลอดความยาวท่อ วัสดุที่ใช้ถมพื้นฐานรองท่อควรปราศจากหิน วัสดุขนาดใหญ่ หรือวัสดุมีคมที่อาจทำให้ท่อเสียหายได้ พื้นฐานรองท่อควรมีความหนาไม่น้อยกว่า 150 มม. พร้อมบดอัดแน่นไม่น้อยกว่า 90% ควรใช้ทราย กรวด หรือวัสดุที่สามารถบดอัดได้ตามที่กำหนด

ในการขุดร่องดิน ขนาดความกว้างร่องดินขึ้นกับขนาดท่อและอุปกรณ์ที่ใช้ในการบดอัด โดยทั่วไปร่องดินควรมีความกว้างมากกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกท่อไม่น้อยกว่าข้างละ 200 มม. ดังรูปที่ 6.21 ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามความเหมาะสม ขึ้นกับท่อและความสามารถในการบดอัด

ชั้นรอบท่อ หรือเรียกว่า Embedment วัสดุที่ใช้เหมือนกับพื้นฐานรองท่อ ควรปิดปลายท่อเพื่อป้องกันสิ่งสกปรกเข้าไปในท่อ การบดอัดข้างท่อควรทำทีละชั้น ความสูงแต่ละชั้นขึ้นกับความแน่นที่

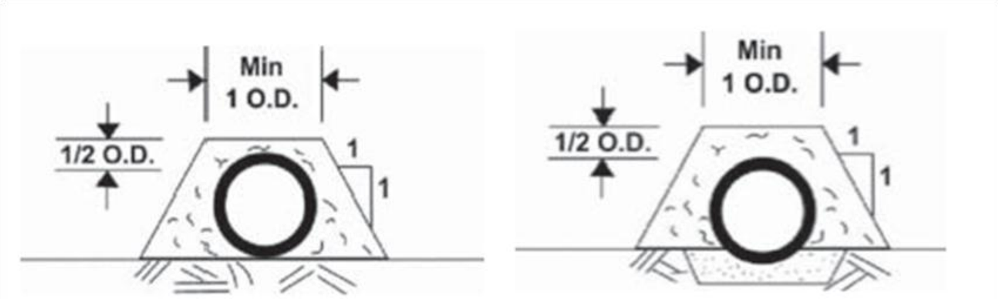
ต้องการและการออกแบบของวิศวกร โดยทั่วไปไม่ควรเกินชั้นละ 300 มม. การบดอัดบริเวณครึ่งท่อด้านล่างต้องทำอย่างระมัดระวัง บริเวณด้านบนท่อหากใช้เครื่องจักรในการบดอัด ก่อนการบดอัดต้องแน่ใจว่ามีวัสดุกลบหลังท่อสูงไม่น้อยกว่า 300 มม. อย่าบดอัดลงบนหลังท่อโดยตรง

ในกรณีที่วางท่อใต้ผิวจราจร ความลึกในการวางท่อ การเลือกใช้วัสดุ การบดอัดชั้นสุดท้ายจะต้องปฏิบัติตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง หรือหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง สำหรับกรณีทั่วไปอาจใช้ดินเดิมในการฝังกลบได้ โดยจะต้องคัดแยกวัสดุขนาดใหญ่ วัสดุมีคมออกไป และบดอัดเป็นชั้นๆ



รูปที่ 6.21 แสดงลักษณะการวางท่อใต้ดิน

กรณีที่ทำการวางท่อและกลบท่อบนดิน ควรมีระยะดังรูป 6.22



การวางท่อและการกลบท่อ

รูปที่ 6.22 การวางท่อและกลบท่อก๊าซ

นอกจากนี้ในการวางท่อใต้ดิน ควรมีบ่อสำหรับติดตั้งอุปกรณ์ระบายน้ำ และทำการตรวจสอบน้ำในท่อด้วย ทั้งด้านที่ทางลงและขึ้นจากใต้ดิน

ข้อคำนึงในการติดตั้งท่อก๊าซ

นอกจากปัจจัยต่างๆ ในการเลือกวัสดุท่อและการวางแนวท่อที่ได้กล่าวมาแล้ว ยังมีข้อที่ควรนำมาพิจาณาเพิ่มเติมสำหรับการออกแบบระบบท่อก๊าซอีก เช่น

- การเสียหายของท่ออันเนื่องมาจากอุบัติเหตุ

เนื่องจากท่อส่วนใหญ่อยู่บนดิน มีโอกาสสูงที่เกิดอุบัติเหตุขึ้นที่ทำให้ท่อแตกหักหรือเสียหาย โดยพนักงาน ยานยนต์ หรือสัตว์ โดยเฉพาะท่อที่ทำจากพลาสติก ดังนั้นควรที่จะมีการทำตัวป้องกันท่อ (Pipe guard) ในบริเวณจุดเสี่ยง หรือถ้าท่อฝังดินควรอยู่ในความลึกที่เหมาะสมและถ้าท่อลอดถนนที่มีการผ่านของยานยนต์หนักควรที่จะการวางท่อคอนกรีตเพื่อป้องกันการกระแทกท่อให้เสียหาย

- การแยก/ลดการสั่นสะเทือน

ในการเพิ่มความดัน ไม่ว่าจาก Blower และ Compressor หรือ การเดินของเครื่องยนต์นั้นจะทำให้เกิดการสั่นสะเทือนของท่อได้ นอกจากนี้การที่ท่อถูกวางหรือยึดบนพื้นที่มีการทรุดตัวไม่เท่ากัน มีโอกาสสูงในการทำให้ท่อแตกหัก หรือรอยเชื่อมฉีกขาดได้ จึงควรมีการติดตั้งข้อต่ออ่อน (Flexible joint) หรือข้อต่อที่รองรับการขยายตัว (Expansion joint) ที่สามารถรับการเยื้องศูนย์ได้ ในบริเวณดังกล่าว

- การขยายตัวของท่อ

ในการวางท่อและออกแบบท่อ ควรที่จะต้องคำนึงถึงเรื่องการขยายตัวของท่ออันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ดังนั้นจึงควรมีการยึดท่ออย่างหลวมๆ และมีข้อต่อที่ยืดหยุ่น หรือ Expansion loop ติดตั้งในบริเวณสามทาง หรืออุปกรณ์ต่างๆ เพื่อป้องกันการแตกหัก หรือเสียหายของอุปกรณ์

- การวางท่อใต้ดิน

ต้องไม่ใช้ข้อต่อที่เป็นเกลียว และควรหลีกเลี่ยงการวางท่อผ่านฐานรากของอาคาร หรือสิ่งก่อสร้างต่างๆ

6.3 การเลือกใช้วาล์วสำหรับก๊าซชีวภาพ

วาล์วที่ใช้ในระบบท่อก๊าซชีวภาพส่วนใหญ่เป็น Manual valve ทำหน้าที่ในปิดกั้น (on/off) การไหลของก๊าซในท่อ โดยที่นิยมใช้กันมีหลายชนิด มีจุดเด่นและข้อด้อย ดังรายละเอียดที่แสดงในตารางที่ 6.10

ตารางที่ 6.10 แสดงชนิดของวาล์วที่ใช้ในท่อก๊าซชีวภาพ

ชนิดของวาล์ว	จุดเด่น	ข้อด้อย
Gate valve	• เหมาะกับการใช้งานที่อุณหภูมิสูงหรือความดันสูง	• อาจจะมีการติดขัดของประตูวาล์วได้ง่าย
Globe valve	• สามารถปรับอัตราการไหลได้ดีกว่า Gate valve • บำรุงรักษาง่าย	• เปิด-ปิดได้ช้า • มีความดันลดสูงกว่า Gate valve
Butterfly valve	• เปิด-ปิดได้อย่างรวดเร็ว • สามารถปรับใช้กับระบบควบคุมการปิดเปิดด้วยลม หรือไฟฟ้า	• ต้องการความระมัดระวังในการติดตั้งมากกว่าวาล์วชนิดอื่นมิเช่นนั้นจะปิดไม่สนิท
Ball valve	• เปิด-ปิดได้อย่างรวดเร็ว • สามารถปรับใช้กับระบบควบคุมการปิดเปิดด้วยลมหรือไฟฟ้า	• ไม่สามารถปรับอัตราการไหลของก๊าซได้ หมุนก้านวาล์วเพียง 45 องศา ก็ปิดกั้นการไหลแล้ว

ที่มา : ESCAP 1980

6.4 ระบบเพิ่มความดันหรือส่งก๊าซชีวภาพ

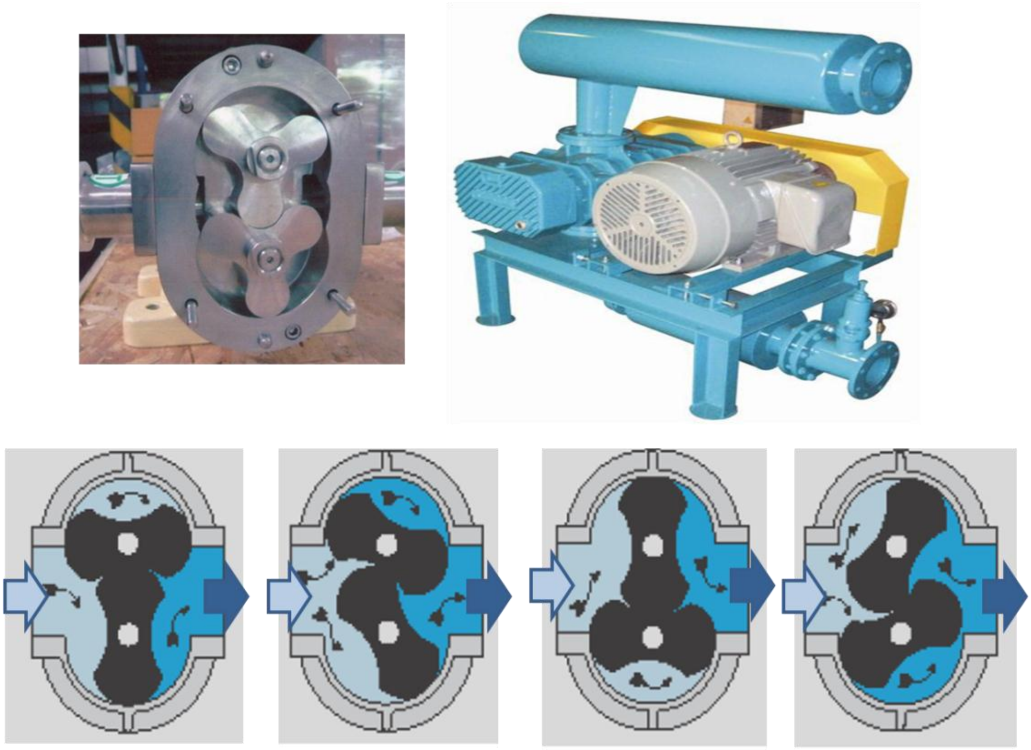
การเพิ่มความดันหรือส่งก๊าซในระบบท่อนั้น ควรใช้ Blower ซึ่งทำงานในสภาวะความดันที่ไม่สูงมาก (ไม่เกิน 1 บาร์เกจ หรือ 100 กิโลพาสคาลเกจ) แต่สามารถจ่ายก๊าซที่อัตราการไหลสูง และอาจจะใช้คอมเพรสเซอร์ในกรณีที่ต้องการสภาวะที่ความดันสูงมาก ในกระบวนการ Compressed Biogas เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงรถยนต์ (ทั้งนี้ก๊าซชีวภาพที่ต้องผ่านคอมเพรสเซอร์ ต้องมีการกำจัดสิ่งเจือปนก่อน) สำหรับ Blower นั้นเป็นกระบวนการเพิ่มความดันแบบ Adiabatic เนื่องจากอัตราการไหลสูง ทำให้การสูญเสียความร้อนบริเวณ Blower น้อยมาก อุณหภูมิก๊าซขาออกจึงสูงขึ้น

6.4.1 ชนิดของ Blower

Blower ที่ใช้ในการส่งก๊าซชีวภาพโดยทั่วไป มีอยู่ด้วยกัน 3 แบบ คือ

6.4.1.1 Root Blower

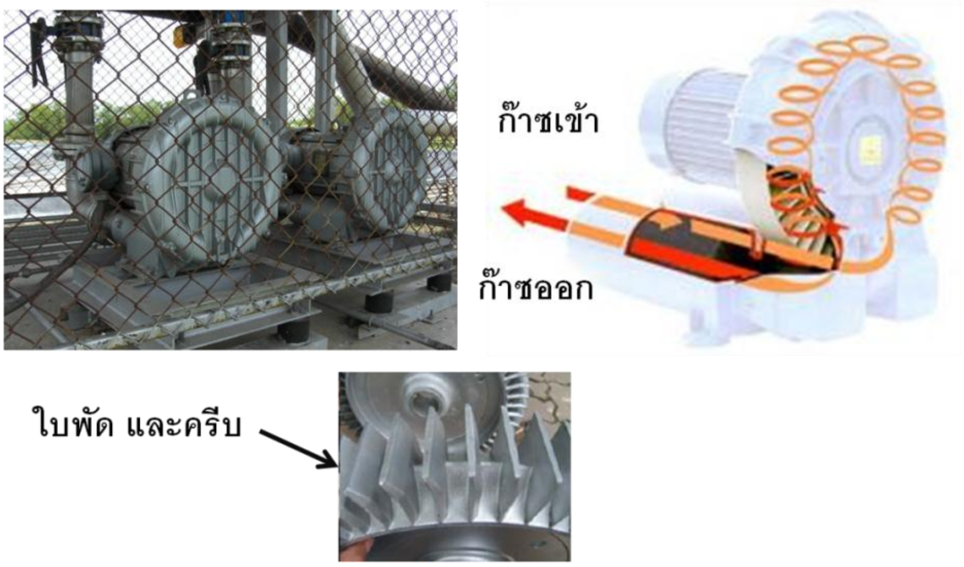
Root Blower เป็น Blower ที่มีการทำงานแบบ Positive displacement โดยมีใบโรเตอร์ 2 ใบ ติดตั้งอยู่บนเพลาที่ขนานกันและหมุนในทิศทางตรงข้ามกัน ก๊าซจะไหลเข้าไปแทนที่ช่องว่างระหว่างโรเตอร์และถูกวักออกอีกด้านหนึ่ง ดังรูปที่ 6.23



รูปที่ 6.23 แสดง Root Blower ที่ใช้ในระบบส่งก๊าซชีวภาพ

6.4.1.2 Ring หรือ Regenerative Blower

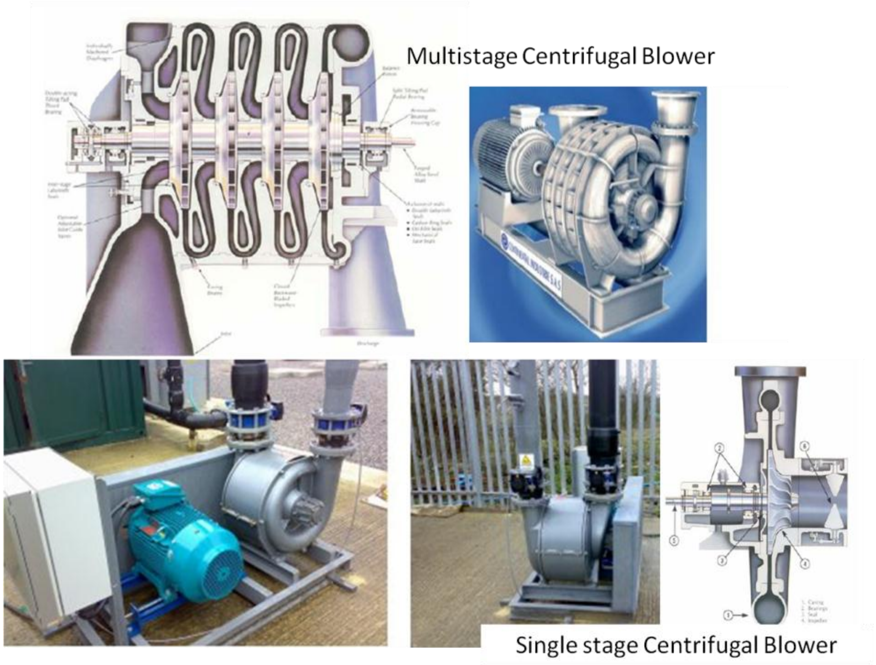
Ring หรือ Regenerative Blower (รูปที่ 6.24) มีการทำงานแบบใช้แรงเหวี่ยง ใบพัดมีครีบหลายใบ ก๊าซจะไหลเข้าและถูกเหวี่ยงให้ออกที่ท่ออีกด้านหนึ่ง



รูปที่ 6.24 Ring Blower ที่ใช้ในระบบส่งก๊าซชีวภาพ

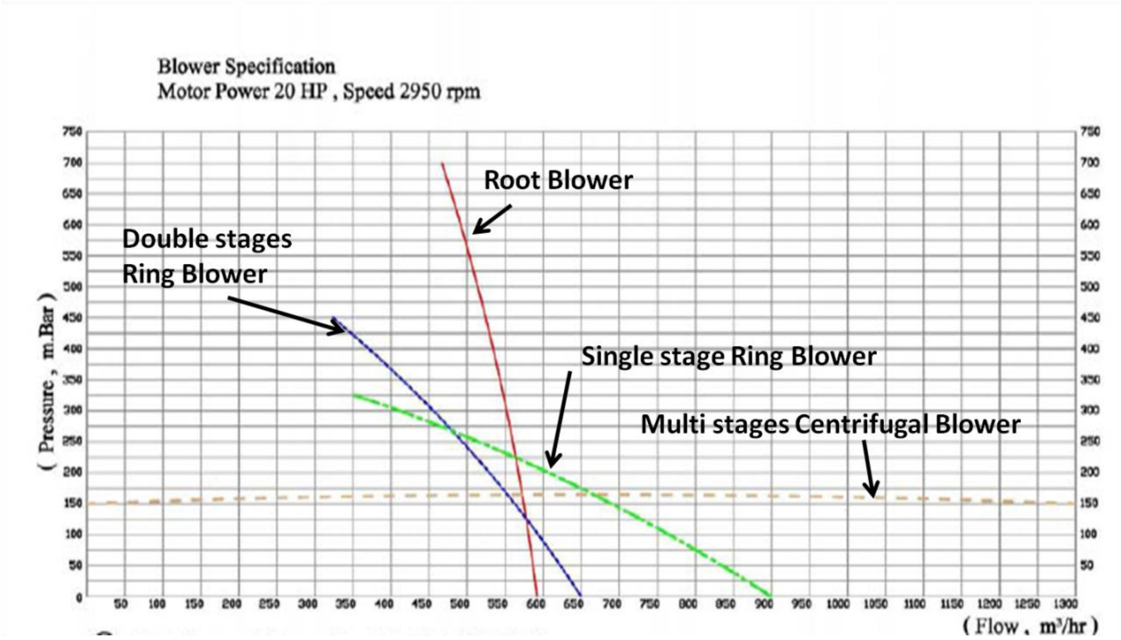
6.4.1.3 Centrifugal Blower

Centrifugal Blower (รูปที่ 6.25) มีการทำงานแบบใช้แรงเหวี่ยง ใบพัดโค้ง ก๊าซจะไหลเข้าที่ใจกลางของใบพัดและถูกเหวี่ยงออกที่ด้านข้าง ในกรณีที่ใช้กับก๊าซชีวภาพส่วนใหญ่จะเป็นแบบ multistage คือ มีใบพัดหลายชั้น มีผลทำให้ได้ความดันค่อนข้างคงที่



รูปที่ 6.25 แสดง Centrifugal Blower ที่ใช้ในระบบส่งก๊าซชีวภาพ

จากรูป 6.26 แสดงกราฟของสมรรถนะของ Blower แบบต่างๆ จะเห็นว่า Root Blower จะมีอัตราการไหลคงที่ แม้ความดันลดของระบบจะสูงขึ้น ขณะที่ Ring Blower อัตราการไหลจะเปลี่ยนแปลง เมื่อความดันลดของระบบเปลี่ยน ซึ่งจะเป็นเช่นเดียวกับ Single stage Centrifugal Blower ขณะที่ถ้าเป็น Multistage Centrifugal Blower จะทำความดันได้สูงสุด (คงที่) ที่อัตราการไหลที่กำหนด ดังนั้นการเลือกใช้ Root Blower จะทำให้ควบคุมอัตราการไหลของก๊าซได้สม่ำเสมอกว่า แต่ราคาของ Root Blower จะสูงกว่า และต้องการการบำรุงรักษาสูงกว่า Blower อีกสองแบบ



รูปที่ 6.26 กราฟแสดงสมรรถนะของ Blower แบบต่างๆในระบบส่งก๊าซชีวภาพ

6.4.2 การคำนวณกำลังที่ใช้งานของ Blower

ในระบบส่งก๊าซชีวภาพ จะใช้ Blower ซึ่งเป็นกระบวนการอัดอากาศ แบบ Adiabatic ดังนั้น สมการในการคำนวณกำลังงาน จะใช้เป็นแบบ Adiabatic

กำลังขับ ที่ใช้ทางทฤษฎี (kW)

$$W_{hp} = \frac{k}{k-1} \cdot p_1 Q \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \qquad \text{.............................(6.6)}$$

เมื่อ Q = อัตราการไหล (ลบ.ม./วินาที)

p_1 = ความดันที่ด้านทางดูด ก๊าซ (กิโลพาสคาล)

p_2 = ความดันที่ด้านทางส่ง ก๊าซ (กิโลพาสคาล)

โดยทั่วไปประสิทธิภาพมอเตอร์และการอัดจะประมาณ 50% ดังนั้นต้องใช้กำลังของ Blower ประมาณ $Bhp\ [kW] = 2 \times W_{hp}$

6.4.3 การเลือกจำนวนรอบของ Blower

เนื่องจาก Root Blower จะต้องดูดก๊าซเข้าไปในตัวเรือนของ Blower โดยที่ก๊าซที่ดูดเข้าไปกับปริมาตรจากการเคลื่อนที่ของโรเตอร์จะมีปริมาตรไม่เท่ากัน เนื่องจากการที่ก๊าซบางส่วนรั่วไหลกลับไปตามช่องว่างระหว่างใบโรเตอร์กับตัวเรือน (Housing) ของ Blower ซึ่งความแตกต่างของปริมาตรทั้งสอง (Slip volume, Vs) หาได้โดย

$$V_s = kb \cdot \left(\frac{\Delta p}{\rho_1}\right)^{0.5} \qquad \text{.................................(6.7)}$$

เมื่อ ρ_1 = ค่าความหนาแน่นของก๊าซชีวภาพ

kb = ค่าคงที่ของ Blower

Δp = ค่าความดันแตกต่างระหว่างด้านทางส่งและด้านทางดูด

เมื่อได้ V_s มา ต้องไปบวกเพิ่มกับ Flow Rate ก๊าซขาเข้า แล้วนำไปหารด้วยปริมาตรของก๊าซที่พัดลมวักได้ (Displacement Volume) ในหนึ่งรอบ

<u>ตัวอย่าง</u> ต้องการอัดก๊าซชีวภาพที่ความดัน 90 กิโลพาสคาลเกจ ปริมาตร 50 ลบ.ม./นาที จาก Root Blower โดยค่าคงที่ของ Blower นี้เท่ากับ 1.34 และ Blower มีอัตราดูดก๊าซชีวภาพ 0.049 ลบ.ม./รอบ (ความหนาแน่นของก๊าซชีวภาพ = 1.068 กก./ลบ.ม.) เราสามารถหาความเร็วรอบของ Blower ได้โดย

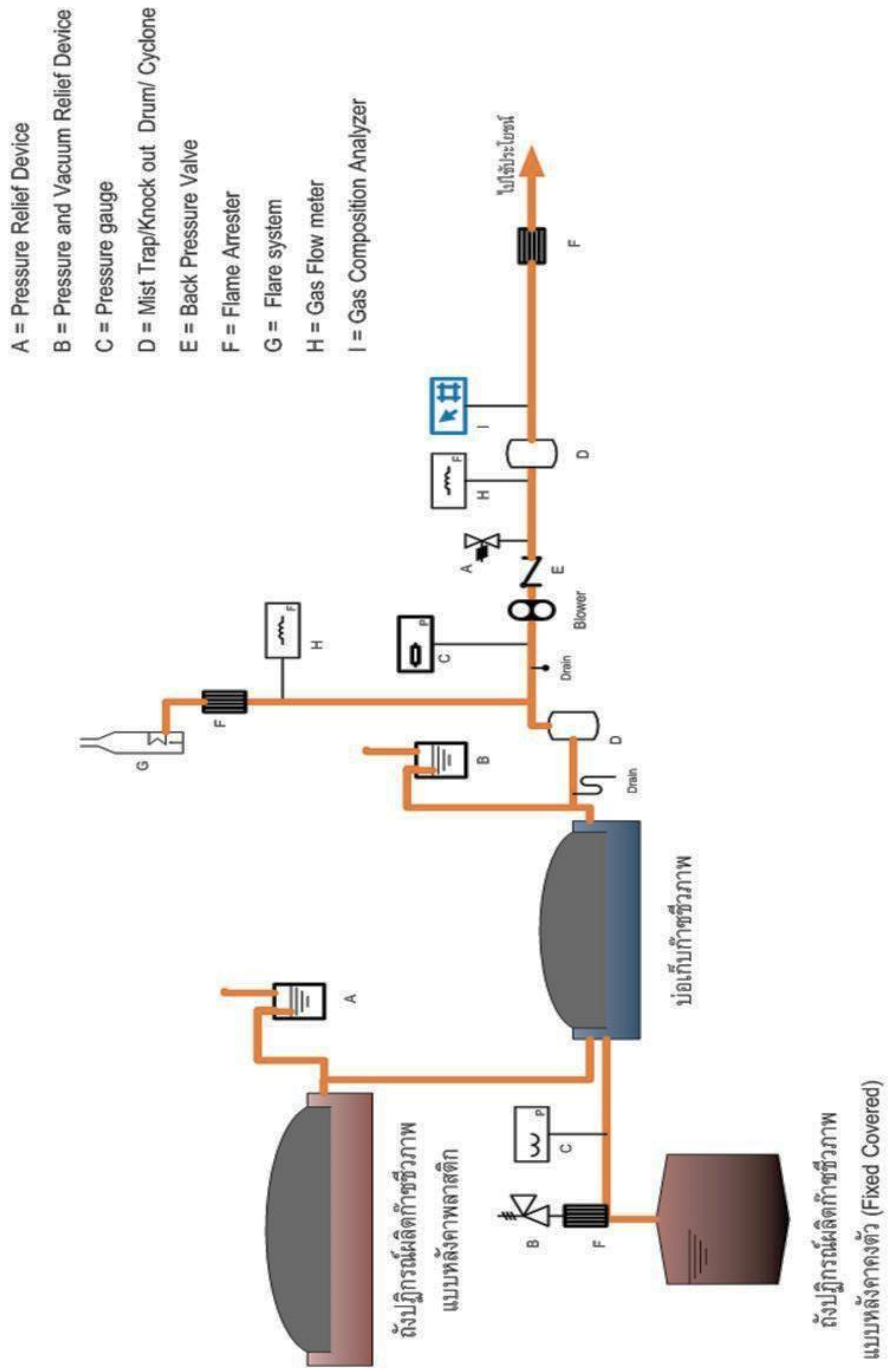
$$V_s = 1.34 \times \left(\frac{90}{1.068}\right)^{0.5} \quad = 12.3 \text{ ลบ.ม/นาที}$$

ปริมาตรที่ Root Blower ต้องดูดเข้าไป = 50+12.3 = 62.3 ลบ.ม./นาที

ดังนั้นความเร็วรอบของ Root Blower = 62.3 / 0.049 = 1270 รอบต่อนาที

6.5 อุปกรณ์ความปลอดภัยในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

รูปที่ 6.27 เป็นผังแสดงอุปกรณ์ด้านความปลอดภัยและตำแหน่งที่ควรติดตั้งในระบบก๊าซชีวภาพ



รูปที่ 6.27 ผังแสดงอุปกรณ์ความปลอดภัยในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

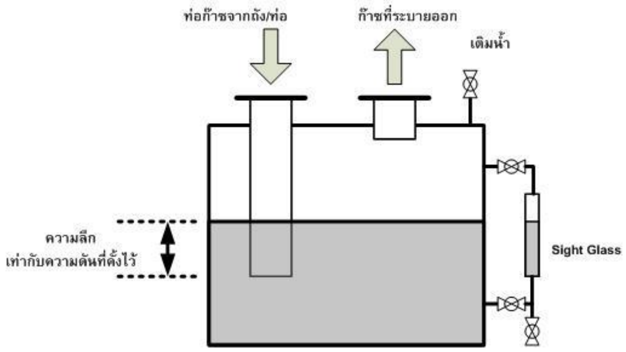
6.5.1 อุปกรณ์ระบายความดัน

6.5.1.1 อุปกรณ์ระบายความดันสูงเกิน (Over pressure relief Device)

อุปกรณ์นี้ใช้สำหรับป้องกันความดันในท่อหรือในถังสูงเกินกว่าค่าที่กำหนด เพื่อที่จะระบายก๊าซออกก่อนที่ท่อหรือถังจะเกิดการเสียหาย ซึ่งจะติดตั้งไว้ที่บริเวณท่อที่มีความดัน โดยรูปแบบของอุปกรณ์ที่ใช้ ได้แก่

1) ถัง Water Seal

เป็นถังที่มีท่อก๊าซจุ่มต่ำกว่าระดับน้ำและมีท่อระบายก๊าซออกอีกด้านหนึ่งถ้าความดันก๊าซในท่อความดันสูงเกินกว่าระดับน้ำกดไว้ ก๊าซก็จะระบายออกที่ถังดังกล่าว ดังรูปที่ 6.28



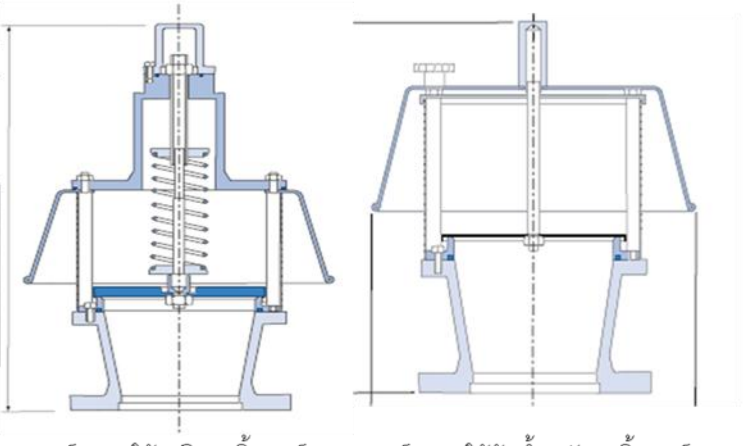
รูปที่ 6.28 แสดง Over pressure relief Device แบบ Water seal

> **ควรหมั่นตรวจสอบระดับน้ำในถัง water seal ให้อยู่ในระดับที่กำหนด อย่างสม่ำเสมอ**
> **ควรมี Sight glass และลูกลอยควบคุมระดับน้ำ**

ในการติดตั้งอุปกรณ์แบบนี้ ควรจะติดตั้งในท่อหรือถังที่มีความดันต่ำ (ต่ำกว่า 0.3 เมตรน้ำ) ซึ่งขึ้นกับระดับความสูงของน้ำในถัง โดยทั่วไปจะติดตั้งที่ท่อในด้านทางดูดของ Blower

2) Over pressure relief valve

เป็นอุปกรณ์ที่อาศัยตุ้มน้ำหนักถ่วงหรือแรงกดจากสปริงที่กดทับวาล์ว เมื่อความดันในท่อหรือถังสูงเกินกว่าแรงที่กดวาล์วไว้ ก๊าซภายในก็จะระบายออกที่วาล์วดังกล่าว ดังรูปที่ 6.29



รูปที่ 6.29 แสดง Over pressure relief valve แบบสปริงและแบบตุ้มน้ำหนัก

ในการติดตั้งอุปกรณ์แบบนี้ สามารถติดตั้งที่ถัง/ท่อที่ออกจากบ่อผลิตก๊าซชีวภาพ และท่อด้านทางส่งของ Blower โดยเลือกขนาดตามความดันที่ต้องการให้ก๊าซระบายออก

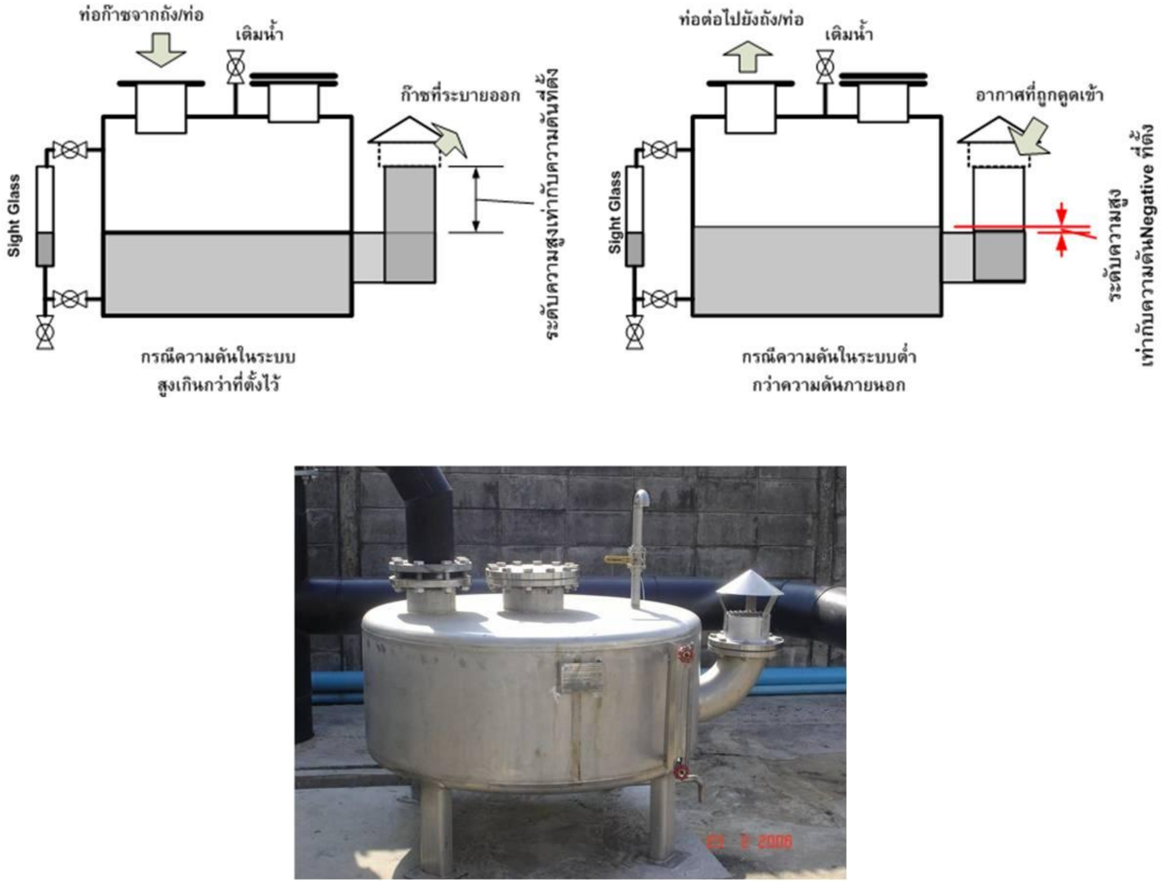
- **การเลือกขนาดของอุปกรณ์ดังกล่าวต้องพิจารณา จากช่วงความดันเปิดวาล์ว (Valve opening pressure) ความดันที่ตั้ง (Valve set pressure) ซึ่งเท่ากับ 0.9 คูณความดันเปิดวาล์ว และอัตราการไหลของก๊าซที่ต้องการระบายออก**
- **ควรหมั่นตรวจสอบการทำงานของ Relief valve อย่างสม่ำเสมอ**

6.5.1.2 Over Pressure and Negative relief valve

อุปกรณ์นี้ใช้ป้องกันความดันในถัง กรณีที่ความดันสูงเกินกว่าค่าที่กำหนด หรือกรณีที่เกิดความดันลบ (Negative pressure) อันเนื่องมาจากการระบายน้ำออกหรือการดูดก๊าซออกเร็วเกินไป ซึ่งจะทำให้ถังเกิดการเสียหายได้ การติดตั้งอุปกรณ์นี้จะติดตั้งที่ถังหมัก หรือถังทำความสะอาดก๊าซชีวภาพ ถังดักน้ำซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ด้านทางดูดของ Blower โดยรูปแบบของอุปกรณ์ที่ใช้ได้แก่

1) ถัง Water Seal

เป็นถังที่มีการบรรจุน้ำและมีท่อออกคล้ายตัวยู ด้านหนึ่งมีพื้นที่หน้าตัดกว้างกว่าอีกด้านหนึ่ง มีท่อก๊าซเข้าทางด้านบนถังและท่อระบายอยู่ด้านข้างถัง ดังรูปที่ 6.30 เมื่อความดันสูงเกินกว่าน้ำหนักน้ำที่กดไว้ ก๊าซก็จะระบายออกที่ถังดังกล่าว และกรณีที่ความดันภายในท่อต่ำกว่าความดันบรรยากาศ อากาศจะไหลผ่านเข้าไปในถัง

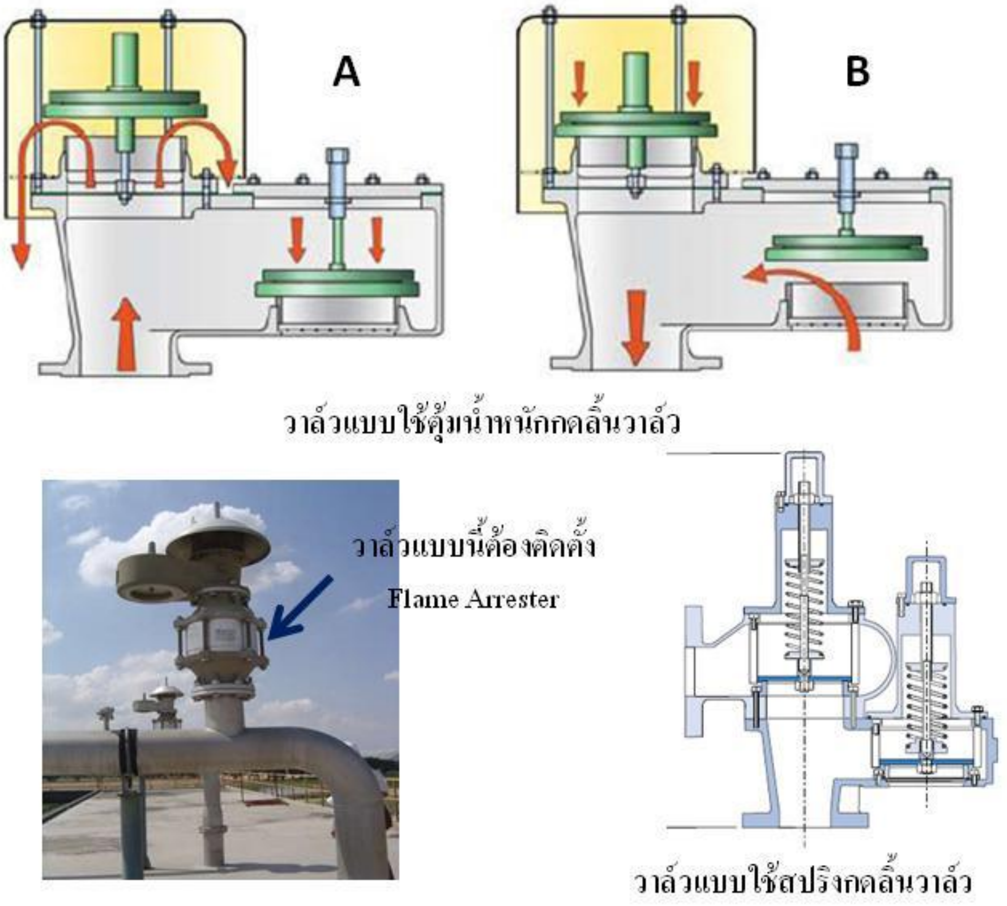


รูปที่ 6.30 แสดง Over pressure and Negative relief valve แบบ Water seal

ควรหมั่นตรวจสอบระดับน้ำในถังอย่างสม่ำเสมอ เนื่องจากเมื่อความดันสูงเกิน ก๊าซจะดันน้ำออก ซึ่งทำให้ระดับน้ำในถังลดต่ำลง และอาจเกิดการรั่วของก๊าซตลอดเวลา

2) Over pressure and Vacuum relief valve

เป็นอุปกรณ์ที่อาศัยน้ำหนักที่กดทับแผ่นปิดท่อระบาย โดยมีวาล์วปิดเปิดอยู่สองส่วน วาล์วที่หนึ่งเป็นวาล์วสำหรับส่วนที่ระบายออกเมื่อความดันในถังสูงเกินกว่าน้ำหนักที่กดไว้ ส่วนวาล์วที่สองเป็นวาล์วสำหรับกรณีที่ความดันในถังต่ำกว่าความดันบรรยากาศ วาล์วจะถูกยกขึ้นเพื่อให้อากาศภายนอกเข้าไปในถัง ดังรูป 6.31 โดยแบ่งเป็นสองแบบด้วยกันคือ แบบที่ใช้ตุ้มน้ำหนักในการควบคุมการเปิด-ปิดวาล์ว และแบบที่ใช้สปริงในการควบคุมการเปิด–ปิดวาล์ว



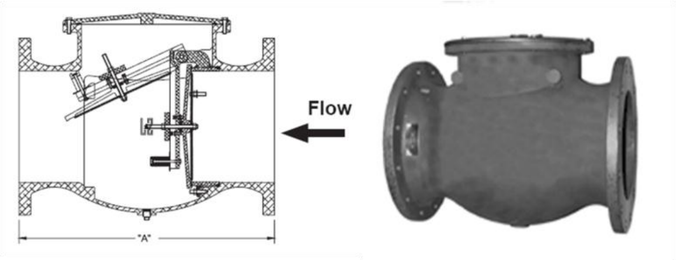
รูปที่ 6.31 แสดง Over pressure and Vacuum relief valve และลักษณะการทำงาน
กรณี over pressure (ภาพ A) และกรณี Vacuum pressure (ภาพ B)

วาล์วแบบใช้ตุ้มน้ำหนักกดวาล์วส่วนใหญ่ จะมีช่วงความดันที่เปิดวาล์ว (Valve opening pressure) ตั้งแต่ 2.5 จนถึง 70 มิลลิบาร์เกจ แต่ถ้าวาล์วแบบใช้สปริงกดวาล์ว จะมีช่วงความดันที่เปิดวาล์ว (Valve opening pressure) ตั้งแต่ 70 จนถึง 800 มิลลิบาร์เกจ

- ***การเลือกขนาดของอุปกรณ์ดังกล่าวต้องพิจารณา จากช่วงความดันเปิดวาล์ว (Valve opening pressure) ความดันที่ตั้ง (Valve set pressure) ซึ่งเท่ากับ 0.9 คูณความดันเปิดวาล์ว และอัตราการไหลของก๊าซที่ต้องการระบายออก การติดตั้งอุปกรณ์นี้ควรติดตั้งพร้อม Flame arrester ด้วย***
- ***ควรหมั่นตรวจสอบการทำงานของ Relief valve อย่างสม่ำเสมอ***

6.5.2 Back Pressure Check Valve

เป็นอุปกรณ์ป้องกันการเสียหายของเครื่องมือวัดหรืออุปกรณ์ อันเนื่องมาจากการไหลของก๊าซสวนทาง เช่น มาตรวัดอัตราการไหล (ที่เป็นแบบใบพัด) เป็นต้น โดยจะติดตั้งที่ทางส่งของ Blower หรือด้านหลังอุปกรณ์ที่อาจจะเสียหายได้ง่าย ดังรูปที่ 6.32

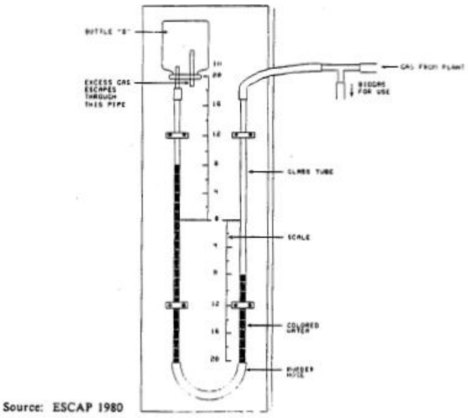


รูปที่ 6.32 แสดง Back Pressure Check Valve

การเลือกขนาดควรเลือกให้เหมาะสมกับอัตราการไหล และความดันลดต้องไม่สูงมาก แนะนำให้เลือกวาล์วที่วัสดุด้านในเคลือบด้วยวัสดุที่ทนต่อการกัดกร่อน ส่วนการดูแลรักษา ต้องหมั่นตรวจสอบสภาพสปริงและการทำงานของวาล์ว

6.5.3 อุปกรณ์วัดความดัน

สำหรับท่อก๊าซชีวภาพควรที่จะมีตำแหน่งสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความดันในท่อ โดยอุปกรณ์ที่ใช้ตรวจวัดขึ้นอยู่กับความดันในจุดนั้นๆ ถ้าในจุดที่เป็นความดันต่ำ (น้อยกว่า 0.1 บาร์เกจ หรือ 1 เมตรน้ำ) ก็สามารถใช้อุปกรณ์ เช่น มาโนมิเตอร์อย่างง่ายๆ ที่ดูจากความแตกต่างของความสูงของน้ำในท่อใส ดังแสดงในรูปที่ 6.33 ซ้าย แต่ถ้าในจุดที่มีความดันสูงมากกว่า ก็ควรที่จะใช้มาตรวัดความดัน (Pressure gauge) ดังแสดงในรูปที่ 6.33 ขวา



รูปที่ 6.33 แสดงอุปกรณ์วัดความดันในท่อ

6.5.4 ระบบดักละอองน้ำและระบายน้ำออกจากท่อ

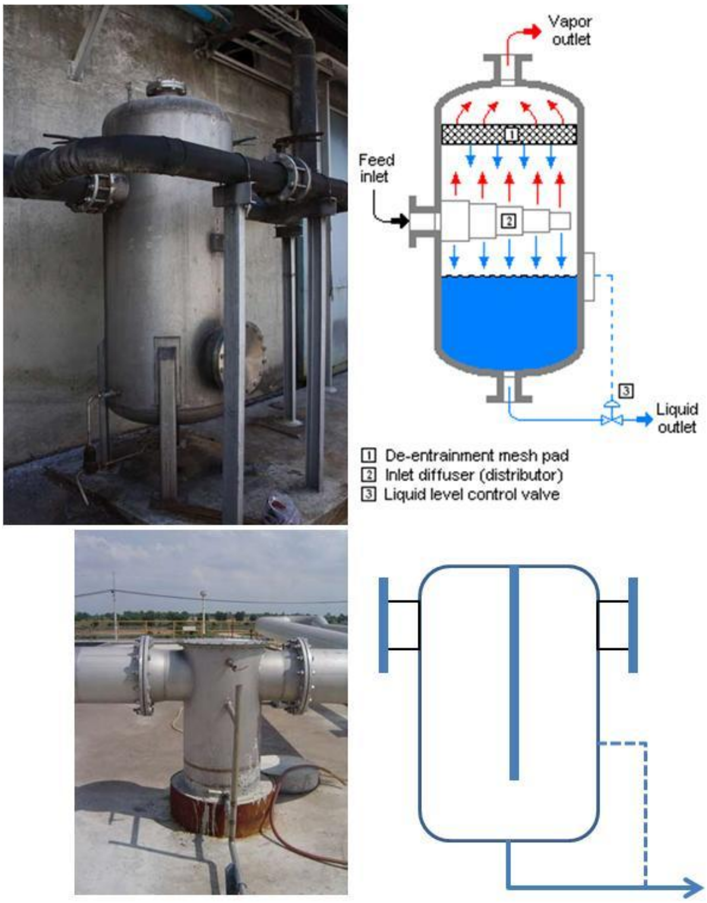
เนื่องจากก๊าซชีวภาพเป็นก๊าซที่อิ่มตัวด้วยไอน้ำ เมื่ออุณหภูมิของก๊าซลดลง ไอน้ำจะกลั่นตัวเป็นละอองน้ำ ซึ่งจำเป็นต้องดักและระบายออกจากท่อ อุปกรณ์สำหรับดักละอองน้ำ (Mist) ในท่อก๊าซ มีรูปแบบดังนี้

6.5.4.1 อุปกรณ์ดักน้ำ

อุปกรณ์ดักน้ำ มี 2 แบบ ได้แก่

1) Knock out Drum

เป็นอุปกรณ์ที่อาศัยหลักการ การเปลี่ยนทิศทางการไหลของก๊าซ และการชนปะทะของกระแสก๊าซ ทำให้ละอองน้ำแยกตัวออกจากก๊าซ ดังรูป 6.34



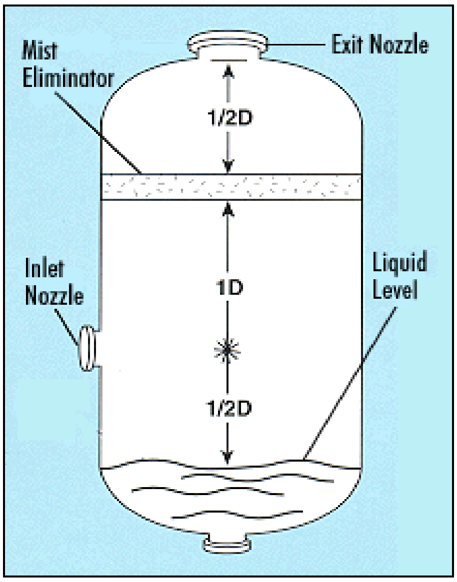
รูปที่ 6.34 แสดง Knock out Drum.

ตัวแปรที่สำคัญในการกำหนดขนาด คือ ความเร็วของก๊าซ ซึ่งคำนวณได้จาก

$$v = K\sqrt{\frac{\rho_L - \rho_g}{\rho_g}} \qquad \text{.................................(6.8)}$$

เมื่อ	v	=	ความเร็วที่ทำให้เกิดการแยก (เมตร/วินาที)
	ρ_L	=	ความหนาแน่นของน้ำ = 998 กก./ลบ.ม
	ρ_g	=	ความหนาแน่นของก๊าซชีวภาพ = 1.0678 กก./ลบ.ม
	K	=	ค่าคงที่ (ถังแนวดิ่ง ใช้ 0.03 ถังแนวนอนใช้ 0.152)

ดังนั้น ความเร็วที่คำนวณ (ในกรณีที่เป็นถังแนวดิ่ง) ได้เท่ากับ 2.3 เมตร/วินาที ทำให้คำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางถังได้ ซึ่งทำให้กำหนดขนาดความสูงของถังได้ ตามรูปที่ 6.35 ส่วนรูปที่ 6.36 แสดงแผงดักละอองน้ำ (Mist Eliminator) ภายใน Knock out Drum และตารางที่ 6.11 แสดงอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง Knock out Drum



รูปที่ 6.35 แสดงขนาดสัดส่วนของ **Knock out Drum**

รูปที่ 6.36 แสดงแผงดักละอองน้ำ (Mist Eliminator)

ตารางที่ 6.11 แสดงอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางถัง Knock out Drum

อัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ (ลบ.ม./ชม.)	**เส้นผ่านศูนย์กลางถัง** (เมตร)
50	0.20
100	0.3
200	0.40
500	0.65
1000	0.90
2000	1.25

สำหรับการติดตั้ง Knock out drum สามารถติดตั้งที่ท่อก๊าซได้ทั้งด้านทางดูด และทางส่งของ Blower ในการบำรุงรักษาควรหมั่นตรวจสอบและระบายน้ำออกจากถัง ในบางครั้งถังที่บริเวณถังหมักอาจจะมีการดักเอาฟองเมือกน้ำ (โฟม) จากถังหมักที่ถูกพามาจากถังหมักติดมาด้วย ซึ่งจะทำให้มีการระบายน้ำได้ลำบาก ดังนั้นต้องหมั่นทำความสะอาดอุปกรณ์ระบายน้ำด้วย

2) อุปกรณ์ดักน้ำแบบไซโคลน

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้หลักการแยกละอองน้ำออกจากก๊าซโดยอาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ซึ่งละอองน้ำที่มีความหนาแน่นมากกว่าก๊าซ จะถูกเหวี่ยงให้ไปชนปะทะกับผนังของไซโคลนและไหลลงสู่ด้านล่างของไซโคลน ดังรูป 6.37

รูปที่ 6.37 แสดงอุปกรณ์ดักน้ำแบบไซโคลน

ตัวแปรที่สำคัญในการกำหนดขนาด คือ ความเร็วของก๊าซ และความดันลดของถังดักน้ำ ใต้ถังดักน้ำต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์ระบายน้ำออกจากระบบด้วย

6.5.4.2 อุปกรณ์ระบายน้ำ

อุปกรณ์การระบายน้ำออกจากท่อก๊าซมีทั้งที่เป็นแบบที่ต้องระบายแบบ Manual และแบบอัตโนมัติ โดยแบ่งเป็น

1) อุปกรณ์ระบายน้ำแบบ ตัว T หรือ ตัว U

การติดตั้งที่อุปกรณ์ระบายน้ำควรติดตั้งในทุกจุดที่มีการเปลี่ยนทิศทางการไหลของก๊าซ และถ้าเป็นท่อตรงแนวนอน ควรจะติดตั้งทุกระยะ 50 เมตร

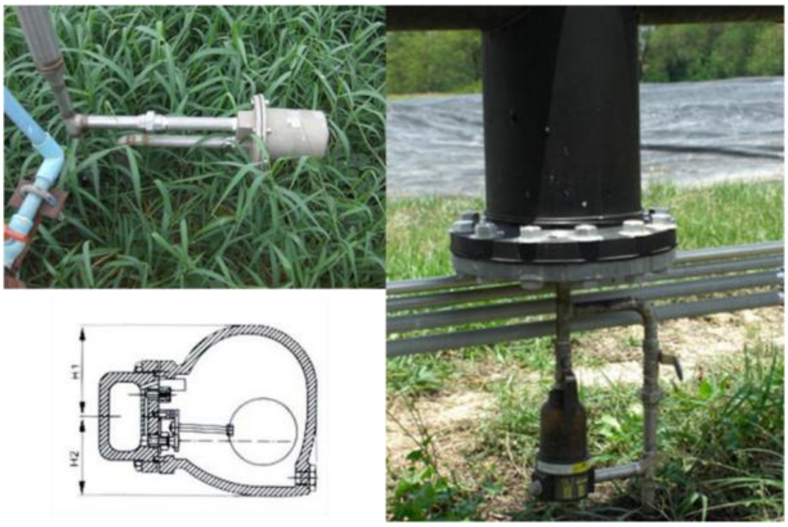
อุปกรณ์ระบายน้ำที่เป็นลักษณะสามทาง (ตัว T) จะต้องมีวาล์วระบายน้ำ อาจจะเป็นแบบ Manual หรือ แบบอัตโนมัติ ก็ได้ ในกรณีที่ติดตั้งอุปกรณ์ระบายน้ำขนิดท่อแบบรูปตัว U ความสูงของท่อรูปตัว U ต้องมีความสูงมากกว่าความดันของก๊าซในท่อที่จุดนั้น เช่น ถ้าความดัน 20 มิลลิบาร์เกจ

ท่อควรที่จะมีความสูงมากกว่า 20 ซม.รูปที่ 6.38 แสดงลักษณะของอุปกรณ์ระบายน้ำแบบตัว T และแบบตัว U

รูปที่ 6.38 แสดงลักษณะของอุปกรณ์ระบายน้ำแบบ ตัว T และแบบตัว U

2) วาล์วระบายน้ำแบบอัตโนมัติ (Auto Drain Valve)

เป็นอุปกรณ์ระบายน้ำโดยอัตโนมัติ เมื่อน้ำในท่อไหลเข้าสู่กระเปาะ ลูกบอลที่อยู่ภายในจะลอยสูงขึ้น วาล์วจะเปิดและระบายน้ำออก เมื่อระดับน้ำลดต่ำลง ลูกบอลที่อยู่ภายในจะต่ำลง วาล์วจะปิดป้องกันก๊าซรั่ว แสดงดังรูป 6.39



รูปที่ 6.39 แสดงอุปกรณ์ Auto Drain Valve

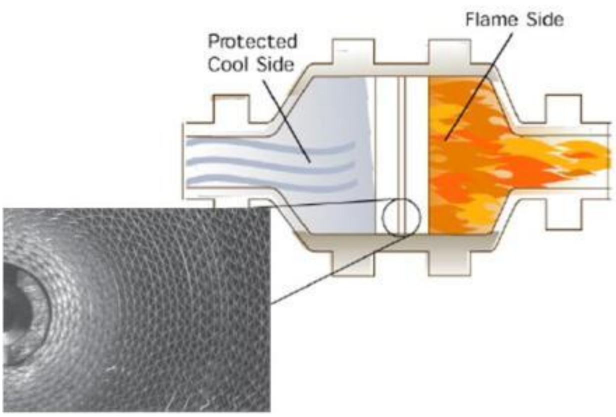
ปัญหาที่พบบ่อยของวาล์วระบายน้ำอัตโนมัติ คือ การอุดตันของวาล์ว เนื่องจากละอองน้ำที่มากับก๊าซ อาจจะพาโฟม หรือเศษของแข็ง หรือสารอินทรีย์เจือปนมาด้วย เมื่อน้ำมาตกค้างในอุปกรณ์นานๆ จึงเกิดเมือกและตะไคร่ ทำให้อุดตันวาล์วและท่อ เป็นเหตุให้ไม่สามารถระบายน้ำออกจากท่อได้

- **การเลือกขนาดของ Auto drain ขึ้นอยู่กับความดันและปริมาณน้ำที่ต้องการระบายออก**
- **ควรมีวาล์ว bypass ที่ Auto drain ด้วย**
- **ควรหมั่นตรวจสอบการอุดตันของวาล์ว โดย**
  - หมั่นตรวจดูหยดน้ำที่บริเวณ Auto Drain ถ้าไม่มี ให้เปิด Bypass
  - ถ้ามีน้ำไหลจากวาล์ว Bypass แสดงว่า Auto Drain ตันให้ทำความสะอาด
  - ถ้าไม่มีหยดน้ำและก๊าซออกจากวาล์ว bypass แสดงว่า ท่อตัน ให้ถอดยูเนียนออกทำความสะอาดท่อ Drain

6.5.5 อุปกรณ์ดักเปลวไฟหรืออุปกรณ์ป้องกันเปลวไฟย้อนกลับ (Flame Arrester)

เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ป้องกันเปลวไฟไม่ให้เปลวไฟย้อนกลับเข้าไปในท่อ โดยการลดอุณหภูมิให้ต่ำกว่าค่าอุณหภูมิติดไฟของก๊าซ

อุปกรณ์ป้องกันเปลวไฟย้อนกลับ ส่วนใหญ่ที่ติดตั้งในระบบก๊าซชีวภาพเป็นแบบใช้ในท่อ (in-line) โดยติดตั้งอยู่ระหว่างถังก๊าซชีวภาพกับจุดที่ท่อก๊าซออกสู่บรรยากาศ หรือไปยังจุดใช้งานที่มีการเผาไหม้ ซึ่งอุปกรณ์นี้จะต้องป้องกันเปลวไฟย้อนได้ไม่น้อยกว่า 30 นาที ขณะที่มีเปลวไฟเผาอยู่อีกด้านหนึ่ง ดังรูปที่ 6.40

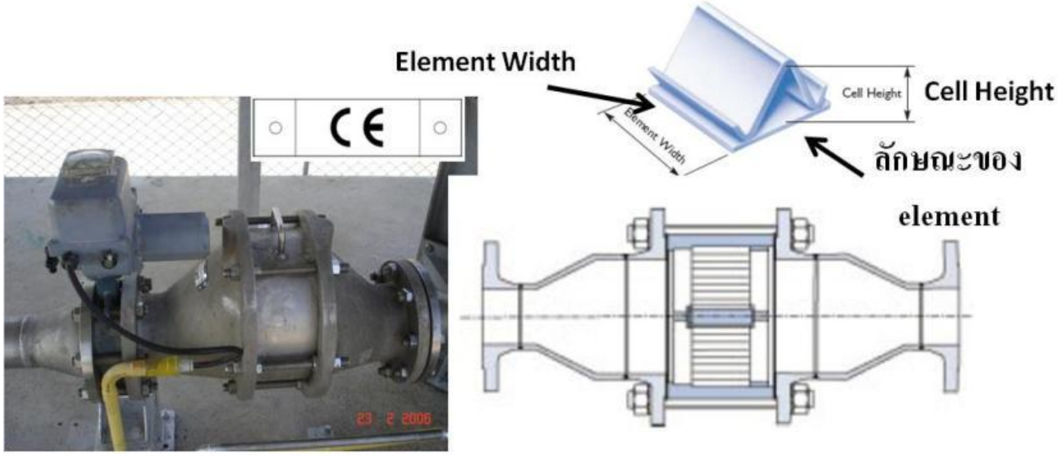


รูปที่ 6.40 แสดงการป้องกันเปลวไฟของอุปกรณ์ป้องกันเปลวไฟย้อนกลับ

ส่วนประกอบของอุปกรณ์ป้องกันเปลวไฟย้อนกลับ ดังรูปที่ 6.41 ประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

- ตัวเรือน (housing)
- แผง element ป้องกันไฟย้อนกลับ

อุปกรณ์ป้องกันเปลวไฟย้อนกลับ มีสองแบบ คือ แบบที่ไม่สามารถเปลี่ยนแผง element และแบบที่สามารถเปลี่ยนแผง element



รูปที่ 6.41 แสดงส่วนประกอบของอุปกรณ์ป้องกันเปลวไฟย้อนกลับ

ข้อแนะนำในการเลือกใช้อุปกรณ์ป้องกันเปลวไฟย้อนกลับ

- ควรเลือก element และอุปกรณ์ที่ออกแบบมาใช้สำหรับก๊าซชีวภาพ โดยพิจารณาจากมาตรฐานการจำแนกกลุ่มของก๊าซ และไอระเหย เช่น กลุ่มประเทศยุโรป จำแนกก๊าซมีเทนให้อยู่ในกลุ่ม IIA และมาตรฐานของประเทศสหรัฐอเมริกา จัดก๊าซมีเทนให้อยู่ในกลุ่ม D แสดงดังตารางที่ 6.12 และตารางที่ 6.13
- ความสูง cell ของ element ต้องต่ำกว่าค่า Maximum Experimental Safe Gap (MESG) ซึ่งค่าของก๊าซและไอระเหยกลุ่ม IIA มีค่า > 0.9 mm และกลุ่ม D มีค่า > 0.75
- ความดันสูญเสีย ของ อุปกรณ์ป้องกันเปลวไฟย้อนกลับ ควรต่ำที่สุดเท่าที่เป็นได้ ซึ่งสามารถทำได้โดยการเพิ่มพื้นที่หน้าตัด
- วัสดุที่ใช้ควรเป็นสแตนเลส

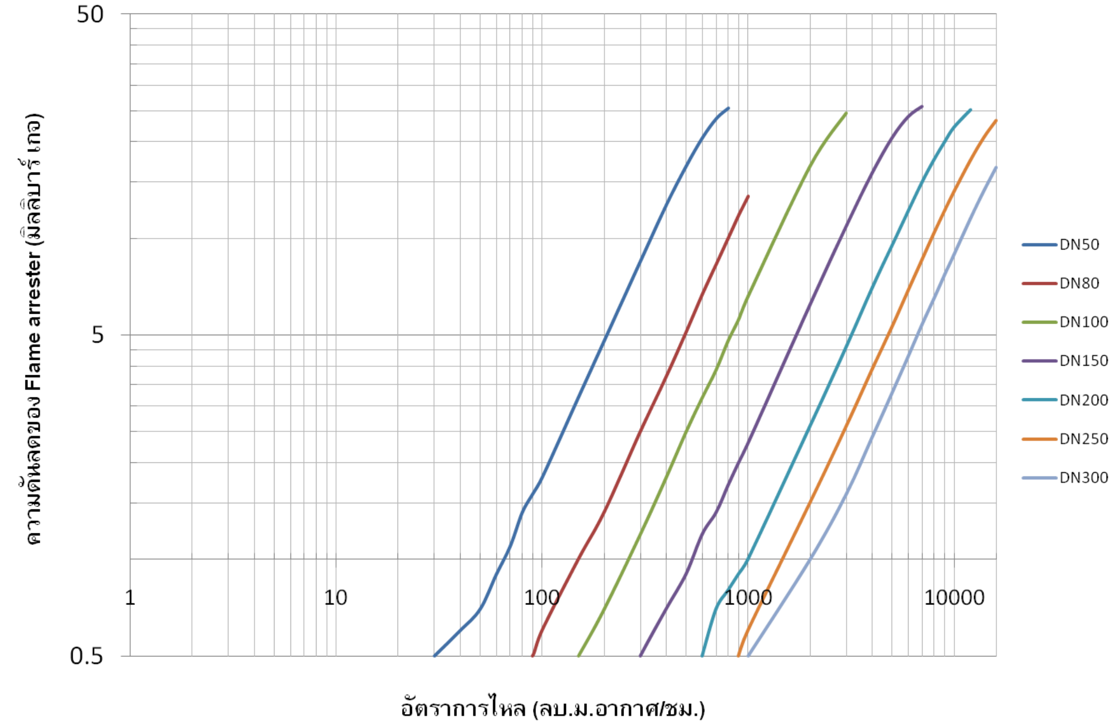
ตารางที่ 6.12 แสดงมาตรฐานการจำแนกกลุ่มก๊าซและไอระเหยของกลุ่มประเทศยุโรป

Gas Group	MESG (mm)	Test Gas	Test Gas Concentration (x % in air)	Typical Gases
IIA	>0.90	Propane	4.2	Methane, alkanes, alcohols, acetone, benzene
IIB3	≥0.65	Ethylene	6.5	Ethylene, ethylene ether
IIB	≥0.50	Hydrogen	45.0	Ethylene oxide, Butadiene
IIC	<0.50	Hydrogen	28.5	Hydrogen

ตารางที่ 6.13 แสดงมาตรฐานการจำแนกกลุ่มก๊าซและไอระเหยของประเทศสหรัฐอเมริกา

Gas Group	MESG (mm)	Typical Gases
D	>0.75	Methane, alkanes, alcohols, acetone, benzene
C	>0.45	Ethylene, ethylene oxide
B	≤0.45	Hydrogen
A	-	Acetylene

การหาความดันลดหรือความดันสูญเสียของอุปกรณ์ป้องกันเปลวไฟย้อนกลับที่ขนาดต่างๆ สามารถดูได้จากกราฟในรูปที่ 6.42



รูปที่ 6.42 กราฟแสดงความดันลดของอุปกรณ์ป้องกันเปลวไฟย้อนกลับตามขนาดและอัตราการไหล

การบำรุงรักษาอุปกรณ์ป้องกันเปลวไฟย้อนกลับ

- ต้องหมั่นตรวจสอบความดันสูญเสียตกคร่อมอุปกรณ์ป้องกันเปลวไฟย้อนกลับ
- ถ้ามีความดันตกคร่อมสูงเกิน แสดงว่า มีการอุดตันของ element ต้องให้ผู้ที่มีความชำนาญทำความสะอาด (ตามข้อแนะนำของผู้ผลิต)
- อย่าทำการแหย่ หรือกระทุ้งแผง element เอง
- ถ้าแผง element เสียหาย ต้องทำการเปลี่ยน
- ตรวจสอบ seal ระหว่าง element และตัวเรือน

6.5.6 อุปกรณ์ตรวจวัดสมบัติของก๊าซ

6.5.6.1 อุปกรณ์ตรวจวัดอัตราการไหลของก๊าซ

เป็นอุปกรณ์สำหรับการวัดอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ มีทั้งที่ใช้วัดอัตราการไหลเชิงปริมาตร และอัตราการไหลเชิงมวล

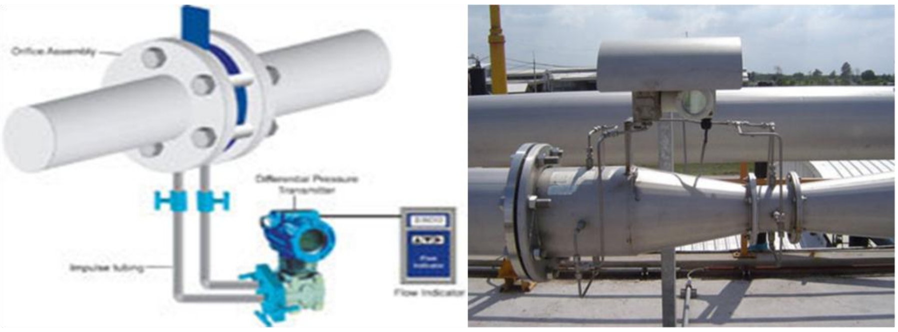
6.5.6.1.1 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลเชิงปริมาตร มี 2 แบบ ได้แก่

1) แบบอาศัยหลักการหมุนของใบพัด แสดงดังรูปที่ 6.13 ส่วนใหญ่วัดปริมาตรก๊าซสะสม ซึ่งไม่เป็นที่นิยม เนื่องจากก๊าซชีวภาพเป็นก๊าซที่ไม่บริสุทธิ์ และมีความชื้น การมีส่วนประกอบที่เคลื่อนไหวในท่อ อาจจะเกิดการติดขัดและชำรุดได้ง่าย

รูปที่ 6.43 แสดงอุปกรณ์วัดอัตราการไหลก๊าซแบบอาศัยหลักการหมุนของใบพัดแบบต่างๆ

2) แบบอาศัยหลักการวัดความดันลดที่ตกคร่อม แสดงดังรูปที่ 6.44 โดยใช้หลักการวัดความดันที่เปลี่ยนแปลงระหว่างอุปกรณ์ Orifice หรือ Venturi หรือ Pitot tube จากความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับความดันลด สามารถคำนวณอัตราการไหลเชิงปริมาตร โดยนำความเร็วมาคูณกับพื้นที่หน้าตัดท่อ ในการคำนวณความเร็วของก๊าซนั้นขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของก๊าซ ดังนั้นจึงต้องอ้างอิงอุณหภูมิของก๊าซในขณะวัดด้วย

การวัดอัตราการไหลของก๊าซโดยวิธีนี้ เป็นการวัดอัตราการไหลของก๊าซในขณะใดขณะหนึ่ง แต่สามารถที่จะต่อเข้าระบบที่คำนวณและแสดงเป็นปริมาตรก๊าซสะสมได้ อัตราการไหลที่อ่านได้ไม่ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพมากนัก



รูปที่ 6.44 แสดงอุปกรณ์วัดอัตราการไหลก๊าซแบบหลักการวัดความดันลดที่ตกคร่อมอุปกรณ์ Orifice และ Venturi

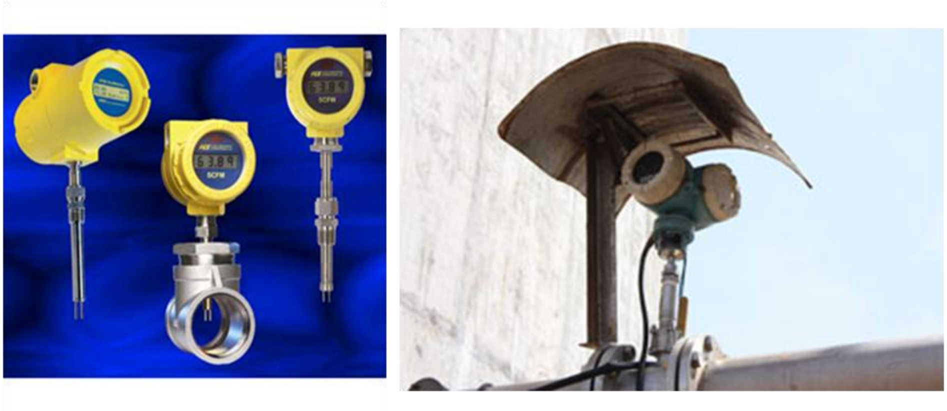
6.5.6.1.2 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลเชิงมวล (Thermal Mass Flow meter) แสดงดังรูปที่ 6.45 อุปกรณ์ทำงานโดยการให้ความร้อนกับก๊าซและวัดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ นำอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงมาคำนวณอัตราการไหลเชิงมวล จากสมการ

$$\text{อัตราการไหลเชิงมวล} = \frac{\text{ความร้อนที่ให้}}{\text{ความจุความร้อน} \times (\text{ผลต่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง})}$$

ในกรณีนี้ องค์ประกอบก๊าซต้องคงที่ เนื่องจากค่าความจุความร้อน (Cp) ถูกกำหนดให้คงที่ในการปรับเทียบ (Calibrate) ครั้งแรก ดังนั้น ถ้าอุณหภูมิของก๊าซเปลี่ยนแปลงค่าความจุความร้อนจะเปลี่ยนแปลงด้วย ทำให้การอ่านค่าอัตราการไหลจะไม่ถูกต้อง ดังนั้นควรเลือกซื้ออุปกรณ์วัดที่เป็นแบบมีการชดเชยการเปลี่ยนอุณหภูมิด้วยตัวเอง (Temperature compensated)

การวัดอัตราการไหลของก๊าซของอุปกรณ์แบบนี้ สามารถวัดได้ทั้งในรูปอัตราการไหลเชิงปริมาตรและเชิงมวล แต่เป็นการวัดอัตราการไหลขณะใดขณะหนึ่ง ซึ่งสามารถที่จะต่อเข้าระบบที่คำนวณและแสดงเป็นปริมาตรก๊าซสะสมได้

ในการวัดปริมาตรก๊าซนั้น ต้องมีการระบุองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพในการสอบเทียบด้วย ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อองค์ประกอบของก๊าซเปลี่ยนไป ค่าความสามารถในการถ่ายเทความร้อนก็จะเปลี่ยนไปด้วย ทำให้ค่าอัตราการไหลที่อ่านได้จะเบี่ยงเบนได้



รูปที่ 6.45 แสดงอุปกรณ์วัดอัตราการไหลก๊าซแบบหลักการวัดอัตราการไหลเชิงมวล

6.5.6.2 เครื่องตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซ

เป็นเครื่องสำหรับการตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซ ได้แก่ ก๊าซมีเทน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แสดงดังรูปที่ 6.46 อาจมีการติดตั้งอุปกรณ์เสริมเพื่อวิเคราะห์ก๊าซออกซิเจน หรือก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (ก๊าซไข่เน่า) เพิ่มเติม ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ โดยเครื่องตรวจวิเคราะห์จะเป็นการวิเคราะห์ก๊าซแห้ง ดังนั้นจะต้องมีชุดดักความชื้นและฝุ่นละอองก่อนที่ก๊าซจะเข้าเครื่องตรวจวิเคราะห์

การตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซ อาจจะมีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการทราบความเข้มข้นสำหรับใช้ในการคำนวณค่าพลังงานที่ไปใช้ประโยชน์ หรืออาจจะเป็นเครื่องตรวจวิเคราะห์เพื่อการเตือน เมื่อค่าองค์ประกอบก๊าซดังกล่าวเกินค่าที่กำหนด เช่น การติดตั้งเครื่องตรวจวิเคราะห์ก๊าซออกซิเจนในท่อก๊าซชีวภาพ โดยตั้งค่าให้ส่งสัญญาณเตือนในกรณีที่ก๊าซออกซิเจนเกิน 4% (v/v) หรือกรณีเครื่องตรวจวิเคราะห์ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (ก๊าซไข่เน่า) เพื่อให้ส่งสัญญาณเตือนและสั่งเครื่องยนต์หยุดทำงานเมื่อไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิน 500 ppm เป็นต้น

รูปที่ 6.46 แสดงเครื่องตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซแบบ Online methane analyzer

- **ในการดูแลรักษาอุปกรณ์ ควรหมั่นตรวจสอบและเปลี่ยนชุดดักความชื้นและฝุ่นละอองให้ดี**
- **ควรมีการสอบเทียบอย่างน้อยปีละครั้ง**

6.6 ระบบเผาก๊าซทิ้ง (Flare system)

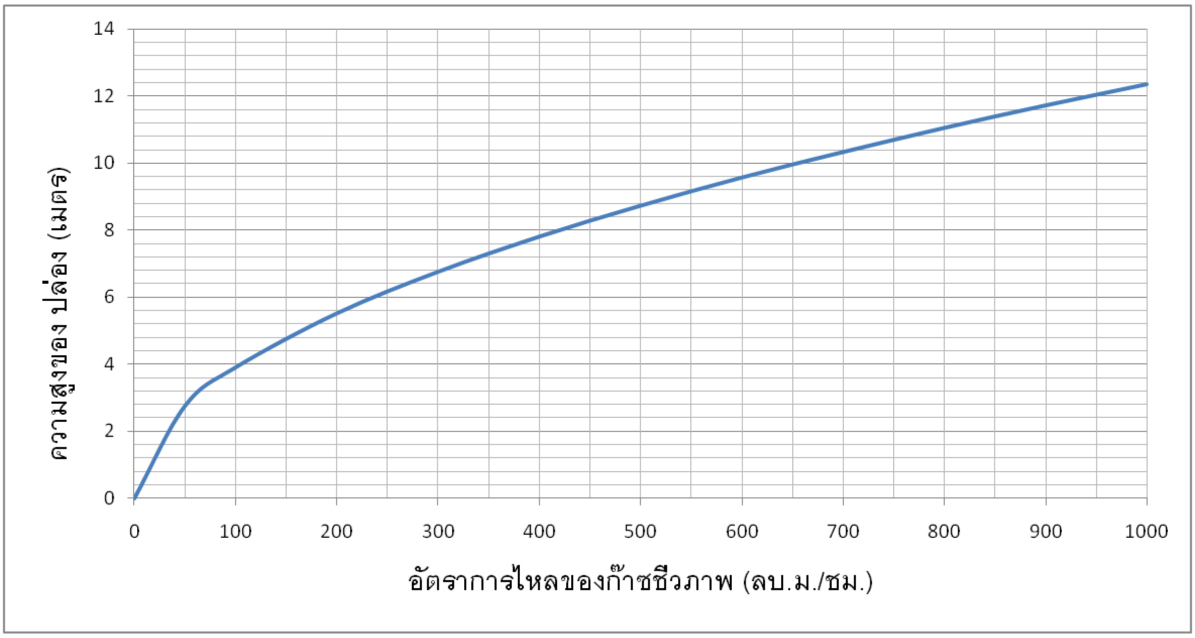
ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพจำเป็นต้องมีระบบเผาก๊าซทิ้ง เพื่อทำหน้าที่ในการเผาก๊าซที่เหลือเกินทิ้ง โดยที่ป้องกันไม่ให้มีการปล่อยก๊าซมีเทนออกสู่บรรยากาศ ระบบเผาก๊าซทิ้งมีทั้งที่เป็นระบบเปิด (Open Flare system) คือ จะมีการเผาไหม้ที่ด้านนอกคล้ายกับตะเกียง ดังนั้นจะสามารถสังเกตเห็นเปลวไฟได้ ประสิทธิภาพการเผาไหม้จะต่ำ อาจมีก๊าซมีเทนเหลืออยู่ได้ และความร้อนจากการเผาไหม้จะแผ่ออกมาบริเวณใกล้เคียงได้โดยตรง ซึ่งเป็นอันตราย รูปที่ 6.47 A แสดงระบบการเผาก๊าซทิ้งแบบเปิด

การที่ระบบเผาก๊าซทิ้งแบบเปิดมีการเผาไหม้ด้านนอกนั้น ทำให้มีความร้อนแผ่ออกมา ซึ่งเป็นอันตรายต่อคนที่เข้าไปทำงานในบริเวณดังกล่าว ดังนั้น ต้องมีการคำนวณระยะห่างและความสูงของปล่องรวมถึงปริมาณความร้อนที่แผ่ออกมา โดยกำหนดใช้ค่า Maximum Heat Intensity ที่ 500 BTU/ft^2-hr ซึ่งจากค่าดังกล่าวสามารถนำมาหาความสูงของปล่องจากพื้นสำหรับระบบแบบเปิดได้ ดังรูปที่ 6.48 เป็นกราฟแสดงความสูงของปล่อง Flare กับอัตราการเผาก๊าซชีวภาพทิ้ง

ในการคำนวณ กำหนดให้ความสูงของปล่อง Flare จากพื้นที่ได้เท่ากับ ระยะห่างของระบบเผาก๊าซทิ้งแบบเปิด

(**ที่มา:** Guide for Pressure-Relieving and Depressurizing Systems, Refining Department, API Recommended Practice 521, Second Edition, September 1982.)

รูปที่ 6.47 แสดงระบบเผาก๊าซทิ้งแบบเปิด (A) และแบบปิด (B)



รูปที่ 6.48 กราฟแสดงความสูงของปล่อง Flare กับอัตราการเผาก๊าซชีวภาพ

ขณะที่ระบบเผาก๊าซทิ้งแบบปิด (Closed Flare System) จะเป็นการเผาไหม้ภายในปล่อง จะมีเพียงแต่ไอร้อนเท่านั้นที่ลอยออกมาจากปล่อง การเผาไหม้จะสมบูรณ์กว่าระบบแบบเปิด และมีความปลอดภัยมากกว่า (รูปที่ 6.47 B)

การออกแบบระบบเผาก๊าซทิ้งแบบปิด มีปัจจัยในการพิจารณา คือ ค่า Residence time และอุณหภูมิ โดยมาตรฐานของต่างประเทศ แสดงดังตาราง ที่ 6.14

ตารางที่ 6.14 แสดงค่ามาตรฐานการเดินระบบเผาก๊าซทิ้งแบบปิด

Combinations of Residence times and Temperature

UK (proposed)	0.3 seconds at 1000°C
USA	0.6-1.0 seconds at 850°C
Netherlands	0.3 seconds at 900°C
Germany	0.3 seconds at 1200°C

ที่มา : Topic report of the IEA Bioenergy Agreement Task 24 – Biological conversion of municipal solid waste

การเปรียบเทียบระหว่างระบบเผาก๊าซทิ้งแบบเปิดและระบบเผาก๊าซทิ้งแบบปิด แสดงดังตารางที่ 6.15 โดยทั่วไป ระบบเผาก๊าซทิ้งควรอยู่ห่างจากบริเวณถังเก็บก๊าซมาก เพื่อป้องกันความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ มาทำให้เกิดอันตราย และถ้ามีอัตราการเผาไหม้ไม่เกิน 200 ลบ.ม/ชม. ปล่องควรสูงจากพื้นไม่น้อยกว่า 6 เมตร

ตารางที่ 6.15 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างระบบเผาก๊าซทิ้งแบบเปิด และแบบปิด

ระบบเผาก๊าซทิ้งแบบเปิด	ระบบเผาก๊าซทิ้งแบบปิด
• ประสิทธิภาพการเผาไหม้ไม่ดี • ควบคุมมลภาวะไม่ได้ • ต้นทุนประมาณ 20–70% ของระบบแบบปิด • เหมาะสำหรับการเผาก๊าซที่อัตราการไหลต่ำ	• ประสิทธิภาพการเผาไหม้ดี • ควบคุมมลภาวะได้ดี • ใช้กับการเผาก๊าซที่อัตราการไหลสูง • ความสูงของปล่องประมาณ 6–10 เมตร • ทำงานในทุกสภาวะของการเผาไหม้

สำหรับระบบเผาก๊าซทิ้งต้องมีการติดตั้ง Gas Train ที่ระบบท่อก่อนเข้าหัวเผาด้วย แสดงดังรูปที่ 6.49

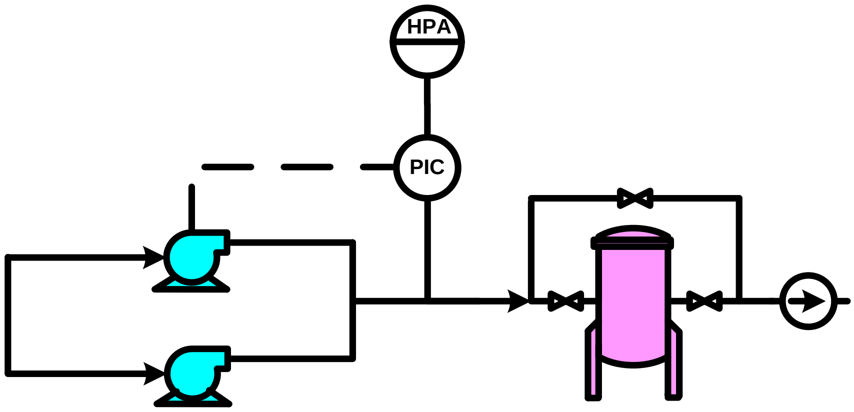
รูปที่ 6.49 แสดงอุปกรณ์ของระบบเผาก๊าซทิ้ง

6.7 การควบคุมการทำงานของระบบส่งก๊าซชีวภาพ

การควบคุมการส่งก๊าซชีวภาพ มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ปริมาณก๊าซที่ส่งไปใช้งานนั้นมีปริมาณสม่ำเสมอ ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้ความดันที่ท่อทางส่ง (ด้านที่นำก๊าซไปใช้ประโยชน์) ในการควบคุมการส่งก๊าซชีวภาพ กรณีที่มีการใช้ก๊าซชีวภาพต่ำกว่าปริมาตรก๊าซที่ส่งไป ทำให้ความดันที่ท่อทางส่งจะสูงขึ้น ถ้าใช้การควบคุมแบบ Manual ก็จะเป็นการปรับวาล์ว Bypass ให้เปิด เพื่อให้ก๊าซที่ทางส่งวนกลับไปยังทางดูด ดังแสดงรูปที่ 6.50 ซึ่งการควบคุมแบบนี้ จะควบคุมอัตราการไหลได้ไม่สม่ำเสมอ และจำเป็นต้องมีพนักงานควบคุมตลอดเวลา เป็นการควบคุมที่ไม่เหมาะสม

รูปที่ 6.50 แสดงการควบคุมความดันที่ท่อทางส่งก๊าซชีวภาพแบบ Manual

สำหรับการควบคุมการส่งก๊าซชีวภาพที่ใช้ความดันที่ท่อทางส่งไปควบคุมการทำงานของ Blower (รูปที่ 6.51) มีการทำงานโดยใช้สัญญาณจากความดันที่ทางส่งของ High pressure switchไปสั่งให้ Blower หยุดการทำงาน เมื่อความดันที่ทางส่งสูงเกินค่าที่ตั้งไว้ และมีการติดตั้ง Pressure transmitter เพื่อส่งสัญญาณให้มีการปรับรอบมอเตอร์ของ Blower โดยที่มอเตอร์ของ Blower ต้องสามารถปรับความเร็วรอบได้ ดังรูปที่ 6.51



รูปที่ 6.51 ผังแสดงการควบคุมการทำงานของ Blower

การควบคุมการทำงานโดยการปรับรอบมอเตอร์ของ Blower นี้ เหมาะสมกับ Root Blower มากกว่า เนื่องจากการปรับรอบมอเตอร์จะไม่ส่งผลต่อสมรรถนะการทำงานของ Blower และสำหรับตำแหน่ง Pressure transmitter ควรติดตั้งให้ใกล้กับจุดใช้งาน เพื่อสามารถวัดการเปลี่ยนแปลงความดันในท่อทางส่งและส่งสัญญาณมาควบคุมการทำงานของ Blower ได้ทันต่อการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ

นอกจากนี้ ถ้าไม่ใช้การควบคุมความดันโดยใช้ Pressure transmitter ก็มีการควบคุมความดันโดยใช้การวนก๊าซจากด้านทางส่งกลับเข้าไปด้านทางดูดของ Blower โดยใช้ Pressure relief valve ช่วย ดังแสดงในรูปที่ 6.52 ซึ่งในกรณีนี้ Blower จะส่งก๊าซออกด้วยอัตราการไหลคงที่ เมื่อมีการใช้ก๊าซน้อยกว่าที่ Blower ส่ง ทำให้ความดันในท่อทางส่งสูงขึ้น Pressure relief valve จะเปิดระบายก๊าซให้ไหลกลับเข้าท่อด้านทางดูดของ Blower เมื่อก๊าซระบายกลับไปความดันในท่อลดลง ทำให้ Pressure relief valve ปิด

รูปที่ 6.52 แสดงการวนก๊าซชีวภาพกลับที่ท่อด้านทางส่งกลับเข้าไปทางด้านทางดูด

การวนก๊าซชีวภาพกลับ ควรคำนึงถึงอุณหภูมิก๊าซที่จะสะสมเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นท่อก๊าซที่วนกลับเข้าทางฝั่งดูด ควรอยู่ห่างจาก Blower ไม่น้อยกว่า 20 เมตร เพื่อให้อุณหภูมิก๊าซลดลง หรือต้องมีการติดตั้ง High temperature protection เพื่อสั่งให้พัดลมหยุดทำงานเมื่ออุณหภูมิสูงเกินกว่าที่กำหนด

บทที่ 7
การปรับปรุงและควบคุมคุณภาพก๊าซชีวภาพ

7.1 การพิจารณาเพื่อปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพ

โดยทั่วไปก๊าซชีวภาพที่ได้จากน้ำเสียอุตสาหกรรมการเกษตร จะมีองค์ประกอบดังนี้คือ

- ก๊าซมีเทน ประมาณร้อยละ 45 – 70
- ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ประมาณร้อยละ 25 – 50
- ความชื้น/ละอองน้ำ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (ก๊าซไข่เน่า) ก๊าซแอมโมเนีย ก๊าซไนโตรเจน ก๊าซไซลอกเซน (ส่วนใหญ่จะมีในก๊าซชีวภาพที่ผลิตจากจากขยะชุมชน) และสิ่งปนเปื้อนอื่นๆ เช่น โฟม (Foam) คราบ (Scum) ประมาณร้อยละ 5 – 10

การนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์ มีวัตถุประสงค์หลักคือ

1. การใช้เป็นเชื้อเพลิงที่หัวเผา (Burner) สำหรับหม้อน้ำ หรือหม้อน้ำมันร้อน ซึ่งก๊าซชีวภาพสามารถใช้ทดแทนเชื้อเพลิงเดิมได้ทุกชนิด
2. การใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์แก๊สโซลีน เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าหรือใช้ในยานพาหนะ ซึ่งก๊าซชีวภาพสามารถใช้ทดแทนน้ำมันเบนซิน ก๊าซแอลพีจี (LPG) หรือก๊าซธรรมชาติอัด (CNG)

องค์ประกอบสำคัญในก๊าซชีวภาพที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงคือ ก๊าซมีเทน สำหรับองค์ประกอบอื่นๆ ที่มีอยู่ในก๊าซชีวภาพ ล้วนเป็นสิ่งเจือปนที่ไม่พึงประสงค์ซึ่งมีผลเสียต่อการใช้งานทั้งสิ้น

ปัญหาที่พบเมื่อใช้ก๊าซชีวภาพที่ไม่มีการปรับปรุงคุณภาพเป็นเชื้อเพลิงที่หัวเผาสำหรับหม้อน้ำ หรือหม้อน้ำมันร้อน เช่น การจุดเตาไม่ติด การระเบิดในห้องเผาไหม้ในขณะจุดเตาหรือในขณะเดินเครื่อง เปลวไฟกระพือและดับในขณะกำลังเร่งไฟ การระเบิดที่ปล่องไอเสีย การสูญเสียความร้อนอย่างมหาศาลไปกับอุณหภูมิปล่องไอเสียที่ร้อนจัด การเกิดความร้อนเฉพาะจุดที่ผิวสัมผัสไฟในห้องเผาไหม้ กำลังผลิตของหม้อน้ำหรือหม้อน้ำมันร้อนไม่ได้ตามข้อกำหนด (Specification) ของเครื่องจักร อุปกรณ์ทุกชนิดที่สัมผัสกับก๊าซชีวภาพชำรุดง่ายและมีอายุการใช้งานสั้น การเกิดไฟไหม้จากการแตกรั่วของระบบสูบส่งก๊าซ เป็นต้น

ปัญหาที่พบเมื่อใช้ก๊าซชีวภาพที่ไม่มีการปรับปรุงคุณภาพเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์แก๊สโซลีน เช่น สตาร์ทเครื่องไม่ติดหรือติดยาก เครื่องยนต์ไม่มีกำลัง น้ำมันเครื่องสกปรกมากและอายุสั้น ห้องเผาไหม้สกปรกมาก ปล่องไอเสียร้อนจัด วาล์วไอเสียไหม้และอายุสั้น เดินเครื่องได้ไม่ต่อเนื่อง ต้องหยุดเพื่อซ่อมบำรุงบ่อยมาก เป็นต้น

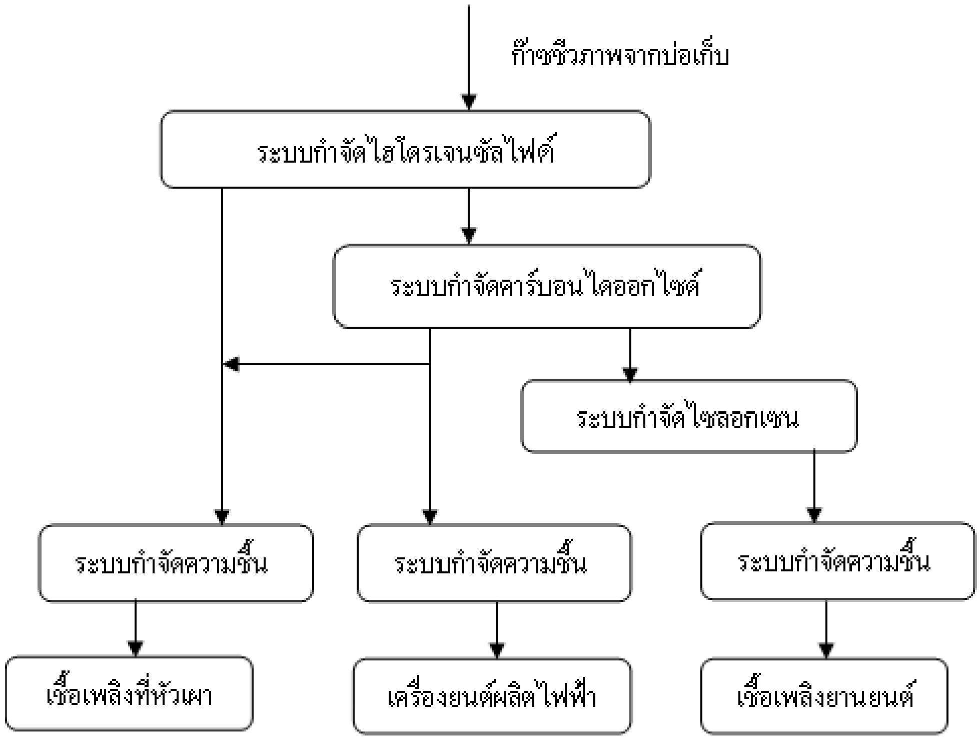
สาเหตุที่ทำให้เกิดปัญหาดังกล่าว ล้วนเกิดจากสิ่งปนเปื้อนต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ เช่น

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นก๊าซเฉื่อยที่ไม่ให้พลังงานความร้อนในการเผาไหม้ เป็นก๊าซที่ทำให้ค่าความร้อนในก๊าซชีวภาพลดลงจนเป็นเชื้อเพลิงที่ด้อยคุณภาพ ก๊าซชีวภาพจะติดไฟยากขึ้นและลุกไหม้ช้าลงจนเป็นเหตุให้เชื้อเพลิงเผาไหม้ไม่หมดภายในห้องเผาไหม้ เป็นก๊าซที่รับความร้อนจากการเผาไหม้และพาความร้อนไปทิ้งทางปล่องไอเสีย เมื่อก๊าซนี้รวมตัวกับน้ำหรือความชื้นจะเกิดเป็นกรดคาร์บอนิค (H_2CO_3) ที่มีฤทธิ์กัดกร่อนวัสดุอุปกรณ์ต่างๆที่สัมผัสกับก๊าซชีวภาพ เช่นทำให้เกิดการกัดกร่อนของถังเก็บก๊าซ เป็นต้น

ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์หรือก๊าซไข่เน่า เมื่อรวมตัวกับน้ำหรือความชื้นจะเกิดเป็นกรดไฮโดรซัลฟิวลิก (hydrosulphuric acid) ที่มีฤทธิ์กัดกร่อนอย่างรุนแรงต่อวัสดุอุปกรณ์ต่างๆ ที่สัมผัสกับก๊าซชีวภาพ เมื่อมีการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์จะเกิดเมือก เป็นต้น

ความชื้นหรือละอองน้ำ ทำให้เกิดการสะสมของน้ำในท่อที่ตกท้องช้างหรือบริเวณจุดต่ำสุดของท่อส่งก๊าซ ทำให้ปิดกั้นการไหลของก๊าซชีวภาพ ช่วยให้เกิดเมือก ตะกอน โฟม ทำให้อุปกรณ์ความปลอดภัยอุดตัน ทำให้เกิดกรดคาร์บอนิคและกรดอันเกิดจากการแตกตัวของซัลไฟด์อิออน ทำให้เชื้อเพลิงจุดไม่ติด หรือติดแต่กระพือดับ เป็นต้น

เพื่อให้การนำก๊าซชีวภาพไปใช้งานกับหัวเผาและเครื่องยนต์เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ สามารถใช้งานต่อเนื่องอย่างปลอดภัย จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพและควบคุมให้มีคุณภาพสม่ำเสมอเหมาะกับการใช้งานทุกสภาวะ



รูปที่ 7.1 แสดงผังกระบวนการปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพโดยรวม

7.2 การกำจัดความชื้นหรือละอองน้ำ

น้ำในก๊าซชีวภาพที่เป็นละอองน้ำเมื่อไหลผ่านท่อก๊าซและอุปกรณ์ดักละอองน้ำ จะถูกแยกออกจากก๊าซชีวภาพ แต่ยังคงมีน้ำที่อยู่ในรูปความชื้นที่ต้องถูกกำจัดก่อนที่จะนำก๊าซไปใช้งาน ไม่เช่นนั้นจะมีผลกระทบต่อการกัดกร่อนอุปกรณ์ต่างๆ หรือทำให้เกิดคราบหรือเมือกในอุปกรณ์ความปลอดภัยต่างๆ เป็นต้นเหตุของอุบัติเหตุได้ การกำจัดความชื้นในก๊าซชีวภาพทำได้โดยเครื่องกำจัดความชื้นที่ใช้หลักการลดอุณหภูมิของก๊าซ ลักษณะของการลดอุณหภูมินั้นทำได้ใน 2 ลักษณะ คือ

- Indirect Heat Exchanger: การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซชีวภาพกับน้ำเย็น (Chiller)
- Direct Heat Exchanger: การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซชีวภาพกับสารทำความเย็น (Refrigerant)

7.2.1 การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซชีวภาพกับน้ำเย็น

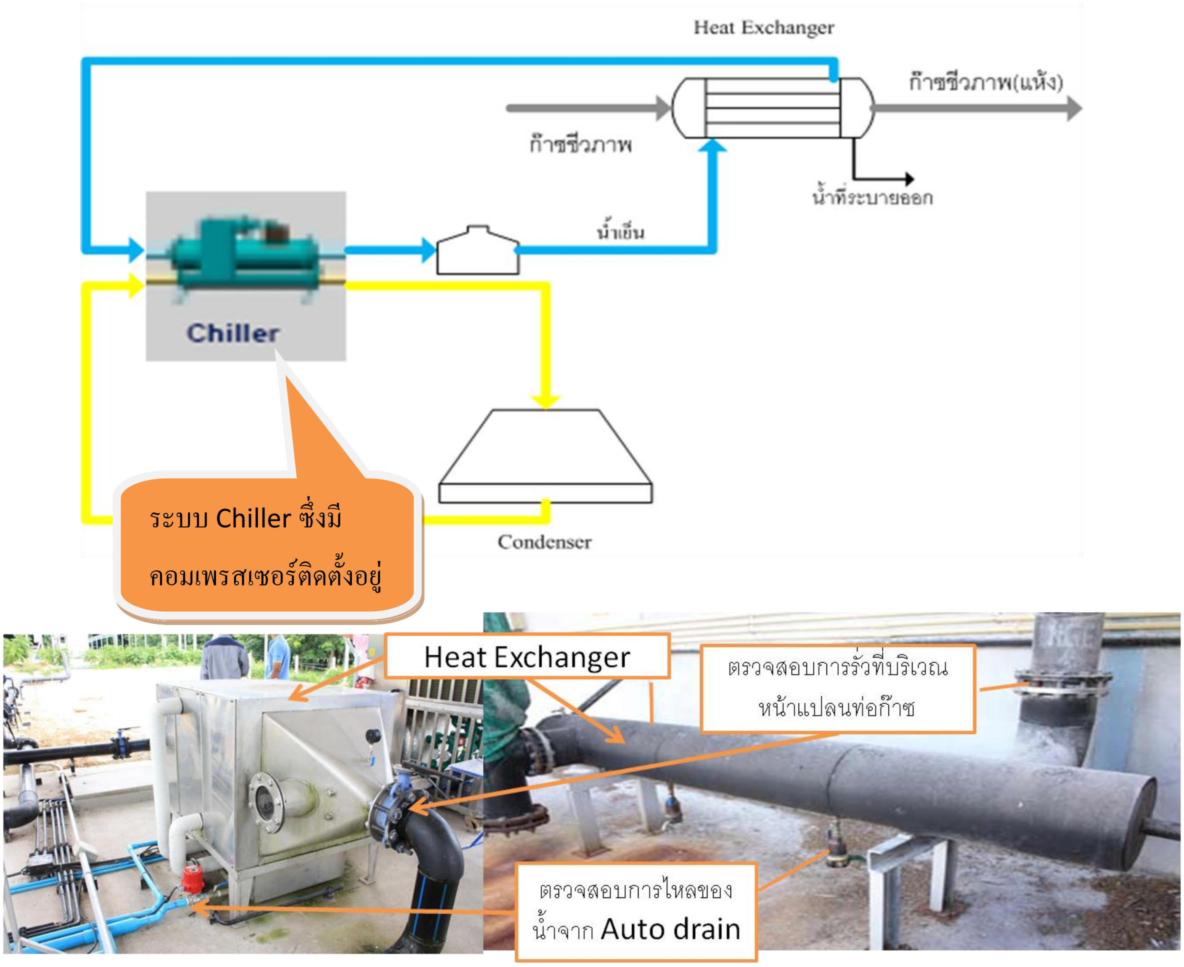
ระบบที่ใช้การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซชีวภาพกับน้ำเย็น มีองค์ประกอบอยู่ 3 ส่วน คือ

1) คอมเพรสเซอร์สำหรับอัดสารทำความเย็น และเครื่องควบแน่น (Condenser)

2) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำกับสารทำความเย็น (Chiller) หรือเครื่องทำน้ำเย็น

3) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซชีวภาพกับน้ำเย็น เพื่อทำให้ก๊าซชีวภาพเย็นลง

โดยเครื่องทำน้ำเย็นจะผลิตน้ำเย็นที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 10–12°ซ. แล้วน้ำเย็นจะถูกปั๊มเข้าสู่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนกับก๊าซชีวภาพ โดยให้มีการลดอุณหภูมิก๊าซชีวภาพให้อยู่ที่ 12–15°ซ. ความชื้นที่อยู่ในก๊าซชีวภาพก็จะกลั่นตัวเป็นน้ำ และแยกตัวออกจากก๊าซโดยระบายออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทางวาล์วระบายน้ำอัตโนมัติ น้ำเย็นที่แลกเปลี่ยนความร้อนกับก๊าซชีวภาพจนมีอุณหภูมิสูงขึ้นจะถูกทำให้อุณหภูมิต่ำลงโดยเครื่อง Chiller ซึ่งสารทำความเย็นของ Chiller จะถูกระบายความร้อนออกที่ Condenser ดังแสดงในรูปที่ 7.2



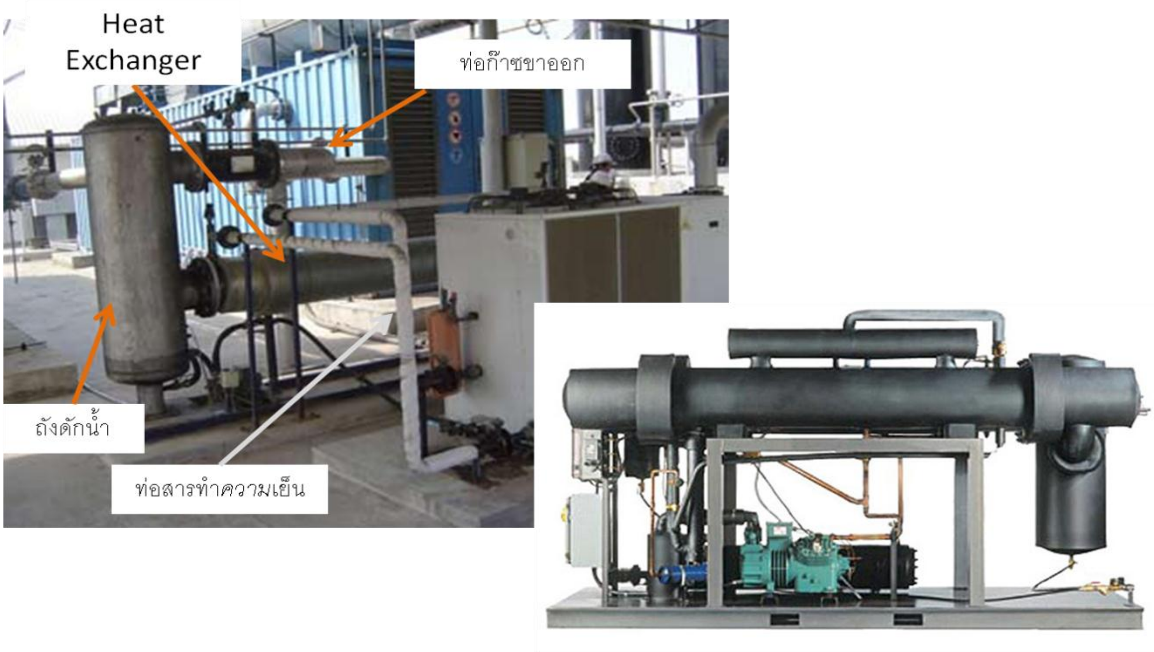
รูปที่ 7.2 ผังแสดงกระบวนการกำจัดความชื้นที่ใช้การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซชีวภาพกับน้ำเย็น

7.2.2 การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซชีวภาพกับสารทำความเย็น

ระบบที่ใช้การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซชีวภาพกับสารทำความเย็น ระบบนี้มีองค์ประกอบอยู่ 2 ส่วน คือ

1) คอมเพรสเซอร์อัดสารทำความเย็นและคอนเดนเซอร์
2) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซชีวภาพกับสารทำความเย็น

สารทำความเย็นจากคอมเพรสเซอร์จะไปแลกเปลี่ยนความร้อนกับก๊าซชีวภาพที่ส่วนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยก๊าซชีวภาพวิ่งในท่อ ขณะที่สารทำความเย็นอยู่ในฝั่ง shell ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เมื่ออุณหภูมิก๊าซชีวภาพลดลงอยู่ที่ 12–15°ซ. ความชื้นที่อยู่ในก๊าซชีวภาพก็จะกลั่นตัวเป็นน้ำ แยกตัวออกจากก๊าซชีวภาพและระบายออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทางวาล์วระบายน้ำอัตโนมัติ ดังแสดงในรูปที่ 7.3



รูปที่ 7.3 แสดงการกำจัดความชื้นที่ใช้การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซชีวภาพกับสารทำความเย็น

การตรวจสอบและบำรุงรักษาเทคโนโลยีการกำจัดความชื้นทั่วไป มีดังนี้

1) ตรวจสอบการรั่วไหลของก๊าซที่ข้อต่อหน้าแปลนต่างๆ ถ้ามีการรั่วซึมให้ขันอัด หรือเปลี่ยนปะเก็น เป็นต้น
2) หมั่นตรวจสอบการระบายน้ำออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและการอุดตันของวาล์วระบายน้ำ ถ้ามีการอุดตันให้ทำความสะอาดท่อและวาล์วระบาย
3) ตรวจสอบสภาพของท่อและอุปกรณ์ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
4) ตรวจสอบการทำงานของคอมเพรสเซอร์ เช่น ตรวจสอบความดันของสารทำความเย็น และปริมาณสารทำความเย็น เป็นต้น และซ่อมบำรุงตามที่ผู้ผลิตกำหนด หรือถ้ามีการรั่วซึมของสารทำความเย็น ให้ทำการซ่อมแซมจุดที่รั่วซึมและเติมสารทำความเย็นเพิ่มเติม
5) ตรวจสอบสภาพฉนวนของท่อ และถังต่างๆ
6) หมั่นทำความสะอาดตะกรันในแผงแลกเปลี่ยนความร้อน หยุดระบบ และทำการฉีดล้างด้วยน้ำ อย่างน้อยทุก 6 เดือน

การตรวจสอบและบำรุงรักษาเทคโนโลยีการกำจัดความชื้น แบบการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซชีวภาพกับน้ำเย็น มีดังนี้

1) ตรวจสอบการทำงานของเครื่องทำน้ำเย็น (Chiller) เช่น ตรวจสอบอุณหภูมิน้ำเย็น ความดันของสารทำความเย็น เป็นต้น และซ่อมบำรุงตามที่ผู้ผลิตกำหนด
2) ตรวจสอบระดับน้ำในถังน้ำเย็น ให้อยู่ในระดับที่กำหนด
3) ตรวจสอบคุณภาพน้ำเย็นในถัง สังเกตว่ามีตะไคร่หรือเมือกหรือไม่ ถ้ามีให้เปลี่ยนและทำความสะอาด

การตรวจสอบและบำรุงรักษาเทคโนโลยีการกำจัดความชื้น แบบการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซชีวภาพกับสารทำความเย็น มีดังนี้

1) ตรวจสอบดูว่าท่อแลกเปลี่ยนความร้อนและท่อสารทำความเย็น มีน้ำแข็งเกาะ ถ้ามีเกาะให้ทำการหยุดและละลายน้ำแข็งออกก่อน
2) ตรวจสอบความดันและอุณหภูมิของสารทำความเย็น และปริมาณของสารทำความเย็น ถ้ามีการรั่วซึมของสารทำความเย็น ให้ทำการซ่อมแซมจุดที่รั่วซึม และเติมสารทำความเย็นเพิ่มเติม

ตำแหน่งของเครื่องกำจัดความชื้น

- ถ้าเครื่องกำจัดความชื้นอยู่ด้านดูดของ Blower ให้ระมัดระวังเรื่องการระบายน้ำออกจากระบบ เนื่องจากความดันในเครื่องกำจัดความชื้นจะใกล้เคียงหรืออาจต่ำกว่าความดันบรรยากาศ ควรมีท่อพักน้ำเพื่อเพิ่ม Static head ของน้ำก่อนเข้าวาล์วระบายน้ำอัตโนมัติ
- ถ้าเครื่องกำจัดความชื้นอยู่ด้านส่งของ Blower ก๊าซชีวภาพอาจเย็นเกินไปจนไม่เหมาะกับการใช้งานโดยตรง อาจจะต้องพิจารณาเรื่องการเพิ่มอุณหภูมิของก๊าซชีวภาพโดยใช้ความร้อนจากระบบคอนเดนเซอร์ ก่อนนำก๊าซชีวภาพไปใช้งาน

ตารางที่ 7.1 แสดงการเปรียบเทียบจุดเด่น (ข้อดี) – ข้อจำกัด (ข้อเสีย) ของระบบกำจัดความชื้นในก๊าซชีวภาพระหว่างระบบที่ใช้การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซชีวภาพกับน้ำเย็นและที่ใช้การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซชีวภาพกับสารทำความเย็น

ลำดับ	ชนิดระบบ	ข้อดี	ข้อจำกัด
1.	ระบบที่ใช้การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซชีวภาพกับน้ำเย็น (Chiller)	• ไม่เสี่ยงต่อการรั่วของสารทำความเย็นกับก๊าซชีวภาพ	• ต้องมีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสองส่วนด้วยกัน คือ ระหว่างสารทำความเย็นกับน้ำ และระหว่างน้ำเย็นกับก๊าซชีวภาพ • มีข้อจำกัดของอุณหภูมิน้ำเย็นที่ทำได้ไม่ต่ำมาก • ใช้พลังงานไฟฟ้าสูงกว่า • เงินลงทุนสูงกว่า
2.	ระบบที่ใช้การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซชีวภาพกับสารทำความเย็น	• เทคนิคไม่ซับซ้อน • ควบคุมอุณหภูมิได้ดีกว่าการใช้น้ำเย็น • ต้องการพื้นที่น้อยกว่า • เงินลงทุนต่ำกว่า	• เสี่ยงต่อการรั่วของสารทำความเย็นและก๊าซชีวภาพ • มีโอกาสการเกิดน้ำแข็งเกาะที่ท่อด้านก๊าซชีวภาพทำให้ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนลดลง • ค่าใช้จ่ายการซ่อมบำรุงรักษาสูง • ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าต่ำกว่า

ตารางที่ 7.2 แสดงการประมาณค่าใช้จ่ายในการลงทุนและค่าเดินระบบ

ชนิดระบบ	เงินลงทุน* (บาท/ ลบ.ม.ก๊าซ)	ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ (บาท/ลบ.ม.ก๊าซ)
ระบบที่ใช้การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซชีวภาพกับน้ำเย็น	0.021–0.033	0.10–0.15
ระบบที่ใช้การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซชีวภาพกับสารทำความเย็น	0.016–0.028	0.08–0.12

* เงินลงทุนได้จากการสอบถาม และคำนวณจากอายุระบบ 5 ปี เดินระบบ 300 วัน/ปี ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบเป็นค่าพลังงาน (ไม่รวมค่าแรงงานและการซ่อมบำรุง) ซึ่งระบบที่ใช้การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซชีวภาพกับสารทำความเย็น จะมีค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงสูงกว่า

ตารางที่ 7.3 แสดงการเปรียบเทียบเทคโนโลยีการกำจัดความชื้นในก๊าซชีวภาพ

ชนิดของระบบ	พื้นที่	ทักษะของผู้เดินระบบ	การบำรุงรักษา
ระบบที่ใช้การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซชีวภาพกับน้ำเย็น	มาก	น้อย	ต่ำ
ระบบที่ใช้การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซชีวภาพกับสารทำความเย็น	น้อย	ปานกลาง	สูง

ความต้องการพื้นที่ : น้อย : < 2 ตร.ม/ 100 ลบ.ม.ก๊าซ /ชม.

มาก : > 2 ตร.ม/ 100 ลบ.ม.ก๊าซ /ชม.

ความต้องการทักษะของผู้เดินระบบ :

น้อย สามารถเริ่มต้นและหยุดระบบ (เครื่องจักร) ได้ ดูแลการระบายน้ำได้ถูกวิธี

ปานกลาง สามารถเริ่มต้นและหยุดระบบ (เครื่องจักร) ได้ ดูแลการระบายน้ำได้ถูกวิธี และเข้าใจการทำงานของเครื่องทำความเย็น/คุณสมบัติของสารทำความเย็น

สูง : สามารถเริ่มต้นและหยุดระบบ (เครื่องจักร) ได้ ดูแลการระบายน้ำได้ถูกวิธี และเข้าใจการทำงานของเครื่องทำความเย็น/คุณสมบัติของสารทำความเย็น และจัดการเครื่องทำความเย็น/การเปลี่ยนถ่ายสารทำความเย็น

ความต้องการการบำรุงรักษา :

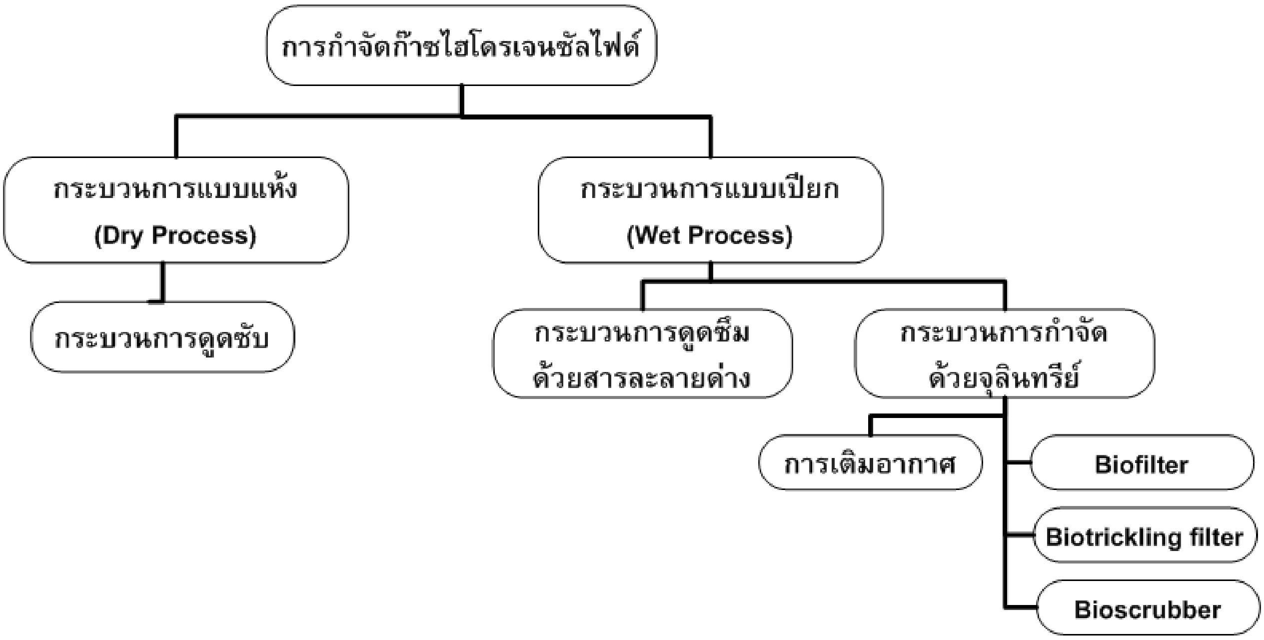
ต่ำ : ต้องการการดูแลอุปกรณ์/เครื่องจักร ไม่บ่อย/ไม่มาก (ท่อ ปั๊ม วาล์ว)

ปานกลาง : ต้องการการดูแลอุปกรณ์/เครื่องจักร สม่ำเสมอแต่ไม่ซับซ้อน

สูง : ต้องการการดูแลอุปกรณ์/เครื่องจักร มากและซับซ้อน

7.3 การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S)

กระบวนการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) นั้น มีหลายกระบวนการ โดยจำแนกเทคโนโลยี ได้ดังรูปที่ 7.4



รูปที่ 7.4 ผังแสดงการจำแนกเทคโนโลยีการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

7.3.1 กระบวนการแบบแห้ง (Dry process)

เป็นกระบวนการที่อาศัยหลักการของการดูดซับ (Adsorption) โดยสารดูดซับ (Adsorbent) ซึ่งก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จะถูกจับในรูพรุน (pore) ของสารดูดซับ หรือหลังจากถูกจับแล้วอาจจะเกิดปฏิกิริยาเคมีก็ได้

7.3.1.1 กระบวนการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S Adsorption)

เทคโนโลยีที่ใช้ในการจับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยสารดูดซับในรูปของแข็งนั้น จะประกอบไปด้วยถังปฏิกรณ์มีลักษณะเป็น Column ภายในบรรจุไว้ด้วยสารดูดซับ (Packed Bed) การไหลของก๊าซอาจจะมีทั้งไหลขึ้น (Upflow) หรือไหลลง (Downflow) ก็ได้ ดังแสดงในรูปที่ 7.5 เมื่อก๊าซชีวภาพที่มีก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ไหลผ่านสารดูดซับก็จะมีการจับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดขึ้น สารดูดซับที่ใช้กัน ได้แก่ Iron oxide (Fe_2O_3) ซึ่งในต่างประเทศนิยมใช้ในรูปผงหรือเม็ด (Pellet) Fe_2O_3 หรือในประเทศไทยนิยมใช้ฝอยเหล็กที่เป็นสนิมและ Hydrate Lime จะดูดซับและเกิดปฏิกิริยา แต่ถ้าเป็น

สารดูดซับพวก Zeolite และ Activated Carbon จะเป็นแต่เพียงจับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ไว้ในรูพรุนเท่านั้น

เมื่อมีการจับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จนอิ่มตัวแล้ว จะต้องมีการเปลี่ยนสารดูดซับใหม่ แล้วนำสารดูดซับที่อิ่มตัวแล้วไปฟื้นสภาพ (Regenerate) ด้วยอากาศ และนำกลับมาใช้ใหม่ได้

การจับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ปฏิกิริยาที่เกิดคือ

$$Fe_2O_3 + 3\,H_2S \rightarrow Fe_2S_3 + 3\,H_2O$$

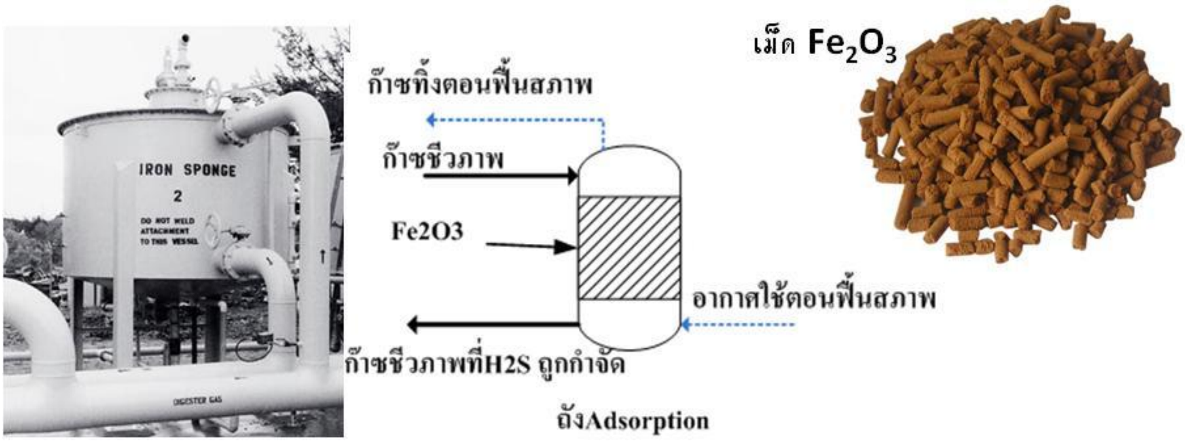
เมื่อมีการฟื้นสภาพด้วยอากาศ ปฏิกิริยาที่เกิดคือ

$$2\,Fe_2S_3 + 3\,O_2 \rightarrow 2Fe_2O_3 + 6\,S$$

ปฏิกิริยาจะเกิดได้ดี ถ้าสารดูดซับชื้น และมี pH >7

ปฏิกิริยาทั้งสองที่เกิดขึ้นข้างต้นเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน โดยในช่วงการจับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ จะมีการคายความร้อน 0.65 กิโลจูล/กรัมของ H_2S ดังนั้นในช่วงของการจับไฮโดรเจนซัลไฟด์ ถังปฏิกรณ์จับ H_2S จะมีอุณหภูมิสูงขึ้นบ้าง และในช่วงการฟื้นสภาพด้วยอากาศก็จะมีการคายความร้อน 5.8 กิโลจูลต่อกรัมของ H_2S ซึ่งจะเห็นได้ว่า ในช่วงการฟื้นสภาพ สารดูดซับจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นมาก และมีความเสี่ยงต่อการเกิดอัคคีภัย

1 กิโลจูล ทำให้อากาศ 1 ลบ.ม. เพิ่มอุณหภูมิขึ้นประมาณ 1.1° ซ.



รูปที่ 7.5 แสดงลักษณะของถังกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบแห้ง

ในการฟื้นสภาพของฝอยสนิมเหล็ก (สีน้ำตาลแดง) อาจจะทำอย่างง่าย คือ การนำมาตากแดด (โดยต้องเกลี่ยให้เป็นชั้นบางๆ) สัก 2-3 วัน เพื่อให้ออกซิเจนในอากาศไปทำปฏิกิริยากับไพไรท์ (Fe_2S_3) (เป็นคราบสีดำ)

กรณีที่ต้องการฟื้นสภาพด้วยอากาศในถังปฏิกรณ์ โดยไม่นำสารดูดซับออกมา ต้องทำการแยกถังปฏิกรณ์นั้นออกจากระบบก๊าซชีวภาพก่อน แล้วจึงทำการเติมอากาศเข้าไปในถังที่ต้องการฟื้นสภาพ (โดยส่วนใหญ่จะใช้กับสารดูดซับที่เป็นเม็ด Iron oxide) นอกจากนี้ ควรหมั่นตรวจสอบอุณหภูมิภายในถังที่ทำการฟื้นสภาพ

โดยทั่วไปการใช้การกำจัดก๊าซ H_2S โดยวิธี Adsorption จะต้องมีถังปฏิกรณ์หลายใบที่ทำงาน และสำรองไว้ช่วงระหว่างการฟื้นสภาพ และถังควรเป็นถังสแตนเลส เนื่องจากจะมีอุณหภูมิสูงมากและต้องระมัดระวังเรื่องการเกิดการติดไฟ

ในกรณีที่ใช้ Activated carbon ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จะถูกจับในรูพรุน (pore) ของ Activated carbon ถ้าต้องการฟื้นสภาพต้องนำ Activated carbon ไปไล่ไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกจากรูพรุน ซึ่งส่วนใหญ่ต้องนำกลับไปยังโรงงานที่ผลิต Activated carbon ทำให้ต้องมีค่าใช้จ่ายสูง จึงไม่เป็นที่นิยมใช้กันในระดับโรงงานอุตสาหกรรม

7.3.2 กระบวนการแบบเปียก (Wet Process)

เป็นกระบวนการดูดซึม (Absorption) อาศัยหลักการของการละลาย ซึ่งก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จะละลายลงไปในสารละลายที่ทำหน้าที่เป็นสารดูดซึม (Absorbent) ที่ไหลผ่านกัน และเมื่อก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ละลายลงไปในสารดูดซึมแล้ว อาจจะเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนรูปของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นกำมะถัน หรือไม่เกิดปฏิกิริยาก็ได้ ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีทั้งที่เป็นปฏิกิริยาเคมี (Chemical reaction) หรือเกิดปฏิกิริยาทางชีววิทยา (Biological reaction) จากจุลินทรีย์ที่มีในระบบ

7.3.2.1 กระบวนการ Absorption ก๊าซ H_2S ด้วยสารละลายด่าง

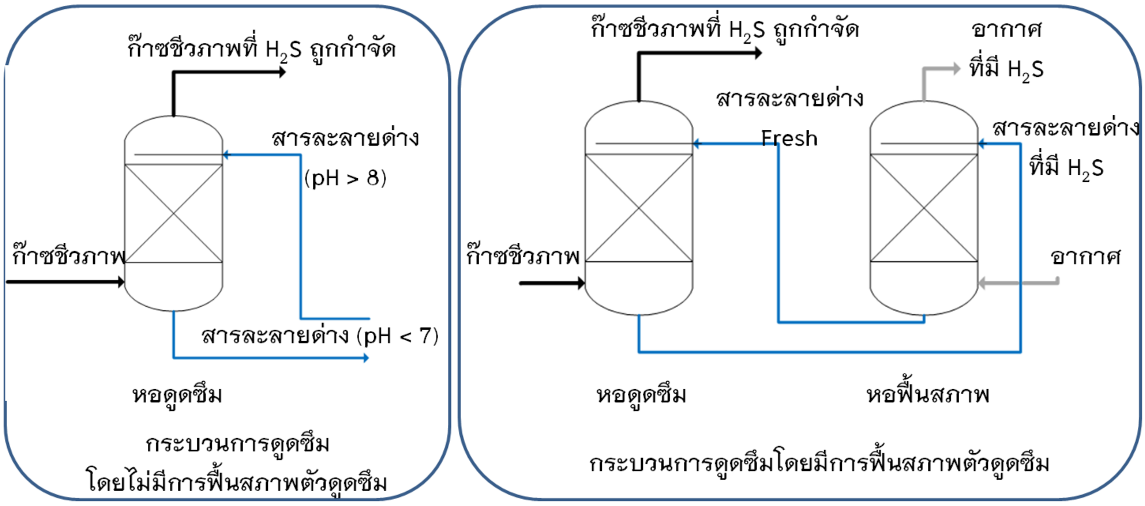
เทคโนโลยีที่ใช้ในการจับ H_2S ด้วยสารละลายด่าง อาศัยหลักการเรื่องความสามารถในการละลายของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ละลายในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรดด่าง (pH) สูง ($8 \leq pH \leq 10$) เทคโนโลยีนี้ประกอบไปด้วย หอดูดซึม (Absorption column) ซึ่งมีลักษณะเป็น Column ที่มีชั้นของตัวกลาง (Pack column) ภายในหอดูดซึม การไหลของก๊าซส่วนใหญ่จะเป็นการไหลขึ้น (Upflow) หรืออาจจะเป็นในลักษณะที่ก๊าซถูกฉีดพ่นทางด้านล่างผ่านชั้นของสารละลาย (Bubble

column) โดยเมื่อก๊าซชีวภาพที่มีก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ไหลสวนทางกับสารละลายจะเกิดการถ่ายเทมวลสาร (mass transfer) โดยสารละลายที่ใช้ ได้แก่ น้ำที่มีค่า pH สูงหรือ น้ำปูนใส หรือ สารละลายโซดาไฟ เป็นต้น ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังสมการ

$$NaOH + H_2S \rightarrow NaHS + H_2O$$

$$2NaOH + H_2S \rightarrow Na_2S + 2H_2O$$

สารละลายที่ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ละลายลงไปแล้ว ทำให้ pH ของสารละลายลดลง และความสามารถในการละลายของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ต่ำลงด้วย จึงต้องมีการเปลี่ยนสารละลายใหม่อยู่เสมอ โดยส่วนใหญ่จะใช้การควบคุม pH ของสารละลายขาเข้าหอดูดซึมให้มี pH >8 ในการใช้สารละลายที่เป็นด่างนี้ บางครั้งโรงงานในประเทศไทยมีการใช้น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วในบ่อเปิดบ่อท้ายๆ ซึ่งมีค่า pH สูงมาใช้ ก็สามารถทำได้แต่ต้องใช้ปริมาณน้ำมาก และต้องควบคุม pH ให้สูงกว่า 8 อยู่เสมอจึงจะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสูง



รูปที่ 7.6 แสดงแผนผังการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ใช้สารละลายด่าง ทั้งแบบมีการฟื้นสภาพตัวดูดซึมและ ไม่มีการพื้นสภาพตัวดูดซึม

ถ้ามีการใช้สารเคมีที่มีความสามารถในการละลาย เช่น สารละลายอามีน ซึ่งมีราคาสูง ได้แก่ Monoethanolamine (MEA, R-NH_2) เป็นต้น ในระบบการกำจัดก๊าซ H_2S อาจจะมีหอสำหรับฟื้นสภาพ (Regenerate) สารละลายกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยการเพิ่มอุณหภูมิสารละลายหรือใช้อากาศเพื่อช่วยในการไล่ H_2S ออกจากสารละลาย ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังสมการ

การดูดซึม: $2(R\text{-}NH_2) + H_2S \rightarrow (RNH_3)_2S$ เมื่อสารละลาย อุณหภูมิต่ำ

การฟื้นสภาพ: $(RNH_3)_2S \rightarrow 2(R\text{-}NH_2) + H_2S$ เมื่อสารละลาย อุณหภูมิสูง

7.3.2.2 กระบวนการกำจัดก๊าซ H_2S ด้วยจุลินทรีย์

เทคโนโลยีที่ใช้ในการกำจัดก๊าซ H_2S อาศัยกลุ่มของเชื้อแบคทีเรียประเภท Sulphide Oxidizing Bacteria ซึ่งใช้ออกซิเจนในการเปลี่ยนก๊าซ H_2S ให้อยู่ในรูปของกำมะถัน (S^0) แต่ถ้าในกรณีที่มีการให้ออกซิเจนมากเกินไปก๊าซ H_2S จะถูกออกซิไดซ์เป็นซัลเฟต ดังสมการ

$HS^- + \frac{1}{2}O_2 + H^+ \rightarrow S^0 + H_2O$ กรณีที่มีการเติมอากาศพอดี

$H_2S + 2O_2 \rightarrow SO_4^{2-} + 2H^+$ กรณีที่มีการเติมอากาศมากเกินไป

เทคโนโลยีในการกำจัดก๊าซ H_2S โดยอาศัยการทำงานของแบคทีเรีย ยังแบ่งเป็นเทคโนโลยีย่อยได้อีกหลายแบบ ได้แก่ เทคโนโลยีการเติมอากาศ Biofilter Biotrickling Filter และ Bioscrubber โดยมีรายละเอียดดังนี้

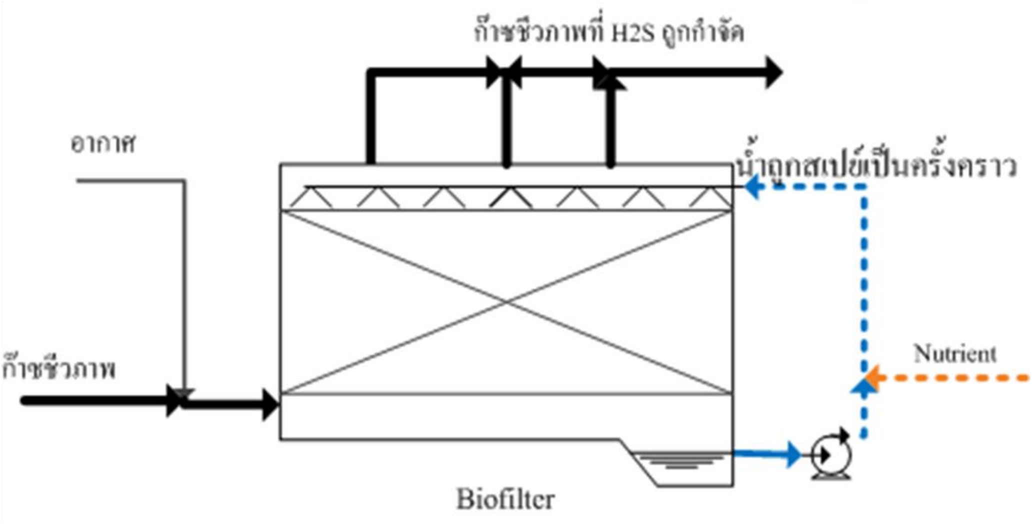
(1) เทคโนโลยีการเติมอากาศ

เทคโนโลยีกำจัดก๊าซ H_2S ด้วยการเติมอากาศที่ผิวหน้าของน้ำในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพ เพื่อเปลี่ยนก๊าซ H_2S ให้อยู่ในรูปของกำมะถันและย่อยสลายด้วยแบคทีเรีย โดยต้องมีการควบคุมปริมาณอากาศที่ป้อนเข้าโดยวัดจากความเข้มข้นของออกซิเจนในก๊าซชีวภาพไม่ให้เกิน 3% (v/v) ทั้งนี้ในถังปฏิกรณ์ต้องมีกลุ่มเชื้อแบคทีเรียประเภท Sulphide Oxidizing Bacteria อยู่ด้วย ไม่เช่นนั้นก็จะไม่สามารถกำจัดก๊าซ H_2S ได้

(2) Biofilter Technology

เป็นเทคโนโลยีที่ใช้การกำจัด H_2S ด้วยการเติมอากาศเข้าท่อก๊าซชีวภาพ แล้วย่อยสลายด้วยแบคทีเรียที่ใช้อากาศบนตัวกลางเปียกชื้นที่มีรูพรุนสูง ประกอบไปด้วย ตัวกลางที่ใส่ในถังปฏิกรณ์แบบสุ่ม (Random packed) ตัวกลางที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นวัสดุทางธรรมชาติที่มีรูพรุนสูง ได้แก่ เปลือกไม้ หินภูเขาไฟ หรือเป็นตัวกลางที่ทำจากพลาสติกแต่ไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากการดูดซับน้ำได้ไม่ดี การไหลของก๊าซจะมีทั้งการไหลขึ้น (Upflow) และการไหลลง (Down flow) โดยที่บนตัวกลางในถังปฏิกรณ์จะมีแบคทีเรียประเภท Sulphide Oxidizing Bacteria เกาะติดและเจริญเติบโตอยู่ที่ผิวใน

รูพรุนของตัวกลาง เมื่อก๊าซไหลผ่านตัวกลาง ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จะละลายในน้ำแล้วแบคทีเรียก็จะเปลี่ยนไฮโดรเจนซัลไฟด์ให้เป็นกำมะถัน ซึ่งต้องมีการสเปรย์น้ำเป็นครั้งคราวเพื่อทำให้ตัวกลางมีความชื้นเพียงพอ



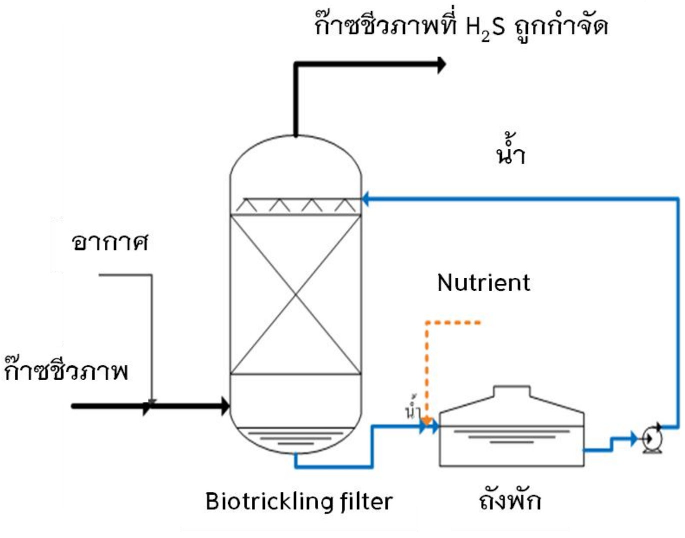
รูปที่ 7.7 แสดงลักษณะของถังกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบ Biofilter

เทคโนโลยี Biofilter จะใช้การเติมอากาศในปริมาณไม่มากในท่อก๊าซชีวภาพก่อนเข้าถังปฏิกรณ์กำจัด H_2S โดยใช้การควบคุมปริมาณอากาศที่ป้อนเข้า จากความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนในก๊าซชีวภาพ ลักษณะของถังกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบ Biofilter แสดงดังรูปที่ 7.7

(3) Biotrickling Filter Technology

เป็นเทคโนโลยีที่ใช้การกำจัด H_2S ด้วยการเติมอากาศเข้าท่อก๊าซชีวภาพ แล้วผ่านหอดูดซึมด้วยน้ำที่เป็นด่างบนตัวกลางพลาสติกและย่อยสลายด้วยแบคทีเรีย โดยอาศัยหลักการความสามารถในการละลายน้ำของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ค่า pH สูง เทคโนโลยีนี้ประกอบไปด้วย หอดูดซึม

(Absorption column) ซึ่งมีลักษณะเป็น Column ที่มีชั้นของตัวกลาง ได้แก่ Plastic packing การไหลของก๊าซจะเป็นการไหลขึ้น (Upflow) และการไหลแบบ Cross flow โดยที่บนตัวกลางใน Column จะมีแบคทีเรียประเภท Sulphide Oxidizing Bacteria เกาะติดและเจริญเติบโตอยู่ที่ผิวของตัวกลาง เทคโนโลยีนี้จะมีการเติมอากาศในปริมาณไม่มากในท่อก๊าซชีวภาพก่อนเข้าถังปฏิกรณ์กำจัด H_2S โดยมีการควบคุมปริมาณอากาศที่ป้อนเข้า จากความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนในก๊าซชีวภาพ ไม่ควรเกิน 3%(v/v) เมื่อก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ละลายลงในน้ำก็จะถูกแบคทีเรียเปลี่ยนให้เป็นกำมะถันติดอยู่บนตัวกลาง จะมีการหมุนวนน้ำตลอดเวลาเพื่อให้มีการจับไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้เต็มที่ ลักษณะของถังกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบ Biotrickling filter แสดงดังรูปที่ 7.8

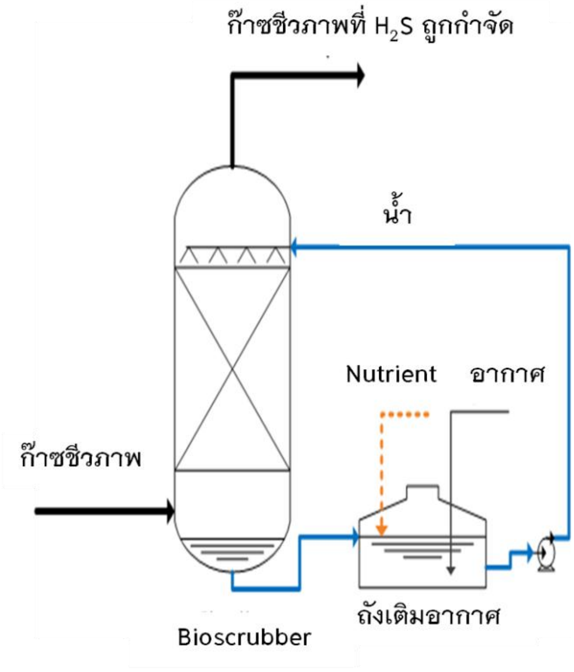


รูปที่ 7.8 แสดงลักษณะของถังกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบ Biotrickling filter

(4) Bioscrubber Technology

เป็นเทคโนโลยีที่ใช้การกำจัดก๊าซ H_2S โดยใช้น้ำที่เป็นด่างไหลผ่านหอดูดซึมที่มีตัวกลางพลาสติกเพื่อดูดจับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพและไหลเข้าบ่อเติมอากาศเพื่อย่อยสลายด้วยแบคทีเรีย อาศัยหลักการเรื่องความสามารถในการละลายของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ค่า pH สูง เทคโนโลยีนี้ประกอบไปด้วย หอดูดซึม (Absorption column) ซึ่งมีลักษณะเป็น Column ที่มีชั้นของตัวกลาง ได้แก่ plastic packing การไหลของก๊าซจะเป็นการไหลขึ้น (Upflow) โดยที่หอดูดซึมที่มีตัวกลางอยู่ด้านในจะทำหน้าที่หลักในการจับไฮโดรเจนซัลไฟด์ และมีบ่อเติมอากาศที่เลี้ยงแบคทีเรียประเภท Sulphide Oxidizing Bacteria อยู่โดยในบ่อเติมอากาศนี้แบคทีเรียจะทำการเปลี่ยน

ไฮโดรเจนซัลไฟด์ให้เป็นกำมะถัน ซึ่งข้อแตกต่างของเทคโนโลยีนี้กับ Biotrickling filter จะอยู่ที่มีการเติมอากาศในบ่อเติมอากาศ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ละลายลงในน้ำก็จะถูกแบคทีเรียเปลี่ยนให้เป็นกำมะถัน น้ำที่ใช้กำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นกำมะถันแล้วจะวนกลับไปที่หอดูดซึมอย่างต่อเนื่อง การควบคุมปริมาณอากาศที่เติม จะควบคุมปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (DO)ให้มีค่าระหว่าง 0 – 1 มก./ลิตร ตลอดเวลา ลักษณะของถังกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบ Bioscrubber แสดงดังรูปที่ 7.9



รูปที่ 7.9 แสดงลักษณะของถังกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ Bioscrubber

หน่วยกำจัด H_2S ที่ใช้กระบวนการแบบเปียก (Wet process) จะมีละอองน้ำและ ความชื้นหลุดไปในระบบท่อ ซึ่งอาจทำให้มีเมือก ตะกอน ไปสร้างปัญหากับอุปกรณ์การใช้งานต่อไป ถ้าไม่มีการดักจับน้ำและความชื้นที่ดี

ตารางที่ 7.4 แสดงรายการตรวจสอบและบำรุงรักษาเทคโนโลยีกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

กระบวนการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S Adsorption)	**กระบวนการ Absorption ก๊าซ H_2S ด้วยสารละลายด่าง**	**กระบวนการกำจัดก๊าซ H_2S ด้วยจุลินทรีย์ เทคโนโลยีการเติมอากาศ**	**กระบวนการกำจัดก๊าซ H_2S ด้วยจุลินทรีย์ Biofilter Technology**	**กระบวนการกำจัดก๊าซ H_2S ด้วยจุลินทรีย์ Biotrickling Filter Technology**	**กระบวนการกำจัดก๊าซ H_2S ด้วยจุลินทรีย์ Bioscrubber Technology**
1. ตรวจสอบการรั่วไหลของก๊าซที่ข้อต่อ หน้าแปลนต่างๆ บริเวณหอดูดซับ ถ้ามีการรั่วซึมให้ขันอัด หรือเปลี่ยนปะเก็น เป็นต้น 2. วิเคราะห์คุณสมบัติก๊าซชีวภาพ โดย พิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ให้เป็นไปตามที่ออกแบบ และความเข้มข้นก๊าซมีเทน 3. ตรวจสอบปริมาณออกซิเจนในก๊าซชีวภาพ ไม่ให้เกิน 3% (v/v) โดยควรมีการติดตั้งเครื่องตรวจจับออกซิเจน (Oxygen Detector) ให้มีการส่งสัญญาณเตือนตลอดเวลา และควรมีการสอบเทียบเครื่องมือวัดทุกปี					
4. ตรวจสอบการอุดตันของวาล์ว อันเนื่องมาจากเศษวัสดุหลุดเข้าไปอุดตัน หรือมีคราบกำมะถันมาเกาะ ถ้าพบมีเศษวัสดุ ควรเปลี่ยนตะแกรงในสารดูดซับ และทำความสะอาดวาล์ว	4. ตรวจสอบการอุดตันของหัวกระจายน้ำ/สารละลายที่เกิดจากตะกอนของสารประกอบกำมะถันทุกสัปดาห์ ถ้ามีการอุดตันให้ทำความสะอาด ล้างคราบตะกรัน/ตะกอนออกโดยใช้น้ำแรงดันสูง		4 ตรวจสอบการอุดตันของหัวกระจายน้ำ/สารละลายที่เกิดจากตะกอนของสารประกอบกำมะถันทุกสัปดาห์ ถ้ามีการอุดตัน ให้ทำความสะอาด ล้างคราบตะกรัน/ตะกอนออกโดยใช้น้ำแรงดันสูง	4. ตรวจสอบการอุดตันของหัวกระจายน้ำ/สารละลายที่เกิดจากตะกอนของสารประกอบกำมะถันทุกสัปดาห์ ถ้ามีการอุดตัน ให้ทำความสะอาด ล้างคราบตะกรัน/ตะกอนออกโดยใช้น้ำแรงดันสูง	4 ตรวจสอบการอุดตันของหัวกระจายน้ำ/สารละลายที่เกิดจากตะกอนของสารประกอบกำมะถันทุกสัปดาห์ ถ้ามีการอุดตัน ให้ทำความสะอาด ล้างคราบตะกรัน/ตะกอนออกโดยใช้น้ำแรงดันสูง

ตารางที่ 7.4 (ต่อ)

กระบวนการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S Adsorption)	กระบวนการ Absorption ก๊าซ H_2S ด้วยสารละลายด่าง	กระบวนการกำจัดก๊าซ H_2S ด้วยจุลินทรีย์ เทคโนโลยีการเติมอากาศ	กระบวนการกำจัดก๊าซ H_2S ด้วยจุลินทรีย์ Biofilter Technology	กระบวนการกำจัดก๊าซ H_2S ด้วยจุลินทรีย์ Biotrickling Filter Technology	กระบวนการกำจัดก๊าซ H_2S ด้วยจุลินทรีย์ Bioscrubber Technology
5 ตรวจสอบประสิทธิภาพการดูดซับ อย่างน้อยทุก 8 ชม. ถ้าสารดูดซับมีการอิ่มตัว ให้นำไปฟื้นสภาพ (Regenerate) กลับมาใช้ใหม่ หรือเปลี่ยนใหม่	5 ตรวจสอบ pH ของสารละลายที่ใช้ ควรเปลี่ยนสารละลายใหม่ เมื่อ pH ต่ำลง		5. ตรวจสอบการอุดตันของตัวกลางโดยดูจากความดันลดระหว่างท่อทางเข้าและท่อทางออกของถัง ถ้ามีการอุดตันให้ทำการหยุดระบบและล้างหรือเปลี่ยนตัวกลางใหม่	5 ตรวจสอบการอุดตันของตัวกลางโดยดูจากความดันลดระหว่างท่อทางเข้าและท่อทางออกของถัง ถ้ามีการอุดตันให้ทำการหยุดระบบและล้างหรือเปลี่ยนตัวกลางใหม่	5 ตรวจสอบการอุดตันของตัวกลางโดยดูจากความดันลดระหว่างท่อทางเข้าและท่อทางออกของถัง ถ้ามีการอุดตันให้ทำการหยุดระบบและล้างหรือเปลี่ยนตัวกลางใหม่
6. ตรวจสอบสภาพถ้ามีขนาดเล็กลง หรือปริมาณสารดูดซับน้อยลง ให้เติมเพิ่ม				6 ตรวจวัด pH ของน้ำขาเข้าถังปฏิกรณ์ให้มี pH อยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับแบคทีเรียตลอดเวลา (ขึ้นอยู่กับชนิดของแบคทีเรีย แต่โดยทั่วไปจะมี pH ในช่วง 7-8) และควรมีการสอบเทียบเครื่องมือวัดทุกปี	6. ตรวจวัดปริมาณออกซิเจนในน้ำ (Dissolved oxygen) โดยใช้ DO probe ตรวจวัดเพื่อควบคุม DO ระหว่าง 0 – 1 มก./ลิตร ตลอดเวลา และควรมีการสอบเทียบเครื่องมือวัดทุกปี

ตารางที่ 7.4 (ต่อ)

กระบวนการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S Adsorption)	กระบวนการ Absorption ก๊าซ H_2S ด้วยสารละลายด่าง	กระบวนการกำจัดก๊าซ H_2S ด้วยจุลินทรีย์เทคโนโลยีการเติมอากาศ	กระบวนการกำจัดก๊าซ H_2S ด้วยจุลินทรีย์ Biofilter Technology	กระบวนการกำจัดก๊าซ H_2S ด้วยจุลินทรีย์ Biotrickling Filter Technology	กระบวนการกำจัดก๊าซ H_2S ด้วยจุลินทรีย์ Bioscrubber Technology
					7. ตรวจวัด pH ของน้ำขาเข้าหอดูดซึมให้มี pH >8 ตลอดเวลา และควรมีการสอบเทียบเครื่องมือวัดทุกปี

ตารางที่ 7.5 แสดงการเปรียบเทียบข้อดี–ข้อเสียของระบบกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) แบบต่างๆ

ลำดับ	ชนิดระบบ	ข้อดี	ข้อเสีย
1.	กระบวนการดูดซับ (Adsorption) H_2S ด้วยของแข็ง (ฝอยเหล็กสนิม)	• สร้างและติดตั้งง่าย เงินลงทุนไม่สูงมาก • ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่ำ • ไม่ต้องมีการเติมอากาศในท่อก๊าซชีวภาพ ไม่เสี่ยงต่อการมีก๊าซออกซิเจนเกินในท่อก๊าซชีวภาพ	• ถังปฏิกรณ์ต้องการพื้นที่มาก ต้องมีการต่ออนุกรมกันหลายถัง และถูกจำกัดเรื่องความสูง (ต้องไม่สูงมาก) เนื่องจากจะมีปัญหาเรื่องความดันลดของระบบก๊าซ • ต้องใช้ฝอยเหล็กสนิมมากและต้องเปลี่ยนถ่ายฝอยเหล็กสนิมตามอายุที่ออกแบบไว้ (อายุค่อนข้างสั้น) • ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ต่ำ โดยประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับปริมาณพื้นที่ผิวของสารดูดซับ และความบริสุทธิ์ของ Fe_2O_3 • ต้องควบคุมความชื้นและการปรับค่า pH ของตัวฝอยเหล็ก เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ • เสี่ยงต่อการเกิดอัคคีภัย ถ้ามีการฟื้นสภาพไม่เหมาะสม
2.	กระบวนการดูดซึม (Absorption) H_2S ด้วยสารละลายด่าง	• ประสิทธิภาพการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์สูง (ถ้าควบคุมดี) • ต้องการพื้นที่น้อย • ขนาดของหอดูดซึมไม่ใหญ่ เงินลงทุนต่ำ • การควบคุมการทำงานของหอดูดซึมด้วยสารเคมี ง่าย ทำโดยตรวจวัดและปรับค่า pH • ไม่ต้องมีการเติมอากาศในท่อก๊าซชีวภาพ ไม่เสี่ยงต่อการมีก๊าซออกซิเจนเกินในท่อก๊าซชีวภาพ	• สิ้นเปลืองสารเคมี • ต้องการการดูแลอย่างดี • ต้องมีเครื่องมือวัดติดตั้งในระบบ เพื่อทำการควบคุมค่า pH อย่างต่อเนื่อง

ตารางที่ 7.5 (ต่อ)

ลำดับ	ชนิดระบบ	ข้อดี	ข้อเสีย
3.	กระบวนการกำจัด H_2S ด้วยจุลินทรีย์		
	3.1 เทคโนโลยีการเติมอากาศ (การเติมอากาศผสมกับก๊าซชีวภาพในถังปฏิกรณ์ เพื่อเปลี่ยนก๊าซ H_2S ให้อยู่ในรูปของกำมะถันและย่อยสลายด้วยแบคทีเรีย)	● สร้างง่าย ไม่ต้องมีการสร้างถังปฏิกรณ์กำจัด H_2S เพิ่มเติม ● เงินลงทุนต่ำ ● การควบคุมการทำงานไม่ยุ่งยาก	● ความเข้มข้นของก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพต่ำลง ● **เสี่ยงต่อการระเบิด**เนื่องจากมีก๊าซออกซิเจนปนในก๊าซชีวภาพสูงเกินไป จนทำให้ความเข้มข้นมีเทนในก๊าซชีวภาพอยู่ในช่วงระหว่างค่า LEL และ UEL ● ต้องมีการติดตั้ง Oxygen detector เพื่อป้องกันการเติมอากาศมากเกินไปจนมีออกซิเจนปนอยู่ในก๊าซชีวภาพมากเกินไป ● **ประสิทธิภาพต่ำ** ขึ้นอยู่กับการทำงานและการเจริญเติบโตของกลุ่มแบคทีเรียประเภท Sulphide Oxidizing Bacteria ในถังผลิตก๊าซชีวภาพ ● มีค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นในการเติมอากาศ

ตารางที่ 7.5 (ต่อ)

ลำดับ	ชนิดระบบ	ข้อดี	ข้อเสีย
	3.2 เทคโนโลยี Biofilter (การเติมอากาศเข้าท่อก๊าซชีวภาพ แล้วย่อยสลายด้วยแบคทีเรียที่ใช้อากาศบนตัวกลางเปียกชื้นที่มีรูพรุนสูง)	● การลงทุนในการสร้างถังปฏิกรณ์ไม่สูงมาก ● การควบคุมการทำงานไม่ยุ่งยาก	● ถังปฏิกรณ์ต้องการพื้นที่มาก ต้องมีการต่ออนุกรมกันหลายถัง และถังปฏิกรณ์ถูกจำกัดเรื่องความสูง (ต้องไม่สูงมาก) เนื่องจากจะมีปัญหาเรื่องความดันลดของระบบก๊าซ และต้องใช้ตัวกลางจำนวนมาก ● เสี่ยงต่อการมีก๊าซออกซิเจนเกินในท่อก๊าซชีวภาพ ● ต้องมีการติดตั้ง oxygen detector เพิ่ม เพื่อป้องการเติมอากาศมากเกินไป จนมีก๊าซออกซิเจนปนอยู่ในก๊าซชีวภาพมากเกินไป ● ประสิทธิภาพไม่สูงมากนัก และประสิทธิภาพต่ำถ้าในระบบขาดความชื้น ● อาจจะเกิดการอุดตันเนื่องจากตะกอนกำมะถันได้ง่าย
	3.3 เทคโนโลยี Biotrickling filter (เติมอากาศเข้าท่อก๊าซชีวภาพ แล้วผ่านหอดูดซึมด้วยน้ำที่เป็นด่างบนตัวกลางพลาสติกและย่อยสลายด้วยแบคทีเรีย)	● ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์สูง ● การสร้างทำได้ไม่ยาก ● ขนาดของระบบจะเล็กกว่า Biofilter และใช้พื้นที่น้อยกว่า เนื่องจากสร้างเป็นหอสูงได้	● เงินลงทุนสูง เนื่องจากราคาตัวกลางเป็นพลาสติก ● เสี่ยงต่อการมีก๊าซออกซิเจนเกินในท่อก๊าซชีวภาพ ● ต้องมีการติดตั้ง Oxygen detector เพื่อป้องการเติมอากาศมากเกินไปจนมีก๊าซออกซิเจนปนอยู่ในก๊าซชีวภาพ มากเกินไป ● วาล์วและท่อกระจายน้ำ อาจเกิดการอุดตันจากเมือก และคราบกำมะถันได้ง่าย ● ต้องการการควบคุมดูแลรักษามากและสม่ำเสมอ ในการเพิ่มปริมาณและควบคุมแบคทีเรียในหอ ● ละอองน้ำและความชื้นที่หลุดไปในระบบท่อก๊าซชีวภาพมักจะมีเมือก และตะกอนกำมะถันปนอยู่ สร้างปัญหาการกัดกร่อนและการอุดตันกับอุปกรณ์ความปลอดภัยในระบบการใช้งาน ถ้าไม่มีการดักจับน้ำและความชื้นที่ดี

ตารางที่ 7.5 (ต่อ)

ลำดับ	ชนิดระบบ	ข้อดี	ข้อเสีย
	3.4 เทคโนโลยี Bioscrubber (ใช้น้ำที่เป็นด่างไหลผ่านหอดูดซึมที่มีตัวกลางพลาสติกเพื่อดูดจับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพและไหลเข้าบ่อเติมอากาศเพื่อย่อยสลายด้วยแบคทีเรีย)	• ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์สูง • ก่อสร้างไม่ยาก • ขนาดของระบบจะเล็กกว่า Biofilter และใช้พื้นที่น้อยกว่าเนื่องจากสร้างเป็นหอสูงได้ • ไม่เสี่ยงต่อการมีก๊าซออกซิเจนเกินในท่อก๊าซชีวภาพ	• เงินลงทุนสูง เนื่องจากต้องมีบ่อหรือถังน้ำสำหรับเติมอากาศและเลี้ยงเชื้อแบคทีเรียเพิ่มขึ้น • ต้องการการควบคุมดูแลรักษามากและสม่ำเสมอ ในการเพิ่มปริมาณและควบคุมแบคทีเรียในถังเติมอากาศ • อาจมีการอุดตันของวาล์วและท่อกระจายน้ำ ที่เกิดจากตะกอนของกำมะถันได้ง่าย • ต้องการพื้นที่ระบบมากกว่า Biotrickling filter • ละอองน้ำและความชื้นที่หลุดไปในระบบท่อก๊าซชีวภาพมักจะมีเมือก และตะกอนกำมะถันปนอยู่ สร้างปัญหาการกัดกร่อนและการอุดตันกับอุปกรณ์ความปลอดภัยในระบบการใช้งาน ถ้าไม่มีการดักจับน้ำและความชื้นที่ดี

ตารางที่ 7.6 แสดงการประมาณค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ

กระบวนการ	ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ * (บาท/ลบ.ม.ก๊าซ)
Adsorption H_2S การดูดซับด้วยของแข็ง (ฝอยเหล็กสนิม)	0.03-0.05
Absorption H_2S การดูดซึมด้วยสารละลายด่าง	0.5 – 1
การเติมอากาศ ผสมกับก๊าซชีวภาพเพื่อเปลี่ยนก๊าซ H_2S ในรูปของกำมะถัน	0.1 – 0.2
Biofilter การเติมอากาศเข้าท่อก๊าซชีวภาพ แล้วย่อยสลายด้วยแบคทีเรียที่ ใช้อากาศบนตัวกลางเปียกชื้นที่มีรูพรุนสูง	0.05 – 0.1
Biotrickling filter การเติมอากาศเข้าท่อก๊าซชีวภาพ แล้วผ่านหอดูดซึมด้วยน้ำที่เป็นด่าง บนตัวกลางพลาสติกและย่อยสลายด้วยแบคทีเรีย	0.05 – 0.1
Bioscrubber ใช้น้ำที่เป็นด่างไหลผ่านหอดูดซึมที่มีตัวกลางพลาสติกเพื่อดูดจับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และไหลเข้าบ่อเติมอากาศเพื่อย่อยสลายด้วยแบคทีเรีย	0.1 – 0.2

* ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ ได้จากการสอบถาม และคำนวณจากอายุระบบ 5 ปี เดินระบบ 300 วัน/ปี (เฉพาะค่าไฟฟ้า สารเคมี ไม่รวมค่าแรงงานและการซ่อมบำรุง)

ตารางที่ 7.7 แสดงการเปรียบเทียบเทคโนโลยีการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

ถังปฏิกรณ์	ปริมาตรของระบบ	ความต้องการ		
		พื้นที่ของระบบ	ทักษะของผู้เดินระบบ	การบำรุงรักษา
Adsorption H_2S ด้วยของแข็ง	สูง	มาก	น้อย	ต่ำ
Absorption H_2S ด้วยสารละลายด่าง	ต่ำ	น้อย	ปานกลาง	ปานกลาง
การเติมอากาศ	ไม่ต้องการ	ไม่ต้องการ	ปานกลาง	ต่ำ
Biofilter	สูง	มาก	ปานกลาง	ปานกลาง
Biotrickling filter	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง
Bioscrubber	ปานกลาง	ปานกลาง/มาก	ปานกลาง	ปานกลาง

ปริมาตรระบบ (คิดตาม empty bed residence time) :

ต่ำ : < 0.4 ลบ.ม.ระบบ/100 ลบ.ม.ก๊าซป้อน/ชม.

ปานกลาง : < 0.4 – 2.5 ลบ.ม.ระบบ/100 ลบ.ม.ก๊าซป้อน/ชม.

สูง : > 2.5 ลบ.ม.ระบบ / 100 ลบ.ม.ก๊าซ ป้อน/ชม.

ความต้องการพื้นที่ (ไม่รวมพื้นที่ประกอบ) :

น้อย : < 0.5 ตร.ม./100 ลบ.ม.ก๊าซป้อน/ชม.

ปานกลาง : 0.5 - 2 ตร.ม./100 ลบ.ม.ก๊าซป้อน/ชม.

มาก : > 2 ตร.ม./100 ลบ.ม.ก๊าซป้อน/ชม.

ความต้องการทักษะของผู้เดินระบบ :

น้อย : อย่างน้อยสามารถในการเริ่มต้นและหยุดระบบ (เครื่องจักร) ได้

ปานกลาง : สามารถในการเริ่มต้นและหยุดระบบ (เครื่องจักร) ได้ และเข้าใจหลักการของการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์

สูง : สามารถในการเริ่มต้นและหยุดระบบ(เครื่องจักร)ได้ เข้าใจหลักการของการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ และหลักการของระบบการควบคุมการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ต่างๆ

ความต้องการการบำรุงรักษา :

ต่ำ : ต้องการการดูแลอุปกรณ์/เครื่องจักร ไม่บ่อย/ไม่มาก (ท่อ ปั๊มพ์ วาล์ว)

ปานกลาง : ต้องการการดูแลอุปกรณ์/เครื่องจักร สม่ำเสมอแต่ไม่ซับซ้อน

สูง : ต้องการการดูแลอุปกรณ์/เครื่องจักร มากและซับซ้อน

7.4 การกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

การกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซชีวภาพมีจุดมุ่งหมายเพื่อที่จะเพิ่มค่าความร้อนของก๊าซชีวภาพให้สูงขึ้น หรือเป็นการควบคุมความเข้มข้นมีเทนให้คงที่ ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานก๊าซชีวภาพไปด้วย สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงของพาหนะหรือทดแทนก๊าซธรรมชาติ รวมทั้งยังลดความเป็นกรด (เมื่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำจะเป็นกรดอ่อน) ซึ่งในขณะนี้ได้มีประเทศในยุโรป 3 ประเทศ ได้แก่ สวิตเซอร์แลนด์ สหพันธรัฐเยอรมนี และสวีเดน ที่ได้มีการยอมรับมาตรฐานของก๊าซชีวภาพดังกล่าว ซึ่งประกอบไปด้วยเทคโนโลยีต่างๆ ได้แก่

- Water Scrubber Technology
- Pressure Swing Adsorption (PSA) Technology
- Chemical Adsorption Technology
- Membrane Separation Technology (ซึ่งยังไม่เป็นที่นิยมแพร่หลายนัก)

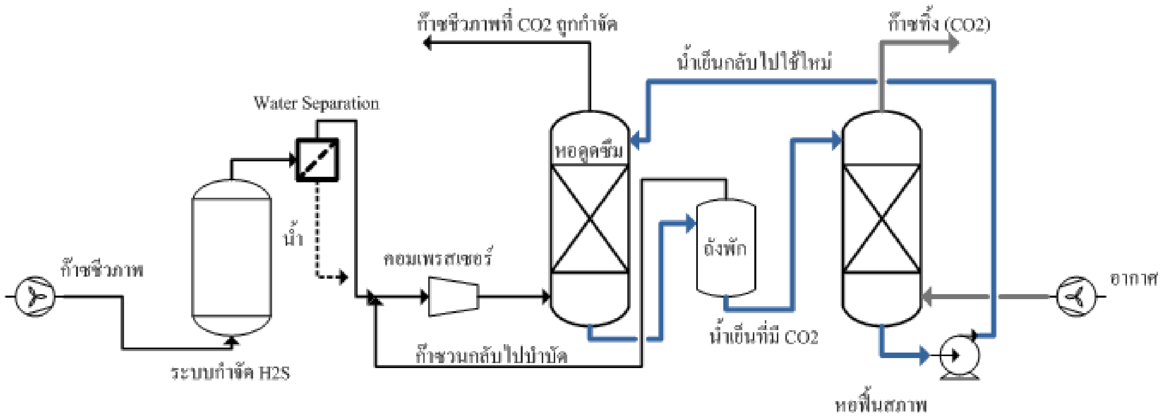
การควบคุมคุณภาพก๊าซ โดยการกำจัดก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ เป็นการเพิ่มความเข้มข้นของก๊าซมีเทนเพื่อรักษาระดับก๊าซมีเทนให้คงที่ ซึ่งมีผลดีต่อการใช้งาน เช่น การควบคุมก๊าซมีเทนให้คงที่ทำให้ ลดปัญหา การเผาไม่สมบูรณ์ หรือเปลวไฟไม่นิ่ง หรือไฟดับ หรือเมื่อเดิน high fire และเกิดการระเบิดในห้องเผาไหม้ หรือถ้านำไปใช้กับเครื่องยนต์ทำให้เผาไหม้ไม่หมดในจังหวะคายไอเสีย และเกิดเปลวไฟยาวออกไปเผาวาล์วไอเสียทำให้ไหม้และทำงานไม่ได้ประสิทธิภาพ

7.4.1 Water Scrubber Technology

เป็นเทคโนโลยีการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยการอัดก๊าซชีวภาพผ่านหอดูดซึมด้วยน้ำที่ความดันสูงและอุณหภูมิต่ำ ในการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ใช้หลักการด้านความสามารถในการละลายที่ดีของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำที่ความดันสูงและอุณหภูมิต่ำ เทคโนโลยีมี 2 แบบหลักๆ คือ ระบบที่ใช้น้ำครั้งเดียวและระบบที่มีการฟื้นสภาพน้ำและนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ องค์ประกอบของระบบจะมีหอดูดซึม และหอ Stripper (ในกรณีที่มีการไล่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากน้ำและวนน้ำกลับไปใช้ใหม่) ภายในหอมีตัวกลางพลาสติกเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการถ่ายเทมวล

สำหรับกระบวนการที่มีการวนน้ำกลับมาใช้ใหม่นั้น มีกระบวนการดังแสดงในรูปที่ 7.10 โดยก๊าซชีวภาพเมื่อผ่านระบบกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์แล้ว เมื่อแยกละอองน้ำออกจะถูกอัดด้วยคอมเพรสเซอร์ให้มีความดันสูง ประมาณ 13 บาร์เกจ (เพื่อเพิ่มความสามารถในการละลาย) ก๊าซที่ความดันสูงจะเข้าหอดูดซึมทางด้านล่างและจะไหลสวนทางกับน้ำ (ที่อุณหภูมิต่ำประมาณ10°C) ก๊าซที่ถูกกำจัด CO_2 และมีความเข้มข้นของก๊าซ

มีเทนสูงออกจากระบบทางด้านบน ส่วนน้ำที่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายอยู่จะไหลออกทางด้านล่างและเข้าสู่ถังพักเพื่อลดความดัน ก๊าซบางส่วนที่ออกมาจากน้ำจะวนกลับไปที่ทางดูดของคอมเพรสเซอร์ใหม่ ส่วนน้ำก็จะเข้าสู่หอฟื้นสภาพที่ใช้อากาศในการไล่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายน้ำออก โดยก๊าซทิ้งที่ออกจากด้านบนจะเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นหลัก น้ำที่ผ่านการไล่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกไปแล้ว จะวนกลับไปที่หอดูดซึมอีกเพื่อละลายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เทคโนโลยีการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แบบ Water Scrubber Technology ชนิดนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ แสดงดังรูปที่ 7.10



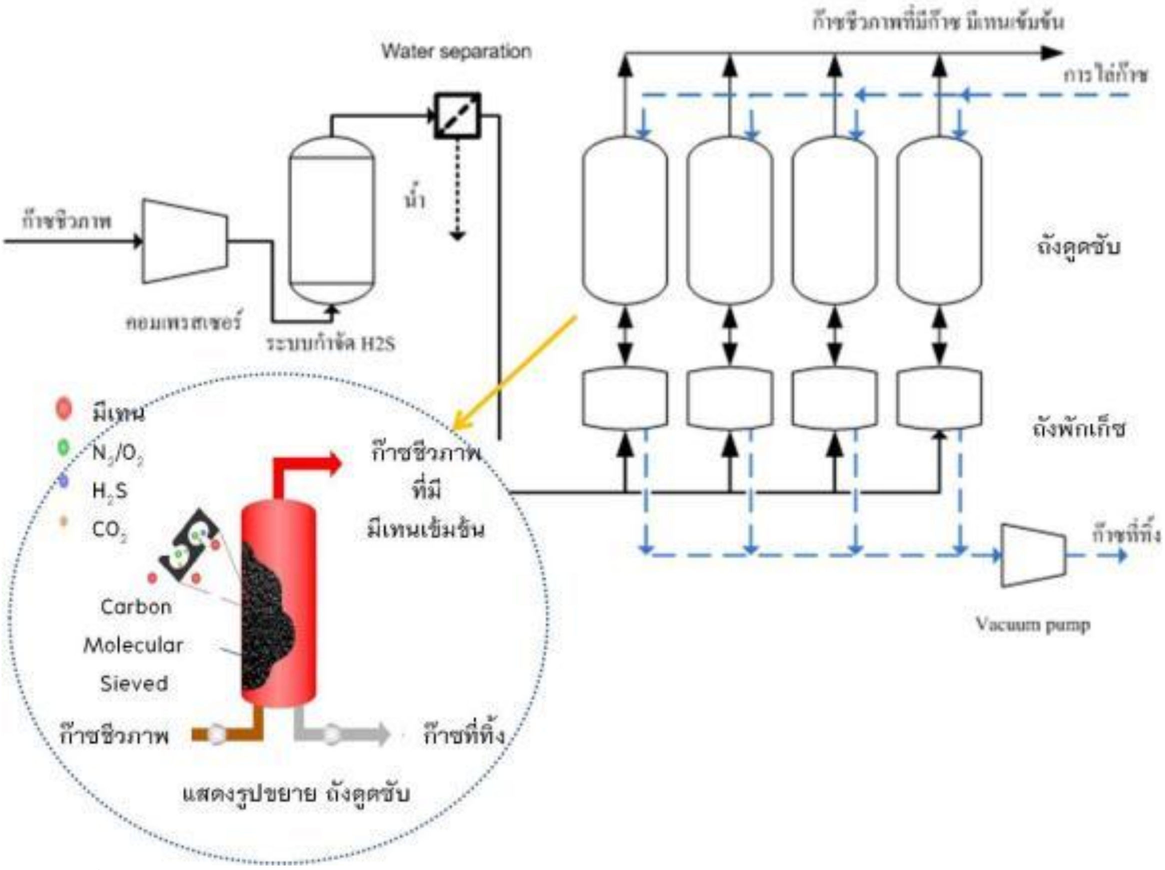
รูปที่ 7.10 แสดงเทคโนโลยีการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
แบบ Water Scrubber Technology ชนิดนำน้ำกลับมาใช้ใหม่

กรณีระบบที่มีการใช้น้ำครั้งเดียว (Single pass) นั้น มีข้อดีคือ จะมีประสิทธิภาพกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูง เนื่องจากน้ำที่ใช้จะไม่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เจือปนอยู่

สำหรับระบบที่มีการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ อาจจะมีประสิทธิภาพการกำจัดไม่ดีเท่าแบบแรกเนื่องจากในการไล่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นั้น ไม่สามารถที่จะไล่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากน้ำได้หมด ดังนั้นความสามารถในการจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จึงต่ำลง แต่ระบบนี้จะใช้น้ำน้อยกว่าการใช้น้ำเพียงครั้งเดียว โดยจากระบบที่มีอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ 330 ลบ.ม./ชั่วโมงนั้น จะต้องเติมน้ำชดเชยในระบบประมาณ 50 ลิตร/ชั่วโมง ดังนั้นถ้าพื้นที่ใดขาดแคลนน้ำ ก็จะเป็นเรื่องยากที่จะใช้ระบบแบบใช้น้ำครั้งเดียวได้

7.4.2 Pressure Swing Adsorption (PSA) Technology

เป็นเทคโนโลยีการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต้องแยกก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกก่อน หลักการทำงานใช้การเปลี่ยนแปลงความดันก๊าซแบบกลับไปกลับมา และสมบัติในการดูดซับของวัสดุต่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซอื่นๆ โดยความสามารถในการดูดซับของวัสดุแต่ละชนิดขึ้นอยู่กับขนาดของโมเลกุล ระบบประกอบด้วย ถัง Adsorption 4 ถังด้วยกัน ภายในบรรจุด้วยตัวดูดซับ เช่น ถ่านกำมันต์ (Activated carbon) หรือ Zeolite การทำงานจะเป็นรอบ ตามวงจรของการดูดซับ ดังรูปที่ 7.11



รูปที่ 7.11 แสดงเทคโนโลยีการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แบบ Pressure Swing Adsorption

ในสภาวะการทำงานปกติ แต่ละถังจะมีสถานะการทำงานต่างกัน คือ ขั้นการดูดซับ ขั้นการฟื้นสภาพ และขั้นการสร้างความดัน (ในช่วง 10-25 บาร์เกจ ขึ้นอยู่กับผู้ขายเทคโนโลยี) ในขั้นการดูดซับ ก๊าซชีวภาพจะเข้าทางด้านล่างของถัง Adsorption ในขั้นตอนนี้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ออกซิเจน ไนโตรเจน จะถูกดูดซับบนตัวดูดซับ ก๊าซที่ออกจากถังจะมีความเข้มข้นของก๊าซมีเทนสูงมากกว่า 97% นอกจากนี้ไซลอกเซน Volatile Organic Compounds (VOCs) และน้ำก็จะถูกดักจับไปด้วย ก่อนที่ถังจะจับสิ่งเจือปนจนอิ่มตัว ขั้นตอนการดูดซับก็จะหยุดลง ถังที่ได้รับการฟื้นสภาพแล้วก็จะทำหน้าที่เป็นถังดูดซับแทนที่ ส่วนถังที่อิ่มตัวก็จะเข้าสู่สถานะการฟื้น

สภาพ โดยปรับลดความดันลง จนถึงความดันบรรยากาศ ก๊าซที่ออกมาจากถังในช่วงการลดความดันก็อาจจะมีก๊าซมีเทนปนมาบ้าง ซึ่งจะมีการวนกลับไปดูดซับใหม่ หลังจากดึงก๊าซอื่นออกจากตัวดูดซับแล้ว (สิ้นสุดขั้นตอนการฟื้นสภาพ) ก็จะมีการอัดความดันเพื่อเตรียมการเข้าสู่ขั้นตอนการดูดซับอีกครั้งหนึ่ง เวลาต่อหนึ่งรอบของกระบวนการดูดซับจะอยู่ในช่วง 3-5 นาที ในกระบวนการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จะเป็นกระบวนการที่ย้อนกลับไม่ได้ (ต้องใช้ความร้อน) ดังนั้นถ้าไม่มีการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกก่อน ก็จะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง เนื่องจากตัวดูดซับเสียสภาพการดูดซับก๊าซอื่นเนื่องจากก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

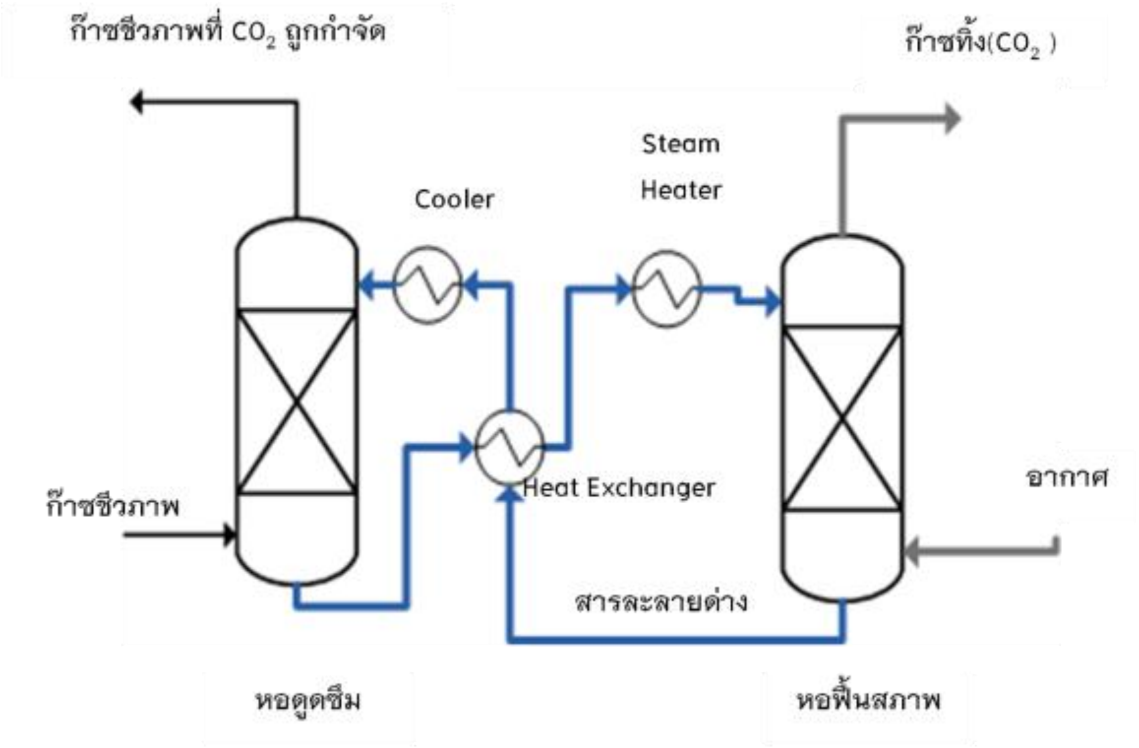
7.4.3 Chemical Absorption Technology

เป็นเทคโนโลยีการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายในสารละลายด่าง Amine อาศัยความแตกต่างด้านความสามารถในการละลายของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซมีเทน ในสารละลายด่าง Amine เช่น Monoethanolamine (MEA, $R\text{-}NH_2$) หรือ Diethanolamine (DEA) เป็นต้น ปฏิกิริยาดังสมการ

การละลายของ CO_2 : $2(R\text{-}NH_2) + CO_2 \rightarrow RNHCOONH_3R$ เมื่อสารละลาย อุณหภูมิต่ำ

การระเหยของ CO_2 : $RNHCOONH_3R \rightarrow 2\,(R\text{-}NH_2) + CO_2$ เมื่อสารละลาย อุณหภูมิสูง

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับด่างเอมีน ดังสมการที่แสดงข้างต้น ระหว่างการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ องค์ประกอบของระบบจะมีหอดูดซึม และหอ Stripper (ในกรณีที่มีการไล่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากสารละลาย และวนสารละลายกลับไปใช้ใหม่) ภายในหอมีตัวกลางพลาสติกเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการถ่ายเทมวล ดังแสดงในรูปที่ 7.12

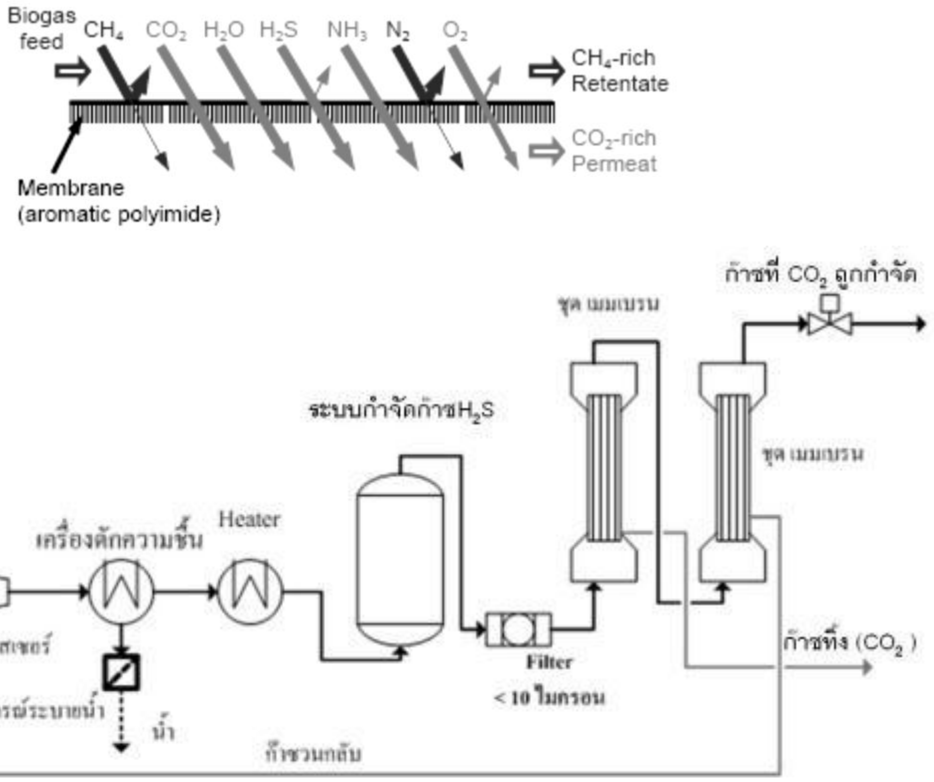


รูปที่ 7.12 แสดงเทคโนโลยีการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แบบ Chemical Absorption technology

ก๊าซชีวภาพจะเข้าหอดูดซึมทางด้านล่างและจะไหลสวนทางกับสารละลาย ก๊าซชีวภาพที่กำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แล้วและมีความเข้มข้นของก๊าซมีเทนสูงจะออกจากระบบทางด้านบน ส่วนสารละลายที่ทำปฏิกิริยากับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะไหลออกทางด้านล่างผ่านตัวแลกเปลี่ยนความร้อน 2 ชุด เพื่อเพิ่มอุณหภูมิ โดยชุดแรกทำการแลกเปลี่ยนความร้อนกับสารละลายที่ออกมาจากหอฟื้นสภาพและชุดที่สองทำการแลกเปลี่ยนความร้อนกับไอน้ำตามลำดับ แล้วเข้าสู่หอฟื้นสภาพ เมื่อเข้าสู่หอก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในสารละลายที่อุณหภูมิสูงจะถูกไล่ออกจากสารละลาย ก๊าซชีวภาพที่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงจะถูกปล่อยทิ้ง ส่วนสารละลายจะถูกวนกลับไปใช้ใหม่ที่หอดูดซึม แต่ก่อนที่จะเข้าหอจะมีการลดอุณหภูมิของสารละลายก่อน เพื่อช่วยให้สามารถละลายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีขึ้น

7.4.4 Membrane Separation Technology

เป็นเทคโนโลยีการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยการเลือกซึมผ่านและแพร่ผ่านเมมเบรน ที่ใช้เยื่อแผ่นทำจาก Dense polyimide membrane ในการแยกสารใช้หลักการความแตกต่างของขนาดโมเลกุลหรือความจำเพาะต่อโมเลกุลของก๊าซแต่ละชนิดในการดึงดูดกัน (Affinity) ทำงานภายใต้ความดัน ประมาณ 6–10 บาร์เกจ ประสิทธิภาพของการแยกขึ้นอยู่กับชนิดของเมมเบรน หลักการโดยทั่วไปของเทคนิคการแยก คือ การเลือกซึมผ่าน (Selective Permeation) ดังรูปที่ 7.13A



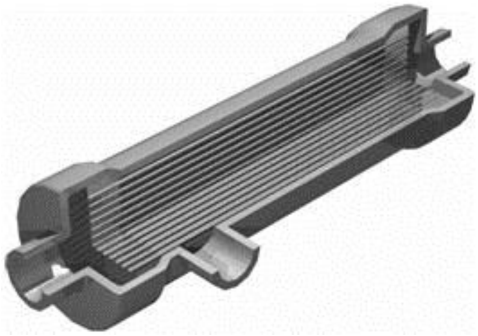
รูปที่ 7.13A แสดงเทคโนโลยีการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แบบ Membrane Technology

> ***การเลือกซึมผ่าน (Selective Permeation) หมายถึง การที่เมมเบรนยอมให้ก๊าซบางชนิดผ่านรูเปิดของเยื่อแผ่นเมมเบรน ขณะที่ไม่ยอมให้ก๊าซบางชนิดผ่าน***
>
> ***ในการแพร่ผ่านนั้นโมเลกุลก๊าซจะละลายและแพร่ผ่านไปในวัสดุโพลิเมอร์ (แผ่นเมมเบรน) โดยมีความแตกต่างระหว่างความดันระหว่างเยื่อแผ่นเป็นตัวช่วยในการดัน (Driving force) ให้โมเลกุลของก๊าซแพร่ผ่านไป ซึ่งอัตราการแพร่ผ่านของก๊าซแต่ละชนิดจะขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การละลาย และสัมประสิทธิ์การแพร่***
>
> ***สำหรับก๊าซองค์ประกอบในก๊าซชีวภาพ นั้น CO_2 และ H_2S จะแพร่ผ่านเยื่อแผ่นได้เร็วกว่า CH_4 N_2 และ O_2***

ในกระบวนการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นั้น ก๊าซชีวภาพจะถูกเพิ่มความดันและกำจัดสิ่งเจือปนอื่น เช่น น้ำ ความชื้น และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกก่อน และป้อนเข้าสู่ชุดเมมเบรน (ส่วนใหญ่เป็นชนิด Hollow fiber) โดยก๊าซชีวภาพที่ความดันสูงจะอยู่ด้านในของ Hollow fiber ซึ่ง CO_2 และ H_2S จะสามารถแพร่ผ่านแผ่นเมมเบรนได้ดีกว่า CH_4 N_2 และ O_2 ดังนั้น ด้านใน Hollow fiber จะมีก๊าซมีเทนที่เข้มข้นขึ้น ขณะที่ด้านนอกของ Hollow fiber ซึ่งอยู่ในฝั่งความดันต่ำ (เกือบความดันบรรยากาศ) จะมีความเข้มข้นของ CO_2 สูงกว่า และจะเป็นก๊าซที่ปล่อยทิ้งไป รูปที่ 7.13 B แสดงระบบกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้เมมเบรนแบบ Hollow fiber

ข้อแนะนำ:

- *ควรมีการกำจัด น้ำ /ความชื้น ก่อนเข้าเมมเบรน เพื่อป้องการการเกิดเมือกเคลือบที่เยื่อแผ่นเมมเบรน*
- *ควรกำจัดก๊าซ H_2S ออกก่อน*
- *ต้องมีการกรองฝุ่นละอองออกก่อนที่เข้าชุดเมมเบรน*
- *ควรมีการระมัดระวังการรั่วไหลของอากาศเข้าไปในระบบท่อ*



รูปที่ 7.13B แสดงระบบการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ระบบเมมเบรน แบบ Hollow Fiber

ที่มา : forum.europarl.europa.eu/jiveforums/servlet/JiveServlet/download/22-475-798-265/Biomethan.pdf

ตารางที่ 7.8 แสดงรายการตรวจสอบและบำรุงรักษาเทคโนโลยีกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

Water Scrubber Technology	Pressure Swing Adsorption (PSA) Technology	Chemical Absorption Technology	Membrane Separation Technology
1. ตรวจสอบการรั่วไหลของก๊าซที่ข้อต่อ หน้าแปลนต่างๆ บริเวณหอดูดซึมและอุปกรณ์ต่างๆ เนื่องจากมีความดันสูง ถ้ามีการรั่วซึมให้ขันอัดหรือเปลี่ยนปะเก็น เป็นต้น 2. วิเคราะห์คุณสมบัติก๊าซชีวภาพ โดยเฉพาะความเข้มข้นก๊าซมีเทน			
3. ตรวจสอบคุณสมบัติของน้ำที่ออกจากหอดูดซึม เช่น pH และอุณหภูมิ เป็นต้น และสังเกตดูเมือกแบคทีเรีย ถ้ามี ต้องเปลี่ยนน้ำและทำความสะอาด	3 ตรวจสอบการอุดตันของวาล์ว อันเนื่องมาจากเศษวัสดุหลุดเข้าไปอุดตันหรือมีคราบกำมะถันมาเกาะ ถ้าพบมีเศษวัสดุ ควรเปลี่ยนตะแกรงในสารดูดซับ และทำความสะอาดวาล์ว	3 ตรวจสอบการอุดตันของหัวกระจายน้ำ/สารละลายที่เกิดจากตะกอนของสารประกอบกำมะถัน ทุกสัปดาห์ ถ้ามีการอุดตันให้ทำความสะอาด ล้างคราบตะกรัน/ตะกอนออก โดยใช้น้ำแรงดันสูง	3. ตรวจสอบความดันลดของระบบกรองฝุ่นละออง ถ้ามีความดันลดสูงต้องมีการทำความสะอาดถังกรอง หรือเปลี่ยนชุดกรองใหม่
4 ตรวจสอบการอุดตันของหัวกระจายน้ำ/สารละลายที่เกิดจากตะกอนของสารประกอบกำมะถันทุกสัปดาห์ ถ้ามีการอุดตันให้ทำความสะอาด ล้างคราบตะกรัน/ตะกอนออก โดยใช้น้ำแรงดันสูง	4. ตรวจสอบประสิทธิภาพการดูดซับ ถ้าสารดูดซับมีการอิ่มตัวให้นำไปฟื้นสภาพ (Regenerate) กลับมาใช้ใหม่ หรือเปลี่ยนใหม่	4. ตรวจสอบค่า pH ของสารละลายเข้าหอดูดซึมให้มีค่า pH >8 ตลอดเวลา และควรมีการสอบเทียบเครื่องมือวัดทุกปี	4. ตรวจวัดและควบคุมความดัน อุณหภูมิของก๊าซที่ออกจากระบบเมมเบรน อย่างน้อยทุกวัน

ตารางที่ 7.8 (ต่อ)

Water Scrubber Technology	Pressure Swing Adsorption (PSA) Technology	Chemical Absorption Technology	Membrane Separation Technology
	5 ตรวจสอบสภาพถ้ามีขนาดเล็กลง หรือปริมาณสารดูดซับน้อยลง ให้เติมเพิ่ม	5. ในกรณีที่มีการ regenerate สารละลายควร ตรวจสอบเข้มข้นของสารละลายให้มีความเข้มข้นคงที่ตามที่ออกแบบ ถ้าเจือจางลงต้องปรับความเข้มข้นให้สูงขึ้น	5. หมั่นสอบเทียบอุปกรณ์วัดซึ่งมีความสำคัญในการตรวจสอบประสิทธิภาพของระบบควบคุมการทำงานของเมมเบรน
	6 ตรวจสอบไม่ให้มีสิ่งเจือปน อื่นๆ เช่น ผงฝุ่น หรือก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เข้าไปในระบบมาก จะมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์		

ตารางที่ 7.9 แสดงการเปรียบเทียบข้อดี–ข้อเสียของระบบกำจัด CO_2 ต่างๆ

ลำดับ	ชนิดระบบ	ข้อดี	ข้อเสีย
1.	Water Scrubber Technology (การอัดก๊าซชีวภาพผ่านหอดูดซึมด้วยน้ำที่ความดันสูงและอุณหภูมิต่ำ)	● เทคนิคไม่ซับซ้อน ● ไม่ต้องใช้สารเคมี ● ได้ก๊าซที่มีความบริสุทธิ์สูง และ yield สูง ● ไม่เกิดสารกัดกร่อนในท่อ ● ไม่ต้องใช้ความร้อน	● ต้องใช้น้ำมากและอุณหภูมิต่ำ ● มีการปนเปื้อนหรือการเจริญเติบโตของแบคทีเรียบนตัวกลางถ้ากำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ไม่ดี ● ทำงานที่ความดันสูง ทำให้โครงสร้างของหอดูดซึมต้องทนความดันสูง ทำให้ต้องมีค่าลงทุนสูง ● เสียค่าพลังงานในการเพิ่มความดันก๊าซชีวภาพ และต้องเสียค่าพลังงานในการทำน้ำเย็น
2.	Pressure Swing Adsorption (PSA) (ใช้การเปลี่ยนแปลงความดันก๊าซแบบกลับไปกลับมาและสมบัติในการดูดซับของวัสดุต่อก๊าซ CO_2)	● ได้ก๊าซที่มีความบริสุทธิ์สูง >97% CH_4 ● ความต้องการในการใช้พลังงานต่ำ และไม่ใช้ความร้อน ● การสูญเสียก๊าซมีเทนต่ำ (Yield สูง) ● กำจัดก๊าซออกซิเจนในก๊าซชีวภาพไปด้วยในตัว ● กำจัดสิ่งเจือปนอื่นๆ ได้ด้วย	● ต้องกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกก่อน ● มีขั้นตอนมาก ● ทำงานที่ความดันสูง ● เสียค่าพลังงานในการเพิ่มและลดความดันก๊าซชีวภาพ
3.	Chemical Absorption Technology (ให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายในสารละลายด่าง Amine)	● กำจัดสิ่งปนเปื้อนในก๊าซ ได้อย่างจำเพาะเจาะจง ● เทคนิคไม่ซับซ้อน ● ตัวระบบมีขนาดเล็ก ● ไม่จำเป็นต้องทำงานที่ความดันสูง ● มีการสูญเสียก๊าซมีเทนน้อย Yields สูง ● ได้ก๊าซที่มีความบริสุทธิ์สูง	● มีค่าใช้จ่ายในการใช้สารเคมีสูง ● ใช้พลังงานความร้อนสูง ในการฟื้นสภาพสารละลายด่าง ● ต้องมีหลายหอดูดซึมในการกำจัดสิ่งเจือปนในแต่ละชนิด ● ถ้าจะให้ทำงานดีต้องมีการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกก่อน ไม่เช่นนั้นจะทำให้สิ้นเปลืองสารเคมีที่ต้องใช้ไปกับการทำปฏิกิริยากับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วย

ตารางที่ 7.9 (ต่อ)

ลำดับ	ชนิดระบบ	ข้อดี	ข้อเสีย
4.	Membrane Separation Technology (การเลือกซึมผ่านและแพร่ผ่านเมมเบรน)	• ใช้พื้นที่น้อย • ไม่มีส่วน Moving parts • ไม่มีการเติมสารเคมี • มีอายุได้นานถึง 10–15 ปี (ถ้าบำรุงรักษาดี) • ใช้พลังงานของตัวเพิ่มความดันไม่มากทำให้ประหยัดพลังงาน (โดยทั่วไปเป็นหน่วยที่ต่อจากการกำจัดก๊าซ H_2S ที่ดำเนินการ (operate) ที่ความดันสูงอยู่แล้ว)	• ราคาแพง • ระบบมีความละเอียดอ่อน ต้องการควบคุมและการบำรุงรักษาอย่างดี • ถ้ามีผงหรือของแข็งปนเข้าไปจะทำให้เมมเบรนเสียหายได้ • ต้องมีการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ก่อน • ได้ yield ก๊าซมีเทนต่ำ อาจจะมีก๊าซออกซิเจนเจือปน

*Yield : หมายถึง มวลของก๊าซมีเทนที่ได้ในก๊าซที่ผ่านการกำจัดต่อมวลก๊าซมีเทนของก๊าซที่เข้าหน่วยกำจัด

ตารางที่ 7.10 แสดงการประมาณค่าใช้จ่ายในการลงทุนและค่าเดินระบบกำจัด CO_2

กระบวนการ	เงินลงทุน* (บาท/ ลบ.ม.ก๊าซ)	ในการเดินระบบ (บาท/ลบ.ม.ก๊าซ)	Yield มีเทน %
Water scrubber technology	0.88	3.64	94
Pressure Swing Adsorption	2.28	6.38	91
Chemical Absorption technology	1.24	4.48	90
Membrane Separation technology	0.92	3.28	78

* ทุกเทคโนโลยีคำนวณจากอายุระบบ 10 ปี ที่ความเข้มข้นของก๊าซมีเทนขาออก 98%
ยกเว้นเทคโนโลยีเมมเบรน ที่มีความเข้มก๊าซมีเทนขาออก 89.5% และอัตราแลกเปลี่ยน 1 ยูโร = 40 บาท

Yield : หมายถึง มวลของก๊าซมีเทนที่ได้ในก๊าซที่ผ่านการกำจัดต่อมวลก๊าซมีเทนของก๊าซที่เข้าหน่วยกำจัด

ตารางที่ 7.11 แสดงการเปรียบเทียบเทคโนโลยีการกำจัด CO_2

ระบบ	ปริมาตรของระบบ	ความต้องการ		
		พื้นที่	ทักษะของผู้เดินระบบ	การบำรุงรักษา
Water scrubber technology	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง
Pressure Swing Adsorption	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง
Chemical Absorption technology	น้อย	น้อย	ปานกลาง	ต่ำ
Membrane Separation technology	น้อย (มาก)	น้อย	มาก	สูง

* **ปริมาตรระบบ** (คิดตาม empty bed residence time) :

ต่ำ : < 0.4 ลบ.ม.ระบบ / 100 ลบ.ม.ก๊าซป้อน/ชม.

ปานกลาง : < 0.4 – 2.5 ลบ.ม.ระบบ / 100 ลบ.ม.ก๊าซป้อน/ชม.

สูง : > 2.5 ลบ.ม.ระบบ / 100 ลบ.ม.ก๊าซป้อน/ชม.

ความต้องการพื้นที่ (ไม่รวมพื้นที่ประกอบ) :

น้อย : < 2 ตร.ม/ 100 ลบ.ม.ก๊าซ ป้อน/ชม.

ปานกลาง : 2 – 5 ตร.ม/ 100 ลบ.ม.ก๊าซ ป้อน/ชม.

มาก : > 5 ตร.ม/ 100 ลบ.ม.ก๊าซ ป้อน/ชม.

ความต้องการทักษะของผู้เดินระบบ :

น้อย : อย่างน้อยสามารถในการเริ่มต้นและหยุดระบบ (เครื่องจักร) ได้

ปานกลาง : สามารถในการเริ่มต้นและหยุดระบบ (เครื่องจักร) ได้และเข้าใจหลักการของการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

สูง : สามารถในการเริ่มต้นและหยุดระบบ(เครื่องจักร)ได้ เข้าใจหลักการของการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และหลักการของระบบการควบคุมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แบบต่างๆ

ความต้องการการบำรุงรักษา :

ต่ำ : ต้องการ การดูแล อุปกรณ์/เครื่องจักร ไม่บ่อย/ไม่มาก (ท่อ ปั๊มพ์ วาล์ว)

ปานกลาง : ต้องการ การดูแล อุปกรณ์/เครื่องจักร สม่ำเสมอแต่ไม่ซับซ้อน

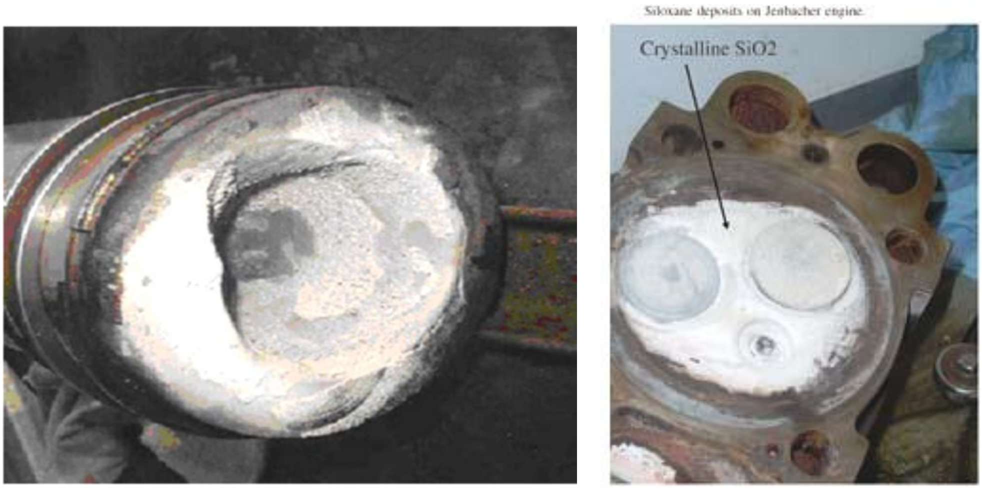
สูง : ต้องการ การดูแล อุปกรณ์/เครื่องจักร มากและซับซ้อน

7.5 การกำจัดไซลอกเซน (Siloxane)

โดยทั่วไปไซลอกเซนจะมีอยู่ในก๊าซชีวภาพที่ได้จากหลุมฝังกลบ จากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสารจากสบู่หรือสารทำความสะอาด (Detergent) เป็นต้น โดยในก๊าซชีวภาพที่ได้จากหลุมฝังกลบมีความเข้มข้นไซลอกเซนประมาณ 3-140 มิลลิกรัม/ลบ.ม. การปนเปื้อนของไซลอกเซนจะสังเกตได้จากคราบของแข็งสีขาวในส่วนที่มีอุณหภูมิสูงของ Gas turbine หรือในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนต่างๆ และในกระบอกสูบของเครื่องยนต์ เป็นต้น (รูปที่ 7.14) โดยผงสีขาวนี้ก็คือ SiO_2 ที่เกิดจากการเผาไหม้ของ ไซลอกเซน

> ***ไซลอกเซน คือ สารเคมีที่มีองค์ประกอบของ R_2SiO โดยที่ R นั้นอาจจะเป็น H หรือ โมเลกุลของไฮโดรคาร์บอน (CH-)***
>
> ***ที่มา :*** *en.wikipedia.org/wiki/Siloxane*

การที่จะต้องกำจัดไซลอกเซน ก็เพื่อป้องกันการสึกหรอของอุปกรณ์และเครื่องจักรในการใช้ประโยชน์จากก๊าซชีวภาพ เทคโนโลยีการกำจัดไซลอกเซน ในก๊าซชีวภาพที่ผลิตขึ้นในโรงงานอุตสาหกรรมของประเทศไทยนั้น เท่าที่ได้ทำการสำรวจยังไม่พบว่ามีการนำมาใช้ แต่ข้อมูลที่ได้นำมาเสนอในที่นี้เป็นข้อมูลของเอกสารจากต่างประเทศที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีกำจัด ไซลอกเซน อาทิเช่น การใช้สารดูดซับในกระบวนการ Pressure Swing Adsorption (PSA) และ Temperature Swing Adsorption (TSA) การลดอุณหภูมิ (Refrigeration) และ Liquid Absorption เป็นต้น



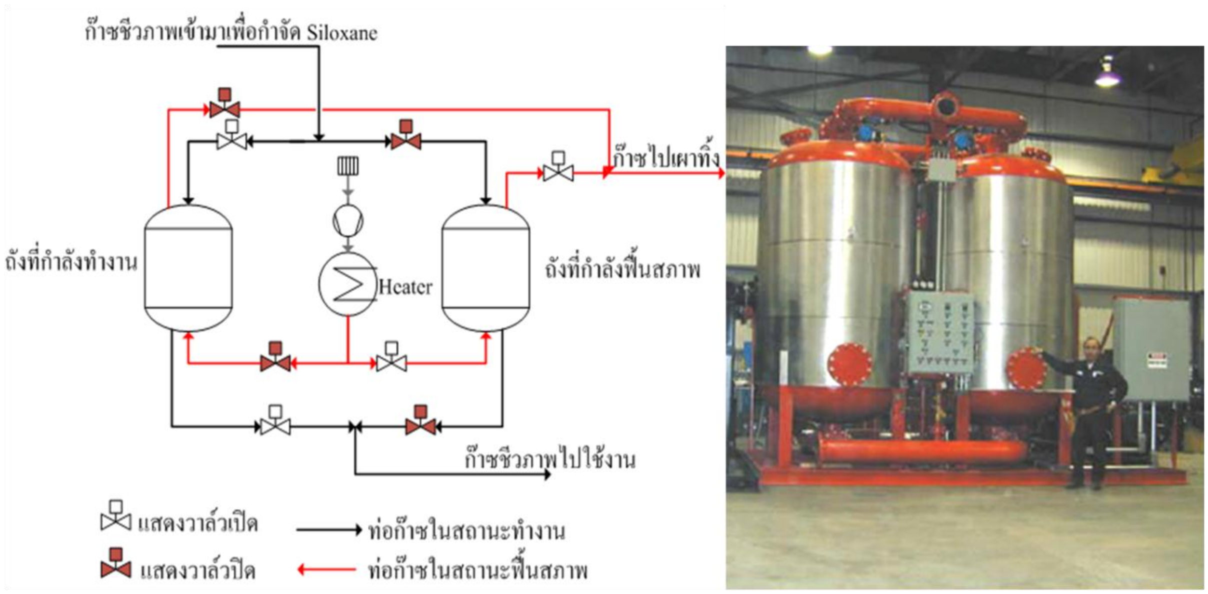
รูปที่ 7.14 แสดงคราบของ SiO_2 ใน Gas Engine และที่ลูกสูบอันเนื่องมาจากไซลอกเซน

(**ที่มา :** www.quadrogen.com/whitepaper.html)

7.5.1 Adsorption Technology

เป็นเทคโนโลยีการกำจัดไซลอกเซนด้วยสารดูดซับ โดยขึ้นอยู่กับขนาดของโมเลกุลและความจำเพาะต่อโมเลกุลของก๊าซแต่ละชนิดในการดึงดูดกัน (Affinity) ของการดูดซับของวัสดุ โดยทั่วไปจะใช้ถ่านกำมันต์หรือถ่าน กราไฟต์ในการดูดซับ โดยในการดูดซับนี้อาจจะมีหรือไม่มีการฟื้นสภาพของสารดูดซับกลับมาใช้อีกครั้ง ถ้ามีการฟื้นสภาพ การทำงานจะคล้ายกับเทคโนโลยี Pressure Swing Adsorption (PSA) ในการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

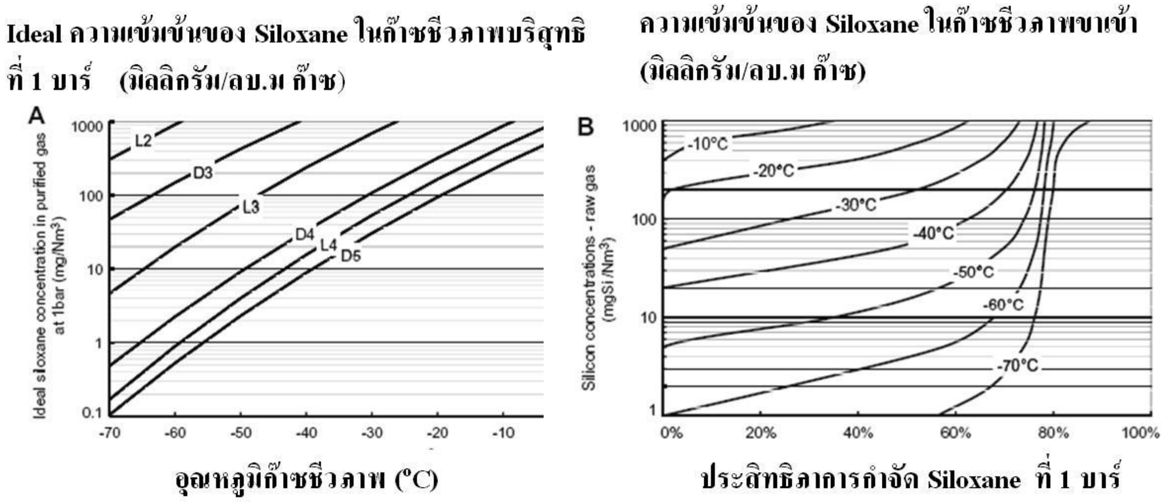
ในกรณีที่มีการฟื้นสภาพของสารดูดซับโดยใช้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Temperature Swing Adsorption) ระบบประกอบด้วย ถัง Adsorption ภายในบรรจุด้วยสารดูดซับ อย่างน้อยสองถัง แต่ละถังจะมีสถานะการทำงานต่างกัน คือ ขั้นการดูดซับ ขั้นการฟื้นสภาพ ในขั้นการดูดซับ ก๊าซชีวภาพจะเข้าถัง Adsorption ในขั้นตอนนี้ก๊าซ Siloxane จะถูกดูดซับบนสารดูดซับ ก๊าซที่ออกจากถังจะมีความบริสุทธิ์มากขึ้น เมื่อขั้นตอนการดูดซับจะหยุดลง ถังที่ได้รับการฟื้นสภาพแล้วก็จะมาเป็นถังดูดซับแทนที่ ส่วนถังที่อิ่มตัวก็จะเข้าสู่สถานะการฟื้นสภาพ โดยการเพิ่มอุณหภูมิให้อากาศเข้าถังดูดซับ เพื่อทำการไล่ก๊าซปนเปื้อนทิ้งไป ก๊าซที่ได้ในช่วงการฟื้นสภาพจะถูกนำไปเผาทิ้ง รูปที่ 7.15 แสดงผังกระบวนการกำจัดไซลอกเซนและมีการฟื้นสภาพของสารดูดซับด้วยเทคนิค Temperature Swing Adsorption



รูปที่ 7.15 แสดงผังกระบวนการกำจัดไซลอกเซนและฟื้นสภาพสารดูดซับด้วย Temperature Swing Adsorption

7.5.2 Refrigeration Technology

เป็นเทคโนโลยีการกำจัดไซลอกเซน โดยการกลั่นตัวที่อุณหภูมิต่ำ (จากรายงานของ IRossel และคณะ (2003) สามารถกำจัดไซลอกเซนได้ 80-90% ที่อุณหภูมิ -30°C) นอกจากนี้ : M.Jhar และคณะ (2010) ได้คาดการณ์การกลั่นตัวของไซลอกเซน ที่ความดัน 1 บาร์ (รูปที่ 7.16) โดยกระบวนการลดอุณหภูมิของก๊าซชีวภาพเป็นเช่นเดียวกับการกำจัดความชื้น แต่ในกรณีนี้จะต้องใช้วิธีแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซชีวภาพกับสารทำความเย็นเท่านั้น จะใช้น้ำเย็นไม่ได้ เนื่องจากไม่สามารถทำให้อุณหภูมิต่ำกว่า 0°C หลังจากนั้นก๊าซชีวภาพที่ผ่านการกำจัดไซลอกเซนแล้ว ก็จะไปแลกเปลี่ยนความร้อนกับไอของสารในเครื่องทำความเย็นที่ Condensing units ของระบบทำความเย็นเพื่อนำความร้อนมาอุ่นก๊าซชีวภาพ



<u>หมายเหตุ</u> L2, D3, L3, D4,L4,D5 คือ ชนิดของ siloxane

รูปที่ 7.16 กราฟแสดงการทำนายการกำจัด Siloxane เมื่อการลดอุณหภูมิ ที่ความดัน 1 บาร์ โดยให้ก๊าซชีวภาพเป็นก๊าซอุดมคติ (**ที่มา:** M.Jhar และคณะ (2010))

7.5.3 Liquid Absorption Technology

เป็นเทคโนโลยีการกำจัดไซลอกเซนด้วยการให้ก๊าซผ่านสารละลายกรด โดยใช้หลักการความแตกต่างในความสามารถละลายของไซลอกเซนในสารละลายกรด โดยกรดที่ใช้ดังตารางที่ 7.12 หรือจะเป็นสารจำพวก Selexol™ สำหรับสารละลายเบสแก่ และ pH >10 จะสามารถละลายไซลอกเซนได้ แต่ก็เกิดปัญหาเรื่องการตกตะกอนของคาร์บอเนต จึงไม่เป็นที่นิยมใช้

ตารางที่ 7.12 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดไซลอกเซน เมื่อใช้กรดความเข้มข้นต่างๆ

Sorbent material	Remarks	Siloxane elimination efficiency	
		D5 (%)	L2 (%)
Sulfuric acid, 97%	Temperature, 60°C	>95	>95
Sulfuric acid, 48%	Temperature, 60°C	>95	>95
Sulfuric acid, 24%	Temperature, 60°C	68–73	64–70
Sulfuric acid, 97%	Temperature, 20°C	65–70	56–61
Sulfuric acid, 97%	Temperature, 20°C, ultrasound (35 kHz)	72–77	60–65
Nitric acid, 65%	Temperature, 60°C	>95	>95
Nitric acid, 65%	Temperature, 20°C	48–53	40–43
Nitric acid, 33%	Temperature, 60°C	70–75	70–75
Phosphoric acid, 85%	Temperature, 60°C	44–48	53–60

ที่มา: M. Schweigkofler,และคณะ (2001)

องค์ประกอบของระบบ จะเป็นเช่นเดียวกับการใช้ Absorption ในการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยจะมีหอดูดซึมและหอ Stripper ภายในหอมีตัวกลางพลาสติกเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการถ่ายเทมวล ใช้สารละลายที่เป็นสารดูดซึมเพื่อละลายไซลอกเซนจากก๊าซชีวภาพ

ตารางที่ 7.13 แสดงรายการตรวจสอบและบำรุงรักษาเทคโนโลยีการกำจัดไซลอกเซน

Temperature Swing Adsorption	Refrigeration Technology	Liquid Absorption Technology
1. ตรวจสอบการรั่วไหลของก๊าซที่ข้อต่อ หน้าแปลนต่างๆ บริเวณหอดูดซึมและอุปกรณ์ต่าง เนื่องจากมีความดันสูง ถ้ามีการรั่วซึมให้ขันอัด หรือเปลี่ยนปะเก็น เป็นต้น 2. วิเคราะห์คุณสมบัติก๊าซชีวภาพ โดยเฉพาะความเข้มข้นก๊าซมีเทน		
3 ตรวจสอบการอุดตันของวาล์ว อันเนื่องมาจากเศษวัสดุหลุดเข้าไปอุดตันหรือมีคราบกำมะถันมาเกาะ ถ้าพบมีเศษวัสดุ ควรเปลี่ยนตะแกรงในสารดูดซับ และทำความสะอาดวาล์ว	3 ตรวจสอบการระบายน้ำออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและการอุดตันของวาล์วระบายน้ำ ถ้ามีการอุดตันให้ทำความสะอาดท่อ	3 ตรวจสอบการอุดตันของหัวกระจายน้ำ/สารละลายที่เกิดจากตะกอนของสารประกอบกำมะถัน ทุกสัปดาห์ ถ้ามีการอุดตันให้ทำความสะอาดล้างคราบตะกรัน/ตะกอนออกโดยใช้น้ำแรงดันสูง
4 ตรวจสอบปริมาณก๊าซ ออกซิเจนในท่อก๊าซชีวภาพที่ไปใช้งาน เนื่องจากอาจเกิดการระเบิดได้	4. การตรวจสอบการสึกกร่อนหรือการกัดกร่อนของวัสดุที่ทำแผงในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ถ้ามีสภาพที่ชำรุดให้ทำการเปลี่ยน	4. ตรวจวัด pH ของสารละลายเข้าถังกำจัดให้มี pH ตามที่ผู้ขายเทคโนโลยีกำหนด และควรมีการสอบเทียบเครื่องมือวัดทุกปี หมั่นสอบเทียบอุปกรณ์วัด
5. ตรวจสอบประสิทธิภาพการดูดซับ ถ้าสารดูดซับมีการอิ่มตัวให้นำไปฟื้นสภาพ (Regenerate) กลับมาใช้ใหม่ หรือเปลี่ยนใหม่	5. ตรวจสอบสภาพถ้ามีขนาดเล็กลง หรือปริมาณสารดูดซับน้อยลง ให้เติมเพิ่ม	

ตารางที่ 7.13 (ต่อ)

Temperature Swing Adsorption	Refrigeration Technology	Liquid Absorption Technology
6 ตรวจสอบสภาพถ้ามีขนาดเล็กลงหรือปริมาณสารดูดซับน้อยลง ให้เติมเพิ่ม	6 ตรวจสอบความดันและอุณหภูมิของสารทำความเย็น และปริมาณของสารทำความเย็น ถ้ามีการรั่วซึมของสารทำความเย็น ให้ทำการซ่อมแซมจุดที่รั่วซึม และเติมสารทำความเย็นเพิ่มเติม	
7 ตรวจสอบไม่ให้มีสิ่งเจือปนอื่นๆ เช่น ผงฝุ่น หรือก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เข้าไปในระบบมาก จะมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดไซลอกเซน	7 ตรวจสอบการเป็นน้ำแข็งที่ท่อแลกเปลี่ยนความร้อน ถ้ามีให้ทำการละลายน้ำแข็งก่อน	

ตารางที่ 7.14 แสดงการเปรียบเทียบข้อดี–ข้อเสียของระบบกำจัดไซลอกเซน แบบต่างๆ

ลำดับ	ชนิดระบบ	ข้อดี	ข้อเสีย
1.	Adsorption Technology	• มีมลภาวะ (emission) น้อย • กำจัดสิ่งเจือปนอื่นๆ ได้ด้วย	• ต้องกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกก่อน • เทคนิคซับซ้อน • อาจมีอากาศเจือปนอยู่ในช่วงฟื้นสภาพมาก
2.	Refrigeration Technology	• เทคนิคไม่ซับซ้อน	• สิ้นเปลืองพลังงานในการลดอุณหภูมิก๊าซ เนื่องจากทำที่อุณหภูมิต่ำมาก
3.	Liquid Absorption Technology	• เทคนิคไม่ซับซ้อน • ระบบมีขนาดเล็ก • ไม่จำเป็นต้องทำที่ความดันสูง	• มีค่าใช้จ่ายในการใช้สารเคมีสูง • ต้องกำจัด CO_2 ออกก่อน

เอกสารอ้างอิง:

1. forum.europarl.europa.eu/jiveforums/servlet/JiveServlet/download/22-475-798-265/Biomethan.pdf
2. en.wikipedia.org/wiki/Siloxane
3. www.quadrogen.com/whitepaper.html

บทที่ 8 การใช้ประโยชน์จากก๊าซชีวภาพ

เนื่องจากก๊าซชีวภาพเป็นก๊าซที่เกิดจากกระบวนการหมัก จากการย่อยสลายของสารอินทรีย์ด้วยเชื้อจุลินทรีย์ชนิดไม่ใช้อากาศ ก๊าซที่ได้มีส่วนผสมของก๊าซมีเทนเชิงปริมาตรโดยประมาณร้อยละ 50 ถึง 70 ซึ่งก๊าซมีเทนนี้เป็นก๊าซที่เผาไหม้ได้ จึงนิยมนำก๊าซชีวภาพนี้มาใช้เป็นเชื้อเพลิง

ในบทนี้ผู้อ่านจะได้เรียนรู้วิธีการคำนวณปริมาณอากาศที่เหมาะสมเพื่อใช้เผาไหม้กับก๊าซชีวภาพในทางทฤษฎี การนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์กับอุปกรณ์ใช้ประโยชน์ต่างๆ และในท้ายบทได้รวบรวมปัญหาที่เกิดขึ้นกับการใช้งานก๊าซชีวภาพของประเทศไทย ซึ่งปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นและรวบรวมไว้นี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้สนใจที่จะได้ศึกษาเรียนรู้ เนื่องจากเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นจริง และคำแนะนำในการแก้ปัญหาก็เป็นประโยชน์สำหรับผู้ปฏิบัติหรือผู้ควบคุมอุปกรณ์ใช้งานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับก๊าซชีวภาพเป็นอย่างมาก

8.1 การคำนวณการเผาไหม้ก๊าซชีวภาพ

8.1.1 สมการสมดุลปฏิกิริยาการเผาไหม้ของก๊าซชีวภาพ (Stoichiometric ratio)

ตัวอย่างอัตราส่วนปริมาณสัมพันธ์ (Stoichiometric ratio) ของการเผาไหม้ก๊าซชีวภาพที่มีส่วนผสมของก๊าซมีเทนร้อยละ 60 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 40 โดยปริมาตร กับอากาศจะมีสมการสมดุลทางทฤษฎี ดังสมการที่ 8.1

$$(CH_4 + 0.67\ CO_2) + (2\ O_2 + 7.52\ N_2) \dashrightarrow 2\ H_2O + 1.67\ CO_2 + 7.52\ N_2 \quad \text{............................(8.1)}$$

(ก๊าซชีวภาพ) + (อากาศ) ------> น้ำ + ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ + ก๊าซไนโตรเจน

คิดเป็นอัตราส่วนอากาศที่ต้องใช้ตามทฤษฎีต่อก๊าซชีวภาพที่มีก๊าซมีเทนความเข้มข้น 60% เท่ากับ 5.71 โดยปริมาตร หรือเท่ากับ 6.06 กิโลกรัมอากาศต่อกิโลกรัมก๊าซชีวภาพเมื่อเทียบโดยน้ำหนัก

8.1.2 Equivalence Ratio

เป็นปริมาณไร้หน่วยที่นิยมใช้ในการเผาไหม้ซึ่งเป็นที่ตัวบอกให้ทราบว่า ส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิไดเซอร์ (อากาศ)เบี่ยงเบนออกจากค่าทางทฤษฎีตามสมดุลย์ปฏิกิริยาการเผาไหม้ (Stoichiometric) มีมากหรือน้อยแค่ไหน

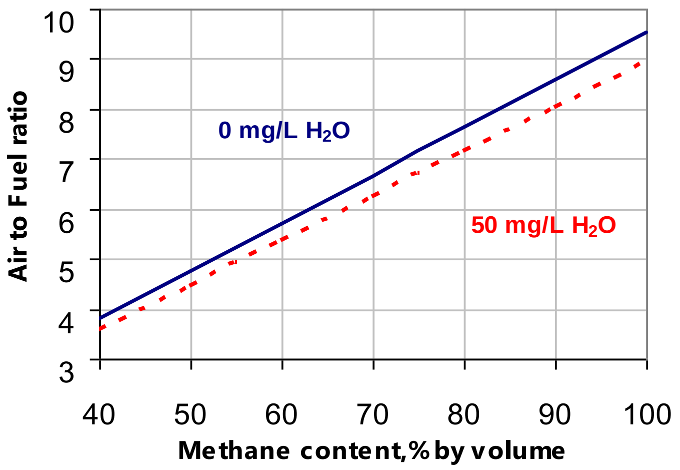
โดยทั่วไป นิยมใช้ค่า Fuel Equivalent Ratio, Fuel ϕ

$$\phi = \frac{y_{fuel} / y_{air}}{(y_{fuel} / y_{air})stoi} = \frac{\eta_{fuel} / \eta_{air}}{(\eta_{fuel} / \eta_{air})stoi} \quad \text{.......................(8.2)}$$

เมื่อ y = Volume basis, η = mole basis

การคำนวณในรูปของ Equivalence ratio ซึ่งเป็นค่าอัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศที่เผาไหม้จริงเทียบกับเชื้อเพลิงต่ออากาศที่เผาไหม้เหมาะสมตามทฤษฎี สำหรับเชื้อเพลิงประเภทก๊าซชีวภาพนี้จะใช้ค่าปริมาตรของก๊าซมีเทนเป็นปริมาตรของเชื้อเพลิงแทนปริมาตรรวมของก๊าซชีวภาพ ดังนั้นเชื้อเพลิงต่ออากาศที่เผาไหม้เหมาะสมตามทฤษฎีของก๊าซมีเทนจึงเท่ากับ 0.105 คำนวณจาก 1 mole CH_4 /(2 mole O_2/(21%O_2 in Air /100%)) เมื่อทราบอัตราส่วนโดยปริมาตรของก๊าซมีเทนต่อปริมาตรของอากาศที่เผาไหม้จริงก็จะสามารถหาค่า Equivalence ratio ได้จากการนำอัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศที่ใช้จริงหารด้วย 0.105

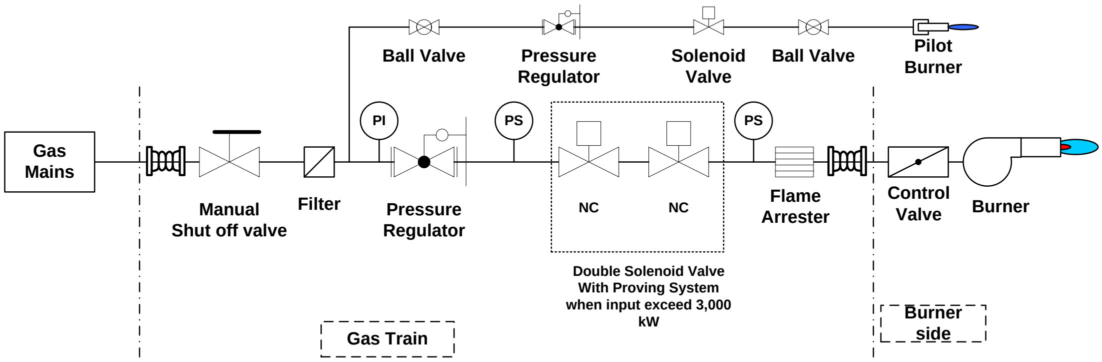
ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโดยปริมาตรของอากาศต่อเชื้อเพลิงทางทฤษฎี กับความเข้มข้นของก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพ แสดงได้ตามรูปที่ 8.1



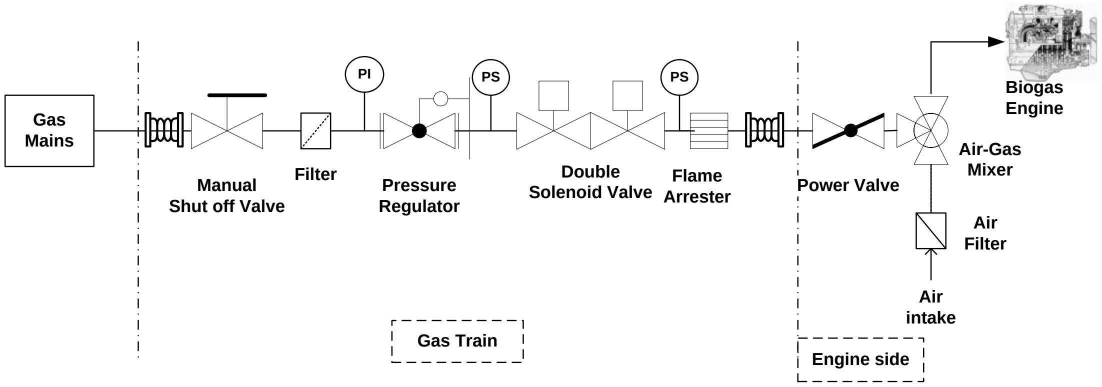
รูปที่ 8.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงโดยปริมาตรกับความเข้มข้นของก๊าซมีเทน (**ที่มา;** HANDBOOK ON BIOGAS UTILIZATION, 1988)

8.2 ชุดอุปกรณ์ก๊าซ (Gas Train)

ชุดอุปกรณ์ก๊าซ (Gas train) เป็นชุดอุปกรณ์ซึ่งทำหน้าที่จ่ายก๊าซไปยังอุปกรณ์ใช้ประโยชน์ โดยทำหน้าที่จ่ายก๊าซได้อย่างเหมาะสมทั้งความดันและอัตราการไหล อุปกรณ์ใช้ประโยชน์สามารถใช้เผาไหม้และแปลงพลังงานที่อยู่ในก๊าซชีวภาพให้กลายเป็นพลังงานรูปอื่นๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ การใช้ประโยชน์ก๊าซชีวภาพทำได้โดยการเผาไหม้ ไม่ว่าจะเป็นการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ หรือเผาไหม้ในกระบอกสูบเครื่องยนต์ (Internal combustion engine) ชุดอุปกรณ์ก๊าซ (Gas train) ประกอบด้วย วาล์วปิด-เปิดก๊าซแบบธรรมดา (Manual shut off valve) หม้อกรองก๊าซ (Filter) วาล์วปรับความดันก๊าซ (Pressure regulator) โซลินอยด์วาล์วคู่พร้อมระบบตรวจพิสูจน์ (Double Solenoid Valve with Proving System) อุปกรณ์ป้องกันเปลวไฟย้อนกลับ (Flame Arrestor) และวาล์วควบคุมอัตราการไหลของก๊าซ (Control valve) ตัวอย่างอุปกรณ์ก๊าซสำหรับหัวเผาและเครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพ ดังแสดงในรูปที่ 8.2 และ 8.3 ตามลำดับ



รูปที่ 8.2 แสดงชุดอุปกรณ์ก๊าซ (Gas train) สำหรับหัวเผาก๊าซชีวภาพ



รูปที่ 8.3 แสดงชุดอุปกรณ์ก๊าซ (Gas train) สำหรับเครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพ

สำหรับหน้าที่ของส่วนต่างๆ มีดังนี้

1) วาล์วปิด-เปิดก๊าซแบบธรรมดา (Manual shut off valve)

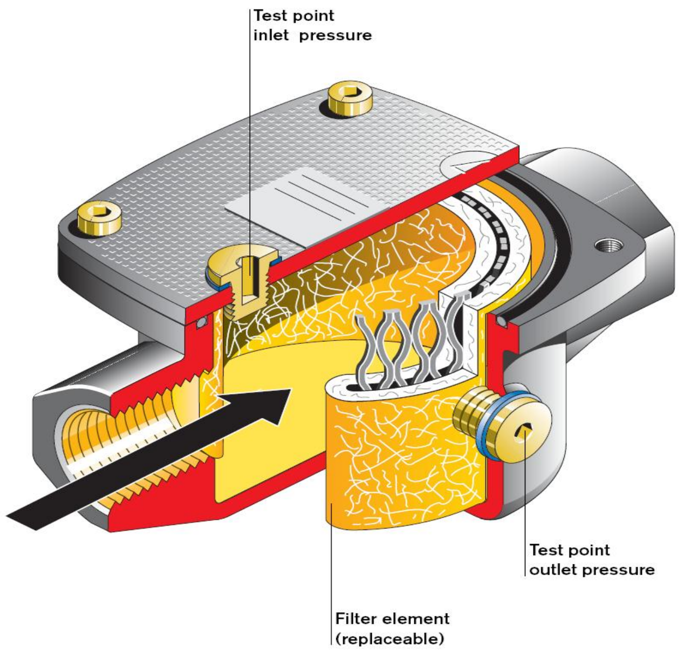
เป็นวาล์วที่ใช้สำหรับการปิด-เปิด ด้วยมือหรือด้ามจับ เพื่อจ่ายก๊าซในชุดอุปกรณ์ก๊าซ โดยทั่วไป วาล์วนี้จะติดไว้ที่ส่วนปลายของท่อย่อยกับอุปกรณ์ใช้ก๊าซ

รูปที่ 8.4 แสดงตัวอย่างวาล์วปิด-เปิดก๊าซแบบธรรมดา (Manual shut off valve)

(**ที่มา**; www. Alloy-valves.com)

2) หม้อกรอง (Filter)

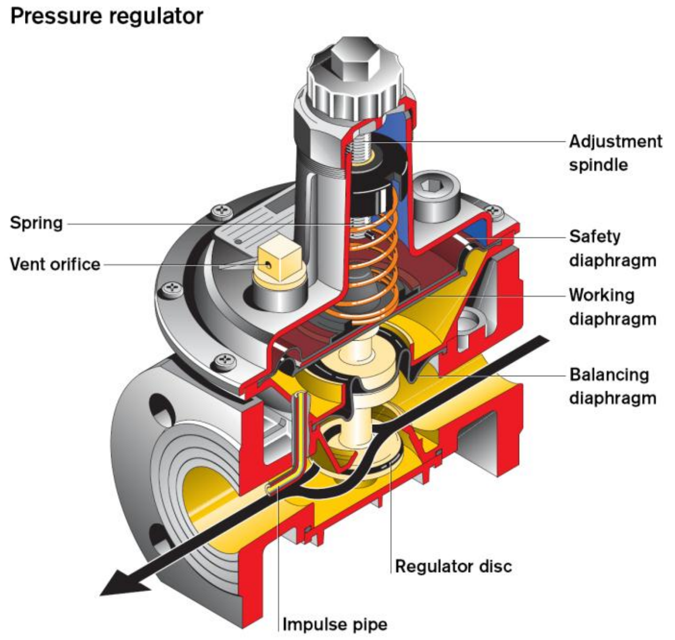
ทำหน้าที่ดักกรองแยกฝุ่น ผง หรืออนุภาคของแข็งต่างๆ ที่ปนมากับก๊าซป้องกันไม่ให้สิ่งเจือปนต่างๆ เหล่านั้นหลุดเข้าไปยังส่วนของชุดอุปกรณ์ควบคุมก๊าซต่างๆ และอุปกรณ์ใช้ประโยชน์



รูปที่ 8.5 แสดงตัวอย่างลักษณะของหม้อกรองก๊าซ (**ที่มา**; Weishaupt GmbH , 1997)

3) วาล์วปรับความดันก๊าซ (Pressure regulator)

วาล์วปรับความดันเป็นวาล์วที่ทำหน้าที่ลดความดันของก๊าซจากต้นทางที่ส่งไปยังอุปกรณ์ใช้งานปลายทางให้มีความดันปลายทางขาออกคงที่ หรือเกือบคงที่ นอกจากนี้ยังควบคุมความดันให้เปลี่ยนแปลงไม่มากในช่วงอัตราการไหลที่เหมาะสมกับอุปกรณ์ใช้ประโยชน์ปลายทาง วาล์วปรับความดันมีหลายชนิด การใช้งานต้องเลือกให้เหมาะสมกับอุปกรณ์ใช้งาน ทั้งความดันและช่วงอัตราการไหลที่ต้องการของอุปกรณ์ใช้ประโยชน์ต่างๆ เช่น ใช้กับหัวเผา (Burner) ความดันของก๊าซจะอยู่ในช่วง 30-70 mbar วาล์วปรับความดันชนิดนี้ ควรเลือกใช้วาล์วที่สามารถทำหน้าที่ปรับอัตราการไหลของก๊าซให้ได้สัดส่วนระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศที่คงที่ได้ วาล์วชนิดนี้อาจเรียกว่า Air-gas ratio regulator หรือ Ratio regulator หรือกรณีที่ใช้กับเครื่องยนต์ ก๊าซเชื้อเพลิงและอากาศจะถูกผสมกันก่อนที่หัวผสม (Mixer) ซึ่งความดันของก๊าซเท่ากับศูนย์ (เท่ากับความดันบรรยากาศ) หรือเครื่องยนต์บางรุ่นต้องการความดันที่สูงกว่า(Positive) หรือต่ำกว่า (Negative) ความดันบรรยากาศเล็กน้อย วาล์วปรับความดันที่เลือกใช้ควรทำหน้าที่ปรับความดันของก๊าซขาออกที่ระดับความดันบรรยากาศได้ เรียกวาล์วชนิดนี้ว่า Zero governor



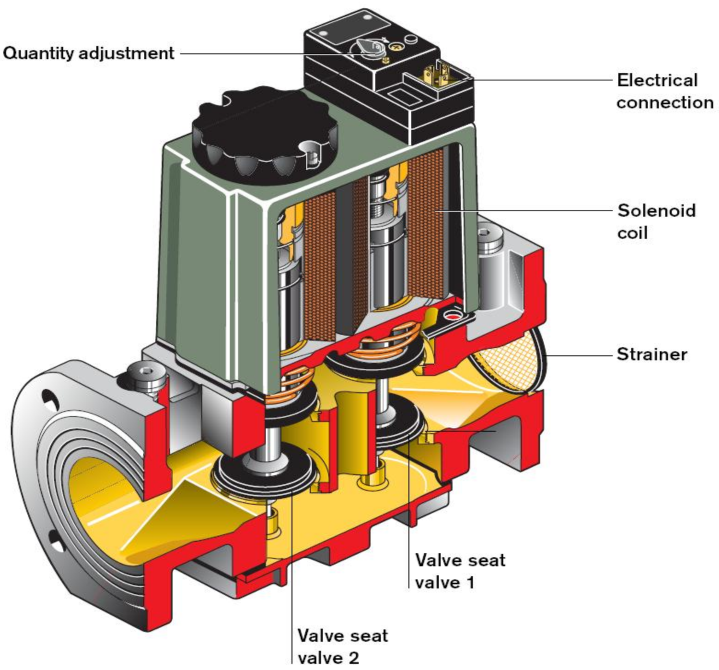
รูปที่ 8.6 แสดงลักษณะส่วนประกอบของ Pressure regulator ของก๊าซรูปแบบหนึ่ง

(**ที่มา;** Weishaupt GmbH , 1997)

4) โซลินอยด์วาล์วคู่ (Double solenoid valves หรือ Double safety shut off valves)

เป็นโซลินอยด์วาล์วชนิดปกติปิดคู่ที่ทำหน้าที่เปิด–ปิดก๊าซอัตโนมัติ อาจจะใช้โซลินอยด์วาล์วเดี่ยวสองตัวติดตั้งแยกกันแต่มีระยะห่างไม่เกิน 1 เมตร หรือใช้โซลินอยด์วาล์วคู่ชนิดที่ออกแบบให้อยู่ในตัวเรือนเดียวกันก็ได้ สำหรับระบบที่มีอัตราการป้อนตั้งแต่ 3,000 kW ขึ้นไป จะต้องมีระบบตรวจสอบการรั่วของก๊าซ (Proving system) ที่โซลินอยด์วาล์วคู่นี้ด้วย

Solenoid valve DMV-D



รูปที่ 8.7 แสดงลักษณะส่วนประกอบของ Double solenoid valve (**ที่มา;** Weishaupt GmbH , 1997)

8.3 การใช้ประโยชน์ก๊าซชีวภาพในการผลิตพลังงาน

แนวทางการผลิตพลังงานจากก๊าซชีวภาพ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 รูปแบบคือ การผลิตพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้โดยตรงและการผลิตพลังงานไฟฟ้าในหลายๆ เทคโนโลยีของอุปกรณ์การใช้ประโยชน์จากก๊าซชีวภาพ วัสดุและอุปกรณ์ต่างๆ ของแต่ละเทคโนโลยีมีความอ่อนไหวต่อลักษณะ หรือคุณภาพของก๊าซชีวภาพไม่เหมือนกัน จึงจำเป็นต้องทำความสะอาดก๊าซ หรือปรับปรุงคุณภาพก๊าซให้เหมาะสมกับอุปกรณ์ต่างๆ อุปกรณ์จึงจะใช้งานได้ และมีอายุการใช้งานตามที่ควรจะเป็น ตารางที่ 8.1 ได้สรุปความต้องการลักษณะทั่วไปแบบคร่าวๆ ของก๊าซชีวภาพที่จะใช้งานกับอุปกรณ์ใช้ประโยชน์ต่างๆ ดังแสดงไว้ดังนี้

ตารางที่ 8.1 แสดงลักษณะของก๊าซชีวภาพที่แนะนำให้ใช้กับการใช้ประโยชน์ต่างๆ

เทคโนโลยี	ลักษณะของก๊าซที่แนะนำ
หัวเผา เตาหุงต้ม	– H_2S < 1000 ppm, ความดัน 80-250 mbar, ไม่มีน้ำปน, CH_4>50% – H_2S < 10 ppm ความดัน 8-25 mbar
เครื่องยนต์สันดาปภายใน	H_2S < 100 ppm, ความดัน 8-25 mbar ,ไม่มีน้ำและไม่มี siloxanes ปน (Otto cycle engines ถูกกัดกร่อนด้วย H_2S ได้ง่ายกว่า diesel engines)
ก๊าซเทอร์ไบขนาดเล็ก (Microturbines)	ค่าความร้อน > 350 BTU/scf ความดันก๊าซ 5.20 bar ไม่มีน้ำและไม่มี siloxanes ปน
เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cells)	PEM: CO < 10 ppm, กำจัด H_2S PAFC: H_2S < 20 ppm, CO < 10 ppm,องค์ประกอบของสารกลุ่ม Halogens< 4 ppm MCFC: H_2S < 10 ppm in fuel (H_2S < 0.5 ppm to stack), องค์ประกอบของสารกลุ่ม Halogens < 1 ppm SOFC: H_2S < 1 ppm, องค์ประกอบของสารกลุ่ม Halogens < 1 ppm
Stirling Engines	H_2S เหมือนกับหม้อน้ำความดันก๊าซ 10-140 mbar
ผลิตเป็นก๊าซธรรมชาติ	H_2S < 4 ppm, CH_4 > 95%, CO_2 < 2 % by volume, $H_2O < 1 \times 10^{-4}$ kg/MMscf, ไม่มี siloxanes and particulates ปน ความดัน> 30 bar

ที่มา; Steven McKinsey Zicari, 2003

8.3.1 การผลิตพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้โดยตรง

การผลิตพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้โดยตรงเป็นรูปแบบการผลิตพลังงานพื้นฐาน และเป็นที่นิยมใช้กันโดยทั่วไป ก๊าซเชื้อเพลิงจะถูกป้อนเข้าสู่อุปกรณ์ที่เรียกว่า หัวเผา (Burner)ความร้อนจากการเผาไหม้จะถูกถ่ายเทออกมาในรูปของก๊าซร้อน น้ำร้อนหรือไอน้ำ หรือน้ำมันร้อน ที่จะนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป หัวเผาเชื้อเพลิงที่ได้รับการออกแบบมาดีจะช่วยให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ได้โดยองค์ประกอบที่ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์นั้นจะเป็นดังนี้

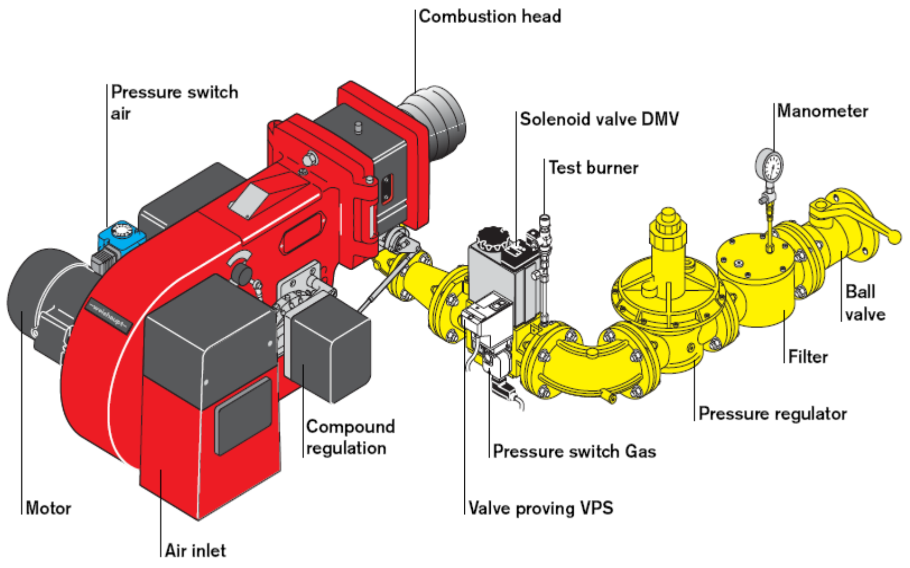
1) มีการผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศอย่างทั่วถึง
2) มีเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้พอเพียงเพื่อไม่ให้สูญเสียเชื้อเพลิงที่ยังไม่ถูกเผาไหม้ออกไปจากห้องเผาไหม้

3) มีอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ในระหว่างเกิดการเผาไหม้สูงพอที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ต่อเนื่อง ซึ่งสามารถทำได้โดยการปรับสัดส่วนของปริมาณเชื้อเพลิงกับอากาศเพื่อให้ได้อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้สูงกว่าจุดติดไฟของเชื้อเพลิง

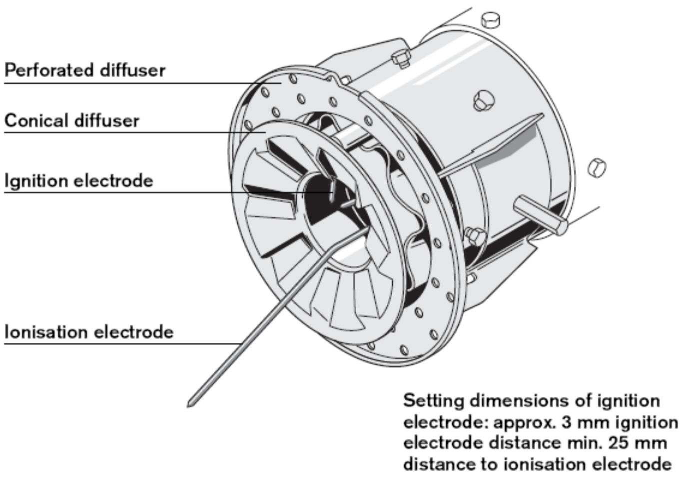
คุณสมบัติของเชื้อเพลิงก๊าซชีวภาพที่สามารถใช้กับหัวเผา (Burner) ได้สรุปไว้แล้วดังตารางที่ 8.1 โดยปกติก๊าซชีวภาพที่ใช้กับหัวเผาและชุดอุปกรณ์ก๊าซ (Gas Train) จะกำหนดให้มีความเข้มข้นของก๊าซไข่เน่าไม่เกิน 1,000 ppm และมีความชื้นสัมพัทธ์ไม่เกิน 60% ที่อุณหภูมิของก๊าซขาเข้า ขณะที่ความเข้มข้นของก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพไม่ควรต่ำกว่า 50% หัวเผาที่ใช้งานกับเชื้อเพลิงก๊าซชีวภาพสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด ได้แก่ หัวเผาก๊าซชีวภาพ (Biogas burner) หัวเผาก๊าซชีวภาพหรือน้ำมัน (Dual burner) และหัวเผาก๊าซชีวภาพผสมกับน้ำมัน (Combination burner)

8.3.1.1 หัวเผาก๊าซชีวภาพ (Biogas burner)

เป็นหัวเผาเชื้อเพลิงประเภทก๊าซที่ได้รับการออกแบบและปรับแต่งให้สามารถใช้กับก๊าซชีวภาพได้โดยตรง ลักษณะของหัวจ่ายก๊าซเป็นท่อประเภท Nozzle มีจานกระจายอากาศแบบแผ่น (Baffles) เอียงทำมุมให้เกิดอากาศหมุนผสมกับก๊าซชีวภาพที่จ่ายจากท่อ Nozzle ทำให้การผสมเชื้อเพลิงกับอากาศดี และมีลักษณะของเปลวไฟเป็นแบบหมุน (Swirl flame) เนื่องจากเป็นหัวเผาใช้กับก๊าซชีวภาพโดยเฉพาะ จึงได้มีการผลิตออกมาในหลากหลายขนาดกำลังการผลิต สามารถที่จะเลือกขนาดที่เหมาะสมกับความต้องการได้โดยตรง การใช้งานและการควบคุมไม่ซับซ้อน ใช้งานง่าย ส่วนประกอบของหัวเผาก๊าซ และ Gas train ดังรูปที่ 8.8 และรูปที่ 8.9 แสดงลักษณะของหัวผสมของหัวเผาก๊าซรูปแบบหนึ่ง



รูปที่ 8.8 แสดงลักษณะส่วนประกอบของหัวเผาก๊าซ และ Gas train (**ที่มา;** Weishaupt GmbH , 1997)



รูปที่ 8.9 แสดงลักษณะของหัวผสมของหัวเผาก๊าซรูปแบบหนึ่ง (**ที่มา;** Weishaupt GmbH , 1997)

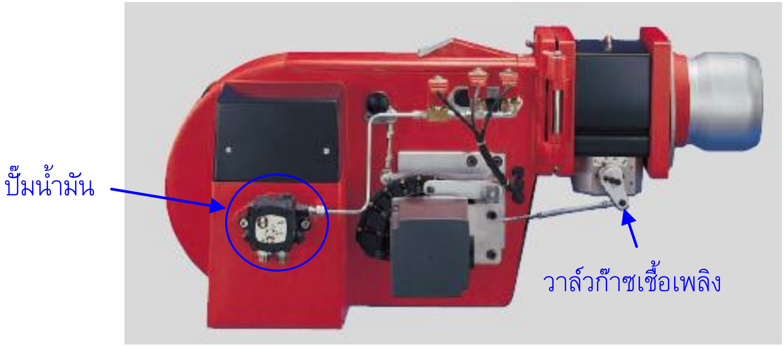
ในกรณีที่ปริมาณหรืออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเปลี่ยนแปลงในด้านลดลง หรือคุณภาพของก๊าซต่ำลง (ค่าความร้อนต่ำลงหรือมีความเข้มข้นของก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพลดลง) ระบบจะไม่สามารถรับภาระความต้องการพลังงานของอุปกรณ์ใช้งานปลายทางได้ ยกตัวอย่างกรณีที่ระบบบำบัดน้ำเสียหยุดใช้งานเป็นระยะเวลานานๆ เมื่อโรงงานเริ่มต้นเดินกระบวนการผลิตใหม่ระบบผลิตก๊าซชีวภาพจะยังไม่สามารถส่งก๊าซชีวภาพเข้ามาใช้ในโรงงานได้ เนื่องจากหยุดไปนานและยังไม่มีน้ำเสีย

ป้อน ดังนั้นโรงงานจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ผลิตพลังงาน (หม้อน้ำมันร้อน หรือหม้อน้ำ) ที่ใช้เชื้อเพลิงอื่นสำรองอีกหนึ่งระบบ เพื่อเดินทดแทนอุปกรณ์ผลิตพลังงานจากก๊าซชีวภาพในระยะแรกไปก่อน หรือกรณีกระบวนการผลิตของโรงงานไม่สามารถเดินได้อย่างต่อเนื่องส่งผลให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจากระบบบำบัดน้ำเสียไม่เพียงพอต่อการใช้งาน โรงงานจึงจำเป็นต้องมีหม้อน้ำมันร้อน หรือหม้อน้ำที่ใช้เชื้อเพลิงอื่นสำรองเดินขนาน เพื่อรองรับภาระความต้องการพลังงานของกระบวนการผลิตให้เพียงพอ และต้องออกแบบระบบเชื่อมต่อพร้อมทั้งควบคุมอุปกรณ์ผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงก๊าซชีวภาพกับอุปกรณ์ผลิตพลังงานที่ใช้เชื้อเพลิงอื่นให้สามารถทำงานควบคู่กันได้อย่างเหมาะสม

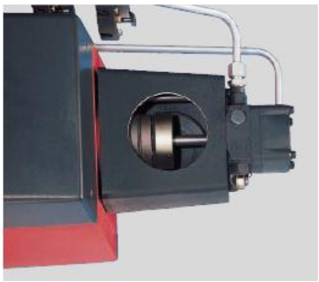
8.3.1.2 หัวเผาก๊าซชีวภาพหรือน้ำมัน (Dual Burner)

เป็นหัวเผาที่ออกแบบให้สามารถเผาไหม้เชื้อเพลิงได้ 2 ลักษณะ คือ 1) เผาไหม้ก๊าซชีวภาพเพียงอย่างเดียวหรือ 2) เผาไหม้น้ำมันเพียงอย่างเดียว ดังนั้นเมื่อปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ไม่เพียงพอ จะต้องสลับมาใช้น้ำมันเพียงอย่างเดียว

หัวเผาก๊าซชีวภาพหรือน้ำมันแบบหัวฉีดความดันสูง หัวเผาแบบใช้ปั๊มน้ำมันแรงดันสูง สูบอัดเชื้อเพลิงผสมให้เป็นฝอยผ่านไปยังรูเล็กๆ เพื่อให้ได้ผลของการเผาไหม้ที่ดี เชื้อเพลิงเหลวจะถูกอัดผ่านช่องทางเล็กๆ ทำให้ฝอยน้ำมันที่ออกมามีความเร็วทั้งที่พุ่งไปข้างหน้าและความเร็วหมุนรอบตัว (Rotational velocity) การผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศก็จะยิ่งดีขึ้น โครงสร้างหัวเผาเรียบง่าย หัวเผาแบบนี้ใช้งานได้สะดวก เพราะสามารถปรับความดันและอัตราการไหลของเชื้อเพลิงเหลวได้ง่าย มีหลายขนาดให้เลือก เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานและสามารถปรับรูปร่างของเปลวไฟได้ แต่มีข้อเสียคือ รูของหัวฉีดน้ำมันมักจะมีฝุ่นผงหรือสิ่งสกปรกอื่นๆ ไปอุดตันบ่อย จึงต้องทำความสะอาดบ่อย และต้องทำความสะอาดไส้กรองน้ำมันด้วย น้ำมันที่สกปรกจะทำให้หัวฉีดอุดตันจึงต้องมีการกรองน้ำมันอย่างละเอียด หัวฉีดอาจเกิดความเสียหายได้ง่ายระหว่างการทำความสะอาด รูปแบบการเผาของหัวผสมนี้ก๊าซจะเผาไหม้อยู่รอบนอกของหัวฉีดน้ำมัน ก๊าซชีวภาพกับอากาศจะผสมกันที่หัวเผาโดยมีแผ่นกระจายอากาศเป็นตัวช่วยผสม แผ่นกระจายอากาศออกแบบให้มีลักษณะเป็นแผ่น Baffle บังคับให้อากาศไหลผ่านในลักษณะที่หมุนจึงเกิดการผสมที่ดี ได้เปลวไฟหมุน (Swirl) ช่วยเพิ่มเสถียรภาพของเปลวไฟได้ดีขึ้น ลักษณะของหัวเผาชนิดนี้ดังแสดงในรูปที่ 8.10 และรูปที่ 8.11



รูปที่ 8.10 แสดงลักษณะของหัวเผาชนิด Dual Burner (**ที่มา;** Wieshaupt Corporation, 2004)



รูปที่ 8.11 แสดงลักษณะของคลัชแม่เหล็กไฟฟ้า (Electro magnetic clutch)

(**ที่มา;**Wieshaupt Corporation, 2004)

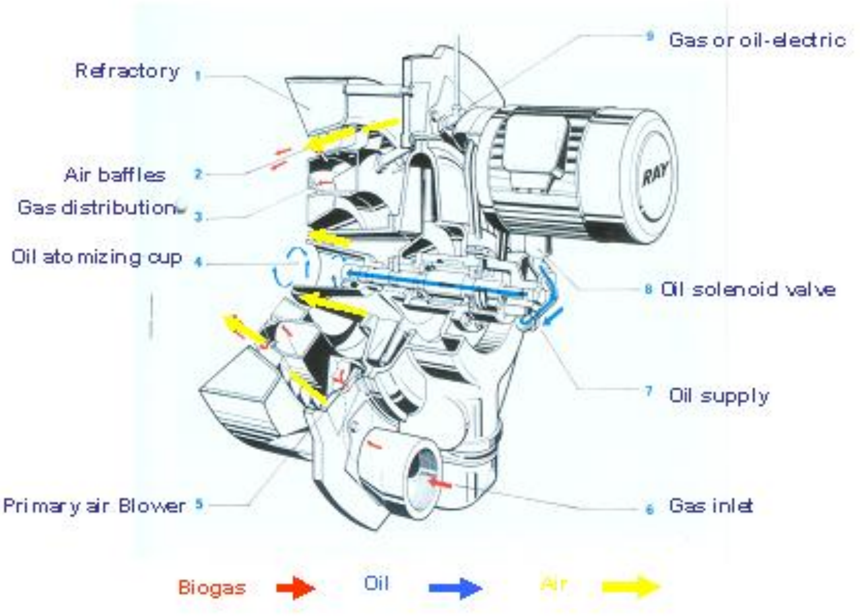
หัวเผาชนิด Dual Burner รุ่นใหม่ๆ จะมีคลัชแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับจับแกนเพลาปั๊มน้ำมัน กรณีเลือกใช้งานเชื้อเพลิงก๊าซ คลัชแม่เหล็กจะจากออกทำให้ปั๊มน้ำมันไม่ต้องทำงาน หรือเดินตัวเปล่าช่วยลดการสึกหรอของปั๊มน้ำมันได้

8.3.1.3 หัวเผาก๊าซชีวภาพผสมกับน้ำมัน (Combination Fuel Burner)

หัวเผาก๊าซชีวภาพผสมกับน้ำมันนี้ เป็นหัวเผาที่ออกแบบให้สามารถเผาไหม้เชื้อเพลิงได้ 3 ลักษณะ คือ 1) เผาไหม้ก๊าซชีวภาพเพียงอย่างเดียว 2) เผาไหม้น้ำมันเพียงอย่างเดียว และ 3) เผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซชีวภาพผสมกับน้ำมัน ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมจะต้องปรับเชื้อเพลิงชนิดหนึ่งให้คงที่ ส่วนอีกเชื้อเพลิงหนึ่งสามารถเร่งหรี่ได้ หัวเผาแบบนี้สามารถใช้งานได้ดีในกรณีที่อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพแตกต่างกัน ก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้มีปริมาณไม่แน่นอน เพราะยังสามารถรักษาภาระความ

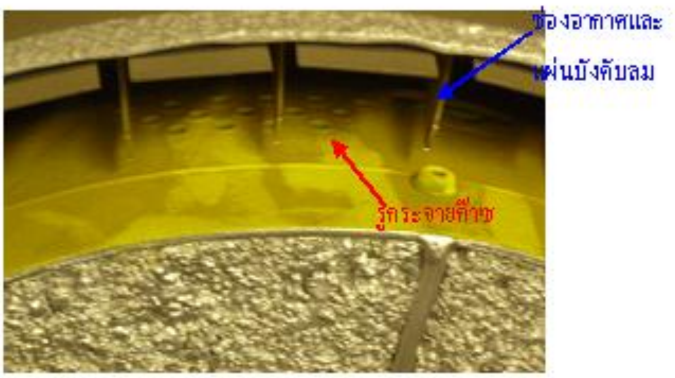
ต้องการพลังงานของอุปกรณ์ปลายทางให้คงที่ได้ แต่การปรับแต่งและการควบคุมการเผาไหม้จะยากกว่า เนื่องจากใช้เชื้อเพลิง 2 ชนิดในหัวเผาเดียว ซึ่งต้องการการดูแลและบำรุงรักษามากกว่า ค่าลงทุนเฉพาะในส่วนของหัวเผาแบบผสมนี้จึงสูงที่สุด

หัวเผาก๊าซชีวภาพผสมน้ำมันแบบถ้วยหมุน (Rotary cup combination burner) มีหลักการทำงาน คือ การใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง เพื่อกระจายเชื้อเพลิงเหลวให้เป็นฝอย เชื้อเพลิงจะถูกป้อนทางด้านในของกรวยที่กำลังหมุนรอบแกน แรงหนีศูนย์กลางจะทำให้น้ำมันถูกเหวี่ยงไปอยู่ด้านขอบของกรวย และกระจายออกจากปลายกรวย ในขณะที่อากาศถูกเป่ามาปะทะ ทำให้ละอองน้ำมันที่กระจายออกมาเป็นฝอยเล็กๆ หัวเผาแบบนี้เหมาะที่จะใช้กับน้ำมันที่มีความหนืดสูง และสามารถใช้ได้กับอัตราการป้อนเชื้อเพลิงเหลวซึ่งไม่คงที่ได้ สามารถปรับอัตราการป้อนได้สูง หรือให้ค่าสัดส่วน Turn-down สูงโดยไม่จำเป็นต้องเพิ่มจำนวนของหัวเผาไม่มีปัญหาเรื่องอุดตันเพราะท่อทางไหลในตัวหัวเผามีขนาดใหญ่ความดันป้อนของเชื้อเพลิงต่ำง่ายต่อการทำงานสามารถควบคุมขนาดของหยดน้ำมันเหลวได้ง่ายเพียงแต่ควบคุมความเร็วรอบของถ้วยหมุนแต่การบำรุงรักษาซับซ้อนยุ่งยากและราคาแพง รวมถึงต้องใช้ไฟฟ้าเพื่อหมุนถ้วยหมุนส่วนการเผาไหม้ก๊าซชีวภาพจะเกิดขึ้นอยู่รอบนอกของการเผาไหม้น้ำมัน โดยก๊าซชีวภาพจะถูกป้อนผ่านแผ่นรูกระจายด้านหน้าของหัวเผา ซึ่งอยู่รอบนอกของถ้วยหมุน อากาศที่ใช้เผาไหม้จะถูกส่งมาผสมกับก๊าซด้านหน้าหัวเผาโดยใช้แผ่น Baffle หลายๆ ใบ ปรับมุมบังคับให้อากาศที่ไหลผ่านมีลักษณะหมุน เมื่อผสมกับเชื้อเพลิงที่ฉีดเข้ามาจึงเกิดการผสมที่ดี กรณีที่ต้องเดินระบบเผาไหม้เชื้อทั้งสองแบบพร้อมๆ กัน โดยทั่วไปจะกำหนดให้ขั้นต่ำของส่วนผสมน้ำมันอยู่ที่ประมาณ 30% ของขนาดกำลังการผลิตทางความร้อนของหัวเผาถ้าก๊าซชีวภาพมีสัดส่วนน้อยกว่า 70% สามารถเพิ่มสัดส่วนของน้ำมันเข้าไปทดแทนได้ โดยส่วนใหญ่เมื่อประเมินสัดส่วนการผสมที่เหมาะสมกับอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพที่ระบบสามารถผลิตได้แล้ว จะกำหนดและตั้งอัตราการป้อนน้ำมันให้คงที่เอาไว้ที่ค่าเดียว การเร่งหรือหรี่อัตราการผลิตพลังงานความร้อนจะเร่ง หรือหรี่ที่อัตราการป้อนของก๊าซชีวภาพเพียงอย่างเดียว โดยการปรับเปลี่ยนอัตโนมัติตามการขึ้นลงของภาระความร้อนที่ต้องการ ทั้งนี้เพื่อให้ง่ายต่อการปรับเปลี่ยนการเร่งหรี่อากาศที่เหมาะสมสำหรับการเผาไหม้ หัวเผาผสมแบบหัวฉีดน้ำมันความดันสูงใช้หลักการเดียวกัน



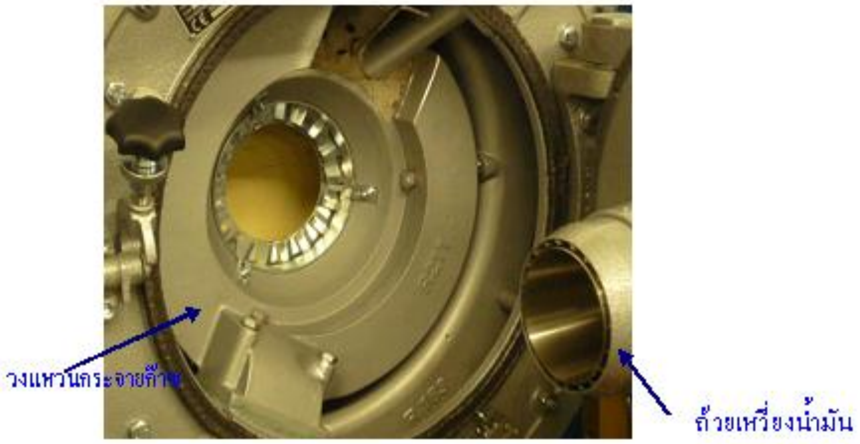
รูปที่ 8.12 แสดงหัวเผาก๊าซชีวภาพผสมน้ำมันแบบถ้วยหมุนน้ำมัน (Rotary cup combination burner)

(**ที่มา;** RAY Öil- und Gasbrenner GmbH, 2001–2002)



รูปที่ 8.13 แสดงลักษณะการผสมของก๊าซกับอากาศของหัวเผาก๊าซผสมน้ำมัน

แบบถ้วยหมุนน้ำมัน (Rotary cup combination burner)



รูปที่ 8.14 แสดงลักษณะหัวเผาก๊าซชีวภาพผสมน้ำมันแบบถ้วยหมุนน้ำมันผสมก๊าซ ขณะเปิดบานสวิงลูกถ้วยออกเพื่อให้ดูลักษณะภายในของหัวเผา

เนื่องจากก๊าซชีวภาพเอง อาจจะมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของก๊าซมีเทนได้ในบางช่วง ซึ่งขึ้นอยู่กับหลายๆ สาเหตุที่เกี่ยวข้องกับระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ดังนั้นการตรวจวัดวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซเป็นประจำ จะช่วยให้เกิดความปลอดภัยในการใช้งาน โดยเมื่อพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพ ก็ควรทำการตรวจวัดความเข้มข้นของออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) ในไอเสียจากการเผาไหม้ควบคู่ไปด้วย เพื่อที่จะได้ปรับแต่งการเผาไหม้ให้สมบูรณ์ และเกิดความปลอดภัยในการใช้งาน ในส่วนของปัญหาในเรื่องการใช้งานสามารถดูได้ในหัวข้อที่ 8.5

คำเตือน

การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของก๊าซมีเทนที่แตกต่างกันมาก ***อาจเกิดปัญหาเปลวไฟที่หัวเผาดับและการระเบิดของหัวเผาทุกชนิดได้*** เนื่องจาก***ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์***ในก๊าซชีวภาพซึ่งแปรผกผันกับความเข้มข้นของก๊าซมีเทน***มีผลกระทบต่อความเร็วเปลวไฟที่เปลี่ยนไป ส่งผลต่อความเสถียรของเปลวไฟ*** เมื่อไฟที่หัวเผาดับขณะอยู่ระหว่างการทำงานในภาระสูงๆ ย่อมมีส่วนผสมเชื้อเพลิงก๊าซกับอากาศจำนวนมากที่ยังไม่ถูกเผาค้างอยู่ภายในเตา ซึ่งส่วนผสมก็อยู่ในช่วงที่ติดไฟได้ ***เมื่อส่วนผสมที่ค้างอยู่ในเตาไปสัมผัสกับพื้นผิวที่ร้อนภายในเตา ถ้าทำให้อุณหภูมิของส่วนผสมสูงถึง 595°C ก็จะเกิดการระเบิดขึ้นภายในเตาได้ในทันที***

8.3.2 การผลิตพลังงานไฟฟ้า

ก๊าซชีวภาพสามารถนำมาใช้ผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยใช้กับเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าในรูปแบบต่างๆ เช่น เครื่องยนต์สันดาปภายในที่ต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้าชนิดสเตอริ่ง เซลล์เชื้อเพลิง รวมไปถึงการใช้ในระบบกังหันก๊าซ เป็นต้น

8.3.2.1 เครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้าชนิดสันดาปภายใน (Internal combustion engine)

(**ที่มา**; Dieter Deublein and Angelika Steinhauser, 2008)

ใช้หลักการทำงานเดียวกับเครื่องยนต์เผาไหม้ภายใน ก๊าซชีวภาพจะถูกป้อนเข้าสู่กระบอกสูบในเครื่องยนต์ ลูกสูบเคลื่อนที่ขึ้นเพื่ออัดความดันในกระบอก เกิดการจุดระเบิดพร้อมดันลูกสูบและคายไอเสีย ลูกสูบที่เคลื่อนที่ขึ้นลงเชื่อมต่อเข้ากับเพลาข้อเหวี่ยง พลังงานที่ได้จากการขับเพลาให้หมุนนี้จะส่งต่อไปขับชุดกำเนิดไฟฟ้า (Generator) เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าต่อไป นอกจากนี้ในระบบที่มีขนาดใหญ่ไอเสียที่ได้เพียงพอที่จะนำไปใช้ผลิตไอน้ำ เพื่อป้อนเข้ากับกังหันไอน้ำผลิตไฟฟ้าได้อีกครั้งหนึ่ง โดยเรียกระบบการผลิตร่วมนี้ว่า ระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าความร้อนร่วม (Cogeneration) เครื่องยนต์ 4 จังหวะที่ใช้กับก๊าซชีวภาพนี้ เดิมทีเป็นเครื่องยนต์ที่ใช้กับก๊าซธรรมชาติแต่ดัดแปลงมาให้สามารถใช้งานกับก๊าซชีวภาพได้ เป็นเครื่องยนต์ชนิดจุดระเบิดด้วยหัวเทียน(Ignition spark plug) ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของเครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพอยู่ในช่วงไม่เกิน 34-40% ขนาดของเครื่องยนต์ที่มีอยู่ในตลาดตั้งแต่ 1 kW ถึง 2 MW เครื่องยนต์ทำงานที่ความเร็วรอบ 1,500รอบต่อนาที

ชุดอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้กับเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้าชนิดเผาไหม้ในกระบอกสูบได้แก่

- เครื่องยนต์สันดาปภายในแบบลูกสูบเป็นเสมือนห้องเผาไหม้ รูปที่ 8.16 แสดงเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้าจากก๊าซชีวภาพ
- ชุดอุปกรณ์ก๊าซ (Gas train) ก่อนเข้าเครื่องยนต์รูปที่ 8.15
- ชุดควบคุมความดันเชื้อเพลิงก๊าซ (Pressure Regulator) เพื่อรักษาความดันของเชื้อเพลิงที่เข้าเครื่องยนต์ให้สม่ำเสมอ
- คาร์บูเรเตอร์ชุดผสมเชื้อเพลิงกับอากาศทำหน้าที่ผสมอากาศกับเชื้อเพลิงให้ทั่วถึง ก่อนป้อนเข้าเผาไหม้ในกระบอกสูบ
- ระบบควบคุมอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง เพื่อทำการวัดปริมาณเชื้อเพลิงและคุมอัตราการป้อนอากาศเข้าผสมกับเชื้อเพลิงในอัตราส่วนที่กำหนดโดยวาล์วควบคุมเชื้อเพลิงทำหน้าที่เร่ง/หรี่ อัตราการไหลของเชื้อเพลิงที่จะเข้าไปผสมกับอากาศที่คาร์บูเรเตอร์หรือที่

หัวผสม (Mixer) โดยตัวควบคุมการทำงานของวาล์ว(Actuator) จะรับสัญญาณจากระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องยนต์ ซึ่งได้รับสัญญาณจาก Sensor ตรวจจับความเร็วรอบมาอีกทอดหนึ่ง

รูปที่ 8.15 แสดงชุดอุปกรณ์ก๊าซ (Gas train) ของเครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพ (**ที่มา;** www.gti-altronicinc.com)

รูปที่ 8.16 แสดงเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้าจากก๊าซชีวภาพ

เครื่องยนต์ 4 จังหวะที่ใช้กับก๊าซชีวภาพขนาดปานกลางขึ้นไป (>500 kW) จะมีระบบอัดส่วนผสมของก๊าซกับอากาศก่อน (Pre-compression) โดยใช้ Turbocharger แล้วจึงลดอุณหภูมิส่วนผสมลงก่อนเข้ากระบอกสูบ ซึ่งจะช่วยให้ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์สูงขึ้น โดยทั่วไปแล้วประสิทธิภาพของเครื่องยนต์จะลดลงเมื่อก๊าซชีวภาพมีความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น แต่เนื่องจากว่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น ทำให้คุณสมบัติการป้องกันน็อค (Anti-knock) ของก๊าซชีวภาพจะสูงขึ้นด้วย ดังนั้นเครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพจึงสามารถเพิ่มอัตราส่วน

การอัด (Compression ratio) ได้สูงขึ้น เมื่อเทียบกับเครื่องยนต์ที่ใช้กับก๊าซโปรเพนจากอัตราส่วนการอัด 11 เป็น 12.5 ทำให้ประสิทธิภาพสูงขึ้น 1-2% (เทียบกับเครื่องยนต์ที่มีอัตราส่วนการอัดเท่ากับ 11) บ่อยครั้งที่เครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพมักจะเผาไหม้ในกระบอกสูบในช่วงการเผาไหม้เจือจาง (Lean–burn range) ช่วง 1.3 <λ< 1.6 (λ หมายถึง อัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ใช้งานจริงต่ออัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทางทฤษฎี) ซึ่งจะมีผลให้ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์แม้จะประกอบด้วย Turbocharger แล้ว มีประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าต่ำลงมาเล็กน้อย คือ มีประสิทธิภาพอยู่ในช่วง 33-39% อย่างไรก็ตามเครื่องยนต์มีแนวโน้มที่จะเกิดการน็อคได้ ถ้าก๊าซชีวภาพมีความแปรปรวนความเข้มข้นของก๊าซมีเทน เพื่อให้เกิดความแน่นอนของการทำงานของเครื่องยนต์ความเข้มข้นของก๊าซมีเทนจึงไม่ควรต่ำกว่า 45%

การใช้ก๊าซชีวภาพในเครื่องยนต์ดีเซลซึ่งมีระบบการควบคุมการฉีดน้ำมันแบบ Direct Injection แต่เนื่องจากเครื่องยนต์ประเภทนี้มีอุณหภูมิในห้องเผาไหม้สูง จึงทำให้ห้องผสมก่อน (Pre chamber engine) มีอุณหภูมิสูงตามไปด้วย จึงทำให้เกิดอาการที่ไม่สามารถควบคุมการจุดระเบิดได้ เครื่องยนต์ดีเซลเมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับก๊าซชีวภาพจะใช้เชื้อเพลิงน้ำมันดีเซลร่วมด้วย การทำงานของเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้เชื้อเพลิงก๊าซชีวภาพร่วมกับน้ำมันดีเซลนี้จะทำงานที่ค่า $\lambda < 1.9$ ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์สูงขึ้นถึง 15% เมื่อเทียบกับเครื่องยนต์ 4 จังหวะ (Spark ignition) ที่มีขนาดเดียวกัน โดยที่มีการผสมน้ำมันดีเซล 10-18%

สำหรับคุณสมบัติของก๊าซชีวภาพอย่างละเอียดที่ใช้กับเครื่องยนต์ยี่ห้อต่างๆ ได้สรุปไว้ในตารางที่ 8.2

ตารางที่ 8.2 แสดงคุณสมบัติเฉพาะของก๊าซชีวภาพที่ใช้กับเครื่องยนต์ของผู้ผลิตเครื่องยนต์ต่างๆ

องค์ประกอบ	Jenbacher	Deutz	Caterpillar	Waukesha
ค่าความร้อน และการเปลี่ยนแปลง	การเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 0.5% CH_4(v/v) ต่อ 30 วินาที	14.4 MJ/Nm^3	15.7-23.6 MJ/Nm^3 ช่วงที่แนะนำ	15.73 MJ/Nm^3
กำมะถันทั้งหมด (Total S)	2,000 mg/Nm^3 CH_4(มีคะตะลิสต์) 1,500 mg/Nm^3 CH_4(ไม่มีคะตะลิสต์) (ผลรวม S เทียบเท่า H_2S)	<2,200 mg/Nm^3 CH_4	<2,140 mg H_2S/Nm^3 CH_4 (ผลรวมเทียบเท่า H_2S)[3]	<715 mg/Nm^3 CH_4 (องค์ประกอบที่มีกำมะถันทั้งหมด)
ก๊าซไข่เน่า(H_2S(ppm))	-	<0.15% v/v	-	-
แอมโมเนีย(NH_3)	<55 mg/Nm^3 CH_4 (ใช้กับก๊าซจากถังย่อยสลายชนิดไม่ใช้อากาศ) รวมระบบผลิตก๊าซชีวภาพทุกแบบ	-	<105 mg NH_3/Nm^3 (ใช้กับก๊าซจากถังย่อยสลายชนิดไม่ใช้อากาศ) รวมระบบผลิตก๊าซชีวภาพทุกแบบ[3]	-
คลอไรด์ทั้งหมด(Total Cl)	ดูผลรวมของ Cl and F	<100 mg/Nm^3 CH_4	ดูผลรวมของ Cl and F	ดูผลรวมของ Cl and F
ฟลูออไรด์ทั้งหมด(Total F)	ดูผลรวมของ Cl and F	<50 mg/Nm^3 CH_4	ดูผลรวมของ Cl and F	ดูผลรวมของ Cl and F
ผลรวมของคลอไรด์และฟลูออไรด์ (sum of Cl+F)	<u>กรณีไม่มีคะตะลิสต์</u>[4]:ผลรวม Cl กับ F ต้อง <100 mg/Nm^3 CH_4(ให้น้ำหนักเท่ากับ Cl 1 ส่วน และ F 2ส่วน) กรณีนี้รับประกันแบบไม่มีเงื่อนไข	<100 mg/Nm^3 CH_4	<713 mg Cl/Nm^3 CH_4 (องค์ประกอบรวมของฮาไลด์เทียบเท่า Cl)[3]	<300 mg Cl/Nm^3 CH_4 (สารอินทรีย์ที่มีฮาไลด์ทั้งหมดเทียบเท่า Cl)[5]

ตารางที่ 8.2 (ต่อ)

องค์ประกอบ	Jenbacher	Deutz	Caterpillar	Waukesha
ผลรวมของคลอไรด์และฟลูออไรด์ (sum of Cl+F)	ผลรวม Cl กับ F อยู่ในช่วง100-400 mg/Nm^3 CH_4จำกัดการรับประกัน ผลรวม Cl กับ F = 400 mg/Nm^3 CH_4 ;ไม่รับประกัน กรณีมีคะตะลิสต์ : ผลรวม Cl กับ F ต้อง = 0 mg/Nm^3 CH_4			
ซิลิกอน(Si)	มาตรฐานเก่า ไม่มีคะตะลิสต์[3]:<20 mg/Nm^3 CH_4 ไม่จำกัดการรับประกัน; (>20 mg/Nm^3 CH_4จำกัดการรับประกัน) มาตรฐานใหม่ 400 mg/Nm^3 CH_4ไม่รับประกันทั้งหมด ไม่มีคะตะลิสต์ดูข้างล่าง[5]: 0 mg/Nm^3 CH_4 ไม่มีคะตะลิสต์ดูข้างล่าง[5]: 0 mg/Nm^3 CH_4 มีคะตะลิสต์(มาตรฐานใหม่ หรือเก่า): 0 mg/Nm^3 CH_4	<10 mg/Nm^3 CH_4	<21mg/Nm^3 CH_4[3]	<50 mg/Nm^3 CH_4ของ siloxane ทั้งหมด(Models ที่มี prechamber fuel system อย่างเดียว)[5]

ตารางที่ 8.2 (ต่อ)

องค์ประกอบ	Jenbacher	Deutz	Caterpillar	Waukesha
ฝุ่น	<50 mg/Nm^3 CH_4(อนุภาค< 3 ไมครอน)	<10 mg/Nm^3 CH_4 (อนุภาค 3-10 ไมครอน)	<30 mg/Nm^3 CH_4 (อนุภาค< 1ไมครอน)[3]	กำจัดอนุภาค >3 ไมครอน
น้ำมัน/น้ำมันที่ปน (Oil/residue oil)	<5 mg/Nm^3 CH_4	<400 mg/Nm^3 CH_4 (ไอน้ำมัน >C5)	<45 mg/Nm^3 CH_4	<2 % v/v (ไฮโดรคาร์บอนที่เป็นเชื้อเพลิงเหลวที่อุณหภูมิขาเข้าเย็นที่สุด
อื่นๆ	-	ขีดจำกัดเฉพาะโครงการ: ไอตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอน	-	ต้องไม่มีไกลคอน
ความชื้นสัมพัทธ์/ความชื้น	<80% ไม่มีคอนเดนเสท	60-80%	<80% ที่อุณหภูมิของเชื้อเพลิงต่ำสุด	*กรณีที่ไม่มีน้ำ*:แนะนำให้ลดอุณหภูมิก๊าซไปที่อุณหภูมิ 4°C ตามด้วยกรองหยาบและอุ่นก๊าซกลับไปที่อุณหภูมิ 29-35°C; จุดน้ำค้างควรต่ำกว่าอุณหภูมิก๊าซขาเข้า 11°C
ความดันขาเข้า	เครื่องยนต์มี Turbocharged: 80-200 mbar	20-200 mbar	-	-
	Pre-combustion chamber: Models 612-616: 2,500 - 4,000 mbar Models 620: 3,000-4,000 mbar	-	-	-

ตารางที่ 8.2 (ต่อ)

องค์ประกอบ	Jenbacher	Deutz	Caterpillar	Waukesha
การเปลี่ยนแปลงความดัน	<10 mbar ต่อวินาที	<+10% ของค่าที่กำหนดที่ความถี่<10 ครั้งต่อชั่วโมง	–	–
อุณหภูมิก๊าซขาเข้า	<40°C	10–50°C	–	>29°C และ<60°C
ความเข้มข้นของมีเทน CH_4 (% v/v)	–	40%	อัตราส่วนที่แนะนำของ CH_4:CO_2 คือ 1.1–1.2	–
Methane Number[7]	–	140 สำหรับก๊าซหลุมขยะ	–	–
ก๊าซไฮโดรเจน (% v/v)	–	–	–	<12%

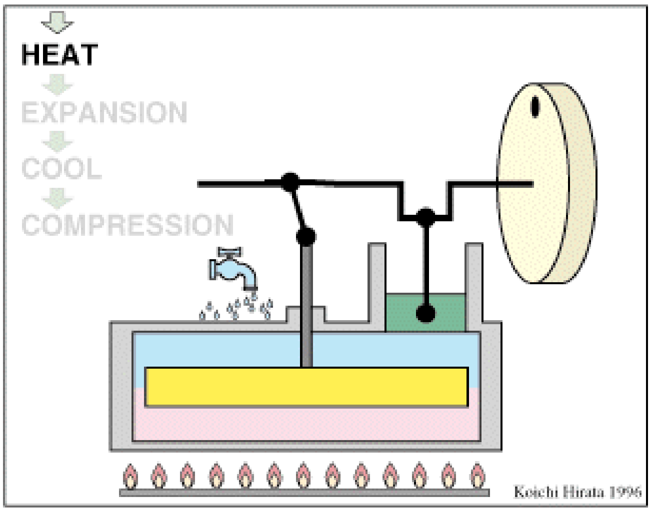
หมายเหตุ:

1) ข้อมูลเฉพาะที่แสดงในตารางนี้มีจุดประสงค์เพื่อนำเสนอข้อมูลเพียงเท่านั้น
2) วันที่ของข้อมูล:Jenbacher (T1 1000–0300); Duetz,1999; Caterpillar, 1997; Waukesha, 2000.
3) ข้อมูลเฉพาะโดยผู้ผลิตในรูป mg/MJ ได้แปลงค่าให้อยู่ในรูป mg/Nm^3 CH_4 โดยสมมุติให้ค่าความร้อนของCH_4เท่ากับ37.5MJ/Nm^3
4) เงื่อนไขอื่น อนุญาตให้ค่าเกิน 30% เหนือค่า 100 mg/Nm^{3}ได้ 1 ครั้ง ในจำนวนผลวิเคราะห์ 4 ครั้งใน 1 ปี ค่าจำกัดสำหรับน้ำมันที่ใช้แล้วและต้องดูเรื่องปริมาตรบรรจุน้ำมันของอ่างน้ำมันด้วย (ดูคำแนะนำทางเทคนิคของ Jenbacher No. 1000–0099)
5) ข้อมูลเฉพาะของผู้ผลิตในรูป mg/l ของก๊าซหลุมขยะได้แปลงค่าให้อยู่ในรูป mg/Nm^3 CH_4โดยสมมุติความเข้มข้นมีเทน 50% ค่าจำกัดสัมพัทธ์ของค่า< 0.02 ตามค่าที่คำนวณ(กรณีไม่มีคะตะลิสต์)
6) Relative limiting value = [(mg/kg Si in engine) x (total oil quantity in litres)]/[(engine power in kW) x (oil service time in hours)]
7) Methane number ของก๊าซธรรมชาติปกติอยู่ในช่วง 70 ถึง 92 จะไม่เกิดอาการน็อก ถ้า Methane number =100และไฮโดรเจน = 0

(**ที่มา;** Guidance on gas treatment technologies for landfill gas engines, 2004)

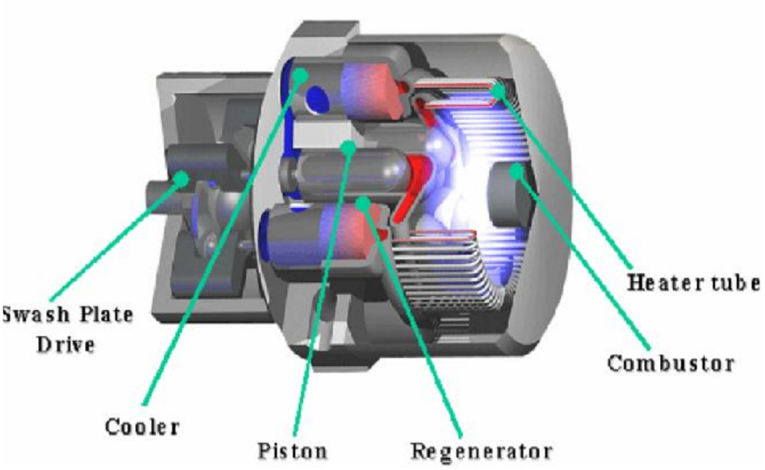
8.3.2.2 เครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้าชนิดสเตอริ่ง (Stirling engine)

เครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้าชนิดสเตอริ่ง เป็นเครื่องยนต์ความร้อนชนิดหนึ่งที่มีความแตกต่างจากเครื่องยนต์สันดาปภายในซึ่งใช้อยู่ในรถยนต์ทั่วๆ ไป เครื่องยนต์สเตอริ่งมีการทำงานเป็นลักษณะครบวงรอบที่เรียกว่า วัฏจักรสเตอริ่ง ความแตกต่างระหว่างเครื่องยนต์สเตอริ่งกับเครื่องยนต์สันดาปภายใน คือ ภายในกระบอกสูบของเครื่องยนต์สเตอริ่งจะมีก๊าซที่บรรจุและผนึกอยู่ภายใน ไม่สามารถรั่วไหลออกมาได้ จึงไม่ต้องมีวาล์วไอเสียเหมือนกับเครื่องยนต์ก๊าซโซลีนหรือดีเซล และไม่มีการจุดระเบิดของหัวเทียนหรือน้ำมันเชื้อเพลิง พลังงานของเครื่องยนต์สเตอริ่งมาจากความร้อนภายนอกกระบอกสูบจึงไม่มีการเผาไหม้ภายในกระบอกสูบ ลักษณะการทำงานของเครื่องยนต์สเตอริ่งสามารถแสดงดังรูปที่ 8.17 และรูปที่ 8.18 หลักการสำคัญของเครื่องยนต์สเตอริ่งนั้น อาศัยการเปลี่ยนแปลงความดันของก๊าซที่อยู่ภายในกระบอกสูบดันลูกสูบให้เคลื่อนที่ไปหมุนเพลาของเครื่องยนต์ เกิดงานทางกลศาสตร์ขึ้น คุณสมบัติของก๊าซที่ทำให้เกิดงานทางกลศาสตร์ขึ้น คือ ก๊าซที่อยู่ในกระบอกสูบเมื่อได้รับความร้อนอุณหภูมิของก๊าซจะเพิ่มขึ้นและเกิดการขยายตัว ในทางตรงกันข้ามเมื่อก๊าซสูญเสียความร้อนอุณหภูมิของก๊าซจะต่ำลงทำให้ปริมาตรของก๊าซลดลง การขยายและหดตัวของก๊าซในกระบอกสูบสามารถทำให้เกิดงานขับเคลื่อนลูกสูบได้



รูปที่ 8.17 แสดงหลักการทำงานของเครื่องยนต์สเตอริ่ง

(**ที่มา;** http://www.stirlingengine.com/faq)



รูปที่ 8.18 แสดงเครื่องยนต์แบบสเตอริ่ง (**ที่มา**; Jeff VanVoorhis, 2004)

ข้อดีของเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้าชนิดสเตอริ่งนี้ คือ การทำงานของเครื่องยนต์มีเสียงเงียบ เพราะลูกสูบเคลื่อนที่จากการขยาย/หดตัวของก๊าซในกระบอกสูบที่ได้รับความร้อนจากเชื้อเพลิงที่เผาไหม้อยู่ภายนอก และการดึงความร้อนออกโดยใช้แหล่งทำความเย็นภายนอกเช่นกัน จึงไม่มีการจุดระเบิดและการสันดาปภายในการปลดปล่อยมวลสารต่ำกว่าเครื่องยนต์สันดาปภายใน ความร้อนที่สะสมอยู่ในเครื่องยนต์ก็ต่ำกว่าเช่นกัน ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของเครื่องยนต์สเตอริ่งอยู่ระหว่าง 24–38% ไอเสียมีอุณหภูมิ 250–300°ซ. ขนาดของเครื่องยนต์ไม่เกิน 150 kW_e (kW_eหมายถึง กำลังการผลิตไฟฟ้า) เนื่องจากการสึกหรอของเครื่องยนต์ต่ำ ดังนั้นค่าบำรุงรักษาจึงต่ำด้วยแต่เนื่องจากขนาดของเครื่องยนต์สเตอริ่งใหญ่สุดที่มีในท้องตลาดไม่เกิน 150 kW_e และราคาต่อ kW ไฟฟ้าที่ผลิตได้ของเครื่องยนต์โดยประมาณ 1,600 เหรียญสหรัฐ ซึ่งสูงกว่าเครื่องยนต์สันดาปภายในจึงยังไม่เป็นที่นิยมนำมาใช้งานกัน (**ที่มา**; Dieter Deublein and Angelika Steinhauser, Biogas from Waste and Renewable Resources, 2008)

8.3.2.3 เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell)

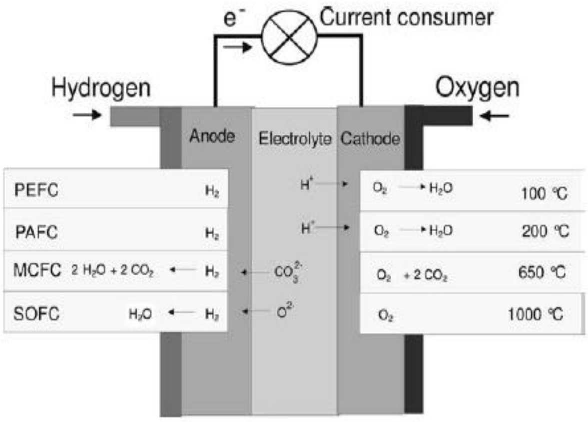
เซลล์เชื้อเพลิง คือ อุปกรณ์ที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี-ไฟฟ้าระหว่างออกซิเจนกับไฮโดรเจน ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงพลังงานของเชื้อเพลิงไปเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง ไม่ต้องผ่านการเผาไหม้ทำให้เครื่องยนต์ที่ใช้เซลล์เชื้อเพลิงนี้ไม่ก่อมลภาวะทางอากาศ ทั้งยังมีประสิทธิภาพสูงกว่าเครื่องยนต์เผาไหม้ 1–3 เท่า ขึ้นอยู่กับชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง และชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้

เซลล์เชื้อเพลิงมีลักษณะคล้ายกับเซลล์สะสมไฟฟ้าแบบตะกั่ว หรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่า แบตเตอรี่ เพราะสามารถที่จะอัดประจุใหม่ได้เรื่อยๆ เซลล์เชื้อเพลิงยังไม่เป็นที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปอย่างแบตเตอรี่ เพราะต้นทุนการผลิตอุปกรณ์ในครั้งแรกสูงและยังมีอันตรายที่ต้องใช้ความรู้เฉพาะด้านในการควบคุมหลายประการ แต่ในปัจจุบันได้มีการนำมาใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าหลายชนิดแล้วเช่น โทรศัพท์มือถือ ปาล์ม คอมพิวเตอร์โน๊ตบุ๊ค เป็นต้น (**ที่มา;** http://th.wikipedia.org/wiki/เซลล์เชื้อเพลิง)

โครงสร้างและการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงสามารถแสดงดังรูปที่ 8.19 โดยมีส่วนประกอบดังต่อไปนี้

1) ขั้วแอโนด (Anode) เป็นขั้วลบ มีหน้าที่ส่งอิเลคตรอนออกจากขั้ว โดยอิเลคตรอนได้จากปฏิกิริยา H_2 ==> $2H^+$ + $2e^-$ โดยที่ขั้วจะมีช่องที่ติดกับตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งฉาบอยู่บนผิวหน้าของเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน ปฏิกิริยาจะเกิดเมื่อผ่านก๊าซไฮโดรเจนเข้าไป
2) ขั้วแคโทด (Cathode) เป็นขั้วบวก โดยมีช่องติดกับเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน ทำหน้าที่รับโปรตอน และก๊าซออกซิเจนซึ่งถูกปล่อยออกมาที่ผิวหน้าของเยื่อซึ่งฉาบตัวเร่งปฏิกิริยาเอาไว้ และทำหน้าที่รับอิเลคตรอนกลับมาจากวงจรภายนอก เพื่อรวมกันได้ผลผลิตเป็นน้ำ ดังปฏิกิริยา O_2 + $4H^+$ + $4e^-$ ==> $2H_2O$
3) สารพาประจุ (Electrolyte) เป็นส่วนที่มีความสำคัญ เพราะเป็นส่วนที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของไอออนชนิดต่างๆ และเป็นส่วนที่เซลล์เชื้อเพลิงแต่ละประเภทแตกต่างกัน โดยประเภทที่เรากล่าวถึงอยู่นี้ สารพาประจุจะเป็นเพียงเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton exchange membrane) เท่านั้น ซึ่งมีลักษณะเหมือนแผ่นพลาสติก โดยจะให้โปรตอนผ่านได้ แต่จะไม่ยอมให้อิเลคตรอนผ่าน
4) ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) เป็นวัสดุพิเศษที่ช่วยให้ปฏิกิริยาในขั้นตอนต่างๆเกิดได้ดี โดยส่วนใหญ่จะเป็นผงแพลทินัมเคลือบอยู่บนเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน ซึ่งจะมีลักษณะขรุขระเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการสัมผัสกับก๊าซไฮโดรเจน และออกซิเจน

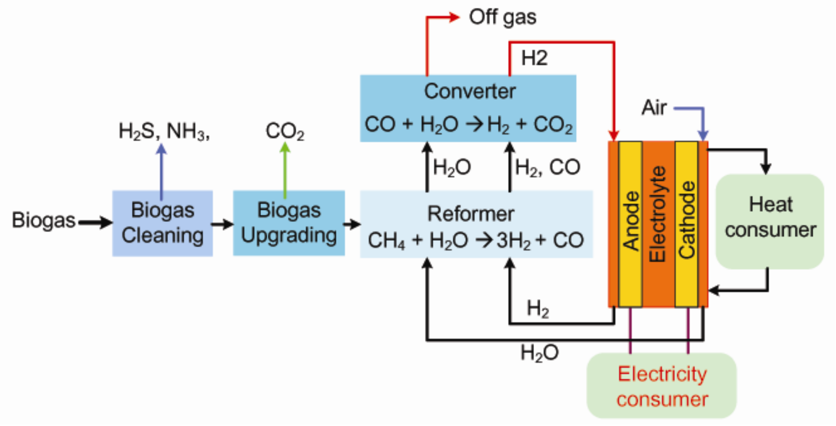
ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง โดยก๊าซชีวภาพที่ใช้กับเซลล์เชื้อเพลิงจะต้องผ่านการกำจัดสิ่งปนเปื้อนที่ติดมากับก๊าซก่อนเข้าไปยังเซลล์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งก๊าซ CO ที่เกิดจากกระบวนการ Reforming ในขั้นตอนการเปลี่ยนก๊าซมีเทนให้กลายเป็นก๊าซไฮโดรเจนก่อนเข้าเซลล์เชื้อเพลิง และก๊าซ H_2S ที่ปนมากับก๊าซชีวภาพตั้งแต่แรกดังตารางที่ 8.3 แสดงชนิดของเซลล์เชื้อเพลิงและการใช้งาน รวมทั้งการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ และข้อดีข้อด้อยต่างๆ



รูปที่ 8.19 แสดงโครงสร้างการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

(**ที่มา**; Dieter Deublein and Angelika Steinhauser, Biogas from Waste and Renewable Resources, 2008)

แนวทางการนำก๊าซชีวภาพไปใช้ในเซลล์เชื้อเพลิง สามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 8.20 ซึ่งก๊าซชีวภาพจำเป็นต้องผ่านขั้นตอนการปรับปรุงหลายขั้นตอน โดยเริ่มจากขั้นตอนการทำความสะอาดก๊าซ การแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แล้วผ่านขั้นตอนการเปลี่ยนก๊าซมีเทนให้เป็นก๊าซไฮโดรเจนด้วยกระบวนการ Reforming ซึ่งจะได้ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ ซึ่งก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์จะถูกเปลี่ยนต่อให้กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยการทำปฏิกิริยากับน้ำในกระบวนการ Converting ซึ่งจะทำให้ได้ไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น



รูปที่ 8.20 แสดงแนวทางการนำก๊าซชีวภาพไปใช้ในเซลล์เชื้อเพลิง

(**ที่มา**; Patikorn Saensing, Energy from Biological Conversion of Organic Waste, 2005)

ตารางที่ 8.3 แสดงชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง

Abbreviation	*AFC*	*PEFC*	*PAFC*	*MCFC*	*SOFC*
	Alkaline Fuel Cell	*Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell*	*Phosphoric Acid Fuel Cell*	*Molten Carbonate Fuel Cell*	*Solid Oxidized Fuel Cell*
Electrolyte	30% KOH	Membrane from polymers (Nafion, Dow)	Concentrated H_3PO_4 absorbed in plastic fleece (Si-PTFE)	Molten Li_2CO_3/K_2CO_3 bound in $LiAlO_2$ matrix	$Zr(Y)O_2$ with yttrium-doped zirconium oxide
Temperature (°C)	60–90	60–120	130–220	650	800–1000
Fuel gas	Pure H_2, hydrazine	H_2, methane, methanol,	Methane, H_2, natural gas, coal gas, biogas	Methane, coal gas, biogas,	Methane, H_2, coal gas, biogas
Gas	Oxygen	Air (3–4 bar)	Air	Air and CO_2	Air
Yield (W/cm²)		0.6	0.2	0.1	0.4
$\eta_{el.}$ (%)	62	60 (H_2), 40 (CH_4)	40	50	55
Status of development	Well engineered	Marketable in niches	Marketable for some years Tested with biogas	Marketable for some years Tested with biogas	Marketable for some years Tested with biogas
Advantages/ disadvantages		Dynamic Fast start-up, insensitive to load changes	Less dynamic Insensitive to CO	Hardly dynamic Nickel and nickel oxide catalysts usable instead of platinum Heat of reaction directly usable for gas reforming.	Not dynamic Long lifetime No catalysts required Heat of reaction directly usable for gas reforming Coupling possible with gas turbine

ตารางที่ 8.3 (ต่อ)

Abbreviation	*AFC*	*PEFC*	*PAFC*	*MCFC*	*SOFC*
	Alkaline Fuel Cell	*Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell*	*Phosphoric Acid Fuel Cell*	*Molten Carbonate Fuel Cell*	*Solid Oxidized Fuel Cell*
Current problems	CO_2^- incompatible due to reactions with caustic potash	The low temperature retards the reaction – a platinum–catalyst is required. Platinum is CO-sensitive especially at low temperatures	Overflow of acid and wetting of the electrodes Drying	Highly corrosive melt Deterioration of the cells during colling after shut down Short lifetime	Tightness of the planar cells
Attempted developments		Saving of catalyst material Minimizing of the losses of the ionic conductors Higher temperatures (180 °C)	Scale-up of the plants and amplification of the market	Longer lifetime of minimum 40 000h Lowering costs	Lowering of the manufacturing cost Lowering the working temperature Other materials
Applications	Today's very seldom applied	Vehicles, small CHPs, rechargeable batteries	Small to medium-sized CHPs	Medium to large-sized CHPs, generators fired with coal	CHPs, combi power stations

(ที่มา; Dieter Deublein and Angelika Steinhauser, Biogas from Waste and Renewable Resources, 2008)

จากตารางที่ 8.3 จะเห็นว่า เซลล์เชื้อเพลิงแต่ละประเภทเหมาะที่จะใช้กับเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ ไม่เหมือนกัน ดังนี้

เซลล์เชื้อเพลิงชนิด AFC ใช้ได้กับเชื้อเพลิงเฉพาะก๊าซไฮโดรเจน

เซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM สามารถใช้กับก๊าซชีวภาพได้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานที่อุณหภูมิ 80°ซ. ชนิดของอิเลคโตรไลท์ที่ใช้มีผลต่ออายุของเมมเบรน ซึ่งอ่อนไหวต่อสิ่งปนเปื้อนที่อยู่ในก๊าซเชื้อเพลิงอย่างมาก รวมทั้งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย ด้วยเหตุผลนี้จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำความสะอาดก๊าซก่อน

เซลล์เชื้อเพลิงชนิด PAFC ใช้งานได้อย่างกว้างขวางกับเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติเมื่อเทียบกับเซลล์เชื้อเพลิงประเภทอื่นๆ ประสิทธิภาพการทำงานต่ำ แต่มีข้อดีก็คือ ไม่อ่อนไหวต่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และคาร์บอนมอนน๊อกไซด์ที่ติดมากับก๊าซเชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิงชนิด MCFC ใช้งานกับก๊าซชีวภาพได้ภายในเซลล์ใช้ของเหลวคาร์บอเนตไหลคล้ายกับเป็นอิเลคโตรไลท์ เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ไม่อ่อนไหวต่อก๊าซคาร์บอนมอนน๊อกไซด์ และทนต่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากสุดถึง 40% โดยปริมาตร เซลล์เชื้อเพลิงนี้ทำงานที่อุณหภูมิ 600 – 700°ซ. กระบวน Reforming ในการเปลี่ยนก๊าซมีเทนให้เป็นก๊าซไฮโดรเจนสามารถเกิดขึ้นได้ภายในเซลล์ ในการนี้สามารถนำไปใช้ร่วมกับกังหันไอน้ำเพื่อผลิตไฟฟ้าในรูปแบบ CO-GENERATION ต่อไปได้ ทำให้ประสิทธิภาพของระบบสูงขึ้นรูปที่ 8.21 แสดงเซลล์เชื้อเพลิงชนิด MCFC

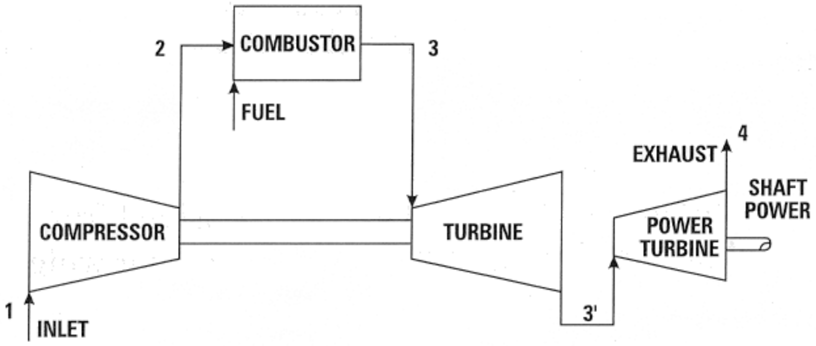
เซลล์เชื้อเพลิงชนิด SOFC เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ทำงานที่อุณหภูมิสูง 750-1000 °ซ.มีประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าสูงกระบวนการ Reforming เปลี่ยนก๊าซมีเทนให้ไปเป็นก๊าซไฮโดรเจนสามารถเกิดขึ้นได้ภายในเซลล์***เหมาะที่จะใช้กับก๊าซชีวภาพเนื่องจากมีความอ่อนไหวกับกำมะถันต่ำ***

(**ที่มา**; biogas HANDBOOK, 2008)

รูปที่ 8.21 แสดงเซลล์เชื้อเพลิงชนิด Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC)
ที่ใช้อยู่ในประเทศเยอรมัน (**ที่มา;** Biogas HANDBOOK, 2008)

8.3.2.4 กังหันก๊าซ (Gas turbine)

เป็นชุดอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าจากการเผาไหม้ภายในอีกรูปแบบหนึ่ง โดยมีลักษณะการทำงาน ตามรูปภาพที่ 8.22

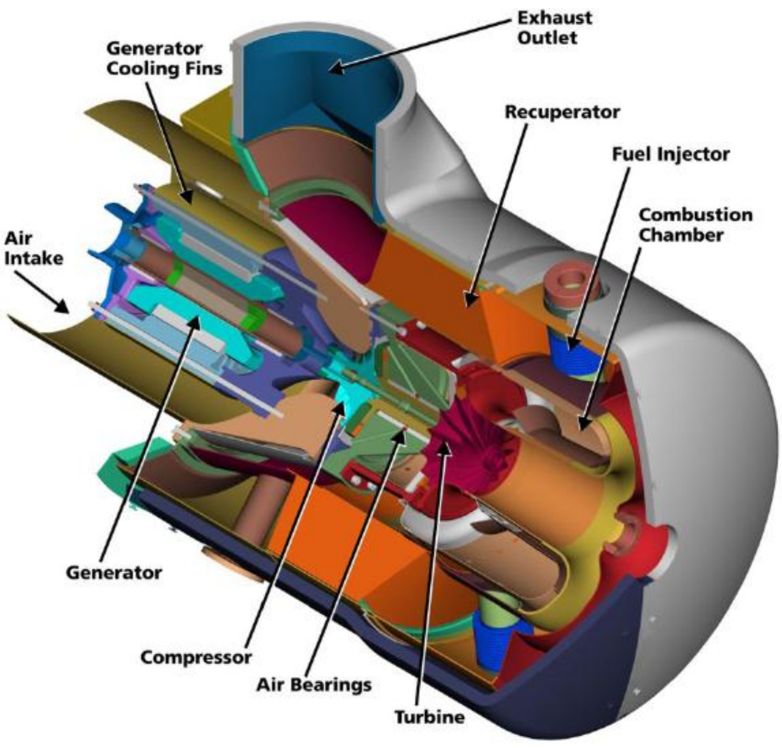


รูปที่ 8.22 แสดงระบบกังหันก๊าซ

หลักการทำงานของกังหันก๊าซเริ่มต้นตั้งแต่อากาศถูกอัดโดยเครื่องอัดอากาศ (Compressor) และป้อนเข้าไปช่วยในการเผาไหม้กับก๊าซเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ (Combustor)ไอเสียอุณหภูมิและความดันสูงถูกป้อนเข้าสู่กังหันก๊าซ (Gas Turbine) ที่เชื่อมต่อกับเครื่องอัดอากาศและอุปกรณ์ผลิตไฟฟ้า (Power turbine) ระบบกังหันก๊าซนี้ มีประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าอยู่ในช่วง 25–35% แต่เนื่องจากระบบกังหันก๊าซเหมาะกับเชื้อเพลิงที่มีความชื้นต่ำ และมีความบริสุทธิ์ของเชื้อเพลิงที่สูง

ทำให้เกิดข้อจำกัดในด้านการใช้งานกับก๊าซชีวภาพ จึงจำเป็นต้องปรับปรุงคุณภาพของก๊าซชีวภาพก่อนการใช้งาน สิ่งนี้เป็นข้อเสียของก๊าซชีวภาพสำหรับการผลิตพลังงานไฟฟ้าในภาคอุตสาหกรรม อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมในแต่ละโรงงานนั้น อาจยังไม่สูงมากพอที่จะนำไปใช้ในการผลิตไฟฟ้ากับระบบกังหันก๊าซขนาดใหญ่ได้ ดังนั้นในปัจจุบันจึงได้มีการพัฒนาสร้างกังหันก๊าซขนาดเล็ก (Micro gas turbine) ขึ้น โดยมีขนาดกำลังการผลิตไฟฟ้าตั้งแต่ 30 kW_e จนถึง 200 kW_e มาใช้งานในเชิงพานิชย์ ซึ่งทำให้การใช้ประโยชน์ก๊าซชีวภาพมีความยืดหยุ่นและหลายทางเลือกมากขึ้น กังหันก๊าซขนาดเล็กมีประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าค่อนข้างต่ำอยู่ในช่วง 15 – 25% อุณหภูมิไอเสีย 400 ถึง 600°ซ.ซึ่งปัจจุบันได้มีการพัฒนากังหันไอน้ำขนาดเล็กมาใช้งานร่วมกับกังหันก๊าซขนาดเล็กแล้ว โดยติดตั้งหม้อน้ำรับความร้อนจากไอเสียที่ออกจากกังหันก๊าซซึ่งมีอุณหภูมิสูงอยู่ ผลิตเป็นไอน้ำจ่ายเข้ากังหันไอน้ำเพื่อผลิตไฟฟ้าอีกครั้งหนึ่ง ทำให้ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าโดยรวมสูงขึ้นถึง 50% รูปที่ 8.23 แสดงภาพตัดภายในของกังหันก๊าซขนาดเล็ก

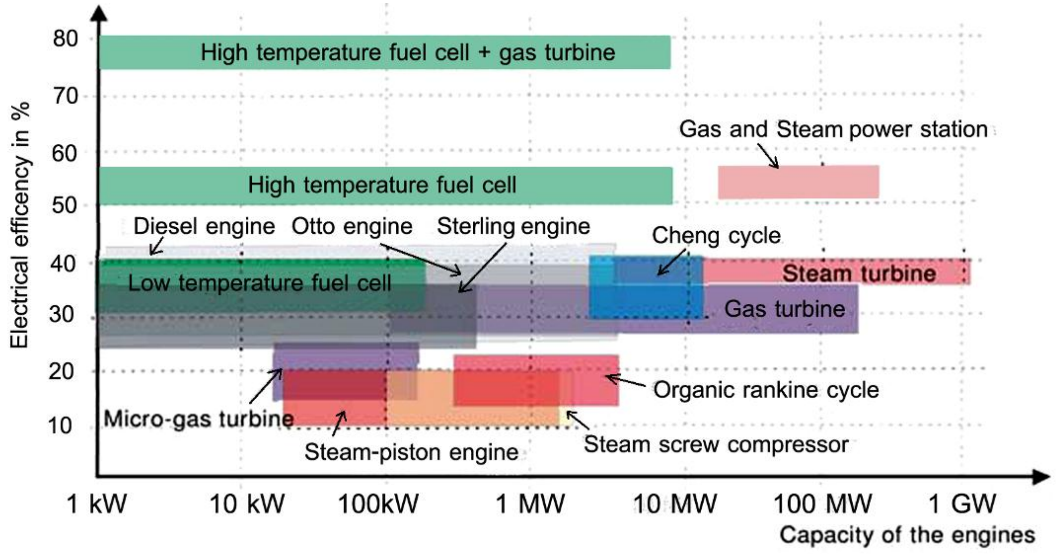
(**ที่มา**; Jeff VanVoorhis, Biogas Handling & Use, 2004 และ Dieter Deublein and Angelika Steinhauser, Biogas from Waste and Renewable Resources, 2008)



รูปที่ 8.23 แสดงภาพตัดภายในของกังหันก๊าซขนาดเล็ก (Micro gas turbine)

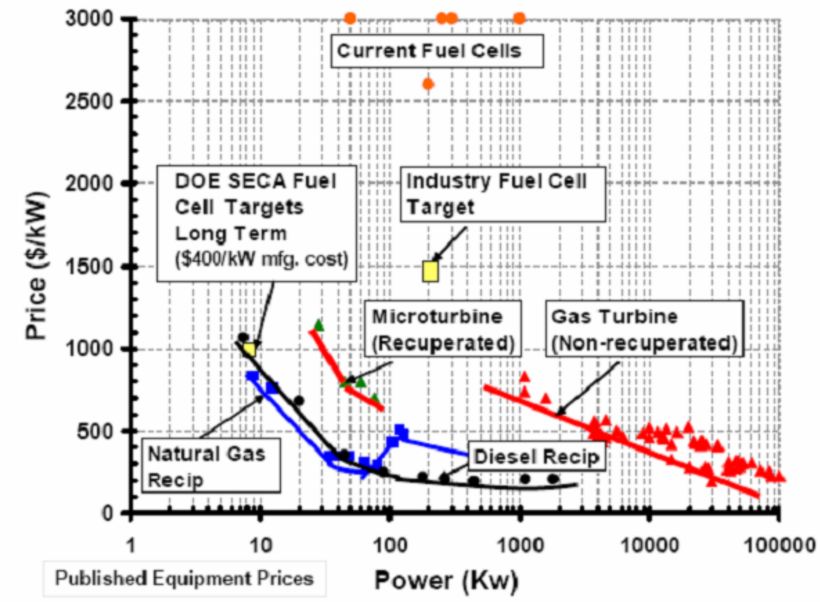
(**ที่มา**; Jeff VanVoorhis, Biogas Handling & Use, 2004)

เทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าประเภทต่างๆ นั้นมีข้อจำกัด และข้อดีข้อด้อยที่แตกต่างกัน ทำให้มีประสิทธิภาพที่ต่างกันออกไป รูปที่ 8.24 ภาพแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าประเภทต่างๆ และรูปที่ 8.25 กราฟแสดงการเปรียบเทียบต้นทุนของอุปกรณ์ตามเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าประเภทต่างๆ กับกำลังการผลิตไฟฟ้า



รูปที่ 8.24 ภาพแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าประเภทต่างๆ

(**ที่มา**; Dieter Deublein and Angelika Steinhauser, Biogas from Waste and Renewable Resources, 2008)



รูปที่ 8.25 กราฟแสดงการเปรียบเทียบต้นทุนของอุปกรณ์ตามเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าประเภทต่างๆ กับกำลังการผลิตไฟฟ้า (kW)

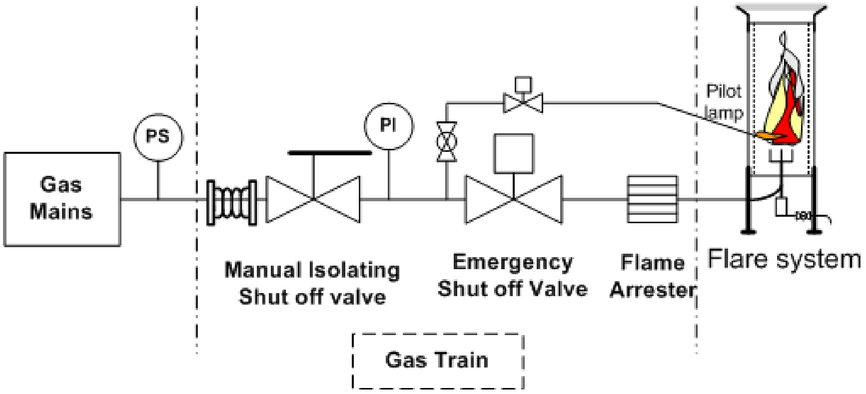
(**ที่มา**; Dieter Deublein and Angelika Steinhauser, Biogas from Waste and Renewable Resources, 2008)

8.4 ระบบเผาก๊าซทิ้ง (Gas Flare System)

ระบบเผาก๊าซชีวภาพทิ้ง เป็นอุปกรณ์ป้องกันการปล่อยก๊าซมีเทนสู่บรรยากาศโดยตรง ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมและทำลายชั้นบรรยากาศ ในหลายๆ ประเทศ กฎหมายจะบังคับเป็นข้อห้ามปฏิบัติสำหรับการปล่อยก๊าซชีวภาพทิ้งโดยไม่ได้เผา ในทางปฏิบัติเมื่อมีก๊าซเหลือเนื่องจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพผลิตได้มากกว่าที่นำไปใช้ประโยชน์ และระบบเก็บก๊าซสำรองไว้ใช้ก็เต็มแล้ว ก๊าซส่วนที่เหลือจำเป็นต้องเผาทิ้งไป ก่อนที่จะถูกระบายออกด้วยวาล์วนิรภัย (Safety relief valve หรือ Pressure relief valve) เพื่อรักษาระดับความดันในถังผลิตและระบบเก็บก๊าซไม่ให้สูงเกิน อุปกรณ์เผาก๊าซทิ้งมีทั้งที่ออกแบบมาให้เป็นการเผาแบบเปิด (Open flare) และระบบเผาทิ้งแบบปิด (Enclosure flare)

ระบบเผาทิ้งแบบปิด (Enclosure flare system) จะช่วยให้การเผาไหม้ก๊าซได้ค่อนข้างสมบูรณ์กว่าระบบเผาทิ้งแบบเปิด (Open flare system) เนื่องจากระบบเผาทิ้งแบบปิด ก๊าซจะถูกเผาอยู่ในห้องเผาไหม้ ทำให้อุณหภูมิการเผาไหม้สูง และไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก รวมทั้งมีระยะเวลาการเผาไหม้ของก๊าซภายในห้องที่เพียงพอไม่ถูกรบกวนจากสิ่งแวดล้อมและลมจากภายนอก ระบบท่อที่จะเชื่อมต่อเข้ากับระบบเผาทิ้ง ควรประกอบด้วยวาล์วแยก (Isolating valve) เป็นวาล์วเปิด-ปิดด้วยมือ วาล์วตัดก๊าซฉุกเฉิน (Emergency shut-off valve) เพื่อป้องกันการปล่อยก๊าซเข้าระบบเผาทิ้งโดยตรง ซึ่งวาล์วนี้จะทำงานก็ต่อเมื่อมีคำสั่งให้เผาก๊าซทิ้งจากระบบควบคุมการเผาทิ้งแบบอัตโนมัติ และมีอุปกรณ์ป้องกันไฟย้อนกลับ (Flame arrester) เป็นอุปกรณ์ความปลอดภัย ระบบ

จุดหัวเผาประกอบด้วย ระบบควบคุมการจุดหัวเผาแบบอัตโนมัติ (Burner controller) หัวล่อไฟ (Pilot lamp) เขี้ยวสปาร์ก หม้อแปลงไฟแรงดันสูงสำหรับจุดสปาร์ก (Ignition transformer) อุปกรณ์ตรวจจับเปลวไฟ (Flame detector) เพื่อความปลอดภัยในการติดตั้งบนพื้นที่โล่งปล่องของหัวเผาทิ้งควรมีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าด้วย รูปที่ 8.26 แสดงชุดอุปกรณ์ก๊าซ (Gas Train) สำหรับระบบเผาก๊าซทิ้ง และรูปที่ 8.27 แสดงระบบเผาก๊าซทิ้งแบบปิด (Enclosure Flare) และชุดอุปกรณ์ก๊าซ



รูปที่ 8.26 แสดงชุดอุปกรณ์ก๊าซ (Gas train) สำหรับระบบเผาก๊าซทิ้ง

รูปที่ 8.27 แสดงระบบเผาก๊าซทิ้งแบบปิด (Enclosure flare) และอุปกรณ์ก๊าซ

ระบบเผาก๊าซทิ้งต้องติดตั้งให้ความสูงของส่วนที่เปิดเปลวไฟออกข้างนอก หรือเปลวไฟเปิดต้องอยู่สูงจากพื้นอย่างน้อย 4 เมตร อยู่ห่างจากอาคาร ถนน หรือที่สาธารณะอย่างน้อย 6 เมตร และต้องอยู่นอกพื้นที่อันตราย (Dangerous classification area) หรือโซนที่กำหนดเอาไว้

8.5 การบำรุงรักษา

เพื่อให้ระบบผลิตและใช้งานก๊าซชีวภาพสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง จึงจำเป็นต้องมีการบำรุงรักษาอุปกรณ์ภายในระบบให้สามารถทำงานได้อย่างปกติ รายการตรวจสอบและบำรุงรักษา ดังแสดงในตารางที่ 8.4

ตารางที่ 8.4 แสดงรายการตรวจสอบและการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในระบบก๊าซชีวภาพ

อุปกรณ์	การตรวจสอบ	การบำรุงรักษา	ความถี่
อุปกรณ์ดักน้ำ (Water drain, Trap, Dip Trap)	ตรวจสอบว่าระบายน้ำได้หรือเพียงพอหรือไม่	– เปิดวาล์วบายพาส เพื่อตรวจดูว่า มีน้ำค้างอยู่ในระบบหรือไม่	ทุกกะ
		– ดูว่าระบบถ่ายน้ำออกอัตโนมัติทำงานได้หรือไม่ เช่น มีน้ำไหลออกที่ปลายท่อหรือไม่	ทุกกะ
		– ทำความสะอาดเมือกตะกอนต่างๆ	สัปดาห์ละครั้ง
วาล์วนิรภัย (Safety Valve, Pressure and Vacuum relief valve)	การทำงาน	– ตรวจสอบว่าทำงานได้หรือไม่ และตรงตามที่ตั้งความดันเอาไว้หรือไม่ – ตรวจสอบว่ารั่วหรือไม่	เดือนละครั้ง
ถังน้ำซีลก๊าซ (Water Seal Tank)	ระดับน้ำ	เติมน้ำให้ได้ระดับ	วันละครั้ง
อุปกรณ์ป้องกันไฟย้อนกลับ (Flame Arrester)	ความดันตกคร่อมสูงกว่าการทำงานปกติของอัตราการไหลที่เคยทราบ	ทำความสะอาดตามคำแนะนำของคู่มือ	ปีละครั้ง
วาล์วปิด-เปิดก๊าซแบบธรรมดา (Manual Shut off valve)	–	หมุนก้านวาล์วเพื่อเปิด-ปิด	เดือนละครั้ง

ตารางที่ 8.4 (ต่อ)

อุปกรณ์	การตรวจสอบ	การบำรุงรักษา	ความถี่
โบลเวอร์ (Blower)	-	ตรวจสอบลูกปืนตามคู่มือแนะนำ	6 เดือนครั้ง หรือเดือนละครั้ง ถ้าจำเป็น
	ความผิดปกติของเสียง	ใส่จาระบี หรือน้ำมันหล่อลื่น	สัปดาห์ละครั้ง
ระบบระบายอากาศ	สั่นผิดปกติ	เปลี่ยนลูกปืน ถ้าเปลี่ยนแล้วยังไม่หาย ลองตรวจสอบความสมดุลของใบพัด	เดือนละครั้ง
ระบบระบายอากาศและมอเตอร์พัดลม	สั่นผิดปกติ	เปลี่ยนลูกปืนถ้าเปลี่ยนแล้วยังไม่หายลองตรวจสอบความสมดุลของใบพัด	เดือนละครั้ง
		ใส่จาระบี และน้ำมันหล่อลื่น	ดูคำแนะนำของคู่มือมอเตอร์
- ชุดอุปกรณ์ก๊าซ (Gas train) - วาล์วปรับความดันและวาล์วตัดก๊าซอัตโนมัติ (Pressure regulator and Automatic Shut off valve)	- ความดันตกคร่อมหม้อกรอง - ตรวจสอบการรั่วของวาล์วต่างๆ	- ทำความสะอาดเปลี่ยนอะไหล่ - ทำความสะอาดเปลี่ยนอะไหล่	- ดูคู่มือ - ดูคำแนะนำของคู่มือวาล์ว
วาล์วป้องกันการไหลย้อนกลับ (Back pressure check valve)	การทำงานและการรั่วไหล	ทำความสะอาด เปลี่ยนซีล	ตามคู่มือแนะนำ
- หัวเผา	- ความสกปรกของหัวฉีด/ถ้วยหมุน	- ทำความสะอาด	- ดูคำแนะนำของคู่มือหัวเผา
เครื่องยนต์	- ความดันตกคร่อมหม้อกรองอากาศ	- ทำความสะอาด	- ดูคำแนะนำจากคู่มือ
	-หัวเทียน	- ทำความสะอาด - ระยะห่างเขี้ยว	- ดูคำแนะนำจากคู่มือ

ตารางที่ 8.4 (ต่อ)

อุปกรณ์	การตรวจสอบ	การบำรุงรักษา	ความถี่
เครื่องยนต์	-ระดับน้ำมันเครื่อง	-เติมน้ำมันเครื่องให้ได้ระดับ	- ทุกกะ
	-คุณภาพน้ำมันเครื่อง	-เปลี่ยนถ่ายน้ำมันเครื่อง	ทุก 2 สัปดาห์ ถึง 1 เดือนต่อครั้งหรือตามคู่มือแนะนำ
ปั๊มลม (Air compressor)	-	-ทำความสะอาดหม้อกรองเป่าด้วยลมอัด เปลี่ยนผ้า กรองเมื่อทำความสะอาด	ทุก 15 วัน
	มีเสียงผิดปกติ	-ส่งไปตรวจสอบ	-
	มีน้ำคอนเดนเสทที่ไส้กรอง	-เป่าไล่ไส้กรอง	สัปดาห์ละครั้ง
ตู้ไฟฟ้าควบคุม	-	ทำความสะอาดไส้กรองอากาศของพัดลมระบายความร้อน	เดือนละครั้ง
		ตรวจสอบและขันขั้วไฟฟ้าให้แน่น	ครั้งแรก และถัดไปปีละครั้ง
	มีเสียงผิดปกติ	ตรวจสอบและเปลี่ยนชุดระบายอากาศ	-
		ตรวจสอบ Thermostatของระบบระบายอากาศ	เดือนละครั้ง
อุปกรณ์วัดอัตราการไหล อุณหภูมิและความดัน	-	สอบเทียบ	ปีละครั้ง
เครื่องวิเคราะห์ก๊าซ (Gas analyzer)	สุญญากาศหรืออัตราการไหลต่ำ	ตรวจสอบ Thermostat ทำความสะอาดภายในท่อ ตรวจสอบชุดกรอง	-
	-	ทำความสะอาดท่อภายใน	เดือนละครั้ง
	ค่าที่อ่านต่างจากก๊าซมาตรฐาน<1%	สอบเทียบ	ทุก 1 ปี หรือตามที่บริษัทผู้ผลิตแนะนำ

(**ที่มา;** BIOGAS COMBUSTION STATION SANITARY LANDFILL “EL MOLLE”)

8.6 ปัญหาจากการใช้งานก๊าซชีวภาพ

จากบทความเผยแพร่ของสำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย กรมโรงงานอุตสาหกรรมเรื่อง "กรณีศึกษาสาเหตุและการป้องกันการระเบิดของห้องเผาไหม้ ซึ่งใช้ก๊าซชีวภาพ (Biogas) เป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อนำความร้อน" (http://www2.diw.go.th/safety/) และเอกสารประกอบการบรรยาย เรื่อง "กรณีศึกษาการระเบิดของก๊าซชีวภาพ (Biogas)" โดยนายศุภวัฒน์ ธาดาจารุมงคล วิศวกรเครื่องกลชำนาญการพิเศษ ได้มีการสอบสวน ตรวจพิสูจน์ และวิเคราะห์หาต้นเหตุของการเกิดอุบัติเหตุ มีการรวบรวมปัญหาการใช้งานก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจริงในประเทศไทย ซึ่งส่วนใหญ่เป็นปัญหาจากการใช้งานในรูปแบบของการใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเผาไหม้โดยตรงในหัวเผา ปัญหาต่างๆเกี่ยวกับการใช้งานก๊าซชีวภาพนี้ ส่วนหนึ่งเกี่ยวข้องกับคุณภาพของก๊าซชีวภาพ โดยเมื่อคุณภาพของก๊าซชีวภาพเปลี่ยนไป คุณสมบัติของเชื้อเพลิงและการเผาไหม้จะเปลี่ยนไปด้วยทำให้เกิดปัญหาในการใช้งานตามมา ในหัวข้อนี้จึงเป็นประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับผู้ใช้งานและผู้ที่เกี่ยวข้องกับการใช้และควบคุมก๊าซชีวภาพที่จะได้เรียนรู้ปัญหาที่อาจเคยพบเห็นมาแล้ว แต่ยังไม่ทราบสาเหตุมาก่อน เพื่อที่จะได้ทำความเข้าใจและหาทางแก้ไขหรือหาทางป้องกันได้ทันปัญหาและสาเหตุข้อบกพร่องของหัวเผาที่ใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงดังแสดงในตารางที่ 8.5

ตารางที่ 8.5 แสดงปัญหาและผลกระทบเกี่ยวกับการใช้งานก๊าซชีวภาพ

ปัญหา	สาเหตุ
1. ปัญหาหัวเผาไม่ทำงาน (ไม่มีการ Pre purge)	-ปริมาณก๊าซไม่เพียงพอ ความดันที่ท่อส่งก๊าซต่ำเกินไป - Valve Proving System ตรวจพบการรั่วไหลของ Double Solenoid Valve -ความดันไอน้ำสูงถึงค่าที่ตั้งไว้ Pressure switch ไม่ต่อวงจรการทำงานของหัวเผา หรือ -อุณหภูมิน้ำมันร้อนสูงถึงค่าที่ตั้งไว้ Temperature switch ไม่ต่อวงจรการทำงานของหัวเผา
2. ปัญหาหัวเผาทำงาน (มีการ Pre purge) แต่จุดเตาไม่ติด	-ค่าก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพต่ำเกินไป -ก๊าซชีวภาพมีความชื้นสูง หรือมีน้ำปนมาก -ส่วนผสมระหว่างก๊าซชีวภาพกับอากาศ ต่ำกว่า LEL หรือสูงกว่า UEL -รูจ่ายก๊าซที่หัวเผาสกปรก อุดตันไม่มีประกายไฟ หรือขาด Ignition Source -Flame Detector ตรวจพบการติดไฟ หรือแสงสว่างในห้องเผาไหม้

ตารางที่ 8.5 (ต่อ)

ปัญหา	สาเหตุ
3. จุดเตาติด แต่เดินได้ชั่วขณะแล้วดับ	-ปริมาณก๊าซลดลงมาก ความดันจาก Blower ที่ท่อส่งก๊าซลดลงมากจนต่ำเกินไป Blower ส่งก๊าซไม่ทัน -ค่าก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพต่ำเกินไปก๊าซชีวภาพติดไฟได้เมื่อ Pilot Burner ทำงาน แต่ไม่สามารถติดไฟต่อเนื่อง เมื่อเปลวไฟที่ Pilot Burner ดับลง -ปริมาณก๊าซมีเทนเปลี่ยนแปลงมากเกินไป ส่วนผสมระหว่างก๊าซชีวภาพกับอากาศต่ำกว่า LEL หรือสูงกว่า UEL -ก๊าซชีวภาพมีคุณภาพต่ำกล่าวคือ ก๊าซมีเทนต่ำมีความชื้นสูง ทำให้ความเร็วในการติดไฟลดลงจนติดไฟไม่ทันเมื่อเดินเครื่องที่High Fire
4. ปัญหาจุดเตาติดแต่เปลวไฟกระพือ	-ก๊าซชีวภาพมีน้ำปนมาก น้ำที่ถูกเปลวไฟจะระเบิดเป็นไอน้ำ ทำให้เกิดช่องโหว่ของส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ
5. ปัญหาเปลวไฟดับขณะเดินเครื่องที่ High Fire	-ค่ามีเทนในก๊าซชีวภาพต่ำเกินไป ก๊าซชีวภาพติดไฟได้เมื่อ Pilot Burner ทำงานแต่ไม่สามารถติดไฟต่อเนื่อง เมื่อเปลวไฟที่ Pilot Burner ดับลง -ปริมาณก๊าซมีเทนเปลี่ยนแปลงมากเกินไปส่วนผสมระหว่างก๊าซชีวภาพกับอากาศ ต่ำกว่า LEL หรือสูงกว่า UEL -ก๊าซชีวภาพมีคุณภาพต่ำ ก๊าซมีเทนต่ำ ความชื้นสูง ทำให้ความเร็วในการติดไฟลดลงจนติดไฟไม่ทันเมื่อเดินเครื่องที่ High Fire
6. ปัญหาจุดเตาไม่ติด และเกิดการระเบิดในห้องเผาไหม้ ขณะจุดเตา	- Valve proving system ไม่ทำงานจากการชำรุดอุดตัน และยอมให้หัวเผาทำงานลัดขั้นตอนความปลอดภัย โดยเฉพาะเมื่อมีก๊าซรั่วผ่าน Double solenoid valve

ที่มา; ศุภวัฒน์ ธาดาจารุมงคล กรณีศึกษา สาเหตุและการป้องกันการระเบิดของห้องเผาไหม้ ซึ่งใช้ก๊าซชีวภาพ (Biogas) เป็นเชื้อเพลิง สำหรับหม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อนำความร้อน กรมโรงงานอุตสาหกรรม 2551

นอกจากนี้ยังพบว่า คุณภาพก๊าซที่เกี่ยวกับความเข้มข้นของก๊าซมีเทน ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ความชื้นและสิ่งสกปรกที่เจือปนมากับก๊าซนั้น ได้ก่อให้เกิดปัญหากับอุปกรณ์ในระบบท่อก๊าซ และการใช้งานดังนี้

ตารางที่ 8.6 แสดงปัญหาและผลกระทบที่เกิดขึ้นกับการใช้ก๊าซชีวภาพ

ปัญหา	ผลกระทบ
ความเข้มข้นของ CH_4 จะมีการเปลี่ยนแปลง โดยผกผันกับ CO_2	– ทำให้การปรับแต่ง และควบคุมการเผาไหม้แบบอัตโนมัติขาดความเสถียร ส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศมีความแปรปรวนสูง และบางครั้งทำให้เกิดส่วนผสมที่บาง หรือหนาเกินกว่าจะติดไฟได้ ทำให้เปลวไฟดับและอาจเกิด Back fire หรือ Furnace explosion ในขณะใช้งาน – ในขณะที่ Biogas มี CH_4 ต่ำ และ CO_2 สูง ยังต้องใช้อากาศส่วนเกินสูง เพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานความร้อนทางปล่องสูงมาก โดยความร้อนจะติดพาไปกับ CO_2 และอากาศส่วนเกิน ทำให้ประสิทธิภาพด้านพลังงานความร้อนต่ำ สิ้นเปลืองเชื้อเพลิงมาก
น้ำและสิ่งสกปรก ที่ติดมากับก๊าซชีวภาพ	น้ำที่ติดมากับก๊าซชีวภาพเป็นน้ำที่มีสิ่งเจือปนละลาย หรือผสมอยู่ในน้ำจำนวนมาก ทั้งสารอินทรีย์ที่ยังย่อยสลายไม่หมด และแร่ธาตุต่างๆ ทำให้เกิดเมือกตะกอน ซึ่งมีผลต่อการชำรุดอุดตันของอุปกรณ์ความปลอดภัยที่เกี่ยวข้อง เช่น – การอุดตันของ Valve proving system และทำงานแบบลัดวงจรทำให้ระบบความปลอดภัยของ Burner ล้มเหลว – การอุดตันของวาล์วระบายน้ำอัตโนมัติ (Mechanical trap) ซึ่งติดตั้งอยู่ในระบบท่อส่งก๊าซ ทำให้มีน้ำขังอยู่ในระบบท่อส่งก๊าซ กีดขวางการไหลของก๊าซ และมีน้ำเข้าสู่ Burner ทำให้เปลวไฟกระพือหรือดับ และเกิดก๊าซตกค้างในห้องเผาไหม้เป็นเหตุให้เกิด Back fire หรือ Furnace explosion

จะเห็นว่า คุณภาพของก๊าซชีวภาพเป็นสาเหตุทำให้เกิดปัญหากับอุปกรณ์ใช้งาน ดังนั้นการควบคุมคุณภาพของก๊าซชีวภาพในเบื้องต้น ซึ่งเกี่ยวข้องกับการดูแล และควบคุมระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่ดี การทำความสะอาดก๊าซขั้นต้นก็จะช่วยให้ปัญหาการใช้งานลดน้อยลง และมีความปลอดภัยมากขึ้น

มาตรการป้องกันที่ผู้ประกอบการโรงงาน ผู้ดูแลระบบผลิตและใช้งานก๊าซชีวภาพ ควรดำเนินการมีดังนี้

- ควรติดตั้งอุปกรณ์ขจัด H_2S และความชื้น ออกจาก Biogas ก่อนป้อนเข้าสู่อุปกรณ์ควบคุมก๊าซ และหัวเผา และภายหลังการติดตั้งอุปกรณ์ขจัด H_2S และความชื้น ต้องควบคุมให้มีการใช้งาน การตรวจสอบและบำรุงรักษาอุปกรณ์ดังกล่าวให้มีประสิทธิภาพในการใช้งานตลอดเวลา
- ดูแลและควบคุมระบบผลิตก๊าซชีวภาพให้มีประสิทธิภาพที่ดี ก๊าซชีวภาพที่ได้ควรมีคุณภาพที่ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก อยู่ในช่วงการใช้งานปกติของอุปกรณ์ใช้ประโยชน์
- ควรจัดให้มีการตรวจสอบคุณภาพ Biogas ที่นำมาใช้งาน ให้มีคุณภาพเป็นไปตามข้อกำหนดของอุปกรณ์ควบคุมก๊าซ หรือเป็นไปตามมาตรฐานสากล ตลอดเวลา
- ควรจัดให้มีการฝึกอบรมพนักงานให้มีความรู้เกี่ยวกับ Biogas การใช้และการป้องกันอันตรายในการใช้หัวเผา การใช้งาน และการตรวจสอบบำรุงรักษาหม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อนำความร้อน เพื่อให้ประหยัด ปลอดภัย และไร้มลภาวะ
- กรณีที่ก๊าซชีวภาพมีความเข้มข้นของก๊าซมีเทนลดลง และความเข้มข้นของ CO_2 สูงขึ้น หรือคุณภาพก๊าซต่ำกว่าช่วงการใช้งานของอุปกรณ์ที่กำหนดเอาไว้ การใช้ประโยชน์ควรใช้เชื้อเพลิงร่วมกันระหว่างน้ำมันเตากับ Biogas ตลอดเวลา เพื่อป้องกันหัวเผาดับและเกิดการระเบิดในห้องเผาไหม้ เมื่อ CH_4 ต่ำ และ CO_2 สูง
- ควรติดตั้งฝานิรภัย (Access Door) บริเวณห้องเผาไหม้ของหม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อนำความร้อน เพื่อระบายก๊าซความดันสูงออกจากห้องเผาไหม้ เมื่อมีการระเบิดของเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้

8.7 กรณีศึกษาการระเบิดจากการใช้งานของก๊าซชีวภาพ

กรณีศึกษาการระเบิดจากการใช้งานก๊าซชีวภาพนี้ เป็นข้อมูลที่ได้รวบรวมจากการเกิดอุบัติเหตุของโรงงานที่ใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงกับหัวเผาในหม้อน้ำมันร้อน โดยนายศุภวัฒน์ ธาดาจารุมงคล สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย กรมโรงงานอุตสาหกรรม กรณีศึกษานี้ได้วิเคราะห์หาสาเหตุที่เกี่ยวข้องเอาไว้เพื่ออย่างน่าสนใจ เหมาะแก่การนำมาเป็นตัวอย่างเพื่อการศึกษา และเพื่อหาทางป้องกันการเกิดอุบัติเหตุจากการใช้งานในโรงงานเป็นอย่างยิ่ง ซึ่งผู้ศึกษาจะได้เรียนรู้เหตุ และผลที่เกิดขึ้นของการระเบิดรวมทั้งจะได้เรียนรู้วิธีการป้องกันที่จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อให้เกิดความปลอดภัยภายในโรงงานของตนเองต่อไปได้

8.7.1 กรณีศึกษาการระเบิดของก๊าซชีวภาพที่ 1

การระเบิดของก๊าซชีวภาพในห้องสูบส่งก๊าซ ณ โรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง โรงงานที่ 1

รูปที่ 8.28 แสดงบ่อผลิตก๊าซแบบผ้าใบคลุม ขนาด 80 x 220 เมตร (2 บ่อ)

- **ปัญหาที่พบ**
  1) ขอบผ้าใบยึดโยงด้วยเชือกไนล่อน ซีลด้วยน้ำ มีรอยฉีกขาด และมีก๊าซรั่วไหลโดยทั่วไป
  2) มีวัชพืชที่อาจติดไฟได้ง่ายขึ้นชิดขอบบ่อ
  3) มีการระบายก๊าซส่วนเกินทิ้ง โดยวิธีเปิดชายผ้าใบข้างบ่อ ยาวประมาณ 1.0 เมตร

รูปที่ 8.29 แสดงสภาพปัญหาที่พบของบ่อผลิตก๊าซชีวภาพ และปัญหาการควบคุมความดันก๊าซในบ่อ

- **เหตุการณ์ก่อนการระเบิดของก๊าซชีวภาพในห้องสูบส่งก๊าซ**

1) ฝ่ายผลิต พบว่า ลมร้อนที่ใช้สำหรับอบแป้งมีอุณหภูมิต่ำมาก จนอบแป้งไม่แห้ง

2) หัวหน้าและช่างจากฝ่ายผลิต 3 คน ตรวจพบว่า น้ำมันร้อนจากหม้อน้ำมันร้อนมีอุณหภูมิต่ำเกินไป โดย Burner ที่ใช้ก๊าซชีวภาพ (Biogas) เป็นเชื้อเพลิงได้ดับลง เนื่องจากแรงดันก๊าซชีวภาพไม่เพียงพอ

3) ช่างทั้ง 3 คน ได้เดินมาตรวจสอบที่ห้องสูบส่งก๊าซ (Gas station) ซึ่งผนังห้องเป็นคอนกรีตทึบทุกด้าน มีช่องระบายอากาศด้านบนติดหลังคา

4) มีการรั่วไหลของ Biogas ที่ท่อส่งก๊าซอย่างรุนแรงในห้องสูบส่งก๊าซ ขณะที่ช่างทั้ง 3 คน เข้าไปในห้อง ก๊าซที่รั่วไหลได้เกิดการจุดระเบิดขึ้น เปลวไฟได้ลวกช่างทั้ง 3 คน บาดเจ็บสาหัส และต่อมาเสียชีวิต 2 ราย ทรัพย์สินเสียหายประมาณ 100,000 บาท

5) จุดที่ก๊าซชีวภาพรั่วไหล เกิดขึ้นที่ข้อต่อรับการขยายตัว (Expansion joint) ซึ่งติดตั้งอยู่ที่ท่อทางออกของ Blower สูบส่งก๊าซ

รูปที่ 8.30 แสดงห้องสูบส่งก๊าซภายหลังเกิดเหตุการณ์ระเบิดของก๊าซชีวภาพ

- **สภาพข้อต่อรับการขยายตัวที่แตกรั่ว**

1) ข้อต่อรับการขยายตัว (Expansion joint) เป็นแบบทำด้วยโลหะ เส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว ติดตั้งที่ท่อทางออก ระหว่าง Blower กับถังดักความชื้น ตัว Blower และมอเตอร์ติดตั้งบนแท่นยึดแข็งโดยไม่มีระบบป้องกันการสั่นสะเทือน

รูปที่ 8.31 แสดงสภาพข้อต่อรับการขยายตัวที่แตกรั่ว

2) ข้อต่อรับการขยายตัวมีการแตกรั่วในส่วนที่เป็นลอน จุดที่แตกเป็นโลหะหนาประมาณ 1 มิลลิเมตร รอยแตกยาวครึ่งหนึ่งของเส้นรอบวง

3) ผิวโลหะด้านในของข้อต่อรับการขยายตัว มีการกร่อนพรุนมาก

รูปที่ 8.32 แสดงสภาพข้อต่อรับการขยายตัวที่แตกรั่ว

- **สาเหตุที่ทำให้ข้อต่อรับการขยายตัวแตกรั่ว**

  จากการวิเคราะห์ สาเหตุการแตกรั่ว อาจเกิดได้จาก

  1) **การเลือกใช้และติดตั้งข้อต่อรับการขยายตัวที่ไม่เหมาะกับงาน**

     เนื่องจากตำแหน่งที่ติดตั้งไม่มีการขยายหรือหดตัวของท่อส่งก๊าซ แต่มีการสั่นสะเทือนจาก Blower ซึ่งติดตั้งบนแท่นยึดแข็ง โดยไม่มีระบบป้องกันการสั่นสะเทือน

  2) **ข้อต่อรับการขยายตัวเสียหายจากการล้าตัว**

     ข้อต่อมีการสบัดตัวในจังหวะหยุดและจังหวะสตาร์ทของ Blower ทำให้เกิดแรงดัดตัวซ้ำๆ

  3) **มีการผุกร่อนและการกัดกร่อนจาก O_2, H_2CO_3, H_2SO_4**

     ภายในข้อต่อรับการขยายตัว ซึ่งเกิดจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์(CO_2)และไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S)ใน Biogas รวมตัวกับน้ำหรือความชื้น

- **แหล่งจุดระเบิด (Ignition Source)**

  1) อุปกรณ์ไฟฟ้าทั้งหมดเป็นแบบไม่ป้องกันการระเบิด เช่น มอเตอร์ ปลั๊ก สวิตช์ หลอดไฟ และอุปกรณ์ไฟฟ้าควบคุม

  2) สวิตช์มอเตอร์ของ Blower บนแผงสวิตช์ อยู่ห่างจากจุดที่แก๊สรั่วประมาณ 1.20 เมตร

รูปที่ 8.33 แสดงแหล่งจุดระเบิดภายในห้องสูบส่งก๊าซ

- **เงื่อนไขที่ทำให้ก๊าซเกิดการจุดระเบิด**

1) ห้องมีสภาพอับอากาศ ผนังห้องเป็นคอนกรีตทึบทุกด้าน และมีหลังคาโค้งครอบปิดอาคาร การระบายอากาศในห้องสูบส่งก๊าซไม่เพียงพอ ก๊าซที่รั่วจึงสะสมในห้อง
2) ความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพผสมกับอากาศในห้อง อยู่ระหว่าง LEL กับ UEL
3) มีแหล่งจุดระเบิด(Ignition source) ภายในห้องสูบส่งก๊าซ อุปกรณ์ไฟฟ้าทุกชนิด เช่นหลอดไฟแสงสว่าง สวิตช์ ปลั๊ก มอเตอร์ อุปกรณ์ไฟฟ้าควบคุม เป็นชนิดไม่ป้องกันหรือไม่ทนต่อการระเบิด
4) มีการจุดระเบิด โดยประกายไฟจากอุปกรณ์ไฟฟ้าซึ่งอาจเกิดจากพนักงานเปิดไฟแสงสว่างในห้อง Gas Station หรืออาจปิด–เปิดสวิตช์มอเตอร์ของ Blower บนแผงสวิตช์ซึ่งอยู่ห่างจากจุดที่ก๊าซรั่วประมาณ 1.20 เมตร เมื่อได้กลิ่น หรือพบเห็นการรั่วของก๊าซชีวภาพ

- **ข้อแนะนำในการปรับปรุงแก้ไข**

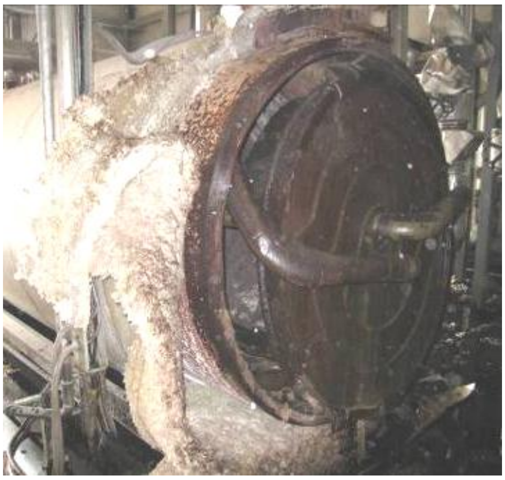
1) ควรติดตั้งข้อต่ออ่อน (Flexible joint) ที่ท่อทางเข้าและออกของปั๊มก๊าซชีวภาพ แทนการใช้ข้อต่อรับการขยายตัว (Expansion joint)
2) ควรติดตั้งวัสดุกันการสั่นสะเทือนที่ฐานแท่นรองรับปั๊มก๊าซชีวภาพ

3) ควรติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับก๊าซรั่ว (Gas detector) พร้อมสัญญาณเตือนการรั่วไหลของก๊าซชีวภาพ
4) อุปกรณ์ไฟฟ้าทุกชนิดที่ใช้ในห้องควบคุมต้องเป็นชนิดทนการระเบิด
5) ควรมี Water seal tank เป็นชุดควบคุมความดันก๊าซชีวภาพเกินกำหนดจากบ่อก๊าซพร้อมต่อท่อออกไปเผาทิ้งที่ปล่อง (Flare system)
6) ติดตั้งเครื่องควบคุมความดันก๊าซชีวภาพที่นำไปใช้งาน
7) ตู้ควบคุมไฟฟ้าต้องติดตั้งห่างจากปั๊มก๊าซชีวภาพไม่น้อยกว่า 5 เมตร
8) ห้องควบคุมและสูบส่งก๊าซควรมีการระบายอากาศอย่างเพียงพอ

8.7.2 กรณีศึกษาการระเบิดของก๊าซชีวภาพที่ 2

การระเบิดของก๊าซชีวภาพในห้องเผาไหม้หม้อน้ำมันร้อน ณ โรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง โรงงานที่ 2

- **สภาพหม้อน้ำมันร้อน ภายหลังการระเบิดของก๊าซชีวภาพในห้องเผาไหม้**
  1) สภาพด้านหน้าและด้านหลัง หม้อน้ำมันร้อนที่เกิดการระเบิดของห้องเผาไหม้ ฝาหน้าโก่งงอ มอเตอร์และลูกถ้วยของหัวเผาหลุดร่วง ฝาหลังเปิดเผยอ ท่อน้ำมันร้อนแตกรั่ว
  2) มีผู้ได้รับบาดเจ็บเล็กน้อย 2 คน ทรัพย์สินเสียหายประมาณ 3 ล้านบาท



รูปที่ 8.34 แสดงสภาพหม้อน้ำมันร้อน ภายหลังการระเบิดของก๊าซชีวภาพในห้องเผาไหม้

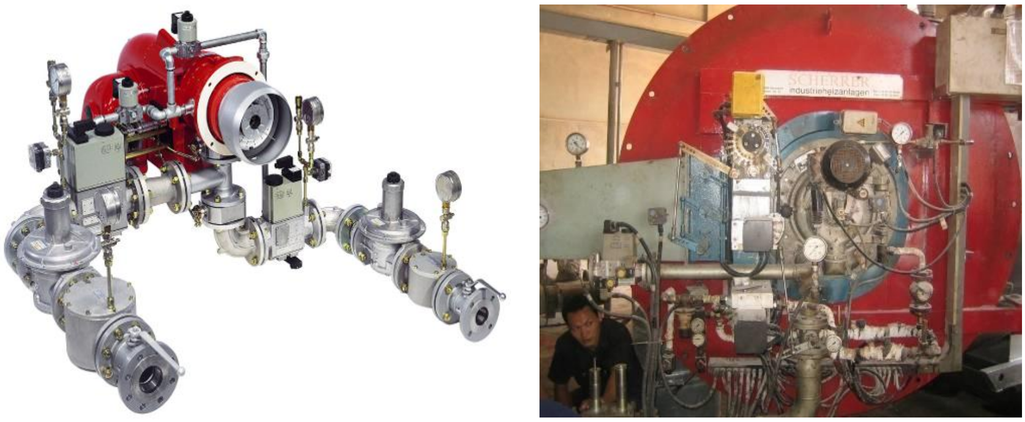
- **ลำดับเหตุการณ์ก่อนการระเบิดของก๊าซชีวภาพในห้องเผาไหม้หม้อน้ำมันร้อน**

1) มีการดับเตาหม้อน้ำมันร้อนประมาณ12.00 น. และเริ่มพยายามจุดเตาหม้อน้ำมันร้อนที่ใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิง เวลาประมาณ13.30 น. แต่จุดเตาไม่ได้ เนื่องจาก Burner ไม่ทำงาน
2) ช่างผู้ควบคุมหม้อน้ำมันร้อนและช่างไฟฟ้าได้ตรวจสอบ และพยายามซ่อมแซมระบบวาล์วจ่ายก๊าซและอุปกรณ์ควบคุมการทำงานของหัวเผา เพื่อให้จุดเตาได้
3) เวลาประมาณ14.00 น. ในขณะเปิดสวิตช์หัวเผาเพื่อจุดเตา หัวเผามีการทำงาน โดยพัดลมมีการ Pre purge ตามลำดับ เมื่อพัดลมหรี่ลมลงจนถึงขั้นตอนที่หัวเทียนจุดประกายไฟในห้องเผาไหม้ ปรากฏว่า ทันทีที่หัวเทียนจุดประกายไฟก็เกิดการระเบิดของห้องเผาไหม้ขึ้น (Furnace explosion)
4) แรงระเบิดทำให้ฝาหน้าของหม้อน้ำมันร้อนและคอยล์น้ำมันฝาหลังชำรุด หัวเผาหลุดร่วง ขดท่อน้ำมันที่ฝาหลังยืดตัวและแตกรั่ว และมีน้ำมันถ่ายเทความร้อนรั่วไหล

- **การสอบสวนและการวิเคราะห์สาเหตุการระเบิดของก๊าซชีวภาพ**

การสอบสวนและการวิเคราะห์สาเหตุการระเบิดของก๊าซชีวภาพในห้องเผาไหม้ พิจารณาจาก

1) องค์ประกอบที่ทำให้เกิดการระเบิดของก๊าซชีวภาพในห้องเผาไหม้
   - ต้องมีปริมาณความเข้มข้นของเชื้อเพลิงผสมกับอากาศอยู่ระหว่าง Lower Explosive Limit (LEL) กับ Upper Explosive Limit (UEL)
   - ต้องมี Ignition Source เช่น การจุดประกายไฟจาก Electrode หรือจากเปลวไฟของ Pilot Burner
   - ห้องเผาไหม้อยู่ในสภาพเป็นห้องอับอากาศ (Confine space)
2) ลักษณะของหัวเผา เชื้อเพลิงที่เกี่ยวข้องและการควบคุมการเผาไหม้
   - หัวเผาเป็นแบบ Rotary cup ผลิตจากประเทศเยอรมัน และเป็น Combination burner
   - จุดเตาโดยใช้ Electrode จุด LPG ให้ไฟติดเป็น Pilot burner ก่อน เนื่องจากน้ำมันเตา และ Biogas จะติดไฟยากในบางสภาวะ เมื่อ LPG ติดไฟแล้ว จึงป้อนน้ำมันเตาหรือ Biogas เข้าสู่เปลวไฟ
   - การควบคุมการเผาไหม้เชื้อเพลิง เป็นระบบเร่งหรี่เชื้อเพลิงและอากาศ ตามภาระการใช้งาน (Modulating control)



รูปที่ 8.35 แสดงอุปกรณ์ควบคุมก๊าซก่อนเข้าหัวเผา

3) ลำดับการทำงานของหัวเผาตามมาตรฐานความปลอดภัย

- เมื่อสวิทช์ต่อวงจร ระบบนิรภัย Valve Proving Systems (VPS) จะตรวจสอบว่า Double Solenoid Valve (DSV) มีการรั่วของ Biogas ผ่านเข้าสู่ห้องเผาไหม้หรือไม่ ถ้า VPS ไม่พบการรั่วไหลของก๊าซที่ DSV หัวเผาจะเริ่มทำงานตามลำดับ
- Flame Detector จะตรวจสอบความมืดทันที ถ้าห้องเผาไหม้มืดจะเปิดพัดลมเป่าอากาศผ่านห้องเผาไหม้ (Pre purge) ประมาณ1-1.5 นาที เพื่อขจัดก๊าซเชื้อเพลิงออกจากห้องเผาไหม้ ถ้าพบความสว่าง จะตัดระบบการทำงานทันที
- เมื่อการ Pre purge ครบตามเวลาที่กำหนด กระบังลมจะค่อยๆ หรี่ลง เพื่อลดปริมาณลมที่ป้อนเข้าห้องเผาไหม้ให้ต่ำสุด
- หัวเทียนจะเริ่มจุดประกายไฟ Solenoid Valve ของ LPG จะเปิด LPG เข้า Pilot burner เพื่อจุดนำให้เกิดเปลวไฟ
- Flame detector จะตรวจสอบการติดไฟของ LPG ที่ Pilot burner ถ้าภายใน 3-5 วินาทีไม่ติดไฟ จะแสดงด้วยสัญญาณเตือนภัยพร้อมตัดระบบการทำงานของหัวเผาทั้งหมด
- เมื่อ Pilot burner ติดไฟและเปลวไฟเป็นปกติ Double solenoid valve จะเปิด Biogas เข้าสู่ห้องเผาไหม้
- Flame Detector จะตรวจสอบการติดไฟของ Biogas ถ้าไม่ติดไฟภายใน 3 -5 วินาที หัวเผาจะหยุดระบบการทำงานทั้งหมด แต่ถ้าติดไฟ หัวเผาจะทำงานต่อเนื่องไป

4) ลำดับการทำงานของหัวเผา ในขณะเกิดการระเบิดของห้องเผาไหม้

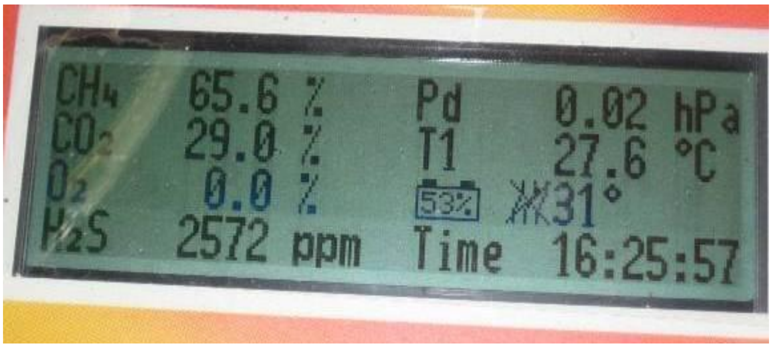
- ก่อนวันที่จะมีการระเบิดของห้องเผาไหม้ หัวเผามีปัญหาไม่ทำงาน โดยระบบนิรภัย VPS ได้ส่งสัญญาณเตือนภัยแสดงการรั่วของก๊าซชีวภาพผ่าน DSV หลังจากการซ่อมโดยช่างของโรงงาน หัวเผาสามารถกลับมาทำงานได้
- มีการติดเตาหม้อต้มน้ำมัน และใช้งานต่อเนื่องถึงเที่ยงของวันที่เกิดอุบัติเหตุและมีการดับเตาระหว่างเที่ยงถึงประมาณบ่ายโมงครึ่ง
- หลังบ่ายโมงครึ่ง ผู้ควบคุมหม้อต้มน้ำมันได้เริ่มจุดเตาใหม่ แต่ปรากฏว่าจุดเตาไม่ติด และพนักงานได้พยายามจุดเตาอยู่หลายครั้ง
- เวลาประมาณบ่าย 2 โมง ในขณะที่กำลังจุดเตา โดยพัดลมมีการไล่อากาศ (Pre Purge) ครบตามกำหนดเวลา ขณะนั้นมีพนักงานที่เกี่ยวข้องยืนอยู่บริเวณหน้าหัวเผา พบว่า หัวเทียนมีการจุดประกายไฟ แต่ในห้องเผาไหม้ไม่มีเปลวไฟ และ ในขณะนั้นก็ได้เกิดการระเบิดของห้องเผาไหม้ขึ้น

5) หลักฐานการระเบิดของก๊าซชีวภาพในห้องเผาไหม้

- Biogas มีความดันจาก Blower ประมาณ 270-350 mbar ปริมาณการผลิต ประมาณ 500-600 m^3/hr เมื่อผ่าน Regulator valve ก่อนเข้าหัวเผา ปรับลดความดันเหลือประมาณ 150-230 mbar ขนาดท่อส่งก๊าซ และ Double solenoid valveØ100 และ 50 mm. เชื้อเพลิงนี้มีโอกาสรั่วไหลสูง เนื่องจากอยู่ในรูปของก๊าซที่มีความดันและปริมาณสูงจึงอาจสะสมในห้องเผาไหม้ได้และมีโอกาสระเบิดได้ทั้งก่อนและหลังการ Pre purge
- การใช้เชื้อเพลิงสำหรับหม้อน้ำมันร้อนเครื่องนี้ ปกติสามารถเลือกใช้เชื้อเพลิงร่วมระหว่างน้ำมันเตา กับ Biogas พร้อมกัน หรือเลือกใช้เชื้อเพลิงใดเชื้อเพลิงหนึ่งเพียงอย่างเดียว แต่ในวันที่เกิดอุบัติเหตุ โรงงานเลือกใช้เฉพาะ Biogas เพียงอย่างเดียว โดยตรวจพิสูจน์ได้จาก Burner control ที่ติดตั้งอยู่ใน Control panel ซึ่ง Sequence ของชุด Biogas ได้หยุดอยู่ที่ตำแหน่ง Pilot burner กำลังจุด LPG

6) องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ : ผลการตรวจวิเคราะห์ด้วย Gas Analyzer

- ก๊าซมีเทน (CH_4) ระหว่าง 55-66 % เป็นเชื้อเพลิงที่ให้ความร้อน
- ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) 27-45 % เป็นก๊าซเฉื่อย
- ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) 2200-3300 ppm. (ประมาณ 0.3 %) เป็นก๊าซพิษ
- ก๊าซไนโตรเจน (N_2เป็นก๊าซเฉื่อย) ก๊าซออกซิเจน (O_2) และความชื้นหรือไอน้ำอิ่มตัวรวมอยู่ด้วย



รูปที่ 8.36 แสดงผลการวิเคราะห์ก๊าซชีวภาพด้วย Gas Analyzer

7) คุณสมบัติของก๊าซชีวภาพ (Biogas)

- Auto ignition temperature : 595°C
- Flammability limits in air (STP conditions) : 5.0-15.0 vol.%
- ช่วงการลุกไหม้ ; จะไม่ลุกไหม้หรือเปลวไฟดับเมื่อ
  CH_4ในบรรยากาศ < 5 % (Lower Explosive Limit),
  CH_4ในบรรยากาศ>15 % (Upper Explosive Limit)
- Specific Hazards ;Exposure to fire may cause containers to rupture/explode.
- Max. ignition velocity , Biogas (60% CH_4, 38% CO_2, 2% Other); 0.25 m/s
- General Behavior : Risk of corrosion by gas contained impurities (CO, CO_2, H_2S) in presence of moisture.

8) ข้อมูลเปรียบเทียบคุณสมบัติของ Biogas , Natural Gas , Town Gas (LPG)

Characteristics of different fuel gases

Parameter	Unit	Natural Gas	Town Gas	Biogas (60% CH_4, 38% CO2, 2% Other)
Calorific value (lower)	MJ/m³	36.14	16.1	21.48
Density	kg/m³	0.82	0.51	1.21
Wobbe index (lower)	MJ/m³	39.9	22.5	19.5
Max. ignition velocity	m/s	0.39	0.70	0.25
Theor. air requirement	m³air/ m³gas	9.53	3.83	5.71
Max. CO_2-conc. in stack gas	vol%	11.9	13.1	17.8
Dew point	°C	59	60	60-160

9) คุณภาพของก๊าซชีวภาพ มาตรฐานการใช้งานของยุโรป

Requirements to remove gaseous components depending on the biogas utilisation

Application	H_2S	CO_2	H_2O
Gas heater (boiler)	< 1000 ppm	no	no
Kitchen stove	yes	no	no
Stationary engine (CHP)	< 1'000 ppm	no	no condensation
Vehicle fuel	yes	recommended	yes
Natural gas grid	yes	yes	yes

10) อุปกรณ์ควบคุมก๊าซที่ใช้กับหัวเผา

- Double Solenoid Valve ขนาด DN 100 เป็นวาล์วไฟฟ้า สำหรับปิด-เปิดก๊าซชีวภาพเข้าสู่หัวเผาแบบอัตโนมัติ ผลิตตามมาตรฐานเยอรมัน-ยุโรป
- Valve Proving Systems เป็นระบบนิรภัยทำหน้าที่ตรวจสอบการรั่วของก๊าซผ่านวาล์ว
- ข้อกำหนดใช้งาน ใช้ได้กับก๊าซแห้งที่มีไฮโดรเจนซัลไฟด์ ไม่เกิน 0.1% (ไม่เกิน 1000 ppm.)โดยปริมาตร

รูปที่ 8.37 แสดง Double Solenoid Valve และ Valve Proving Systems

11) ระบบความปลอดภัยของหัวเผา

Valve Proving Systems ดังรูป 8.38 เป็นอุปกรณ์นิรภัยตามมาตรฐานเยอรมัน-ยุโรป ติดตั้งควบคู่กับ Double solenoid valve สำหรับตรวจสอบการรั่วของก๊าซชีวภาพผ่าน Double solenoid valve

- เมื่อหัวเผาเริ่มทำงาน ถ้ามีการรั่วของก๊าซผ่านวาล์ว จะแสดงด้วยสัญญาณเตือนภัย ไฟสีแดง พร้อมตัดระบบการทำงานของหัวเผาทั้งหมด
- Application for Biogas with Hydrogen Sulphide <0.1 vol. % dry

รูปที่ 8.38 แสดง Valve Proving Systems

12) สาเหตุที่ทำให้ Biogas รั่วผ่าน Double Solenoid Valve เข้าสู่ห้องเผาไหม้

- Biogas อาจรั่วผ่าน Double Solenoid Valve เข้าห้องเผาไหม้ได้ในกรณีต่อไปนี้
  - เมื่อหน้าวาล์วและบ่าวาล์วสกปรก
  - เมื่อหน้าวาล์วหรือบ่าวาล์วชำรุด
  - เมื่อสปริงกดวาล์วสึกกร่อน แตกหัก
  - เมื่อก้านวาล์วและรูสกปรก ทำให้ค้ำยัน หรือติดตายในตำแหน่งวาล์วเปิด
  - เมื่อผู้เกี่ยวข้อง มีการลัดวงจรไฟฟ้า ในตำแหน่งให้วาล์วเปิด
- สภาพของ Double Solenoid Valve

  จากการถอดชิ้นส่วนออกตรวจสอบ พบว่าสปริงวาล์วและบ่าวาล์วของ Double Solenoid Valve มีการกัดกร่อนจากกรด โดยมีลักษณะการกัดกร่อนเป็นรูพรุน (Pitting) ดังรูป 8.39

รูปที่ 8.39 แสดงสภาพการถูกกัดกร่อนของ Double Solenoid Valve

- ประวัติการชำรุด
  สปริงกดวาล์วมีการสึกกร่อน ผุกร่อนเป็นรูพรุน และเคยมีการแตกหักบ่อยครั้ง ซึ่งทำให้เกิดการรั่วไหลของก๊าซชีวภาพผ่าน Double Solenoid Valve เข้าสู่ห้องเผาไหม้จนติดเตาไม่ได้หลายครั้งสภาพของวาล์วเมื่อถอดชิ้นส่วนดังรูป 8.40

รูปที่ 8.40 แสดงสภาพของ Double Solenoid Valve ที่ถอดชิ้นส่วนออก และสปริงกดวาล์วที่ชำรุด

– ลักษณะของวาล์วและการทำงานปกติของ Double Solenoid Valve ดังรูปที่ 8.41

รูปที่ 8.41 แสดงลักษณะและการทำงานปกติของ Double Solenoid Valve

– สภาพก้านวาล์วและรูก้านวาล์วตัวล่างกับปัญหาการรั่วไหล
สภาพก้านวาล์วและรูก้านวาล์วตัวล่างสกปรกมาก มีเมือก ตะกอนสะสมอยู่ในรูก้านวาล์ว ทำให้ฝืดและขัดตัว ก้านวาล์วถูกตะกอนสกปรกค้ำยัน เป็นเหตุให้วาล์วเปิดค้างหรือปิดไม่สนิท ทำให้ Biogas รั่วไหลอย่างรุนแรง ดังรูป 8.42

รูปที่ 8.42 แสดงสภาพก้านวาล์วและรูก้านวาล์ว

– เมื่อ Biogas รั่วไหลผ่าน Double solenoid valve อย่างรุนแรงแต่เหตุใดValve proving systems จึงไม่ตัดระบบการทำงานของหัวเผา
จากการตรวจสอบพบว่า Valve proving systems มีการชำรุด รูส่งก๊าซเพื่ออัดทดสอบการรั่วของ Double solenoid valve มีการอุดตัน เมื่อทดสอบทำงาน ความดันจะถึง 20 mbar ทันที ระบบนิรภัยจึงล้มเหลว

- **สรุปสาเหตุการระเบิดของก๊าซชีวภาพในห้องเผาไหม้**

1) **มี Biogas ที่ความดันประมาณ 150-230 mbar (Capacity ประมาณ 500 m^3/h)รั่วไหลอย่างมาก ผ่าน Double solenoid valve ขนาด DN 100 mm. เข้าสู่ห้องเผาไหม้ตลอดเวลา จนมีความเข้มข้นของก๊าซมีเทนในอากาศอยู่ระหว่าง Lower Explosive Limit ; LEL กับ Upper Explosive Limit ; UEL คือ 5-15.0 vol.%**

   การรั่วของ Double solenoid valve เกิดจากก้านวาล์วและรูก้านวาล์วชุดล่างสกปรกมาก มีเมือก และตะกอนสะสมอยู่ในรูก้านวาล์ว จนทำให้ก้านวาล์วถูกตะกอนสกปรก ค้ำยัน วาล์วจึงเปิดค้าง และเป็นสาเหตุให้ Biogas รั่วไหลอย่างมากตลอดเวลา

2) **มีการชำรุดของระบบนิรภัย Valve Proving Systems (VPS) ซึ่งเป็นระบบนิรภัยสำหรับตรวจสอบการรั่วของ Double solenoid valve การชำรุด ของ VPS นี้ ทำให้มีการต่อวงจรให้หัวเผาทำงานได้ แม้จะมีการรั่วของ Biogas เข้าสู่ห้องเผาไหม้**

   การชำรุดของ VPS เกิดขึ้นจาก Solenoid valve ของ VPS ติดตาย ทำให้การปิด-เปิดของรูลิ้นด้านอัดเกิดการติดตายและอุดตัน ส่งผลให้เมื่อปั้มก๊าซใน VPS เริ่มทำงาน เพื่ออัดความดันทดสอบการรั่วของวาล์ว จะเกิดความดันย้อนกลับทันที ประมาณ 20 mbar ซึ่งทำให้ปั้มหยุดทำงานทันที เสมือนไม่มีการรั่วของก๊าซที่ Double solenoid valve ระบบนิรภัยนี้จึงล้มเหลว ซึ่งหลังจากนั้นภายในประมาณ 10 วินาทีจะปรากฏไฟสีเหลืองหรือแสดงผลผ่านการทดสอบ และต่อวงจรของหัวเผา ให้สามารถทำงานต่อเนื่องไป

3) **หัวเผามีการจุดประกายไฟ และมีการเปิด LPG เข้าสู่ Pilot burner จุดเป็นเปลวไฟ ซึ่งทั้งประกายไฟและเปลวไฟ เป็น Ignition source จึงทำให้เกิดการติดไฟและการระเบิดของ Biogas ซึ่งมีความเข้มข้นของก๊าซมีเทนในอากาศอยู่ระหว่าง LEL กับ UEL คือ 5-15.0 vol.% จากการรั่วไหลต่อเนื่อง และสะสมปริมาณมากในห้องเผาไหม้**

   Biogas มีความเร็วในการติดไฟ (Flame velocity or Ignition velocity) ประมาณ 25-30 cm./sec. และมีคุณสมบัติความเป็นอันตรายเฉพาะ Specific Hazards : Exposure to fire may cause containers to rupture/explode. จึงทำให้เกิดการระเบิดของห้องเผาไหม้ขึ้น

8.7.3 กรณีศึกษาการระเบิดของก๊าซชีวภาพที่ 3

การระเบิดของก๊าซชีวภาพในห้องเผาไหม้หม้อน้ำมันร้อน ณ โรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังโรงงานที่ 3

แรงระเบิดภายในห้องเผาไหม้ ทำให้ฝาหน้าของหม้อน้ำมันร้อนหลุดออก Burner และอุปกรณ์ต่อเนื่องแตกหักชำรุดเสียหายสภาพดังรูป 8.43

รูปที่ 8.43 แสดงภาพความเสียหายเนื่องจากแรงระเบิดภายในห้องเผาไหม้

รูปที่ 8.44 แสดงสภาพภายในท่อที่สกปรก และเต็มไปด้วยการกัดกร่อน

ท่อส่งก๊าซ และ Double solenoid valve สกปรกมาก ดังรูป 8.44 ทำให้วาล์วค้างและก๊าซรั่วไหลผ่านเข้าห้องเผาไหม้ตลอดเวลา และความสกปรกทำให้ Valve Proving System ดังรูป 8.45 เกิดการชำรุดอุดตัน ส่งผลให้ระบบนิรภัยของหัวเผาล้มเหลว หัวเผาทำงานแบบลัดวงจร

รูปที่ 8.45 แสดงภาพการชำรุดและอุดตันของวาล์ว Valve Proving Systems

8.7.4 กรณีศึกษาการระเบิดของก๊าซชีวภาพที่ 4

การระเบิดของก๊าซชีวภาพในห้องเผาไหม้หม้อน้ำมันร้อน ณ โรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง โรงงานที่ 4

การระเบิดของก๊าซชีวภาพในห้องเผาไหม้หม้อน้ำมันร้อนเกิดขึ้นในขณะที่ Burner กำลังทำงาน โดยเผาน้ำมันร่วมกับก๊าซชีวภาพในตำแหน่ง High fire แล้วเกิดการดับของเปลวไฟ ผู้ควบคุมหม้อน้ำมันร้อนได้กดสวิตช์ Burner reset ทันที หลังจากนั้นประมาณ 5 วินาที ห้องเผาไหม้ก็เกิดระเบิดขึ้น ทำให้ขดท่อน้ำมันที่ผนังหลังถูกแรงระเบิดเคลื่อนตัวถอยหลังประมาณ 30 cm. โดยไม่มีการแตกรั่วของท่อ ฝานิรภัยที่ผนังหลังมีการเปิดระบายความดันออกจากห้องเผาไหม้ดังรูป 8.46

รูปที่ 8.46 แสดงความเสียหายจากการระเบิดภายในห้องเผาไหม้

- **การสอบสวนเพื่อวิเคราะห์หาสาเหตุการระเบิดของห้องเผาไหม้**

1) **ข้อมูลจากผู้ควบคุมหม้อน้ำมันร้อน**

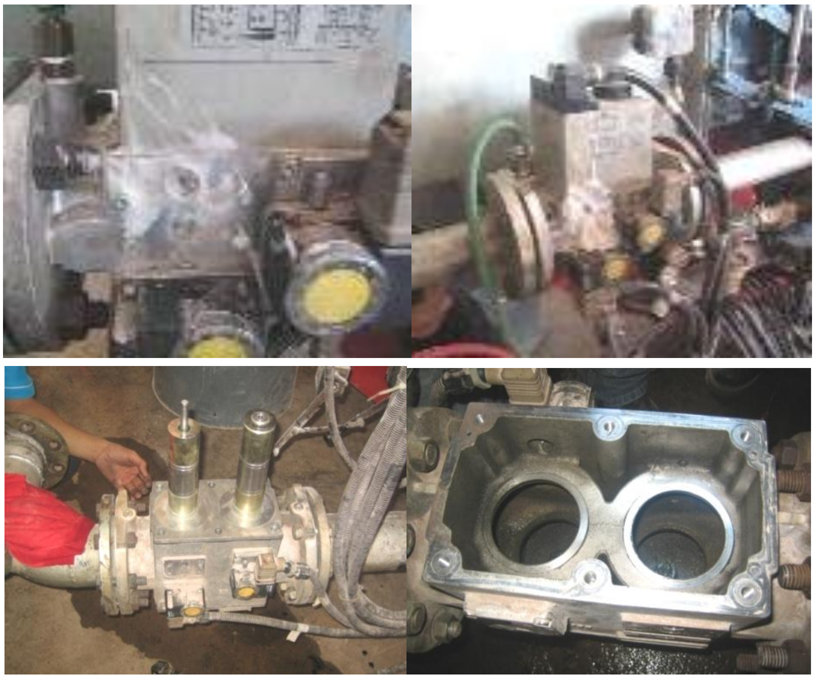
วันที่ 10 ธ.ค.2552 หม้อน้ำมันร้อนกำลังทำงานโดยเผาน้ำมันร่วมกับก๊าซชีวภาพในตำแหน่ง High fire

- เวลาประมาณ 20.00 น. สัญญาณกระดิ่งที่ตู้ควบคุมดัง พร้อมหลอดไฟแดงสว่างขึ้น แสดงถึงเปลวไฟในห้องเผาไหม้ดับ
- ทันทีที่ผู้ควบคุมเห็นสัญญาณแสดงเปลวไฟดับ ได้กดสวิตช์ Burner reset ใหม่ในทันที
- หลังจากกดสวิตช์ Burner reset ใหม่ ประมาณ 5-10 วินาที ก็ได้ยินเสียงระเบิดที่หม้อน้ำมันร้อน พร้อมมีควันไฟกระจายตัวออกด้านหลังของหม้อน้ำมันร้อน
- หลังจากเสียงระเบิด พบว่า ขดท่อน้ำมันที่ผนังหลังถูกแรงระเบิดเคลื่อนตัวถอยหลังประมาณ 30 cm. แต่ไม่มีการแตกรั่วของท่อน้ำมัน โดยฝานิรภัยที่ผนังหลังมีการเปิดระบายความดันออกจากห้องเผาไหม้
- ไม่พบความเสียหายของโครงสร้างหม้อน้ำมันร้อนในส่วนอื่นๆ และไม่มีผู้บาดเจ็บ

2) **ข้อมูลจากการตรวจสอบสถานที่เกิดเหตุ**

วันที่ 12 ธ.ค.2552 มีการตรวจสภาพทั่วไปของหม้อน้ำมันร้อน การตรวจทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ควบคุมก๊าซ และตรวจสภาพหัวเผา

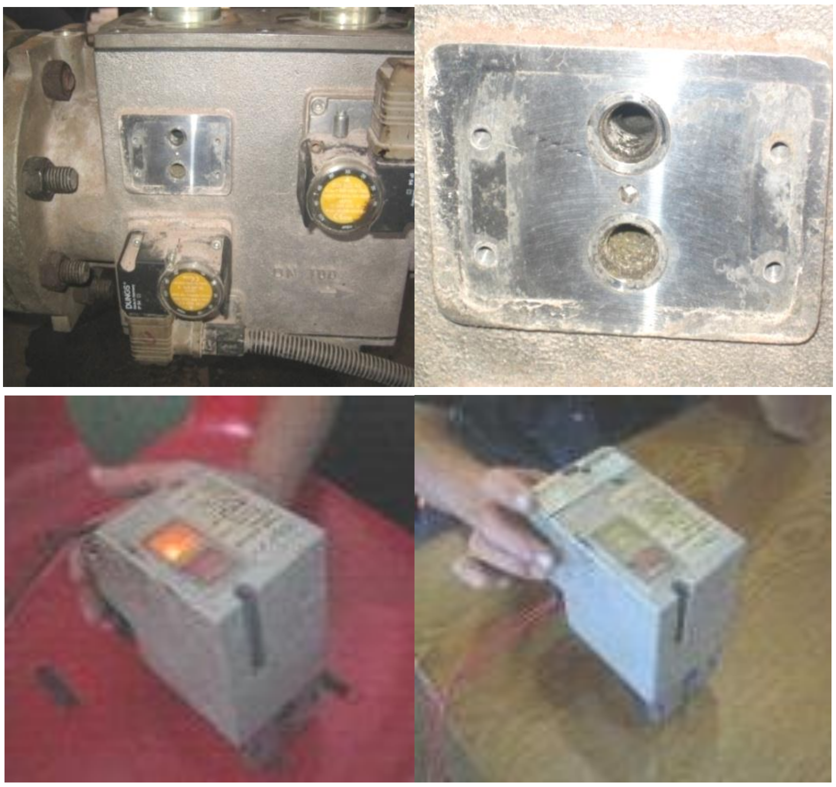
- วาล์วปิดเปิดก๊าซ Double solenoid valve ทั้งสองชุด มีการรั่วไหลเล็กน้อย
  จากการตรวจสภาพวาล์วปิดเปิดก๊าซ Double solenoid valve ทั้งสองชุดด้วยแรงดันลมและฟองสบู่พบว่า มีการรั่วไหลเล็กน้อย



รูปที่ 8.47 แสดงการตรวจสอบการรั่วไหลของ Double solenoid valveด้วยแรงดันลมและฟองสบู่ และแสดงภาพวาล์วที่ถอดชิ้นส่วน

- Valve Proving Systems (VPS) มีการอุดตันและลัดวงจรทั้งสองชุด

  การตรวจทดสอบการทำงานของ Valve Proving Systems (VPS) พบว่า มีการอุดตันและลัดวงจรทั้งสองชุด การอุดตันของ VPS ทำให้ Burner ทำงานลัดขั้นตอน ไม่เป็นไปตามมาตรฐานความปลอดภัยดังรูป 8.48



รูปที่ 8.48 แสดงการตรวจสอบ Valve Proving Systems (VPS) และไฟที่แสดงการทำงานว่าปกติบน VPS (ภาพซ้ายล่าง)เกิดจากการลัดวงจรอันเนื่องมาจากการอุดตัน

– ภายในท่อส่งก๊าซชีวภาพ มีคราบตะกรันและตะกอนสกปรกสะสมอยู่มากดังรูป 8.49 การตรวจสภาพภายในท่อส่งก๊าซชีวภาพ พบคราบตะกรันและตะกอนสกปรกสะสมอยู่มาก คราบตะกรันและตะกอนสกปรก เป็นสาเหตุที่ทำให้ Valve Proving Systems ชำรุดอุดตัน

รูปที่ 8.49 แสดงสภาพภายในท่อส่งก๊าซชีวภาพ

3) การวิเคราะห์หาสาเหตุที่ทำให้เปลวไฟดับ

– ปริมาณก๊าซชีวภาพไม่เพียงพอ ความดันก๊าซต่ำเกินไปจนหัวเผาตัดดับ

กรณีนี้เป็นระบบความปลอดภัยของหัวเผา เมื่อความดันก๊าซต่ำเกินไป หัวเผาจะตัดระบบการเผาไหม้ทั้งหมด และปิดวาล์วจ่ายก๊าซ ทำให้ไม่มีก๊าซป้อนเข้าห้องเผาไหม้ ซึ่งเป็นระบบป้องกันการระเบิดของห้องเผาไหม้

– การอุดตันของไส้กรองก๊าซชีวภาพ ทำให้ก๊าซชีวภาพไม่เพียงพอ ส่วนผสมก๊าซ-อากาศบางเกินไป

กรณีนี้จากการตรวจสอบสภาพไส้กรอง ปรากฏว่า ไส้กรองไม่มีการอุดตัน หัวเผาจึงไม่ดับจากสาเหตุนี้

– ค่ามีเทนในก๊าซชีวภาพแปรเปลี่ยนมาก จนส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศต่ำกว่า LEL หรือสูงกว่า UEL

กรณีนี้ จากการตรวจวิเคราะห์ด้วย Gas Analyzer ปรากฏว่า เครื่องวิเคราะห์ก๊าซอ่านค่าได้ไม่แน่นอน เนื่องจากมีน้ำปนในก๊าซมาก และรบกวนการทำงานเครื่องวิเคราะห์ก๊าซ

– ก๊าซชีวภาพมีน้ำปนมาก

เมื่อก๊าซที่มีน้ำปนเข้าสู่ห้องเผาไหม้ ความร้อนจากเปลวไฟจะทำให้น้ำเปลี่ยนสถานะเป็นไอน้ำและขยายตัวประมาณ 1600 เท่าแบบทันทีทันใด ทำให้บริเวณดังกล่าว ขาดเชื้อเพลิงและอากาศ เปลวไฟจึงมีการกระพือดับ

- ขาดการระบายน้ำออกจากท่อส่งก๊าซ หรือวาล์วระบายน้ำอัตโนมัติอุดตัน
- ไม่มีระบบกำจัดความชื้นออกจากก๊าซชีวภาพ

กรณีนี้ จากการตรวจสภาพท่อส่งก๊าซ พบคราบตะกรันและตะกอนสะสมมาก และพบว่าที่ถังดักน้ำ (Knockout Drum) มีน้ำสะสมมาก เนื่องจากเกิดการอุดตันของวาล์วระบายน้ำอัตโนมัติ (Auto Drain Valve)

4) สรุปสาเหตุที่ทำให้เกิดการระเบิดของก๊าซชีวภาพในห้องเผาไหม้

การระเบิดในห้องเผาไหม้เกิดขึ้นในขณะเดินเครื่องที่ High fire แล้วเปลวไฟดับ สาเหตุการเกิดอุบัติเหตุ สามารถวิเคราะห์ได้ตามลำดับดังนี้

– เปลวไฟมีการกระพือดับ สาเหตุเกิดจากก๊าซชีวภาพมีน้ำปนมาก

<u>ข้อวิเคราะห์</u> เมื่อก๊าซที่มีน้ำปนเข้าสู่ห้องเผาไหม้ ความร้อนจากเปลวไฟจะทำให้น้ำเปลี่ยนสถานะเป็นไอน้ำ และขยายตัวประมาณ 1600 เท่า ทันทีทันใด ทำให้เกิดบริเวณที่ขาดเชื้อเพลิงและอากาศ เปลวไฟจึงดับ สาเหตุพื้นฐานเกิดจาก

- ไม่มีระบบกำจัดความชื้นออกจากก๊าซชีวภาพ
- ขาดการระบายน้ำออกจากท่อส่งก๊าซชีวภาพ เนื่องจากวาล์วระบายน้ำอัตโนมัติอุดตันจากเมือกและตะกอน
- การกำจัด H_2S ขาดประสิทธิภาพ น้ำมีออกซิเจนปน จึงเกิดตะกอนและเมือก

— **มีก๊าซชีวภาพไหลผ่าน DSV เข้าสู่ห้องเผาไหม้ในขณะเตาดับ และสะสมในห้องเผาไหม้**

ข้อวิเคราะห์ ในขณะเตาดับ Flame detector ต้องใช้เวลาตรวจสอบการดับของเปลวไฟ ก่อนจะสั่งตัดระบบเชื้อเพลิง จึงยังมีก๊าซป้อนเข้าห้องเผาไหม้ปริมาณมาก เนื่องจากวาล์วก๊าซเปิดในตำแหน่งเร่งสุด

— **มีความร้อนสูงสะสมอยู่ที่ปูนทนไฟภายในห้องเผาไหม้ เป็น Ignition source**

ข้อวิเคราะห์ ภายในห้องเผาไหม้ ปูนที่คอเตาและฝาหลังจะสะสมความร้อนจากการเผาไหม้ไว้สูงมาก จึงสามารถจุดระเบิดก๊าซชีวภาพผสมอากาศ เมื่อมีความเข้มข้นระหว่าง LEL กับ UEL ได้

8.7.5 กรณีศึกษาการระเบิดของก๊าซชีวภาพที่ 5

การระเบิดของก๊าซชีวภาพในห้องเผาไหม้หม้อน้ำมันร้อน ณ โรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังโรงงานที่ 5

- **ข้อมูลเบื้องต้น**
  - อุบัติเหตุเกิดเมื่อวันที่16มิถุนายน 2552เวลา 21.30 น.เหตุเกิดในขณะกำลังจุดเตา
  - มีการระเบิดภายในห้องเผาไหม้ของหม้อน้ำมันร้อน แรงระเบิดทำให้ ฝาด้านหน้าของหม้อน้ำมันร้อนพร้อมหัวเผาหลุดร่วงลงในระยะ ประมาณ 1 ม.
  - มีผู้ได้รับบาดเจ็บจากเศษวัสดุและเปรอะเปื้อนไปด้วยเขม่ารวม 4 ราย เป็นพนักงานของโรงแป้งมัน 2 ราย และเป็นพนักงานของบริษัทผู้รับเหมาติดตั้งหม้อน้ำมันร้อน 2 ราย
  - ทรัพย์สินเสียหาย 1-3 แสนบาท

ปัญหาด้านอุบัติเหตุอันตราย มลภาวะ และประสิทธิภาพจากกระบวนการผลิต การจัดเก็บ และการใช้ก๊าซชีวภาพ

1) ปัญหาจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณก๊าซ
   ก. ปัญหาเมื่อก๊าซเหลือทิ้ง
   ข. ปัญหาเมื่อก๊าซไม่เพียงพอ

2) ปัญหาจากคุณภาพก๊าซมีการเปลี่ยนแปลง

ก. เมื่อ CH_4 ต่ำเกินไป

ข. เมื่อ CH_4 สูงเกินไป

3) ปัญหาจากสิ่งปนเปื้อนของก๊าซ เช่น CO_2, H_2S, H_2O, อื่นๆ

4) ปัญหาจากการใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิง

5) ปัญหาที่อาจเกิดขึ้น เมื่อมีการซ่อมบำรุง บ่อผลิต ท่อ หรืออุปกรณ์ฯ

6) ปัญหาต่างๆ จากการใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิง

ก. หัวเผาไม่ทำงาน (ไม่มีการ Pre purge)

ข. หัวเผาทำงาน (มีการ Pre purge) แต่จุดเตาไม่ติด

ค. จุดเตาไม่ติด และเกิดการระเบิดในห้องเผาไหม้ขณะจุดเตา

ง. จุดเตาติด แต่เดินได้ชั่วขณะแล้วดับ

จ. จุดเตาติด แต่เปลวไฟกระพือ

ฉ. จุดเตาติด แต่เร่งไฟไม่ขึ้น

ช. เปลวไฟดับ ขณะเดินเครื่องที่ High Fire

ซ. ขณะเดินเครื่องที่ High Fire เปลวไฟดับ และเกิดการระเบิดในห้องเผาไหม้

ฌ. หัวเผาทำงาน แต่ CO สูง , O_2 สูง และอุณหภูมิปล่องสูงมาก

ญ. ในขณะที่หัวเผาทำงาน มีการระเบิดที่ปล่องไอเสีย

(**ที่มา;** ศุภวัฒน์ ธาดาจารุมงคล, กรณีศึกษาการระเบิดของก๊าซชีวภาพ (Biogas), กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553)

8.7.6 กรณีศึกษาการระเบิดของก๊าซชีวภาพที่ 6

นักศึกษาทำโครงงานก๊าซชีวภาพถังก๊าซระเบิด

นักศึกษาเคราะห์ร้ายทำโครงการถังบรรจุก๊าซชีวภาพเตรียมส่งอาจารย์ก่อนจบหลักสูตร ขณะช่วยกันลงมือประดิษฐ์เกิดระเบิดเสียงดัง ส่งผลให้บาดเจ็บจนต้องนำส่งโรงพยาบาล

เมื่อเวลา 18.00 น.วันที่ 11 กุมภาพันธ์ 2552 เจ้าหน้าที่ตำรวจได้รับแจ้งว่า เกิดอุบัติเหตุถังก๊าซระเบิด มีผู้ได้รับบาดเจ็บหลายราย จากการสืบสวน พบว่า จุดเกิดเหตุอยู่ภายในใต้ถุนบ้าน มีถังน้ำมันขนาด 200 ลิตร จำนวน 2 ถัง ล้มตะแคงอยู่ 1 ใน 2 ถัง มีร่องรอยก้นถังถูกแรงอัดจนบวม และฝาถังกระเด็นออกไปตกห่างจากจุดเกิดเหตุราว 5 เมตร สิ่งของที่อยู่บริเวณใกล้เคียงได้รับแรงระเบิดกระเด็นไปตามแรงระเบิด มีผู้ได้รับบาดเจ็บ 3 ราย ถูกนำตัวส่งไปรักษาที่โรงพยาบาล จากการสอบสวนของเจ้าหน้าที่ทราบว่า ทั้ง 3 คน เป็นนักศึกษาระดับ

ปวช. ชั้นปีที่ 3 แผนกช่างยนต์ ได้รับบาดเจ็บเล็กน้อยที่บริเวณลำคอ ปาก และตา โดยนักศึกษาทั้ง 3 คน ได้รวมกลุ่มกันทำโครงการประดิษฐ์ถังบรรจุก๊าซชีวภาพที่ทำจากมูลหมูสำหรับไว้ใช้ในครัวเรือน ซึ่งเป็นโครงการที่จะต้องนำเสนออาจารย์ก่อนที่จะจบหลักสูตร ขณะที่ทั้ง 3 คน กำลังถ่ายก๊าซจากถังก๊าซลูกหนึ่งไปบรรจุไว้ในถังน้ำมันขนาด 200 ลิตร ที่คิดค้นขึ้นมาใหม่ เพื่อเอาไว้ใช้ในครัวเรือน จนเต็มถังแล้ว แต่เกิดความสงสัยว่า แก๊สจะรั่วซึมออกจากตัวถัง ใช้จมูกดมดูแล้วไม่มีกลิ่น จึงใช้วิธีนำไฟแช็กมาจุดทดลองดู ก็เกิดเหตุการณ์ไม่คาดฝันขึ้น เมื่อถังน้ำมัน 200 ลิตร เกิดระเบิดอย่างแรง จนทำให้ทั้ง 3 คน กระเด็นไปตามแรงระเบิดและได้รับบาดเจ็บที่ใบหน้าจนลืมตาไม่ขึ้น ต่อมาเมื่อเวลา 22.00 น. คืนเดียวกันทางโรงพยาบาลได้ตรวจดูอาการที่ดวงตาแล้วพบว่า สาเหตุที่ทั้ง 2 คน ลืมตาไม่ได้ เนื่องมาจากมีอาการแสบตาจากก๊าซชีวภาพ ผลการรักษาทั้ง 3 คนอยู่ในขั้นปลอดภัย

(**ที่มา;** ไทยนิวส์ 13 กุมภาพันธ์ 2552,http://www.cmprice.com/forum/?content=detail&wb_type_id=18
&topic_id=40919)

ถังระเบิดเกิดขึ้นได้อย่างไร และเหตุใดจึงเกิดการเผาไหม้และระเบิดขึ้นภายในถัง ขณะที่แหล่งจุดติดไฟอยู่ภายนอกถัง

- **การวิเคราะห์การระเบิดของถัง**

ต้องเชื่อว่ามีการระเบิดเกิดขึ้นในถังแน่นอน

1) แสดงว่าในถังไม่ได้มีเฉพาะก๊าซชีวภาพเท่านั้น แต่เป็นก๊าซชีวภาพที่ผสมกับอากาศเรียบร้อยแล้ว และส่วนผสมของก๊าซในถังที่อยู่ในช่วงติดไฟได้ด้วย สันนิษฐานว่า ตอนถ่ายก๊าซจากถังแรกมาเข้าถังที่สองไม่ได้ไล่อากาศในถังที่สองให้หมดเสียก่อน ความดันก๊าซอาจจะไม่สูงมาก สัดส่วนก๊าซชีวภาพกับอากาศที่ค้างถังอยู่ในช่วงติดไฟได้พอดี
2) มีแหล่งจุดติดไฟคือไฟแช็ค
3) มีก๊าซรั่ว (ซึม) จากถังบรรจุจริง สันนิษฐานว่า คงมีการใช้ไฟลนบริเวณจุดที่สงสัย เช่น ขอบฝาถังหรือบริเวณตามดของแนวเชื่อมระหว่างท่อเหล็กกับถังบรรจุก๊าซ ตำแหน่งระหว่างถังบรรจุก๊าซกับวาล์วที่ใช้สำหรับปิด-เปิดเพื่อบรรจุก๊าซเข้าถัง
4) การซึมของก๊าซมีความเร็วต่ำ ความเร็วเปลวไฟสูงกว่าความเร็วของก๊าซที่ซึมออกมา
5) เปลวไฟลามเข้าไปจุดระเบิดข้างในถังได้

เอกสารอ้างอิง:

1. James L Waish. Jr., P.E.Charles C. Ross., P.E. M i r h d S. Smith., Stephen R. Harper., W. Allen Wllklnr (1988) HANDBOOK ON BIOGAS UTILIZATION, U. S. Department of Energy Southeastern Regional Biomass Energy Program, Tennessee Valley Authority Muscle Shoals, Alabama.
2. R. STONE, A. CLARKE, P. BECKWITH, Correlations for the Laminar-Burning Velocity of Methane/Diluent/Air Mixtures Obtained in Free-Fall Experiments, The Combustion Institute, Elsevier Science Inc. , COMBUSTION AND FLAME 114:546—555, 1998
3. คะตะล็อควาล์ว บริษัท The Alloy Valve Stockist, www. Alloy-valves.com
4. เอกสารอบรมหัวเผาของ Wieshaupt, Training course Gas burner type G โดย Max Weishaupt GmbH , 1997
5. Steven McKinsey Zicari, REMOVAL OF HYDROGEN SULFIDE FROM BIOGAS USING COW-MANURE COMPOST, A Thesis Presented to the Faculty of the Graduate School of Cornell University, 2003
6. เอกสารแนะนำสินค้าหัวเผา รุ่น Weishaupt Gas burners model "G" Combination Gas/Oil burners models "GL" and "RGL" Sizes 1 and 3, Wieshaupt Corporation, Germany, 2004
7. เอกสารแนะนำสินค้าหัวเผา รุ่น Industrial combined burner BGEC, RAY Öl- und Gasbrenner GmbH, Fellbach, Germany, 2001-2002
8. Dieter Deublein and Angelika Steinhauser, Biogas from Waste and Renewable Resources, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co.KaA, 2008
9. GTI BI-FUEL, Project Overview, GTI-Altronic, Inc., Ohio, USA., www.gti-altronicinc.com
10. Guidance on gas treatment technologies for landfill gas engines, Environment Agency, Bristol, UK, 2004, www.environment-agency.gov.uk
11. Jeff VanVoorhis, Biogas Handling & Use, Applied Technologies, Inc., Brookfield, WI, 2004
12. บทความแปลจากจากวิกิพีเดีย สารานุกรมเสรีเรื่อง เซลล์เชื้อเพลิงปี 2550 http://th.wikipedia.org/wiki/เซลล์เชื้อเพลิง
13. Patikorn Saensing, Energy from Biological Conversion of Organic Waste, School of Environmental Engineering, SUT , 2005
14. Teodorita Al Seadi, Dominik Rutz, Heinz Prassl, Michael Köttner, Tobias Finsterwalder, Silke Volk, Rainer Janssen, biogas HANDBOOK, University of Southern Denmark Esbjerg, Niels Bohrs Vej 9-10, DK-6700 Esbjerg, Denmark, 2008

15. เอกสารการปฏิบัติงานและการบำรุงรักษา “ BIOGAS COMBUSTION STATION SANITARY LANDFILL “EL MOLLE” FIFTH REGION”, http://cdm.unfccc.int/filestorage/H0AFJ9O2CYEV6PG1W57ZQML8KR3SBT/Annex%204%2049%20BIOGAS%20%20COMBUSTION%20%20%20STATION.pdf?t=dFJ8MTI5MzI1Mjg5Ni4xMw==ltUo-bhO1RbXt8zTQGib-sw_a7_l=
16. ศุภวัฒน์ ธาดาจารุมงคล, บทความเผยแพร่ของสำนักเทคโนโลยีความปลอดภัยเรื่อง “กรณีศึกษาสาเหตุและการป้องกันการระเบิดของห้องเผาไหม้ ซึ่งใช้ก๊าซชีวภาพ (Biogas) เป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อนำความร้อน” กรมโรงงานอุตสาหกรรม ปี 2551,http://www2.diw.go.th/safety/
17. ศุภวัฒน์ ธาดาจารุมงคล, เอกสารประกอบการบรรยาย เรื่อง “กรณีศึกษาการระเบิดของก๊าซชีวภาพ (Biogas)” กรมโรงงานอุตสาหกรรม ปี 2553, http://www2.diw.go.th/safety/
18. http://www.stirlingengine.com/faq
19. ไทยนิวส์ 13 กุมภาพันธ์ 2552 http://www.cmprice.com/forum/?content=detail&wb_type_id=18&topic_id=40919

บทที่ 9
ความปลอดภัยในระบบก๊าซชีวภาพ

เนื้อหาในบทนี้ประกอบไปด้วยเรื่องของความเสี่ยงจากการระเบิดและไฟไหม้ โดยได้อธิบายเกี่ยวกับการกำหนดพื้นที่อันตรายในโรงงานตั้งแต่ระบบผลิตจนถึงการใช้ประโยชน์จากก๊าซชีวภาพ โดยได้นำเสนอแนวทางในการเลือกใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่เหมาะสมรวมทั้งมีตัวอย่างป้ายอุปกรณ์ไฟฟ้า เพื่อให้สามารถทำความเข้าใจในเรื่องอุปกรณ์ป้องกันการระเบิด (Explosion proof) ได้ง่ายยิ่งขึ้น นอกจากนี้ ยังได้กล่าวถึงความปลอดภัยและอาชีวอนามัยในการทำงานในพื้นที่อับอากาศ ซึ่งมีอยู่หลายแห่งที่อาจพบได้ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ อันตรายอันเกิดจากก๊าซพิษ พร้อมทั้งได้สอดแทรกเรื่องการปฐมพยาบาลเบื้องต้นเมื่อเกิดเหตุฉุกเฉิน นอกจากนี้ยังมีตัวอย่างแบบฟอร์มการขออนุญาตเข้าทำงานในพื้นที่อันตราย และพื้นที่อับอากาศที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับโรงงานได้

9.1 ความเสี่ยงจากการระเบิดและไฟไหม้

(**ที่มา ;** คู่มือการตรวจสอบ ติดตั้งระบบและอุปกรณ์ไฟฟ้า ในพื้นที่อันตรายที่มีไอระเหยของสารไวไฟ กรมโรงงานอุตสาหกรรม 2548)

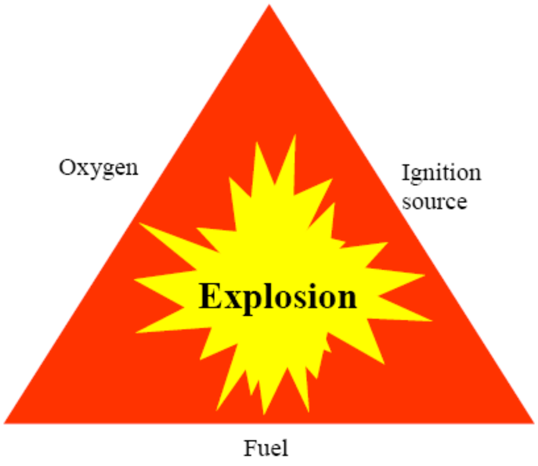
9.1.1 พื้นที่อันตราย (Hazardous Area)

คือ บริเวณที่มีโอกาสจะเกิดอุบัติเหตุระเบิดหรือไฟไหม้ขึ้นได้ง่าย โดยสภาวะที่จะเกิดเหตุดังกล่าวจะต้องมีองค์ประกอบร่วม 3 อย่าง คือ

ก. มีสารไวไฟในปริมาณมากพอที่จะจุดติดไฟได้ (Flammable Material in Ignitable Quantities)

ข. มีออกซิเจนในปริมาณที่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้ (ในอากาศปกติจะมีออกซิเจนประมาณ 21%)

ค. มีแหล่งจุดติดไฟ (Ignition Source) ทำให้เกิดพลังงานความร้อนที่มากพอกับส่วนผสมของเชื้อเพลิงและอากาศ ซึ่งการจุดติดไฟนี้สามารถเกิดได้จากสาเหตุต่างๆ เช่น เปลวไฟ การเกิดประกายไฟ (Spark) ของอุปกรณ์ไฟฟ้า ความร้อนสูงสะสม การถ่ายเทประจุไฟฟ้าสถิต เป็นต้น



รูปที่ 9.1 แสดงองค์ประกอบ 3 อย่างที่ทำให้เกิดการจุดติดไฟ และการระเบิด

(**ที่มา;** Deutsche Montan, Fraunhofer UMSICHT, 2002)

9.1.2 การระเบิด (Explosion)

(**ที่มา** ; Jurgen Kuhlmei, 2003)

คือ ปฏิกิริยาเคมีของสารไวไฟกับออกซิเจน แล้วปลดปล่อยพลังงานความร้อนสูงมาก ซึ่งสารไวไฟอาจอยู่ในรูปของก๊าซ (Gas) หรือไอระเหย (Vapor) เนื่องจากเราไม่สามารถหลีกเลี่ยงการใช้สารไวไฟได้ จึงจำเป็นต้องพยายามไม่ให้เกิดการรั่วไหลของสารไวไฟสู่บรรยากาศ จนเกิดสภาวะที่จะเกิดระเบิดได้ อย่างไรก็ตามในบางพื้นที่ที่มีการใช้หรือถ่ายเทสารไวไฟอยู่เป็นประจำ การป้องกันการระเบิดทำได้โดยการสร้างระบบระบายอากาศ (Ventilation) ให้เหมาะสม และมีการป้องกันไม่ให้มีแหล่งกำเนิดการจุดติดไฟขึ้นได้ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากสารแต่ละชนิดมีคุณสมบัติในการจุดติดไฟต่างกัน ดังนั้น การมีออกซิเจน แหล่งจุดติดไฟ และสารไวไฟร่วมกันแล้วก็อาจจะยังไม่ทำให้เกิดการระเบิดหรือไฟไหม้ขึ้นได้ทันทีเสียทีเดียว ซึ่งทั้งนี้ยังมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติที่สำคัญของสารไวไฟที่ปนเปื้อนอยู่ในอากาศที่จะทำให้เกิดสภาพบรรยากาศที่จุดติดไฟได้ (Explosive Atmosphere) อีก 5 ประการ คือ

1) Lower Explosive Limit (LEL) คือ ปริมาณเปอร์เซ็นต์ของก๊าซ หรือไอระเหยขั้นต่ำที่ผสมกับอากาศ จนเกิดเป็นส่วนผสมที่เหมาะสมที่จะทำให้เกิดการระเบิดได้ (Explosive mixture) ถ้ามีปริมาณเปอร์เซ็นต์ของก๊าซไวไฟเจือปนในอากาศเข้มข้นน้อยกว่านี้ ก็จะไม่เพียงพอที่จะทำให้จุดติดไฟได้

2) Upper Explosive Limit (UEL) คือ ปริมาณเปอร์เซ็นต์ของก๊าซ หรือไอระเหยมากที่สุดที่ผสมกับอากาศ จนเกิดเป็นส่วนผสมที่เหมาะสมที่จะทำให้เกิดการระเบิดได้ (Explosive mixture) ถ้ามีปริมาณเปอร์เซ็นต์ของก๊าซไวไฟเจือปนในอากาศเข้มข้นมากกว่านี้ ก็จะไม่สามารถจุดติดไฟได้
3) Flash Point คือ ค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่ทำให้สารไวไฟในสภาพของเหลว เกิดการระเหยจนกลายเป็นไอระเหยในปริมาณเพียงพอให้เกิดการจุดติดไฟได้เหนือของเหลวนั้น ของเหลวที่มีค่า Flash Point ต่ำกว่า 37.8°ซ (100°ฟ) จะเรียกว่า “Flammable Liquid” ส่วนของเหลวที่มีค่า Flash Point สูงกว่า 37.8°ซ (100°ฟ) จะเรียกว่า “Combustible Liquid” ถ้าเราจัดเก็บหรือใช้สารไวไฟในพื้นที่ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าค่า Flash Point ก็จะไม่ทำให้เกิดสภาพของพื้นที่อันตรายขึ้นได้
4) Auto-Ignition Temperature คือ อุณหภูมิต่ำที่สุดที่ทำให้ก๊าซ หรือไอระเหยของสารไวไฟซึ่งผสมอยู่ในบรรยากาศเกิดลุกติดไฟได้เอง โดยไม่จำเป็นต้องมีประกายไฟ ในพื้นที่ที่มีการรั่วไหลของก๊าซหรือไอระเหยของสารไวไฟ ถ้ามีการใช้งานเครื่องจักรกล หรืออุปกรณ์ไฟฟ้าซึ่งทำให้เกิดความร้อนสูงที่ส่วนใดส่วนหนึ่ง (Hot Spot) โดยความร้อนที่เกิดขึ้นนี้มีอุณหภูมิสูงกว่าค่า Auto-Ignition Temperature ของก๊าซหรือไอระเหยนั้นๆ ก็อาจจะทำให้สารไวไฟในบรรยากาศเกิดการลุกติดไฟขึ้นเองได้
5) Vapor Density คือ ความหนาแน่นของก๊าซ หรือไอระเหยของสารไวไฟ เมื่อเทียบกับอากาศถ้าค่าความหนาแน่นของก๊าซหรือไอมากกว่า 1.0 แสดงว่า ก๊าซหรือไอนี้หนักกว่าอากาศ เมื่อเกิดมีการรั่วไหล ก๊าซหรือไอนี้จะลอยอยู่ในระดับต่ำ แต่ถ้าค่าความหนาแน่นของก๊าซหรือไอน้อยกว่า 1.0 แสดงว่า ก๊าซหรือไอชนิดนี้เบากว่าอากาศ เมื่อเกิดมีการรั่วไหล ก๊าซหรือไอนี้จะลอยขึ้นสูง คุณสมบัติข้อนี้อาจจะไม่ได้เกี่ยวกับการจุดติดไฟโดยตรง แต่คุณสมบัตินี้จะช่วยบอกว่า พื้นที่อันตรายที่ง่ายต่อการติดไฟจะอยู่บริเวณด้านบน หรือด้านล่างของแหล่งที่เกิดการรั่วไหลของก๊าซหรือไอระเหยสารไวไฟนั้นๆ

9.1.3 แหล่งที่ทำให้เกิดการจุดระเบิด (Ignition Source)

(**ที่มา** ; EN 1127-1: 1997 และ IEC 60079-14, 2007)

ในการออกแบบระบบป้องกันการจุดระเบิดภายในบริเวณที่มีการใช้หรือจัดเก็บสารไวไฟ นั้น ผู้ออกแบบจะต้องพยายามหลีกเลี่ยงการเกิดบรรยากาศที่มีสารไวไฟปนเปื้อนที่มากพอที่จะทำให้เกิดการจุดติดไฟได้ อย่างไรก็ตามในกระบวนการผลิตบางกระบวนการ หรืองานบำรุงรักษาบางงาน อาจจะไม่สามารถหลีกเลี่ยงสภาพบรรยากาศดังกล่าวได้ ดังนั้น จึงต้องพยายามป้องกันไม่ให้เกิดการจุดระเบิดในสถานที่นั้น ซึ่งแหล่งที่ทำให้เกิดการจุดระเบิดที่สำคัญ มีดังนี้

- เปลวไฟ (Open Flame) เช่น ไฟแช็ค เปลวเทียน ไฟจากหัวเชื่อมก๊าซ เป็นต้น

- พื้นผิวที่มีความร้อนสูง (Hot Surfaces) เช่น ฮีตเตอร์ให้ความร้อน อุปกรณ์ไฟฟ้า หรือเครื่องยนต์ เครื่องจักรกลที่มีความร้อน
- ประกายไฟฟ้าจากการอาร์ก และประกายไฟจากการสปาร์กของอุปกรณ์ไฟฟ้า (Electrical Arcs and Sparks) เช่น การเชื่อมโลหะด้วยไฟฟ้า และประกายไฟจากการเปิด หรือปิดสวิตช์ไฟฟ้า
- การถ่ายเทประจุของไฟฟ้าสถิตระหว่างวัตถุที่มีความต่างศักย์ไฟฟ้า(Electrostatic Discharge) ลักษณะเหตุการณ์อาจจะเกิดจากการเสียดสีกันระหว่างวัสดุชนิดที่นำไฟฟ้า กับวัสดุชนิดที่ไม่นำไฟฟ้า แล้วทำให้เกิดการถ่ายเทประจุไฟฟ้าขึ้น เช่น การเสียดสีของสายพานลำเลียงกับ Roller หรือแป้งที่หมุนอยู่ในไซโคลนแยกแป้ง เป็นต้น
- การเกิดฟ้าผ่า หรือการถ่ายเทประจุไฟฟ้าจากบรรยากาศลงสู่พื้นดิน : Lightning (Atmospheric Discharge)
- การเกิดการเสียดสีของเครื่องจักรกล หรือการกระทบอย่างรุนแรงของโลหะ (Mechanical Friction or Impact Sparks) เช่น การตี/ทุบโลหะ หรือหินด้วยค้อน หรือใบมีดบด/ตัดกระทบกับหินหรือโลหะอื่นๆ หรือการเจาะหิน/พื้นคอนกรีตด้วยหัวกระแทก
- การเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความเข้มสูง (Electromagnetic Radiation) เช่น คลื่นวิทยุ เมื่อชิ้นส่วนที่เป็นตัวนำอยู่ในสนามความถี่ซึ่งเป็นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ตัวนำนั้นจะทำหน้าที่คล้ายเป็นเสาอากาศรับสัญญาณ ถ้าสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามีพลังงานเพียงพอ และเสาอากาศใหญ่พอ ตัวนำนี้สามารถทำให้เกิดการจุดติดไฟ (Ignition) ในบรรยากาศ ซึ่งอาจทำให้เกิดการระเบิดได้ ตัวอย่างแหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุได้แก่ เครื่องส่งวิทยุ โทรศัพท์มือถือ เครื่องส่งคลื่นวิทยุสำหรับอุปกรณ์ทางการแพทย์ หรือสำหรับใช้ในอุตสาหกรรมเพื่อการให้ความร้อน อบแห้ง ชุบแข็ง เชื่อม และตัดวัสดุเป็นต้น
- การเกิดคลื่นอัลตร้าโซนิกที่มีพลังงานสูง (Ultrasonic) จากการใช้อุปกรณ์ที่เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นเสียงอัลตร้าโซนิก อันตรายเกิดขึ้นเมื่อของแข็ง หรือของเหลวที่ได้รับคลื่นอัลตร้าโซนิกแล้วดูดกลืนพลังงานเอาไว้จนร้อนขึ้นและลุกติดไฟ ตัวอย่างเช่น อุปกรณ์เครื่องมือวัดอัตราการไหลบางประเภท
- คลื่นพลังงานกระแทกอย่างรุนแรง(Shock Waves Adiabatic Compression) ตัวอย่างเช่น ก๊าซที่ความดันสูงถูกปล่อยระบายสู่ท่อที่ความดันต่ำกว่า คลื่น Shock wave เคลื่อนที่ไปยังพื้นที่ๆ มีความดันในท่อต่ำกว่าด้วยความเร็วที่มากกว่าเสียง เมื่อกระทบกับข้องอ ข้อต่อของท่อ หรือวาล์วที่ปิด จะทำให้เกิดความร้อนและก๊าซจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นมากได้ ตัวอย่างอื่นๆ เช่น การแตกของหลอดไฟฟ้าชนิด fluorescent ที่บรรจุก๊าซไฮโดรเจนที่มีความดันอยู่ภายในหลอด
- การแผ่คลื่นพลังงานจากปฏิกิริยาการแยกตัวของไอออน (Ionizing Radiation) เช่น เอ็กซ์เรย์ (X-Ray) และสารกัมมันตภาพรังสีต่างๆ เหล่านี้ก่อให้เกิดจุดติดไฟได้

- การแผ่คลื่นแสงที่มีความเข้มสูง (Optical Radiation) เช่น คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าช่วงความถี่ 3×10^{11} Hz ถึง $3. \times 10^{15}$ Hz เลเซอร์ที่ใช้ในการสื่อสาร รับ-ส่งข้อมูล เครื่องเลเซอร์ที่สำหรับวัดระยะทาง เป็นต้น อันตรายที่อาจจะเกิดขึ้นเมื่อลำแสงเข้มนี้ส่องผ่านฝุ่นในอากาศ หรือกระทบพื้นผิวของวัตถุแล้วดูดกลืน และเก็บสะสมพลังงานเอาไว้จนร้อนถึงจุดติดไฟแล้วเกิดการระเบิดได้ในบรรยากาศที่มีสารที่ไวไฟอื่นๆ เช่น แสงที่มีความเข้มสูงทางธรรมชาติที่เกิดจาก เลนซ์รับแสงอาทิตย์ กระจกเงาสะท้อนและรวมแสง เป็นต้น
- ปฏิกิริยาเคมีอย่างรุนแรงและเกิดพลังงานความร้อนสูง (Chemical Reaction) เช่น ปฏิกิริยาคายความร้อนจากการทำปฏิกิริยาของสารประเภท Pyrophoric กับอากาศ สารโลหะอัลคาไลน์กับน้ำ เช่น แมกนีเซียมกับน้ำ ฝุ่นหรือของแข็งที่กองเก็บและสลายตัวเกิดความร้อนจนลุกไหม้ขึ้นเอง เป็นต้น

9.1.4 พื้นที่โซนอันตรายของการระเบิดและไฟไหม้

พื้นที่อันตรายถูกจัดแบ่งประเภทตามคุณสมบัติของสารไวไฟที่อาจมีใช้ หรือเก็บรักษาอยู่ในพื้นที่นั้นๆ ก๊าซหรือไอระเหยที่ปะปนอยู่ในบรรยากาศจะทำให้เกิดส่วนผสมของเชื้อเพลิงและออกซิเจนที่เหมาะสม (Ignitable Concentration) ที่จะจุดติดไฟได้ ดังนั้น ***ควรหลีกเลี่ยงการติดตั้งระบบไฟฟ้าในบริเวณพื้นที่อันตราย แต่ถ้าไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ในทางปฏิบัติ ผู้ออกแบบจะต้องเลือกใช้อุปกรณ์ชนิดพิเศษที่ได้มาตรฐานการป้องกันการระเบิด*** **(Explosion Proof)** ***เพื่อใช้กับพื้นที่อันตรายประเภทต่างๆตามมาตรฐาน***

9.1.4.1 ระดับของการรั่วไหล

เนื่องจากปริมาณและความเข้มข้นของสารไวไฟ เกิดจากการรั่วไหลของสารไวไฟสู่บรรยากาศ ทำให้เกิดการระเบิด ความเสี่ยงจะมากหรือน้อยนั้น ขึ้นอยู่กับระดับของการรั่วไหล ดังนั้นศักยภาพการรั่วไหลของสารไวไฟจึงถูกจัด “ระดับของการรั่วไหล” ได้ดังแสดงในตารางที่ 9.1

ตารางที่ 9.1 แสดงระดับการรั่วไหลของสารไวไฟ

ระดับของการรั่วไหล	คำอธิบาย
ระดับของการรั่วไหลต่อเนื่อง	การรั่วไหลซึ่งต่อเนื่องหรือคาดว่าจะเกิดขึ้นถี่ หรือมีระยะเวลานาน (โดยทั่วไป > 1000 ชม./ปี)
ระดับของการรั่วไหลปฐมภูมิ	การรั่วไหลที่คาดว่าจะเกิดขึ้นเป็นระยะ หรือบางโอกาสในช่วงของการปฏิบัติงานปกติ (โดยทั่วไปอยู่ระหว่าง 10 ถึง 1000 ชม./ปี)
ระดับของการรั่วไหลทุติยภูมิ	การรั่วไหลที่ไม่คาดว่าจะเกิดขึ้น ในช่วงของการปฏิบัติงานปกติ และถ้าเกิดขึ้นก็ไม่บ่อยมาก (และเกิดในระยะเวลาสั้นๆ (โดยทั่วไปน้อยกว่า 10 ชม./ปี และระยะเวลาช่วงสั้นๆ เท่านั้น)

หมายเหตุ: *"ระยะเวลาช่วงสั้นๆ" ในระดับการรั่วไหลระดับทุติยภูมิ หมายถึงระยะเวลาที่น้อยกว่า 1 ชั่วโมง*

(**ที่มา** ; ESA ICoP 2, 2005)

9.1.4.2 การจำแนกพื้นที่อันตราย (Hazardous Area Classification)

การจำแนกพื้นที่อันตราย หรือการแบ่งโซน จะถูกจำแนกจากพื้นฐานของโอกาสในการที่จะมีการรั่วไหลของวัสดุติดไฟในพื้นที่นั้นๆ มาตรฐานยุโรป (IEC / CENELEC) ได้แบ่งพื้นที่ออกเป็น 3 โซน ส่วนมาตรฐานอเมริกา (NEC) ได้แบ่งออกเป็น 2 ระดับ (Class) คือ Class I: Division 1 และ Class I: Division 2 ดังตารางที่ 9.2 ซึ่งได้แสดงการเปรียบเทียบมาตรฐานการจำแนกประเภทของพื้นที่ของยุโรปและอเมริกา

ตารางที่ 9.2 แสดงการเปรียบเทียบมาตรฐานการจำแนกประเภทของพื้นที่ที่มีสารไวไฟของยุโรปและอเมริกา

มาตรฐาน	มีแก๊สไวไฟอยู่		
	เป็นประจำ	ในสภาวะปกติ	ในสภาวะไม่ปกติ
IEC / CENELEC	Zone 0	Zone 1	Zone 2
NEC 500	Class I: Division 1	Class I: Division 1	Class I: Division 2
NEC 505	Zone 0	Zone 1	Zone 2

(**ที่มา** ; Cooper Crouse-Hinds Ex Digest, 2006)

สำหรับการจำแนกโซนตามโอกาสความเสี่ยง และระดับของการรั่วไหล แสดงในตารางที่ 9.3

ตารางที่ 9.3 แสดงความสัมพันธ์ของโซน กับโอกาสความเสี่ยง และระดับความรั่วไหล

การแบ่งพื้นที่	โอกาสความเสี่ยง	ระดับการรั่วไหล	คำอธิบาย
โซน 0	ความเสี่ยงสูง	**ต่อเนื่อง**	บริเวณซึ่งมีบรรยากาศที่มีส่วนผสมของอากาศและมีวัสดุที่ติดไฟได้ อยู่ในสภาวะก๊าซ ไอ หรือละออง ออกมาอย่างต่อเนื่อง หรือมีอยู่ในระยะเวลานาน หรือมีออกมาบ่อย
โซน 1	ความเสี่ยงปานกลาง	**ปฐมภูมิ**	บริเวณซึ่งมีบรรยากาศที่มีส่วนผสมของอากาศและมีวัสดุที่ติดไฟได้ อยู่ในสภาวะก๊าซ ไอ หรือละออง เป็นบางครั้งบางคราวในการปฏิบัติงานปกติ
โซน 2	ความเสี่ยงน้อย	**ทุติยภูมิ**	บริเวณซึ่งมีบรรยากาศที่มีส่วนผสมของอากาศและมีวัสดุที่ติดไฟได้ อยู่ในสภาวะก๊าซ ไอ หรือละออง ไม่ค่อยเกิดขึ้น ในการปฏิบัติงานปกติ แต่ถ้าเกิดขึ้น จะเกิดในช่วงเวลาสั้นๆ เท่านั้น

พื้นที่โซน 0 (Class I: Division 1) ตัวอย่างพื้นที่ลักษณะนี้ เช่น

- ภายในถังบรรจุสารไวไฟ
- พื้นที่ใกล้ช่องเปิดของถังบรรจุที่อาจทำให้ก๊าซหรือไอระเหยรั่วกระจายออกมาสู่ภายนอกได้

พื้นที่ใน Zone 0 จะมีโอกาสสูงที่จะมีความเข้มข้นของไอระเหยของสารอันตรายเกินกว่า 100 % ของค่า Lower Explosive Limit (LEL) ของสารนั้นในภาวะปกติ มากกว่า 1,000 ชั่วโมงต่อปี **อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในพื้นที่ Zone 0 มักจะเป็นเครื่องมือวัดต่าง ๆเช่น เครื่องมือวัดระดับของเหลว และเครื่องมือวัดอุณหภูมิ เป็นต้น อุปกรณ์เครื่องวัดดังกล่าวจะต้องเป็นประเภท Intrinsically Safe เท่านั้น** เพราะอุปกรณ์ประเภทนี้จะใช้กำลังไฟฟ้าในระดับต่ำมาก ทำให้เมื่อเกิดการลัดวงจรในชิ้นส่วนอุปกรณ์เครื่องมือวัดเหล่านี้ พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจะไม่มากพอให้ก๊าซหรือไอระเหยไวไฟเกิดการจุดติดไฟได้

พื้นที่โซน 1 (Class I : Division 1) ตัวอย่างของพื้นที่ในโซนนี้ เช่น

- บริเวณรอบช่องเปิดของถังบรรจุสารไวไฟ
- บริเวณรอบ safety valve และบริเวณใกล้กับ seal ของ pump หรือ compressor
- จุดถ่ายเทสารไวไฟ

- บริเวณที่มีการถ่ายบรรจุก๊าซ
- บริเวณที่มีการใช้สารตัวทำละลาย (solvent)
- บริเวณที่มีการพ่นเคลือบสี
- ห้องที่มีการใช้สารไวไฟซึ่งไม่มีการระบายอากาศที่เหมาะสม

พื้นที่ใน Zone 1 จะมีโอกาสที่จะมีความเข้มข้นของไอระเหยของสารอันตรายเกินกว่า 100% ของค่า Lower Explosive Limit (LEL) ของสารนั้นในสภาวะปกติ ระหว่าง 10 ถึง 1,000 ชั่วโมงต่อปี

พื้นที่โซน 2 (Class I : Division 2) คือ พื้นที่ที่มีก๊าซหรือไอระเหยผสมอยู่ในบรรยากาศด้วยความเข้มข้นเหมาะสมในการจุดติดไฟได้ในช่วงเวลาสั้น ๆ ตัวอย่างของพื้นที่ในลักษณะนี้ เช่น

- พื้นที่ที่สามารถเกิดการรั่วไหลของก๊าซหรือสารไวไฟ เนื่องจากมีการเกิดอุบัติเหตุ
- พื้นที่เก็บบรรจุสารไวไฟและอาจเกิดมีรอยแตกร้าวของถังบรรจุ
- พื้นที่ที่มีการใช้สารไวไฟ แต่กระบวนการทำงานทุกขั้นตอนตามปกติ จะไม่มีไอระเหยของสารไวไฟสามารถรั่วไหลออกมาได้
- พื้นที่ที่มีท่อนำก๊าซหรือสารไวไฟและอาจเกิดการรั่วไหลเนื่องจากความบกพร่องของข้อต่อและวาล์ว
- พื้นที่ที่อยู่ติดกับพื้นที่ใน Zone 1

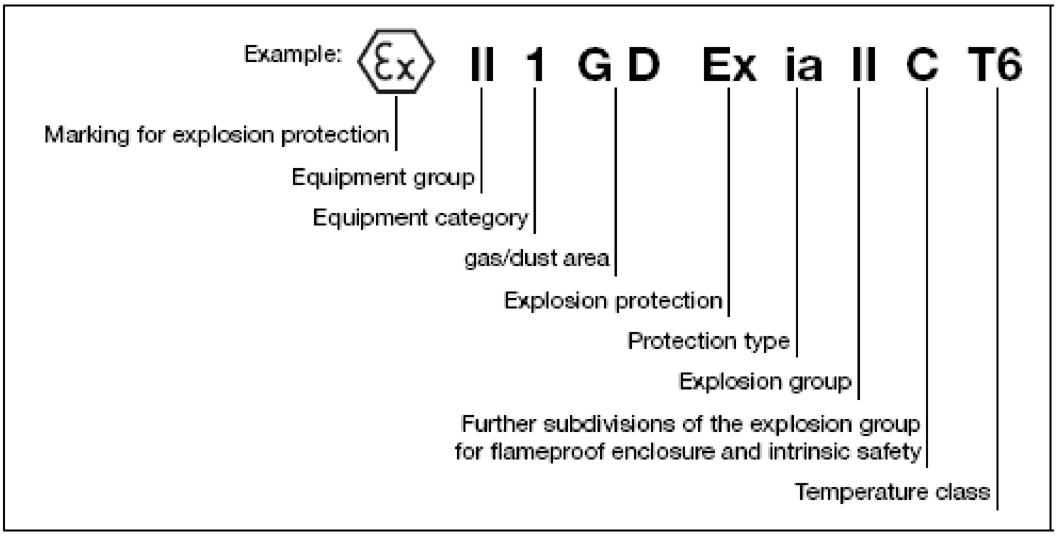
พื้นที่ที่มีการใช้สารไวไฟ ซึ่งอาจมีการรั่วไหลเป็นบางครั้ง จัดว่าเป็นพื้นที่อันตรายใน Zone 1 แต่เมื่อมีการติดตั้งระบบระบายอากาศอย่างเหมาะสม จะช่วยให้สามารถลดขอบเขตของพื้นที่อันตรายใน Zone 1 ให้แคบลง โดยพื้นที่บางส่วนซึ่งเดิมเป็น Zone 1 จะกลายเป็นพื้นที่ใน Zone 2 เนื่องจากมีไอระเหยของสารไวไฟลดน้อยลง

การกำหนดโซนสำหรับบรรยากาศการระเบิดที่สารไวไฟเป็นก๊าซ จะกำหนดด้วยตัวเลขโซนเป็นตัวเลขเดี่ยว (ตัวเลขที่ตามหลังคำว่า “โซน” หรือ Zone) คือ 0, 1 และ 2 สำหรับการกำหนดตัวเลขโซนในบรรยากาศที่มีสารไวไฟประเภทฝุ่น (Dust) จะกำหนดตัวเลขที่ตามคำว่า “โซน” ด้วยตัวเลขสองตัว โดยตัวแรกจะเป็นเลข 2 ใช้บอกว่า เป็นบรรยากาศที่เป็นฝุ่น และตัวที่สองจะเป็นตัวเลขของโซน เช่น โซน 0 โซน 1 และโซน 2 ของบรรยากาศที่เป็นฝุ่น จะเขียนได้ดังนี้ คือ **โซน 20 โซน 21** และ**โซน 22** ตามลำดับ เพื่อให้ความเข้าใจเป็นไปอย่างต่อเนื่อง หลังจากทำความเข้าใจถึงความจำเป็นและความสำคัญของการกำหนดพื้นที่อันตรายแล้ว (การกำหนดพื้นที่เป็นโซนตามความเสี่ยงและโอกาสที่จะเกิด) จะได้ทำความเข้าใจและเรียนรู้เรื่องมาตรการการป้องกันการระเบิดของเครื่องจักร/อุปกรณ์ องค์ประกอบที่ใช้ในการเลือกอุปกรณ์ และวิธีการเลือกอุปกรณ์ที่จะนำมาใช้ใน

พื้นที่อันตรายที่มีบรรยากาศการระเบิดได้อย่างถูกต้องและปลอดภัยต่อไป โดยรายละเอียดแนวทางการกำหนดขอบเขตพื้นที่โซนในระบบผลิตก๊าซชีวภาพสามารถศึกษารายละเอียดได้ในหัวข้อที่ 9.1.6

9.1.5 แนวทางการเลือกอุปกรณ์ป้องกันการระเบิด

การเลือกอุปกรณ์ป้องกันการระเบิด จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องเลือกให้เหมาะสมกับพื้นที่ใช้งาน และบรรยากาศการระเบิด แนวทางการเลือกจำเป็นต้องกำหนด และตรวจสอบให้ตรงกับการใช้งาน สำหรับอุปกรณ์ตามมาตรฐานยุโรปกำหนดให้แสดงป้ายของอุปกรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 10.1



รูปที่ 9.2 แสดงป้ายอุปกรณ์ป้องกันการระเบิดตามมาตรฐานยุโรป

(**ที่มา;** Jurgen Kuhlmei, 2003)

รูปที่ 9.2 แสดงการเรียงลำดับขั้นของการพิจารณาเลือกอุปกรณ์ป้องกันการระเบิดจากด้านซ้ายไปด้านขวา ซึ่งวิธีการพิจารณาจะได้กล่าวถึงในรายละเอียดดังต่อไปนี้

9.1.5.1 การแบ่งกลุ่มของอุปกรณ์ป้องกันการระเบิด

ตามข้อกำหนดของ ATEX Directive 94/9/EC ได้กำหนดให้ผู้ผลิตอุปกรณ์ที่จะถูกนำไปใช้ในพื้นที่อันตรายนั้นต้องทำการระบุกลุ่ม (Groups) และประเภท (Categories) ของอุปกรณ์ไว้บนแผ่นป้ายชื่อด้วย โดยอุปกรณ์ที่จะนำไปใช้ในพื้นที่อันตรายนั้นให้แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่ม I เป็นอุปกรณ์ที่ใช้งานกับอุตสาหกรรมเหมืองแร่ที่มีบรรยากาศที่อาจจะเกิดการระเบิดได้ ทั้งที่อยู่บนพื้นดิน และ/หรืออยู่ใต้พื้นดิน และกลุ่ม II เป็นอุปกรณ์ที่ใช้กับพื้นที่อันตรายอื่นนอกเหนือจากเหมืองแร่ ในแต่

ละกลุ่มของอุปกรณ์นี้ยังให้แยกออกเป็นประเภท (Category) ตามความเหมาะสมกับการนำอุปกรณ์ไปใช้งานในแต่ละพื้นที่โซนนั้นๆ ด้วย ดังแสดงในตารางที่ 9.4

ตารางที่ 9.4 แสดงการแบ่งกลุ่ม (Equipment groups) และประเภท (Categories) ของอุปกรณ์

กลุ่มอุปกรณ์ (Equipment Group)	ประเภท (Category)	พื้นที่ใช้งาน: พื้นที่ที่มีบรรยากาศการระเบิดบนพื้น/ใต้พื้นของการทำงานในเหมืองแร่ที่มีก๊าซ และ/หรือฝุ่นที่ติดไฟได้	
I	M1 (Zone 0)	พื้นที่อันตรายของการทำงานในเหมืองที่มีก๊าซเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง หรือช่วงเวลาที่ยาว (รวมถึงฝุ่นด้วย)	**ความเสี่ยงสูงสุด:** อุปกรณ์ต้องทำงานต่อไปได้ในบรรยากาศที่อาจเกิดการระเบิด โดย ● เมื่อมาตรการการป้องกันอันใดอันหนึ่งล้มเหลว ยังมีมาตรการการป้องกันอันดับที่สองรองรับ ● เมื่อมีความผิดพลาดสองอย่างเกิดขึ้นพร้อมกัน ยังให้ความมั่นใจต่อความปลอดภัยได้
I	M2 (Zone 1)	พื้นที่อันตรายของการทำงานในเหมืองที่มีก๊าซเกิดขึ้น (รวมถึงฝุ่นด้วย)	**ความเสี่ยงสูง** : อุปกรณ์จะถูกหยุดการทำงานเมื่อมีบรรยากาศที่อาจจะเกิดการระเบิดปรากฏขึ้น มาตรการป้องกันการระเบิดที่ติดตั้งไว้สามารถให้ความมั่นใจในความปลอดภัยได้ในการทำงานปกติ แม้อยู่ภายใต้สถานการณ์การทำงานที่เคร่งเครียด โดยเฉพาะในกรณีที่จัดการได้ยาก และมีการเปลี่ยนแปลงอิทธิพลของบรรยากาศ

ตารางที่ 9.4 (ต่อ)

กลุ่มอุปกรณ์ (Equipment Group)	ประเภท (Category)	พื้นที่ใช้งาน พื้นที่ที่มีบรรยากาศการระเบิดที่นอกเหนือการทำงานในเหมืองแร่	
II	1G (Zone 0) 1D (Zone 20)	ก๊าซ หรือ ไอระเหย ฝุ่น	**ความเสี่ยงสูงสุด** : อุปกรณ์มีความจำเป็นต้องใช้งานในพื้นที่ที่มีบรรยากาศการระเบิดปรากฏอยู่อย่างต่อเนื่อง หรือระยะเวลานาน หรือ บ่อยๆ แม้ความผิดพลาดของอุปกรณ์จะเกิดขึ้นไม่บ่อยนัก มาตรการป้องกันการระเบิดของอุปกรณ์ที่มีอยู่สามารถให้ความมั่นใจในความปลอดภัยได้ โดย ● เมื่อมาตรการการป้องกันอันใดอันหนึ่งล้มเหลว ยังมีมาตรการการป้องกันอันดับที่สองรองรับ ● เมื่อมีความผิดพลาดสองอย่างเกิดขึ้นพร้อมกัน ยังให้ความมั่นใจต่อความปลอดภัยได้
II	2G (Zone 1) 2D (Zone21)	ก๊าซ หรือ ไอระเหย ฝุ่น	**ความเสี่ยงสูง** : อุปกรณ์มีความจำเป็นต้องใช้งานในพื้นที่ที่มีบรรยากาศการระเบิดปรากฏอยู่เป็นบางครั้ง แม้ในกรณีที่ความผิดพลาดของอุปกรณ์จะเกิดขึ้นบ่อยๆ หรือในสถานการณ์ความผิดพลาดปกติที่มีการคาดการณ์เอาไว้แล้ว มาตรการป้องกันการระเบิดของอุปกรณ์ที่มีอยู่สามารถให้ความมั่นใจในความปลอดภัยได้
II	3G (Zone 2) 3D (Zone 22)	ก๊าซ หรือ ไอระเหย ฝุ่น	**ความเสี่ยงปกติ** : อุปกรณ์มีความจำเป็นต้องใช้งานในพื้นที่ที่มีไม่มีบรรยากาศการระเบิดเกิดขึ้น อย่างไรก็ตามถ้าเกิดขึ้นก็ค่อนข้างน้อยครั้ง หรือ ระยะเวลาสั้นๆ ในการทำงานปกติอุปกรณ์สามารถให้ความมั่นใจในความปลอดภัยได้

(**ที่มา** ; PhoeNix CoNtaCt Gmbh & Co. KG, 2007)

โดยที่

อุปกรณ์ในประเภท 1G สามารถนำไปใช้งานใน Zone 0,1 และ 2 ได้

อุปกรณ์ในประเภท 2G สามารถนำไปใช้งานใน Zone 1 และ 2 ได้

อุปกรณ์ในประเภท 3G ใช้งานได้เฉพาะใน Zone 2 เท่านั้น

อุปกรณ์ในประเภท 1D สามารถนำไปใช้งานใน Zone 20, 21และ 22 ได้

อุปกรณ์ในประเภท 2D สามารถนำไปใช้งานใน Zone 21 และ 22 ได้

อุปกรณ์ในประเภท 3D ใช้งานได้เฉพาะใน Zone 22 เท่านั้น

9.1.5.2 เทคนิคการป้องกันการระเบิด

กฎในการป้องกันการระเบิดมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องจัดทำเป็นมาตรการในพื้นที่ที่มีอันตราย เพื่อหลีกเลี่ยงการระเบิด และลดความเสียหายที่จะเป็นผลเกิดขึ้นตามมา มาตรการป้องกันประกอบด้วย

มาตรการขั้นต้น (Primary explosion protection) คือ การป้องกันไม่ให้เกิดบรรยากาศที่สามารถเกิดการระเบิด เช่น การป้องกันการรั่วไหลของก๊าซ การหมั่นตรวจสอบดูแลและการบำรุงรักษาที่ดี การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดการรั่วไหล อุปกรณ์เตือนภัย และการระบายอากาศที่ดี

มาตรการการป้องกันขั้นที่สอง (Secondary explosion protection) ได้แก่ การป้องกันไม่ให้มีหรือเกิดแหล่งจุดติดไฟขึ้นในพื้นที่อันตราย การใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่เป็นแบบไม่เกิดประกายไฟหรือไม่เกิดความร้อนสูง การแยกแหล่งจุดติดไฟออกจากพื้นที่เสี่ยง เป็นต้น

มาตรการขั้นที่สาม เป็นมาตรการการป้องกันด้วยการออกแบบ (Explosion protection through design) เช่น การสร้างให้สามารถป้องกันการระเบิด (Explosion proof construction) การระบายความดันเมื่อเกิดการระบิด (Explosion pressure relief) การปิดกั้นการระเบิด (Explosion suppression) และการจำกัดหรือการป้องกันเปลว/ป้องกันการระเบิดไม่ให้ออกไปสู่บรรยากาศที่อาจจะระเบิด

สำหรับอุปกรณ์ป้องกันการระเบิดสามารถแบ่งได้ตามเทคนิคการป้องกัน ดังแสดงไว้ในตารางที่ 9.5 ซึ่งอุปกรณ์ใช้งานชนิดต่างๆ จะใช้เทคนิคการป้องกันการระเบิดที่แตกต่างกัน และเทคนิคการป้องกันนี้มีความเหมาะสมในแต่ละโซนอันตรายที่แตกต่างกัน เช่น ในโซน 0 อุปกรณ์ที่จะใช้งานได้ต้องเป็นอุปกรณ์ที่มีเทคนิคการป้องกันแบบ Intrinsically safe a (Ia) เท่านั้น

ตารางที่ 9.5 แสดงชนิดอุปกรณ์ป้องกันการระเบิดแบ่งตามเทคนิคการป้องกัน

เทคนิคการป้องกันการระเบิด	รหัสมาตรฐาน	ตัวอย่างอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้งาน	พื้นที่อันตรายที่ใช้ได้	
			มาตรฐาน IEC	มาตรฐาน NEC
Flameproof	D	มอเตอร์, โคมไฟ,สวิตซ์ควบคุม, เต้ารับ และเต้าเสียบ หม้อแปลง อุปกรณ์ให้ความร้อนเป็นต้น	Zone 1 และ 2	Division 1 หรือ 2
Intrinsically Safe	Ia	Thermocouple, Transducer, Transmitter, Proximity Switch, Flow Detector, และ Level Sensor อุปกรณ์วัดและควบคุม อุปกรณ์สื่อสาร	Zone 0, 1 และ 2	Division 1 หรือ 2
Intrinsically Safe	Ib	Thermocouple, Transducer, Transmitter, Proximity Switch, Flow Detector, และ Level Sensor อุปกรณ์วัดและควบคุม อุปกรณ์สื่อสาร	Zone 1 และ 2	Division 2
Purge or Pressurization	P	มอเตอร์ขนาดใหญ่ สวิตซ์ควบคุม ตู้ควบคุม เครื่องวิเคราะห์ต่างๆ	Zone 1 และ 2	Division 1 หรือ 2
Increased Safety	E	อุปกรณ์การต่อสายไฟ, ระบบแสงสว่าง, มอเตอร์และเครื่องมือวัด	Zone 1 และ 2	Division 2
Immersed in Oil	O	สวิตซ์ เกียร์ และหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดใหญ่	Zone 1 และ 2	Division 2
Filled with Poder / Sand	Q	คาปาซิเตอร์ และหม้อแปลงขนาดเล็ก	Zone 1 และ 2	Division 2
Encapsulated / Molding	M	Solenoid Valve, Rapid Starter, Resistor, Capacitor, Optoisolator และ Diode	Zone 1 และ 2	Division 2

ตารางที่ 9.5 (ต่อ)

เทคนิคการป้องกันการระเบิด	รหัสมาตรฐาน	ตัวอย่างอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้งาน	พื้นที่อันตรายที่ใช้ได้	
			มาตรฐาน IEC	มาตรฐาน NEC
Non-Sparking / Nonincendive	N	nA = non-sparking apparatus nC = sparking apparatus in which contacts are protected conveniently nL = energy-limited apparatus nR = purged / pressurized apparatus nZ = purged pressurized apparatus, n	Zone 2	Division 2

(**ที่มา** ; Cooper Crouse-Hinds Ex Digest, 2006)

9.1.5.3 วิธีการจัดแบ่งกลุ่มก๊าซ (Gas Grouping หรือ Explosion Group)

ก๊าซและไอระเหยแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน จึงไม่สามารถออกแบบอุปกรณ์ไฟฟ้าเพื่อใช้ป้องกันการระเบิดสำหรับก๊าซแต่ละชนิดได้ วิธีที่ดีที่สุดในทางปฏิบัติก็คือการแบ่งกลุ่มก๊าซไวไฟตามลักษณะที่สำคัญ 2 ประการ คือ

1) Minimum Ignition Current (MIC) คือ ค่ากระแสไฟฟ้าน้อยที่สุดที่จะทำให้เกิดสปาร์ก จนเกิดการลุกติดไฟของก๊าซหรือไอระเหย จากการทดสอบในห้องทดลอง ถ้าก๊าซชนิดหนึ่งมีค่า MIC น้อย แสดงว่า ก๊าซนั้นสามารถติดไฟได้ง่าย ดังนั้นการเลือกใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้กระแสไฟฟ้าต่ำกว่าค่า MIC เพื่อติดตั้งในบริเวณที่มีก๊าซนี้เจือปนในบรรยากาศ จะช่วยป้องกันการเกิดประกายไฟที่มีความร้อนสูงจนเกิดการจุดระเบิดขึ้นได้ แม้จะเกิดความบกพร่องในวงจรไฟฟ้าก็ตาม
2) Maximum Experimental Safe Gap (MESG) คือ ค่าความกว้างของช่องเปิดมากที่สุดที่จะสามารถป้องกันการแพร่ขยายของเปลวไฟที่เกิดจากการจุดระเบิดของก๊าซชนิดหนึ่งผ่านช่องเปิดนั้นไปสู่ภายนอกที่มีก๊าซชนิดเดียวกันเจือปนอยู่ ถ้าก๊าซชนิดใดมีค่า MESG มาก แสดงว่าสามารถเลือกใช้อุปกรณ์ป้องกันการระเบิด (Explosion proof) หรือ อุปกรณ์ป้องกันไฟ (Flameproof) ที่มีค่า MESG น้อยกว่าได้ เนื่องจากยิ่งช่องเปิดแคบลงเท่าไร ก็จะมีโอกาสน้อยลงที่เปลวไฟจากการระเบิดภายในเครื่องห่อหุ้มจะแทรกออกสู่ภายนอก

ตารางที่ 9.6 แสดงตัวอย่างก๊าซหรือไอระเหยของสารไวไฟเรียงลำดับตามอันตรายของสารไวไฟ

Typical Gas	MESG		MIC		GROUP	
	NEC (mm.)	IEC (mm.)	NEC (mA)	IEC* (ratio)	NEC	IEC
Acetylene	0.25	< 0.5	60	<0.45	A	IIC
Hydrogen	0.28	< 0.5	75	<0.45	B	IIC
Ethylene	0.65	0.5 – 0.9	108	0.45-0.8	C	IIB
Propane	0.97	>0.9	146	>0.8	D	IIA
Methane	1.14	>0.9	195	1	D	IIA

** ค่า MIC ของมาตรฐาน IEC เป็นค่าอัตราส่วนที่เทียบกับก๊าซมีเทน*
ถ้าค่า < 1.0 หมายถึง ใช้กระแสไฟฟ้าในการจุดระเบิดก๊าซนี้น้อยกว่าของก๊าซมีเทน

ตามมาตรฐาน NEC จะมีการจัดกลุ่มก๊าซ (Gas) และไอระเหย (Vapor) ได้ดังนี้

Group A: คือ ก๊าซ Acetylene

Group B: คือ ก๊าซและไอระเหยของสารไวไฟ ที่มีค่า MESG ไม่เกิน 0.45 มม. หรือมีค่า MIC Ratio ไม่เกิน 0.4

Group C: คือ ก๊าซและไอระเหยของสารไวไฟ ที่มีค่า MESG มากกว่า 0.45 มม. แต่ไม่เกิน 0.75 มม. หรือมีค่า MIC Ratio มากกว่า 0.4 แต่ไม่เกิน 0.8

Group D: คือ ก๊าซและไอระเหยของสารไวไฟ ที่มีค่า MESG มากกว่า 0.75 มม. หรือมีค่า MIC Ratio มากกว่า 0.8

ตามมาตรฐาน IEC จะมีการจัดกลุ่มก๊าซ (Gas) และไอระเหย (Vapor) ได้ดังนี้

Group IIC: คือ ก๊าซและไอระเหยของสารไวไฟ ที่มีค่า MESG ไม่เกิน 0.50 มม. หรือมีค่า MIC Ratio ไม่เกิน 0.45

Group IIB: คือ ก๊าซและไอระเหยของสารไวไฟ ที่มีค่า MESG มากกว่า 0.50 มม. แต่ไม่เกิน 0.90 มม. หรือมีค่า MIC Ratio มากกว่า 0.45 แต่ไม่เกิน 0.8

Group IIA: คือ ก๊าซและไอระเหยของสารไวไฟ ที่มีค่า MESG มากกว่า 0.90 มม. หรือมีค่า MIC Ratio มากกว่า 0.8

(**ที่มา** ; คู่มือการตรวจสอบ ติดตั้งระบบและอุปกรณ์ไฟฟ้าในพื้นที่อันตรายที่มีไอระเหยของสารไวไฟ กรมโรงงานอุตสาหกรรม 2548, Jurgen Kuhlmei, 2003 และ Cooper Crouse-Hinds Ex Digest)

สำหรับก๊าซชีวภาพที่มีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบพอสรุปได้ว่า ถ้ากำหนดตามมาตรฐานอเมริกา (NEC) ก๊าซชีวภาพจะถูกจัดอยู่ในกลุ่ม D และถ้าใช้มาตรฐานยุโรป (IEC) ก๊าซชีวภาพจะถูกจัดอยู่ในกลุ่ม IIA

9.1.5.4 ชั้นอุณหภูมิการทำงานสูงสุดของอุปกรณ์ (Temperature Classes) (1,2,6)

อุณหภูมิ คือ ระดับของความร้อนที่ถือว่าเป็นแหล่งจุดติดไฟ การทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ย่อมเกิดความร้อนขึ้นและถ่ายเทออกมาที่ผิวนอกของอุปกรณ์ ดังนั้นการเลือกอุปกรณ์ให้เหมาะสมกับก๊าซ หรือไอระเหยจึงมีความจำเป็น เนื่องจากก๊าซ และไอระเหยต่างๆ มีอุณหภูมิจุดติดไฟอัตโนมัติ (Auto Ignition Temperature) ที่แตกต่างกัน การระบุชั้นอุณหภูมิ (Temperature Classes) ของอุปกรณ์ติดเอาไว้กับอุปกรณ์ ทำให้สะดวกในการเลือกใช้อุปกรณ์ ว่าจะนำไปใช้ในบรรยากาศที่มีก๊าซ หรือไอระเหยของสารชนิดใด เพราะผู้ใช้จะทราบค่าอุณหภูมิติดไฟอัตโนมัติของก๊าซ หรือไอระเหยของสารชนิดนั้นอยู่แล้ว

ตารางที่ 9.7 แสดงระดับอุณหภูมิการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้า (Temperature Classes)

Temperature class of electrical equipment	Maximum surface temperature of electrical equipment	Ignition temperature of gas or vapor
T1	<450℃	>450 ℃
T2	≤300 ℃	>300 ℃
T3	≤200 ℃	>200 ℃
T4	≤135 ℃	>135 ℃
T5	≤100 ℃	>100 ℃
T6	<85 ℃	>85 ℃

วิธีการพิจารณาเลือกอุปกรณ์ไฟฟ้าให้พิจารณาเลือกอุปกรณ์ที่มีอุณหภูมิการทำงานสูงสุด (Maximum operating Temperature of Device) ต่ำกว่าอุณหภูมิติดไฟอัตโนมัติของสาร เพื่อป้องกันมิให้ก๊าซหรือไอระเหยของสารไวไฟเกิดลุกติดไฟได้เอง เมื่อสัมผัสความร้อนสูง โดยที่

Class T1 อนุญาตให้ใช้ได้ ถ้าก๊าซหรือไอระเหยของสารไวไฟไม่สามารถติดไฟได้เองที่อุณหภูมิต่ำกว่า 450°C

Class T2 อนุญาตให้ใช้ได้ ถ้าก๊าซหรือไอระเหยของสารไวไฟไม่สามารถติดไฟได้เองที่อุณหภูมิต่ำกว่า 300°C

Class T2A อนุญาตให้ใช้ได้ ถ้าก๊าซหรือไอระเหยของสารไวไฟไม่สามารถติดไฟได้เองที่อุณหภูมิต่ำกว่า 280°C

Class T2B อนุญาตให้ใช้ได้ ถ้าก๊าซหรือไอระเหยของสารไวไฟไม่สามารถติดไฟได้เองที่อุณหภูมิต่ำกว่า 260°C

Class T2C อนุญาตให้ใช้ได้ ถ้าก๊าซหรือไอระเหยของสารไวไฟไม่สามารถติดไฟได้เองที่อุณหภูมิต่ำกว่า 230°C

Class T2D อนุญาตให้ใช้ได้ ถ้าก๊าซหรือไอระเหยของสารไวไฟไม่สามารถติดไฟได้เองที่อุณหภูมิต่ำกว่า 215°C

Class T3 อนุญาตให้ใช้ได้ ถ้าก๊าซหรือไอระเหยของสารไวไฟไม่สามารถติดไฟได้เองที่อุณหภูมิต่ำกว่า 200°C

Class T3A อนุญาตให้ใช้ได้ ถ้าก๊าซหรือไอระเหยของสารไวไฟไม่สามารถติดไฟได้เองที่อุณหภูมิต่ำกว่า 180°C

Class T3B อนุญาตให้ใช้ได้ ถ้าก๊าซหรือไอระเหยของสารไวไฟไม่สามารถติดไฟได้เองที่อุณหภูมิต่ำกว่า 165°C

Class T3C อนุญาตให้ใช้ได้ ถ้าก๊าซหรือไอระเหยของสารไวไฟไม่สามารถติดไฟได้เองที่อุณหภูมิต่ำกว่า 160°C

Class T4 อนุญาตให้ใช้ได้ ถ้าก๊าซหรือไอระเหยของสารไวไฟไม่สามารถติดไฟได้เองที่อุณหภูมิต่ำกว่า 135°C

Class T4A อนุญาตให้ใช้ได้ ถ้าก๊าซหรือไอระเหยของสารไวไฟไม่สามารถติดไฟได้เองที่อุณหภูมิต่ำกว่า 120°C

Class T5 อนุญาตให้ใช้ได้ ถ้าก๊าซหรือไอระเหยของสารไวไฟไม่สามารถติดไฟได้เองที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100°C

Class T6 อนุญาตให้ใช้ได้ ถ้าก๊าซหรือไอระเหยของสารไวไฟไม่สามารถติดไฟได้เองที่อุณหภูมิต่ำกว่า 85°C

โดยสรุปแล้ว ลักษณะป้ายของอุปกรณ์ป้องกันการระเบิดที่ใช้กับก๊าซชีวภาพตามมาตรฐานยุโรป(IEC) ประกอบด้วยรายละเอียดดังนี้

CE 123 Ex II 2 G Ex d T1

CE marking

Code number of the notified body

Identification for protection against explosions (ATEX 100a)

Equipment group

II = Non-mining application

Category (บ่งบอกโซน)

1 = extremely high safety

2 = high safety

3 = normal safety

Ex atmosphere

G = Gas

D = Dust

Explosion protection (CENELEC-EEx)

Protection type (ดูในตะรางที่ 9.5)

p = pressurized enclosure

d = flame-proof enclosure

e = increased safety

nA = non-sparking

i = intrinsic safety

c = design safety

b = ignition source monitoring

k = liquid immersion

Temperature class Limit temperature (ดูในตาราง 9.7)

T1 = max. 450° C

T2 = max. 300° C

T3 = max. 200° C

T4 = max. 135° C

T5 = max. 100° C

T6 = max. 85° C

รูปแบบป้ายของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ป้องกันการระเบิดตามมาตรฐานกลุ่มอเมริกาเหนือเป็นดังนี้

Typical NEC/CEC Product Markings

NEC 500(U.S. Division system)

Class I Division 1 Groups A, B, C & D (ก๊าซชีวภาพเลือก D) T1

- **Hazard Category** — Class I
- **Area Classification** — Division 1
- **Hazardous Atmosphere Category (Gas or Dust Grouping)** — Groups A, B, C & D (ก๊าซชีวภาพเลือก D)
- **Temperature Classification** — T1

Typical NEC 505/CEC 18 Product Markings

(U.S. Zone system)

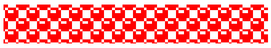
Class I Zone 1 AEx e IIC (ก๊าซชีวภาพเลือก IIA) T1

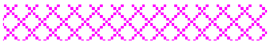
- **Hazard Category** — Class I
- **Area Classification** — Zone 1
- **Explosion Protection Standard (EX-IEC/ATEX/CEC, AEx-NEC)** — AEx
- **Method of Explosion Protection** — e
- **Hazardous Atmosphere Category (Gas or Dust Grouping)** — IIC (ก๊าซชีวภาพเลือก IIA)
- **Temperature Classification** — T1

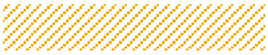
หมายเหตุ: ในกลุ่มประเทศยุโรปจะมีองค์กร หรือหน่วยงานที่อยู่ในประเทศต่างๆ ของประเทศสมาชิก ซึ่งได้รับการแต่งตั้งและเป็นที่ทราบกันในกลุ่มสมาชิกเรียกว่า Notified body มีหน้าที่ในการทดสอบ ให้การรับรองอุปกรณ์ไฟฟ้า หรืออุปกรณ์ที่จะนำมาใช้ในพื้นที่ที่มีบรรยากาศการระเบิดว่ามีคุณภาพเป็นไปตามข้อกำหนดของ EU รวมทั้งออกใบรับรองผลการทดสอบให้ซึ่งเรียกเป็นภาษาอังกฤษว่า “EC-type-examination certificate” ซึ่งจะระบุ Notified body ที่ทำการทดสอบ ปีที่ผลิต อักษรคำว่า “ATEX” และ Serial number

9.1.6 แนวทางการจัดแบ่งโซนรอบๆ อุปกรณ์ก๊าซชีวภาพ

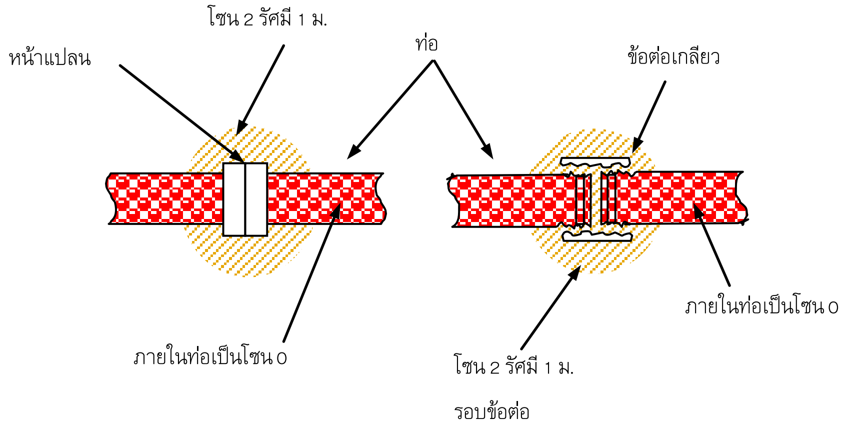
ระบบผลิตก๊าซชีวภาพในโรงงานอุตสาหกรรมมีพื้นที่อันตรายหลายตำแหน่งที่มีโอกาสเกิดบรรยากาศที่อาจจะเกิดการระเบิด ตามตำแหน่งอุปกรณ์ หรือเครื่องจักรต่างๆ ซึ่งอาจจะเกิดจากการรั่วไหลของก๊าซชีวภาพจากการปฏิบัติงานปกติ หรือเกิดจากความบกพร่องของอุปกรณ์ก็ได้ การกำหนดพื้นที่โซนอันตรายจะช่วยให้การออกแบบระบบ และการปฏิบัติงานมีความปลอดภัย การกำหนดโซนต่างๆ ภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพสามารถกำหนดได้ตามตำแหน่งติดตั้งของอุปกรณ์ ดังรายละเอียดข้างล่างนี้ สำหรับสัญลักษณ์ของโซนในคู่มือเล่มนี้จะใช้รูปสัญลักษณ์ดังนี้

โซน 0 

โซน 1 

โซน 2 

9.1.6.1 การจัดแบ่งโซนรอบๆหน้าแปลน



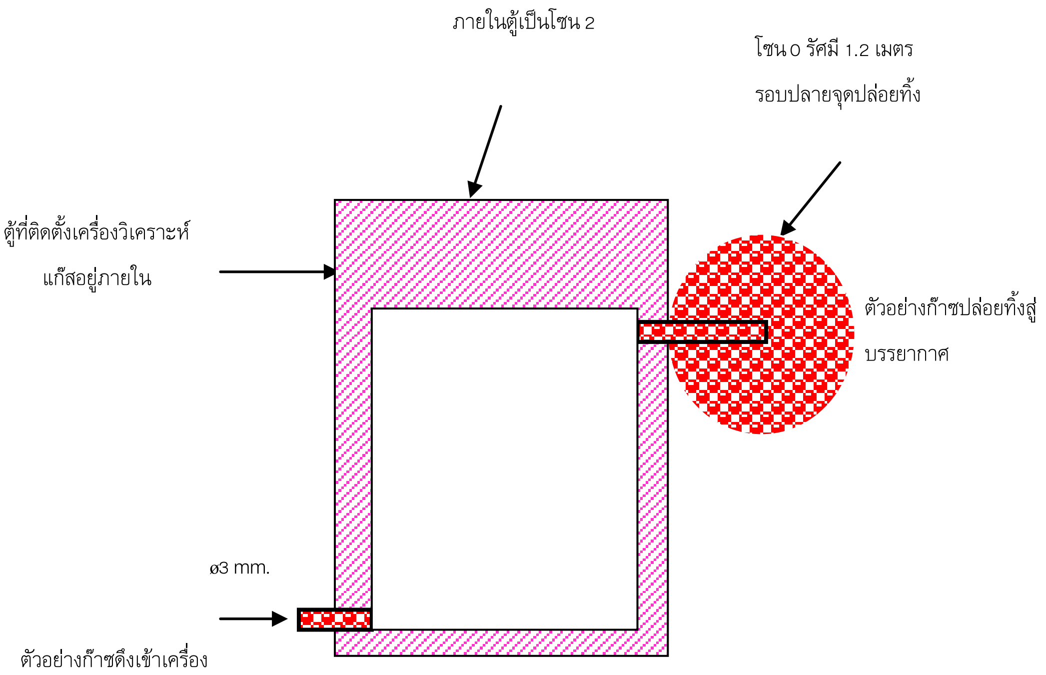
รูปที่ 9.3 แสดงการจัดแบ่งโซนรอบหน้าแปลน และข้อต่อของท่อก๊าซ

โซน 2 ของส่วนผลิตก๊าซที่มีความดันของระบบสูงสุดไม่เกิน 80 $mbar_g$ เป็นพื้นที่ขนาดเล็กที่มีรัศมีไม่เกิน 0.1 เมตร และสำหรับบริเวณที่มีการเพิ่มความดันก๊าซไม่เกิน 350 $mbar_g$ โซน 2 จะมี

รัศมีไม่เกิน 0.2 เมตร ทั้งนี้ คำนวณจากรูรั่วที่มีพื้นที่หน้าตัดของรู 0.25 mm^2 ***รัศมีของพื้นที่เหล่านี้จะใช้กับสถานที่ที่ได้มีการติดตั้งระบบท่ออย่างถูกต้อง และมีการตรวจสอบอย่างสม่ำเสมอเท่านั้น ในกรณีสถานที่อยู่ในสภาวะที่ไม่พึงประสงค์ต่างๆได้ (เช่น ที่มีแรงสั่นสะเทือน, การกัดกร่อน) และงานท่อที่ไม่ได้มีการตรวจสอบอย่างสม่ำเสมอ เช่น มีการตรวจสอบระบบท่อประมาณ 6 เดือนต่อครั้ง ควรกำหนดรัศมีของพื้นที่โซน 2 เผื่อไว้ 1 เมตร***

9.1.6.2 การจัดแบ่งโซนที่เครื่องวัดวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซ

ก. การจัดแบ่งโซนที่เครื่องวัดวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซแบบต่อเนื่อง



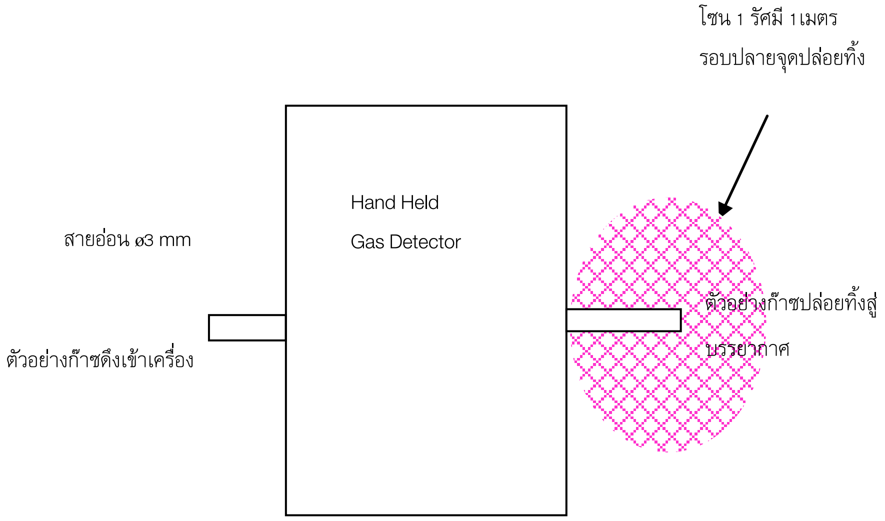
รูปที่ 9.4 แสดงการจัดแบ่งโซนที่เครื่องวัดวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซแบบต่อเนื่อง (**ที่มา** ; ESA ICoP 2,2005)

การตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซอย่างต่อเนื่องนั้นจะใช้ท่อนำก๊าซขนาด 3 มม. ดึงก๊าซจากท่อก๊าซหลักเข้าเครื่องวิเคราะห์ที่ติดตั้งอย่างถาวร เครื่องวิเคราะห์จะติดตั้งอยู่ภายในภาชนะหรือตู้ปิดบนพื้นที่เปิดโล่ง ก๊าซจะถูกดูดเข้าเครื่องวัดและระบายออกสู่บรรยากาศผ่านท่อที่ต่อสูงขึ้นไป ซึ่งจะมีอุปกรณ์ป้องกันไฟย้อนกลับติดอยู่ที่ปลายท่อ ภายในตู้ที่ติดตั้งเครื่องวิเคราะห์ก๊าซกำหนดให้เป็น โซน 2 และรอบปลายท่อระบายเป็นโซน 0 มีระยะรัศมี

1.2 เมตร เพื่อที่จะให้การกำหนดครอบคลุมถึงเครื่องวิเคราะห์ก๊าซแบบต่างๆ รัศมีของโซนจะอยู่บนพื้นฐานของกรณีที่ร้ายแรงที่สุด คือกรณีก๊าซรั่วที่ความดัน 350 $mbar_g$ ผ่านรู 3 มม. ที่ระดับการเจือจาง 0.25 LEL

หมายเหตุ: เครื่องวิเคราะห์ก๊าซไม่ควรติดตั้งอยู่ในบริเวณที่กำหนดให้เป็นพื้นที่อันตราย (Hazardous Area) ที่อาจมีบรรยากาศการระเบิดปรากฏอยู่ เช่น ในห้องควบคุมของเครื่องยนต์ แต่ถ้าไปติดตั้งในพื้นที่ดังกล่าว จำเป็นที่จะต้องมีการตรวจสอบท่อรั่ว และขอบเขตของโซนจะขึ้นอยู่กับระดับการระบายอากาศ

ข. การจัดแบ่งโซนที่เครื่องวิเคราะห์ก๊าซแบบพกพา (Hand Held Gas Detector)



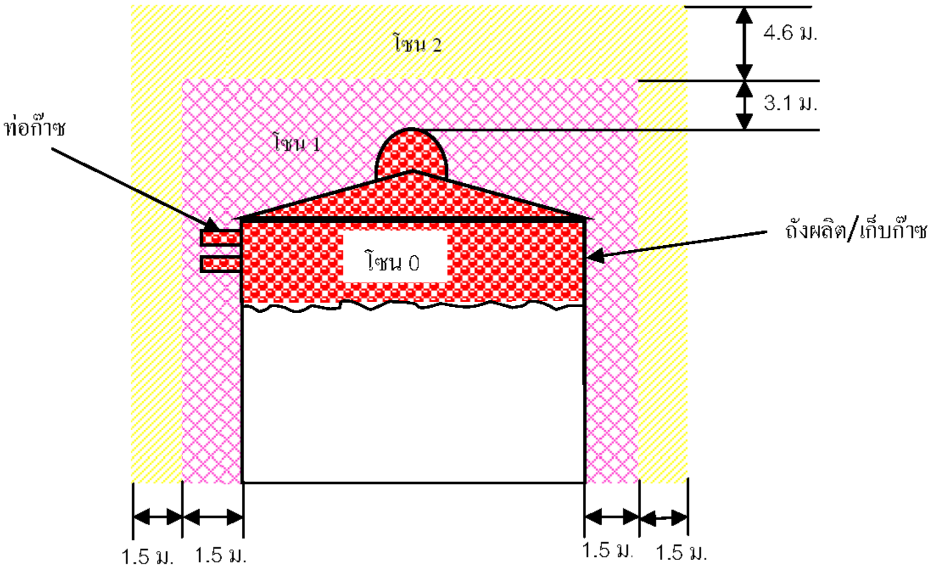
รูปที่ 9.5 แสดงการจัดแบ่งโซนที่เครื่องวิเคราะห์ก๊าซแบบพกพา หรือ Hand Held Gas Detector

วิธีวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซด้วยเครื่องวิเคราะห์ชนิดพกพานี้ วิธีการเก็บตัวอย่างทำแบบ manual โดยการต่อท่ออ่อนเชื่อมจุดเก็บตัวอย่างที่มีรูขนาด 3 มม. เข้ากับเครื่องวิเคราะห์ แล้วจึงทำการดูดก๊าซเข้าเครื่อง ขณะเครื่องทำงานก๊าซที่ผ่านการวิเคราะห์แล้วจะถูกระบายออกจากเครื่องสู่บรรยากาศ วิธีวัดองค์ประกอบของก๊าซนี้เป็นการทำงานแบบปกติ และถูกจัดระดับการรั่วไหลเป็นการรั่วไหลระดับปฐมภูมิ คือ โซน 1 บางครั้งจุดเก็บตัวอย่างอาจจะถูกปล่อยให้เปิดทิ้งไว้ หรือในระหว่างการวัดก๊าซตัวอย่างจะถูกระบายออกทิ้งทางรู

ขนาด 3 มม. ซึ่งในกรณีที่ความดันสูงถึง 350 $mbar_g$ การกำหนดให้รัศมีของโซนอยู่ที่ 1 เมตร ก็ถือว่ามากเพียงพอแล้ว

9.1.6.2 การจัดแบ่งโซนที่ระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

ก. การจัดแบ่งโซนที่ระบบผลิต/เก็บก๊าซชีวภาพแบบหลังคาคงตัว (Fixed Roof) และหลังคาลอย (Floating Roof) และระบบเก็บก๊าซ (Gas Storage)

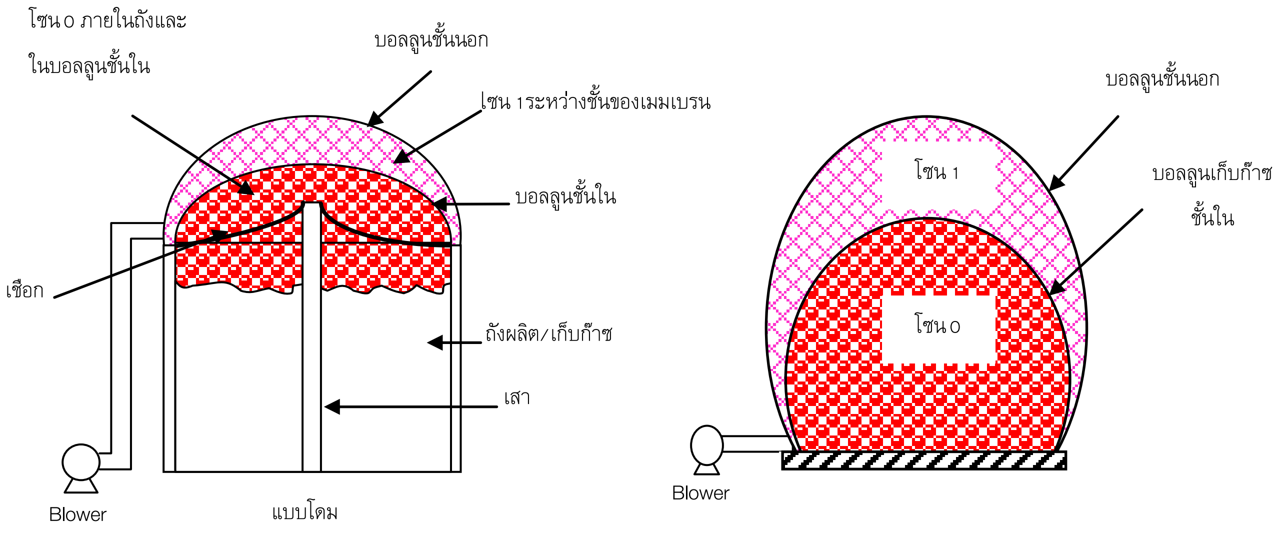


รูปที่ 9.6 แสดงการจัดแบ่งโซนที่ระบบผลิต/เก็บก๊าซชีวภาพแบบหลังคาคงตัว (Fixed Roof) และหลังคาลอย (Floating Roof) และระบบเก็บก๊าซ (Gas Storage)

ถังผลิต/เก็บก๊าซแบบหลังคาคงตัว และหลังคาลอยปกติจะรักษาความดันก๊าซไว้ไม่เกิน 80 mbar มักจะพบว่ามีการรั่วซึมของก๊าซบริเวณหน้าแปลนหรือจุดเชื่อมต่อต่างๆได้บ่อยๆ เช่น ระหว่างท่อกับถัง ทั้งที่อยู่บนถัง หรือด้านข้างถัง ดังนั้นโซน 1 จึงอยู่รอบๆ ถัง กำหนดไว้ที่ 1.5 เมตร โซน 2 อยู่รอบโซน 1 อีกชั้นหนึ่ง รัศมีต่อออกไปอีก 1.5 เมตร ส่วนบริเวณพื้นที่ด้านบนซึ่งปกติก๊าซชีวภาพเบากว่าอากาศจะลอยตัวขึ้นไปเมื่อมีการรั่วไหลจึงกำหนดระยะ โซน 1 และโซน 2 ของพื้นที่ด้านบนเป็น ระยะ 3.1 เมตร และ 7.7 เมตร จากจุดสูงสุดของถัง

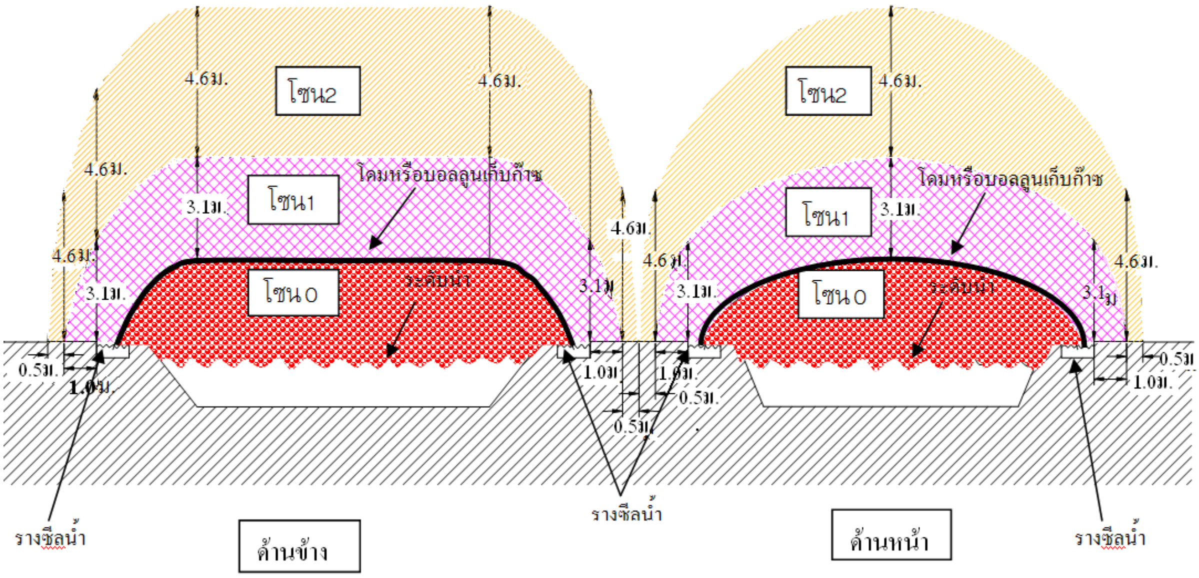
ข. การจัดแบ่งโซนระบบผลิต/เก็บก๊าซแบบบอลลูนสองชั้น และแบบโดม

เช่นเดียวกับถังหลังคาคงตัว และหลังคาลอย ระบบผลิต/เก็บก๊าซชนิดบอลลูนสองชั้นและแบบโดม ความดันก๊าซไม่เกิน 80 mbar การกำหนดโซนเป็นไปตามรูปที่ 9.7



รูปที่ 9.7 แสดงการจัดแบ่งโซนที่ระบบผลิต/เก็บก๊าซชีวภาพแบบบอลลูนสองชั้น และแบบโดม

ค. การจัดแบ่งโซนระบบผลิต/เก็บก๊าซแบบ Cover lagoon (รวมถึงรูปแบบชนิดใช้ดินกดทับขอบแผ่นเมมเบรนรอบบ่อ และใช้น้ำซีล)



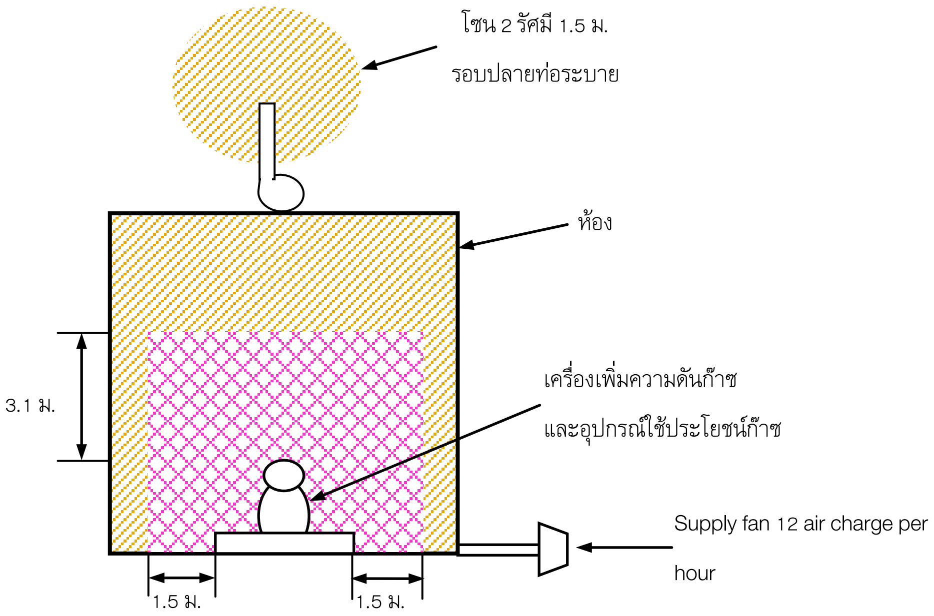
รูปที่ 9.8 แสดงการจัดแบ่งโซนที่ระบบผลิต/เก็บก๊าซแบบ Cover lagoon

ระบบผลิตและเก็บก๊าซแบบ Cover Lagoon ปกติมักเก็บก๊าซที่ความดันไม่เกิน 5 มิลลิเมตรน้ำ ทั้งรูปแบบใช้น้ำซีลเก็บก๊าซ และแบบใช้ดินทับชาย หรือขอบแผ่นพลาสติกที่ใช้คลุมเก็บก๊าซ ระบบนี้ มักพบก๊าซรั่วซึมบ่อยๆ ที่รางน้ำซีล ตามแนวรอยเชื่อมพลาสติก หรือรอยแผลที่เกิดบนแผ่นพลาสติกเอง โซนที่ 1 กำหนดไว้ที่ระยะ 1 เมตรจากขอบรางน้ำที่ใช้ซีล หรือขอบที่ใช้ดินทับ โซน 2 อยู่ต่อจากโซนที่ 1 มีระยะห่างจากขอบรางน้ำที่ใช้ซีล หรือขอบที่ใช้ดินทับ 1.5 เมตร ระยะที่ใช้กำหนดโซนนี้เป็นระยะที่เพียงพอสำหรับกรณีแผลฉีกขาด ไม่เกิน 1 มม.x 50 มม. หรือพื้นที่หน้าตัดไม่เกิน 50 ตารางมิลลิเมตร โดยความเข้มข้นของก๊าซที่ระยะ 1 เมตร (โซน 1) จากรอยรั่วต่ำกว่า 50% ของค่า LEL และที่ระยะ 1.5 เมตร (โซน 2) ความเข้มข้นของก๊าซมีเทนต่ำกว่า 25% ของค่า LEL

9.1.6.3 การจัดแบ่งโซนที่เครื่องเพิ่มความดันก๊าซและอุปกรณ์ใช้ประโยชน์ก๊าซชีวภาพ

ก. การจัดแบ่งโซนที่เครื่องเพิ่มความดันก๊าซ และอุปกรณ์ใช้ประโยชน์ก๊าซชีวภาพในห้องที่มีระบบ Ventilation ที่อัตราการระบายอย่างน้อย 12 เท่าของห้องต่อหนึ่งชั่วโมง (Air change rate per hour)

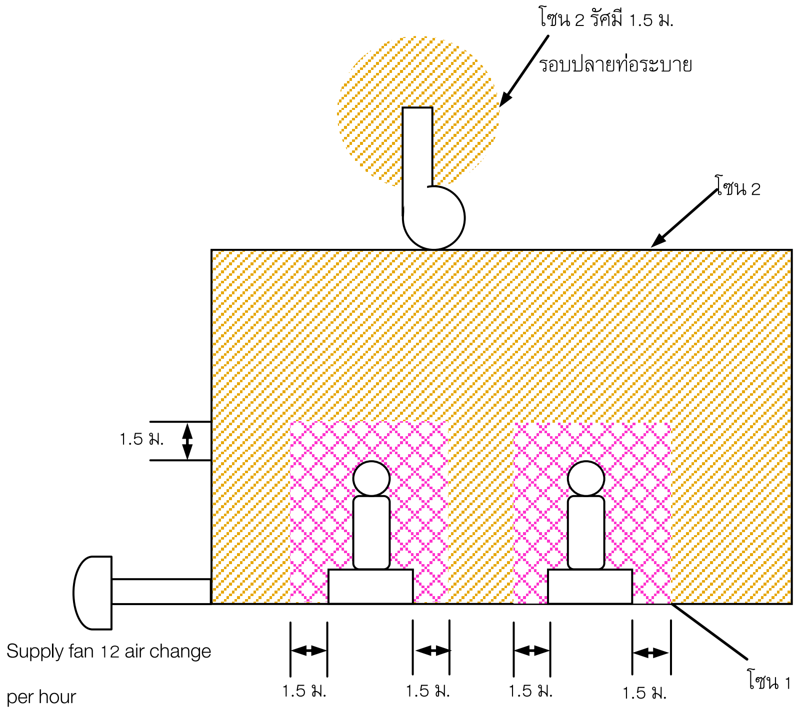
ในห้องปิดที่ติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มความดันก๊าซ หรืออุปกรณ์ใช้ประโยชน์ ต้องออกแบบให้มีการระบายอากาศอย่างเพียงพอ อัตราการระบายอย่างน้อย 12 เท่าของปริมาตรห้องต่อชั่วโมง นอกจากนี้ ยังจำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับก๊าซรั่วไหลในตำแหน่งที่สามารถตรวจจับก๊าซที่รั่วไหลได้ดีอีกด้วย และตำแหน่งที่ติดตั้งต้องไม่เป็นจุดที่ถูกอากาศจากพัดลมระบายรบกวนจนไม่สามารถตรวจวัดได้ โซน1 อยู่รอบๆ อุปกรณ์ 1.5 เมตร และด้านบน 3.1 เมตร โซน 2 อยู่ต่อออกไปจากโซน 1 ทั่วทั้งห้อง ดังรูปที่ 9.9



รูปที่ 9.9 แสดงการจัดแบ่งโซนที่เครื่องเพิ่มความดันก๊าซและอุปกรณ์ใช้ประโยชน์ก๊าซชีวภาพในห้องที่มีระบบ Ventilation ที่อัตราการระบายอย่างน้อย 12 เท่าของปริมาตรห้องต่อหนึ่งชั่วโมง (Air change rate per hour)

ข. การจัดแบ่งโซนที่เครื่องเพิ่มความดันก๊าซและอุปกรณ์ใช้ประโยชน์ก๊าซชีวภาพหลายเครื่องในห้องที่มีระบบ Ventilation ที่อัตราการระบายอย่างน้อย 12 เท่าของปริมาตรห้องต่อหนึ่งชั่วโมง (Air change rate per hour)

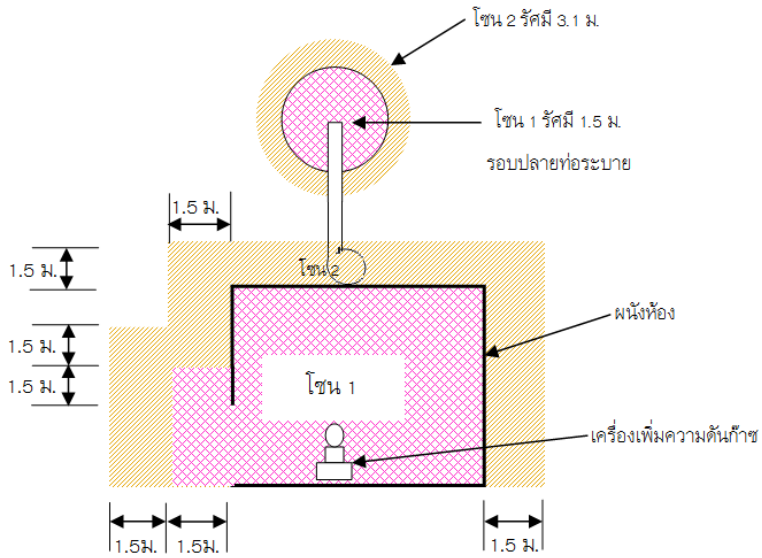
กรณีที่ในห้องปิดมีอุปกรณ์เพิ่มความดันหรือใช้ประโยชน์หลายตัว มีการระบายอากาศที่เพียงพออย่างน้อย 12 เท่าของห้องต่อชั่วโมง การจัดแบ่งโซนดังรูปที่ 9.10



รูปที่ 9.10 แสดงการจัดแบ่งโซนที่เครื่องเพิ่มความดันก๊าซและอุปกรณ์ใช้ประโยชน์ก๊าซชีวภาพหลายเครื่องในห้องที่มีระบบ Ventilation ที่อัตราการระบายอย่างน้อย 12 เท่าของห้องต่อหนึ่งชั่วโมง (Air change rate per hour)

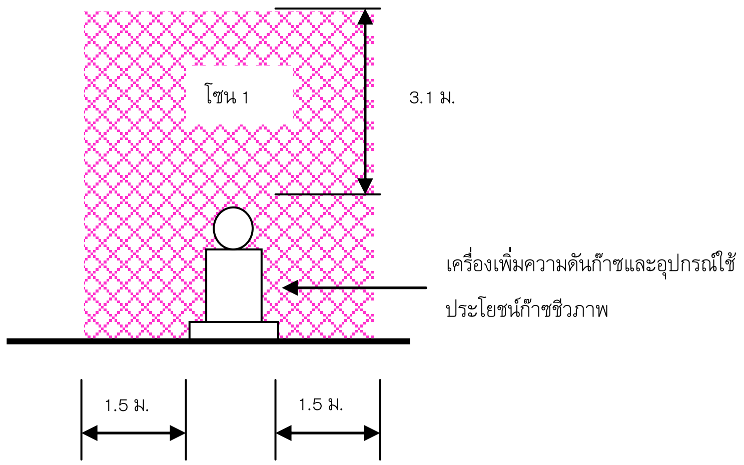
ค. การจัดแบ่งโซนที่เครื่องเพิ่มความดันก๊าซและอุปกรณ์ใช้ประโยชน์ก๊าซชีวภาพในห้องที่มีระบบ Ventilation ที่อัตราการระบายต่ำกว่า 12 เท่าของปริมาตรห้องต่อหนึ่งชั่วโมง หรือการระบายแบบธรรมชาติ

ในกรณีที่ในห้องที่มีอุปกรณ์ใช้ประโยชน์ หรืออุปกรณ์เพิ่มความดันก๊าซมีการระบายอากาศต่ำกว่า 12 เท่าของห้องต่อชั่วโมง หรือไม่ใช้ระบบระบายอากาศแบบบังคับ ใช้วิธีการระบายอากาศแบบธรรมชาติ การกำหนดโซนจะแตกต่างจากห้องปิดที่มีการระบายอากาศที่เพียงพอ ดังแสดงในรูปที่ 9.11



รูปที่ 9.11 แสดงการจัดแบ่งโซนที่เครื่องเพิ่มความดันก๊าซและอุปกรณ์ใช้ประโยชน์ก๊าซชีวภาพ ในห้องที่มีระบบ Ventilation ที่อัตราการระบายต่ำกว่า 12 เท่าของห้องต่อหนึ่งชั่วโมง หรือใช้วิธีการระบายแบบธรรมชาติ

ค. การจัดแบ่งโซนที่เครื่องเพิ่มความดันก๊าซและอุปกรณ์ใช้ประโยชน์ก๊าซชีวภาพในพื้นที่โล่งกลางแจ้ง

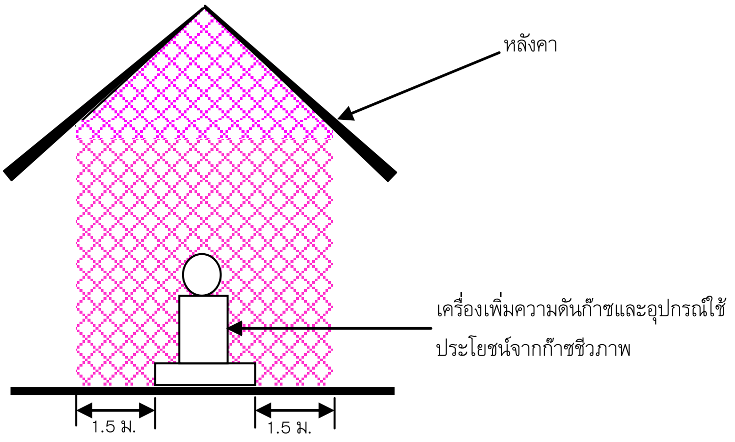


รูปที่ 9.12 แสดงการจัดแบ่งโซนที่เครื่องเพิ่มความดันก๊าซและอุปกรณ์ใช้ประโยชน์ก๊าซชีวภาพในพื้นที่โล่งกลางแจ้ง

สำหรับกรณีอุปกรณ์เพิ่มความดันก๊าซ หรืออุปกรณ์ใช้ประโยชน์อยู่ในที่โล่ง การระบายอากาศเป็นแบบธรรมชาติ กำหนดให้โซน 1 อยู่รอบๆ อุปกรณ์ ระยะ 1.5 เมตร ด้านข้าง และด้านบนเหนือขึ้นไป 3.1 เมตร

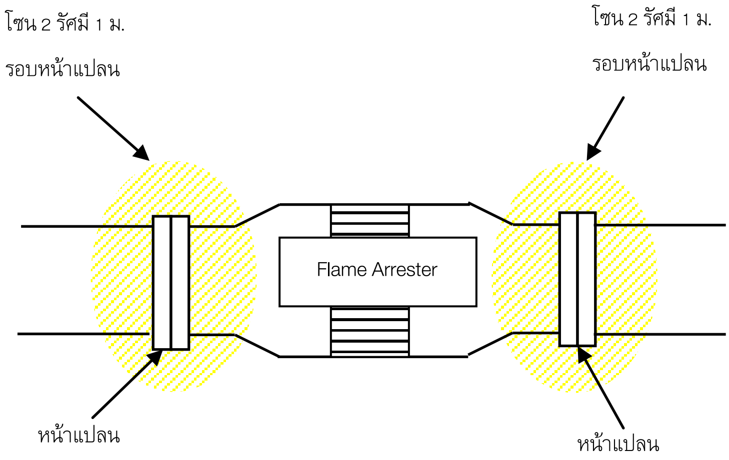
ง. การจัดแบ่งโซนที่เครื่องเพิ่มความดันก๊าซและอุปกรณ์ใช้ประโยชน์ก๊าซชีวภาพในอาคารเปิดแบบไม่มีผนังห้อง การระบายแบบธรรมชาติ

กรณีอุปกรณ์เพิ่มความดัน หรือใช้ประโยชน์ก๊าซชีวภาพที่ติดตั้งภายในอาคารโล่งไม่มีผนัง การระบายอากาศเป็นแบบธรรมชาติ การกำหนดโซนดังแสดงในรูปที่ 9.13



รูปที่ 9.13 แสดงการจัดแบ่งโซนที่เครื่องเพิ่มความดันก๊าซและอุปกรณ์ใช้ประโยชน์ก๊าซชีวภาพในอาคารเปิดแบบไม่มีผนังห้อง การระบายแบบธรรมชาติ

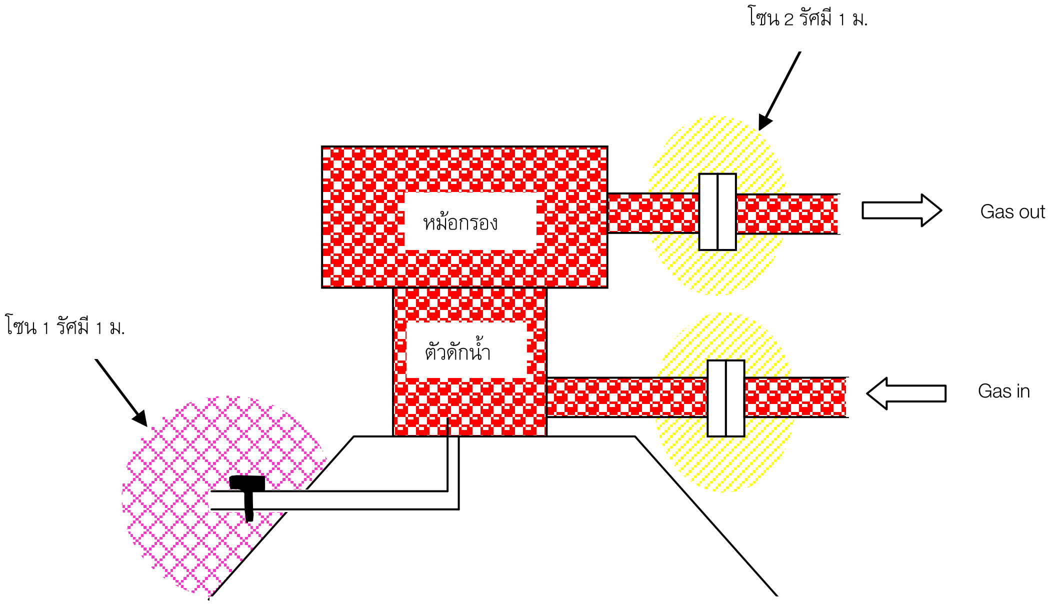
9.1.6.4 การจัดแบ่งโซนที่อุปกรณ์ป้องกันไฟย้อนกลับ หรือ Flame Arrester



รูปที่ 9.14 แสดงการจัดแบ่งโซนที่อุปกรณ์ป้องกันไฟย้อนกลับ หรือ Flame Arrester

9.1.6.5 การจัดแบ่งโซนที่อุปกรณ์ดักน้ำประเภทต่างๆ

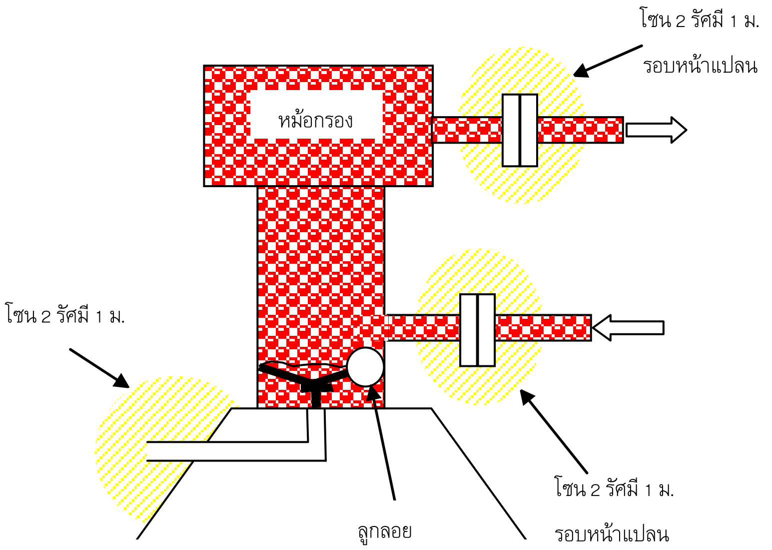
ก. การจัดแบ่งโซนเครื่องดักน้ำและหม้อกรองที่ติดตั้งด้านก่อนเข้าเครื่องเพิ่มความดันและใช้วิธีการถ่ายน้ำแบบ manual



รูปที่ 9.15 แสดงการจัดแบ่งโซนเครื่องดักน้ำและหม้อกรองติดตั้งด้านก่อนเข้าเครื่องเพิ่มความดัน วิธีการถ่ายน้ำแบบ manual

ถังนี้เป็นอุปกรณ์กรองก๊าซก่อนเข้าโบลวเวอร์ ปกติติดตั้งในพื้นที่โล่ง การระบายคอนเดนเสทแบบ manual บางครั้งอาจจะมีการรั่วไหลของก๊าซบ้างเล็กน้อยขณะที่มีการระบายน้ำจนหมด ปกติวาล์วจะปิดอยู่เมื่อไม่มีการระบายน้ำ ภายในถังดักน้ำเป็นโซน 0 ด้วย แต่รอบๆ ของจุดที่ระบายน้ำจะเป็นโซน 1 มีรัศมี 1 เมตร เนื่องจากถูกจัดระดับให้มีการรั่วไหลระดับปฐมภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 9.15

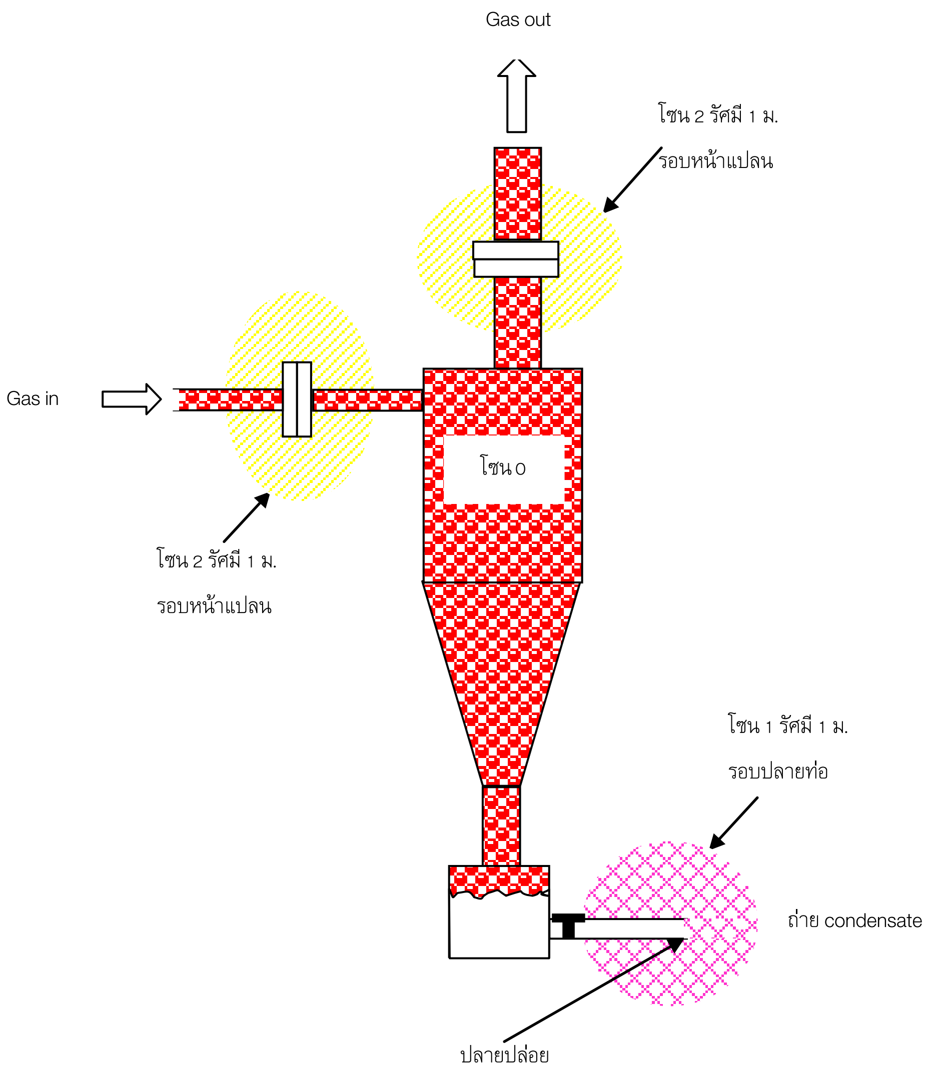
ข. การจัดแบ่งโซนที่เครื่องดักน้ำและหม้อกรองติดตั้งด้านก่อนเข้าเครื่องเพิ่มความดัน วิธีการถ่ายน้ำออกแบบใช้ลูกลอย



รูปที่ 9.16 แสดงการจัดแบ่งโซนที่เครื่องดักน้ำและหม้อกรองติดตั้งด้านก่อนเข้าเครื่องเพิ่มความดัน วิธีการถ่ายน้ำออกแบบใช้ลูกลอย

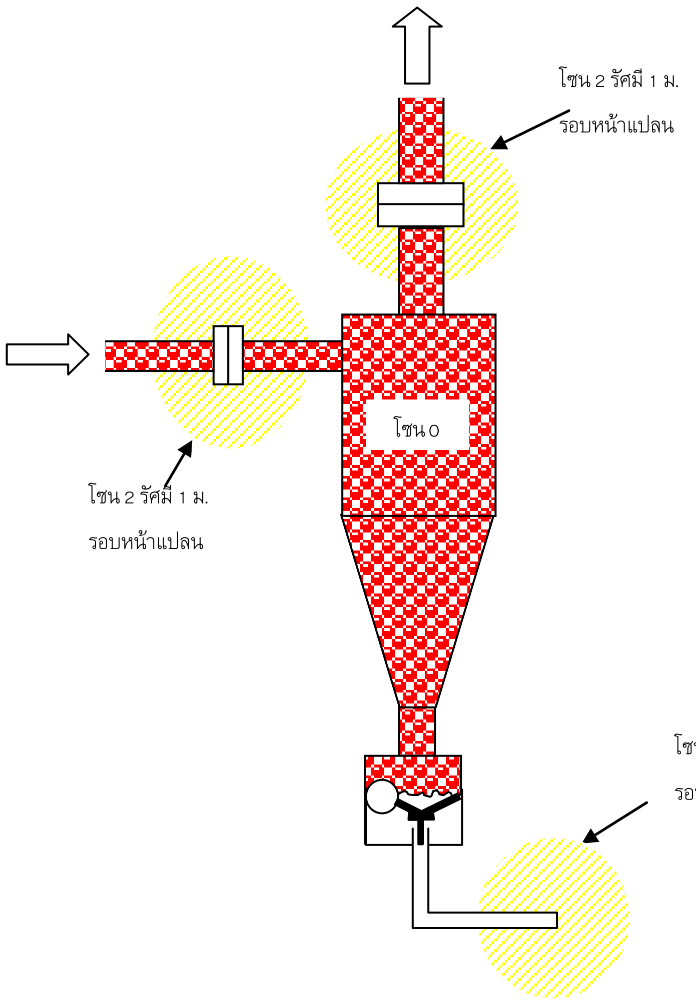
ถังนี้ออกแบบมาเพื่อดักคอนเดนเสทที่เหลืออยู่น้อยแล้วจากก๊าซ และควรติดตั้งอยู่ในพื้นที่โล่ง การระบายน้ำออกใช้วาล์วลูกลอย เมื่อคอนเดนเสทสะสมในถังเก็บน้ำสูงถึงระดับหนึ่ง ลูกลอยก็จะเปิดวาวล์ระบายน้ำออก เมื่อระดับน้ำลดลูกลอยก็จะปิดวาล์วระบาย ความผิดพลาดส่วนใหญ่จะเกิดจากการติดขัดของวาล์วซึ่งจะเปิดค้าง ทำให้มีการรั่วของก๊าซที่ปลายท่อระบายน้ำหลังจากที่ระดับน้ำในถังเก็บน้ำคอนเดนเสทหมด แบบนี้ถือว่ามีระดับการรั่วในระดับทุติยภูมิ กรณีที่ขาดการดูแลโซนอาจจะเปลี่ยนจากโซน 2 เป็นโซน 1 ได้ เช่น กรณีที่ซีลรั่วทำให้ปิดไม่สนิทจึงมีก๊าซรั่วออกมาทีละน้อยที่ปลายท่อระบายน้ำ กรณีเช่นนี้จะถือว่ามีระดับการรั่วในระดับปฐมภูมิที่โซน 1

ค. ไซโคลน/อุปกรณ์แยกน้ำ ติดตั้งทางด้านขาออกของเครื่องเพิ่มความดัน วิธีการถ่ายน้ำแบบ manual



รูปที่ 9.17 แสดงการจัดแบ่งโซนที่ไซโคลน/อุปกรณ์แยกน้ำ ติดตั้งทางด้านขาออกของเครื่องเพิ่มความดัน วิธีการถ่ายน้ำแบบ manual

ง. การจัดแบ่งโซนที่ไซโคลน/อุปกรณ์แยกน้ำติดตั้งทางด้านขาออกของเครื่องเพิ่มความดัน วิธีการถ่ายน้ำแบบลูกลอย



รูปที่ 9.18 แสดงการจัดแบ่งโซนที่ไซโคลน/อุปกรณ์แยกน้ำติดตั้งทางด้านขาออกของ เครื่องเพิ่มความดัน วิธีการถ่ายน้ำแบบลูกลอย

9.2 การเดินสายไฟฟ้าบริเวณพื้นที่อันตราย

9.2.1 วิธีเดินสายไฟฟ้าในพื้นที่อันตราย สายไฟฟ้าต้องร้อยภายในท่อโลหะอย่างหนา

9.2.2 กล่อง เครื่องประกอบการเดินท่อ ท่ออ่อนและข้อต่อท่อต้องเป็นชนิดที่มีเกลียวใน สำหรับต่อเข้ากับท่อร้อยสายไฟฟ้า หรือเครื่องประกอบปลายสายเคเบิลและต้องเป็นชนิดทนการระเบิด ข้อต่อที่เป็นเกลียว ต้องกินเกลียวกันอย่างน้อย 5 เกลียว

9.2.3 ท่อร้อยสายไฟจะต้องมีการปิดผนึกเพื่อป้องกันไม่ให้ก๊าซซึม หรือไหลผ่านท่อร้อยสายไฟจากจุดหนึ่งไปยังจุดอื่นๆ ได้

9.2.4 การผนึกนั้น สารปิดผนึก ต้องสามารถป้องกันการรั่วไหลของไอหรือก๊าซที่ข้อต่อปิดผนึกได้ ต้องทนต่อสภาวะแวดล้อมได้ และมีจุดหลอมเหลวไม่ต่ำกว่า 93 องศาเซลเซียส การใส่สารปิดผนึกลงในข้อต่อปิดผนึก ความหนาของสารปิดผนึกต้องไม่น้อยกว่าขนาดระบุของท่อร้อยสายไฟฟ้า และไม่ว่ากรณีใดๆ สารปิดผนึกต้องหนาไม่น้อยกว่า16 มิลลิเมตร (5/8 นิ้ว) ห้ามต่อสายภายในข้อต่อปิดผนึกและห้ามใช้สารปิดผนึกหุ้มขั้วต่อสายหรือขั้วต่อแยกสาย

9.2.5 สายเมนเส้นเฟสทุกเส้นที่ต่อเข้าไปในพื้นที่อันตราย ต้องป้องกันด้วยเครื่องล่อฟ้า (Surge Arrester) ที่เหมาะสม การติดตั้งและการต่อลงดินของเครื่องล่อฟ้าให้เป็นไปตามข้อกำหนดไว้ในมาตรฐานเพื่อความปลอดภัยทางไฟฟ้า เรื่องการต่อลงดินตามมาตรฐานการติดตั้งทางไฟฟ้าสำหรับประเทศไทย พ.ศ.2545 เครื่องล่อฟ้าถ้าติดตั้งอยู่ในพื้นที่อันตรายโซน1 ต้องอยู่ภายในกล่องหุ้มชนิดทนการระเบิด หรือกล่องหุ้มชนิดอัดอากาศบริสุทธิ์และควบคุมแรงอัดภายใน (Purge and Pressurized)

9.2.6 ระบบไฟฟ้า เครื่องใช้ไฟฟ้า และอุปกรณ์ไฟฟ้า ต้องต่อลงดิน รายละเอียดและวิธีการต่อลงดินให้เป็นไปตามที่กำหนดไว้ในมาตรฐานการติดตั้งทางไฟฟ้าสำหรับประเทศไทย พ.ศ.2545

9.2.7 ข้อกำหนดหลักเกณฑ์ของสายไฟฟ้า และวิธีการเดินสายไฟฟ้าทั่วไป ซึ่งไม่ได้ระบุไว้ในข้อกำหนดนี้ ให้เป็นไปตามมาตรฐานการติดตั้งทางไฟฟ้าสำหรับประเทศไทย พ.ศ.2545

9.3 การต่อฝากและการต่อลงดิน

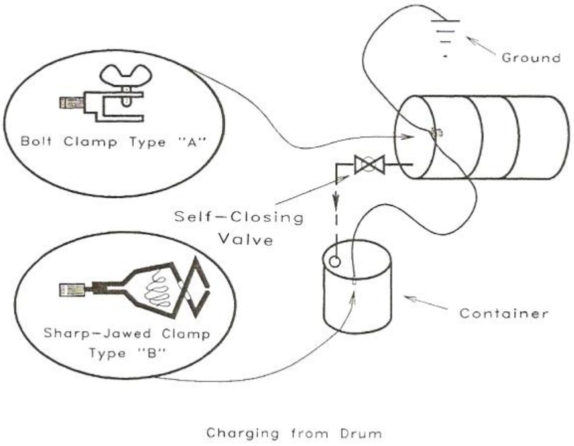
(**ที่มา ;** มาตรฐาน ว.ส.ท. 2004-45 , 2545)

การป้องกันการสปาร์กจากประจุไฟฟ้าสถิต สามารถทำได้โดยการใช้ถังบรรจุและท่อนำสารไวไฟที่สามารถนำไฟฟ้าได้ และการป้องกันการเกิดประจุไฟฟ้าสะสมบนพื้นผิววัสดุตัวนำดังกล่าว ทำได้โดยการต่อฝากและต่อลงดิน (Bonding and Grounding) ซึ่งเป็นมาตรการป้องอันตรายจากไฟฟ้าสถิตที่สำคัญ การต่อฝาก คือการเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้าระหว่างโครงสร้างที่เป็นตัวนำไฟฟ้า 2 ส่วนเข้าด้วยกันโดยใช้ตัวนำไฟฟ้า ขนาดของตัวนำไฟฟ้าเป็นประเด็นที่สำคัญ แต่ความแข็งแรงของวัสดุตัวนำและความแนบแน่นของหน้าสัมผัสของจุดต่อเป็นเรื่องที่ต้องให้ความสำคัญมากกว่า การต่อฝากไม่สามารถแก้ปัญหาการสะสมของประจุไฟฟ้าสถิตได้ แต่จะช่วยกระจายการสะสมของประจุไฟฟ้าบนโครงสร้างหนึ่งๆ เมื่อมีการเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้าแล้วศักย์ไฟฟ้าของโครงสร้างทั้งสองจะเท่ากันซึ่งเรียกวิธีการนี้ว่า “Potential Equalization” เป็นการกำจัดความเสี่ยงของการถ่ายเทประจุระหว่างวัตถุ

การต่อกราวด์ คือการเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้าระหว่างโครงสร้างที่เป็นตัวนำไฟฟ้าลงสู่พื้นดินโดยใช้ตัวนำไฟฟ้า การต่อกราวด์สามารถแก้ปัญหาการสะสมของประจุไฟฟ้าสถิตย์บนวัสดุตัวนำได้ เพราะการเชื่อมต่อกันทาง

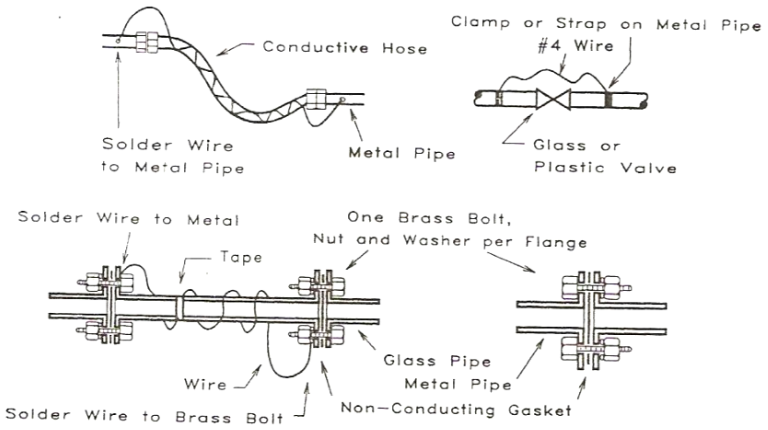
ไฟฟ้าจะช่วยถ่ายเทประจุไฟฟ้าลงสู่พื้นดิน ทำให้ศักย์ไฟฟ้าบนโครงสร้างนั้นเท่ากับพื้นดิน ตัวอย่างการทำศักย์ทางไฟฟ้าให้เท่ากัน(Potential Equalization) เช่น ตำแหน่งหน้าแปลนของส่งก๊าซระหว่างคู่ของหน้าแปลนต้องมีตัวนำต่อคร่อมหน้าแปลนเพื่อลดความต่างศักย์คร่อมหน้าแปลน โดยให้ความต้านทานสูงสุดคร่อมหน้าแปลนไม่เกิน 1×10^{6} โอห์ม

ระบบผลิตก๊าซชีวภาพจะมีระบบส่งก๊าซไปใช้งานที่อุปกรณ์ โดยทั่วไประบบส่งก๊าซจะใช้ท่อสแตนเลสเป็นท่อส่งซึ่งการเดินระบบจะมีจุดเชื่อมต่อระหว่างท่อส่งซึ่งจุดเชื่อมต่อระหว่างท่อนั้นจะมีประเก็นเพื่อกันก๊าซรั่ว แต่ประเก็นนั้นมีคุณสมบัติที่เป็นฉนวนไฟฟ้า ทำให้ต้องมีการต่อฝากและต่อลงดินเพื่อลดการเกิดไฟฟ้าสถิตของระบบส่งก๊าซ การต่อฝากของวัสดุที่เป็นตัวนำสองชนิดจะช่วยทำให้ความต่างศักย์ของวัสดุทั้งสองลดลงโดยการเชื่อมต่อด้วยสายตัวนำเข้ากับวัสดุทั้งสอง โดยที่ระบบจะต้องมีการต่อลงดินเพื่อทำให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าของระบบเท่ากับพื้นดิน การต่อฝากและการต่อลงดินแสดงดังรูปที่ 9.19 9.20 และ 9.21



รูปที่ 9.19 แสดงลักษณะการต่อฝาก และการต่อลงดิน

(**ที่มา ;** Daniel A. Crowl and Joseph F. Louvar, Chemical Process Safety Fundamentals with Applications)



รูปที่ 9.20 แสดงลักษณะการต่อฝาก สำหรับวาล์ว ท่อ และหน้าแปลน

(**ที่มา ;** Daniel A. Crowl and Joseph F. Louvar, Chemical Process Safety Fundamentals with Applications)

รูปที่ 9.21 แสดงลักษณะการทำ Potential Equalization ของท่อและหน้าแปลน

9.4 ระบบป้องกันฟ้าผ่า

ความจำเป็นในการป้องกันฟ้าผ่า เกิดขึ้นเนื่องจากระบบการบำบัดน้ำเสียจะผลิตแก๊สที่ติดไฟและไวไฟ โดยที่ฟ้าผ่าสามารถทำให้เกิดความเสียหายกับบ่อแก๊สชีวภาพได้หลายรูปแบบตามที่นิยามในมาตรฐานของ IEC ดังนี้

D1 การบาดเจ็บแก่สิ่งมีชีวิตเนื่องจากผลทางไฟฟ้า

D2 ความเสียหายทางกายภาพเนื่องจากผลทางกล, ความร้อน, เคมี และการระเบิด

D3 ความล้มเหลวของระบบไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์เนื่องจากผลทางแม่เหล็กไฟฟ้า

ในพื้นที่ที่มีอันตรายจากการระเบิด ต้องมีมาตรการเพื่อหลีกเลี่ยงการระเบิดที่เกิดจากบรรยากาศโดยรอบระบบ ตามมาตรฐานการป้องกันฟ้าผ่า IEC 62305-3 ระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับอาคารและการติดตั้งในพื้นที่ที่เกี่ยวข้องกับการระเบิดต้องใช้ระบบป้องกันฟ้าผ่า class II

ในกรณีพิเศษที่มีการกำหนดมาตรการเพิ่มเติม จะต้องมีการตรวจสอบตาม IEC 62305-2 การวิเคราะห์ความเสี่ยงสามารถทำได้โดยวิธีการคำนวณตามที่ระบุไว้ใน IEC 62305-2 ดังนั้น เป็นไปได้ว่าการกำหนดความเสี่ยงของความเสียหายของอาคารหรือโครงสร้าง คนและอุปกรณ์ จากฟ้าผ่าเป็นไปได้ทั้งทางตรงและทางอ้อม ความเสี่ยงจากความเสียหายนั้นมีความจำเป็นต้องลดความเสี่ยงความเสียหายจากการเกิดฟ้าผ่าด้วยมาตรการป้องกันฟ้าผ่าเพื่อให้ไม่เกินค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้

มาตรฐาน IEC 62305-3 ได้ให้ข้อมูลเพิ่มเติมสำหรับอาคารหรือโครงสร้างพิเศษและความใกล้เคียงของคุณสมบัติตามข้อกำหนดสำหรับการป้องกันฟ้าผ่าของโรงงานก๊าซชีวภาพ ดังนั้นโรงงานก๊าซชีวภาพจึงต้องป้องกันฟ้าผ่าโดยการแยกตัวล่อฟ้าและระบบตัวนำ

9.4.1 ย่านป้องกันฟ้าผ่า (LPZ)

เมื่อพิจารณาถึงอันตรายจากฟ้าผ่า ย่านป้องกันฟ้าผ่าจะนิยามดังต่อไปนี้

9.4.1.1 ย่านด้านนอก

ย่านป้องกันฟ้าผ่า LPZ 0 คือ ย่านที่มีอันตรายเนื่องจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากฟ้าผ่าที่ไม่ลดทอน และที่ระบบภายในอาจได้รับกระแสกระโชก(Surge) จากฟ้าผ่าทั้งหมดหรือบางส่วน โดยย่านป้องกันฟ้าผ่า 0 แบ่งย่อยออกเป็น

ย่านป้องกันฟ้าผ่า $LPZ\ 0_A$ คือ ย่านที่มีอันตรายที่อาจจะถูกฟ้าผ่าโดยตรง ดังนั้นจึงได้รับกระแสฟ้าผ่าและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากฟ้าผ่าเต็มที่ ระบบภายในอาจได้รับกระแสกระโชกจากฟ้าผ่าทั้งหมด

ย่านป้องกันฟ้าผ่า $LPZ\ 0_B$ คือ ย่านที่ไม่ถูกฟ้าผ่าโดยตรงเนื่องจากมีการป้องกันฟ้าผ่าโดยตรงด้วยระบบตัวนำล่อฟ้า แต่ยังได้รับผลของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ยังไม่มีการลดทอน ระบบภายในอาจได้รับกระแสกระโชกจากฟ้าผ่าบางส่วนได้

9.4.1.2 ย่านด้านใน (ย่านที่มีการป้องกันฟ้าผ่าโดยตรง)

ย่านป้องกันฟ้าผ่า LPZ 1 *คือ* ย่านป้องกันสืบเนื่อง มีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันกระแสกระโชก ผลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นอยู่กับมาตรการกำบัง

ย่านป้องกันฟ้าผ่า LPZ 2 คือย่านป้องกันที่อยู่ในอาคาร ไม่มีแหล่งกำเนิดกระแสทรานเซียนต์หรือแรงดันไฟฟ้าเกิน การกำบังและการวางวงจรแยกจากกัน ซึ่งอาจรบกวนซึ่งกันและกันได้

ย่านป้องกันฟ้าผ่า LPZ n คือ ย่านป้องกันฟ้าผ่าสืบเนื่อง มีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกัน รวมทั้งมีการกำบังที่ดี ผลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าไม่มีการรบกวนในย่านนี้ ความหมายของ n คือ การเลือกอุปกรณ์ป้องกันในย่านที่สูงขึ้น ค่าพารามิเตอร์ทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าต่ำลง

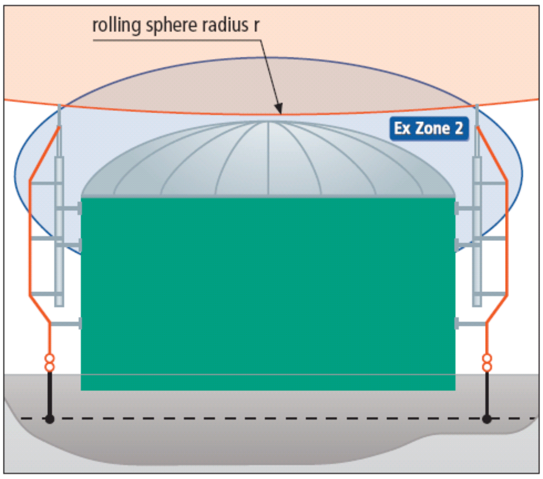
9.4.2 การป้องกันฟ้าผ่าภายในและภายนอก

ถังปฏิกรณ์เป็นส่วนสำคัญของระบบก๊าซชีวภาพ ระบบหมักมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับการออกแบบ ดังนั้นระบบป้องกันฟ้าผ่าจำเป็นต้องปรับให้มีความสอดคล้องกับโครงสร้างของถังปฏิกรณ์นั้นๆ เสมอ ข้อกำหนดทั่วไปของวิธีการต่างๆ ในการป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบก๊าซชีวภาพมีกล่าวอยู่ในระบบป้องกันฟ้าผ่า class II

ระบบป้องกันฟ้าผ่าประกอบด้วยการป้องกันฟ้าผ่าภายในและภายนอกซึ่งหน้าที่ของการป้องกันฟ้าผ่าภายนอกคือ การตัดจุดฟ้าผ่าทั้งหมดรวมถึงด้านในอาคารหรือโครงสร้างที่จะเกิดฟ้าผ่าจากจุดบนพื้นดินและกระจายในพื้นดินโดยไม่มีความเสียหายที่อาคารหรือที่โครงสร้าง เพื่อป้องกันผลกระทบอันเนื่องจากความร้อน พลังงานกล หรือไฟฟ้า

9.4.3 ถังปฏิกรณ์และโดมเก็บแก๊ส

ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพส่วนใหญ่ ถังปฏิกรณ์กับโดมเก็บแก๊ส มักจะใช้แผ่นพลาสติกที่สามารถหยุดความเสียหายจากฟ้าผ่าได้ จุดที่อาจจะทำให้เกิดความเสี่ยงของการเกิดไฟไหม้และระเบิดที่มาจากสาเหตุของฟ้าผ่าจะต้องมีมาตรการป้องกันและต้องออกแบบในลักษณะที่จะไม่ให้ฟ้าผ่าลงโดมของถังปฏิกรณ์โดยตรง ดังรูปที่ 9.22

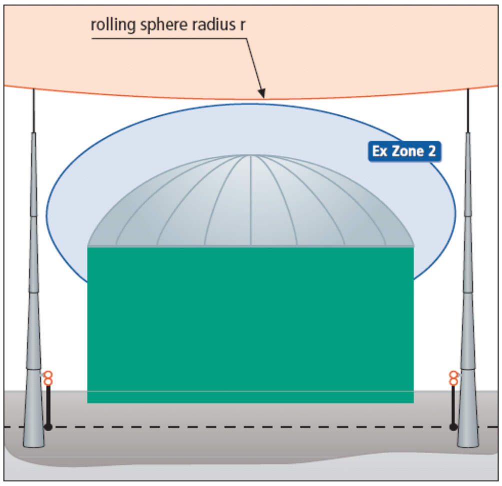


รูปที่ 9.22 แสดงลักษณะการออกแบบระบบฟ้าผ่า (**ที่มา** ; www.dehn.de)

ความปลอดภัยสำหรับโรงงานผลิตก๊าซชีวภาพ จะถูกกำหนดให้อยู่ในพื้นที่ 7.7 เมตร รอบโดมของถังปฏิกรณ์เป็นโซน 2 บรรยากาศการระเบิดที่เกิดขึ้นในโซน 2 นี้ถือว่าเป็นเหตุการณ์ที่ไม่เกิดขึ้นบ่อยและเกิดขึ้นชั่วคราวเท่านั้น ซึ่งหมายความว่าโซน 2 ถ้ามีการระเบิดจะพิจารณาเฉพาะที่ไม่มีการดำเนินงาน (ในกรณีของความผิดพลาด เช่น การซ่อมแซม / ซ่อมบำรุง) ดังนั้น ตามมาตรฐาน IEC 62305-3 ยอมให้ติดตั้งเสาล่อฟ้าอยู่ในโซน 2 ได้

หลักการทรงกลมกลิ้ง(Rolling Sphere Radius) ใช้กำหนดความสูงและจำนวนการติดตั้งเสาล่อฟ้า การเลือกขนาดของเสาล่อฟ้าตามวิธีทรงกลมกลิ้งนี้สามารถคำนวณได้ตามมาตรฐาน IEC 62305-3 สำหรับการติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าในพื้นที่ที่อาจจะเกิดการเบิดได้ในระบบก๊าซชีวภาพนี้ตามวิธีการป้องกัน Class II ต้องใช้วิธีทรงกลมกลิ้งรัศมี 30 เมตร ดังรูปที่ 9.22

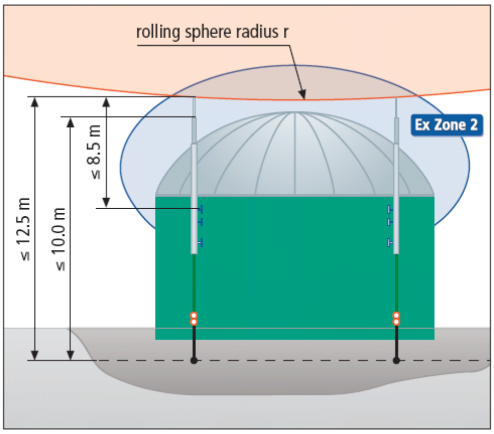
ความเป็นไปได้อีกวิธีหนึ่งเพื่อหลีกเลี่ยงฟ้าผ่าโดยตรงที่โดมของถังปฏิกรณ์ก็คือการใช้เสาเหล็กป้องกันฟ้าผ่า เสาเหล็กนี้ติดตั้งอยู่บนพื้นดินหรือพื้นคอนกรีต ความสูงของเสาแบบนี้ที่มีจำหน่ายกันสูงถึง 21 เมตรเหนือระดับพื้นดิน หรือความสูงมากกว่านี้ก็อาจทำได้ขึ้นอยู่กับการคำนวณ ดังรูปที่ 9.23



รูปที่ 9.23 แสดงลักษณะการป้องกันถังปฏิกรณ์ที่มีโดมคลุมด้วยเสาเหล็กป้องกันฟ้าผ่า (**ที่มา** ; www.dehn.de)

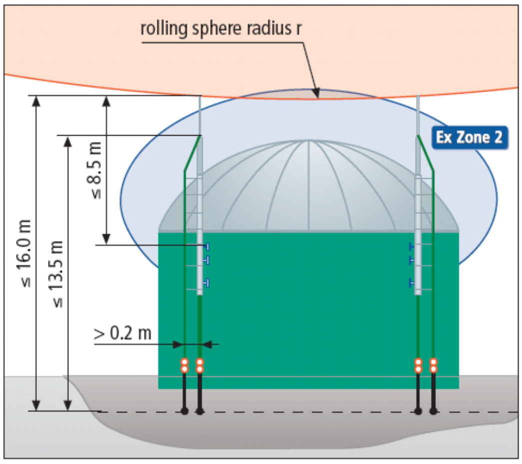
ความเป็นไปได้ที่จะป้องกันถังปฏิกรณ์กับโดมที่โดนฟ้าผ่าโดยตรงอีกวิธีหนึ่งก็คือการใช้ตัวนำเชื่อมต่อและดัดแปลงพิเศษ ตัวนำต้องเป็นตัวนำที่ทนแรงดันได้สูง โดยเฉพาะด้านนอกต้องเคลือบด้วยฉนวนชนิดพิเศษ ตัวนำที่ใช้ในการป้องกันฟ้าผ่ามีสองรูปแบบคือ

1) รูปแบบเสาของตัวนำล่อฟ้าต่อแบบหนึ่งตัวนำ ความยาวสูงสุดของระบบตัวนำล่อฟ้าจากระบบสายดินสู่ระบบตัวนำล่อฟ้าคือ 12.5 เมตร ความยาวอิสระสูงสุดเหนือขอบบนของถังปฏิกรณ์จะต้องไม่เกิน 8.5 เมตร (ด้วยเหตุผลเรื่องความแข็งแรงในการติดตั้ง) ดังรูปที่ 9.24



รูปที่ 9.24 แสดงถังปฏิกรณ์ทีมีเสาเหล็กป้องกันฟ้าผ่าที่มี 1 ตัวนำ (**ที่มา**; www.dehn.de)

2) รูปแบบเสาของตัวนำล่อฟ้าต่อแบบสองตัวนำ (รูปที่ 9.25) ความยาวสูงสุดของระบบตัวนำล่อฟ้าจากระบบสายดินสู่ระบบตัวนำล่อฟ้าเป็นระยะเป็น 16 เมตร ความยาวอิสระสูงสุดเหนือขอบบนของถังปฏิกรณ์เป็น 8.5 เมตรเช่นกัน



รูปที่ 9.25 แสดงถังปฏิกรณ์ที่มีเสาเหล็กป้องกันฟ้าผ่าที่มี 2 ตัวนำ (**ที่มา ;** www.dehn.de)

9.5 มาตรการควบคุมในการลดความเสี่ยงจากเพลิงไหม้

การติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าในพื้นที่อันตรายให้ใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดกันระเบิดตามที่ได้กล่าวไว้แล้วในขั้นต้น มาตรการควบคุมในการลดความเสี่ยงจากเพลิงไหม้ อื่นๆ ที่ควรพิจารณา เช่น

- การตัดกระแสไฟฟ้าในระหว่างการดำเนินบำรุงรักษาและซ่อมแซมอุปกรณ์ไฟฟ้า ควรมีการตัดกระแสไฟฟ้าอย่างถูกวิธี พร้อมทั้งติดป้ายเตือน
- จัดให้มีอุปกรณ์ช่วยดับเพลิงในบริเวณที่มีความเสี่ยง หรือเป็นจุดๆ ตามความเหมาะสม พร้อมมีป้ายหรือเครื่องหมายบอกให้ชัดเจน
- จัดการอบรมให้ผู้ปฏิบัติงานที่ควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าให้สามารถปฏิบัติตามวิธีการทำงานอย่างถูกต้องและปลอดภัย
- บำรุงรักษาอุปกรณ์ไฟฟ้าอย่างสม่ำเสมอและมีประสิทธิภาพ รวมทั้งต้องมีการจัดการอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ผิดปกติหรือทำงานผิดพลาดทันที
- ติดตั้งไฟฟ้าสำรองโดยใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล เพื่อผลิตไฟฟ้าสำรองในกรณีที่ระบบไฟฟ้าถูกตัดขาดจากการเกิดเพลิงไหม้ ไฟฟ้าสำรองนี้ จำเป็นสำหรับการควบคุมถังปฏิกรณ์และใช้ในการเพิ่มแรงดันให้กับน้ำดับเพลิงหรือในท่อหรือการปั๊มน้ำจากภายนอกเข้าสู่ระบบท่อดับเพลิง

9.6 ความเป็นพิษของก๊าซและสถานที่อับอากาศ

9.6.1 นิยาม และความหมายของคำศัพท์

- STEL (Short-term Exposure Limit) หมายถึง ค่าความเข้มข้นสูงสุดที่ผู้ปฏิบัติงานสามารถจะสัมผัสอย่างต่อเนื่องในช่วงเวลาสั้นๆ (สัมผัสวันละ 4 ครั้งๆ ละ 15 นาที ห่างกัน 1 ชั่วโมง) โดยไม่ได้รับอันตราย เช่น การระคายเคือง มึนเมา หรืออาการเรื้อรัง
- TWA (Time-Weight Average) หมายถึง ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของสารเคมีในอากาศสำหรับการทำงาน 8 ชั่วโมงใน 1 วัน หรือ 40 ชั่วโมงต่อสัปดาห์ซึ่งผู้ปฏิบัติงานเกือบทั้งหมดสามารถสัมผัส (Exposure) ซ้ำแล้วซ้ำอีกวันแล้ววันเล่าโดยปราศจากอันตรายต่อสุขภาพ
- Peak หมายถึง ค่าวิกฤตที่วัดได้ในระหว่างช่วงเวลา (อาจจะเป็นค่าต่ำสุดหรือสูงสุดก็ได้)
- LEL (Lowe-Exposure Limit) หมายถึง ขีดจำกัดต่ำสุดของปริมาณสารที่อาจเกิดการระเบิดได้
- TLW (Threshold limit Values) หมายถึง ค่าความเข้มข้นของสารเคมีในอากาศ และสภาพแวดล้อมซึ่งเชื่อว่าผู้ปฏิบัติงานเกือบทั้งหมดสามารถทำงานอยู่ในสิ่งแวดล้อมนั้นวันแล้ววันเล่าโดยปราศจากผลเสียต่อสุขภาพ
- Ceiling หมายถึง ส่วนผสมสูงสุดของสารพิษซึ่งคนงานที่ไม่มีเครื่องป้องกันมีแนวโน้มอาจสัมผัสแม้แต่ในระยะสั้นๆ คนงานที่ไม่มีเครื่องป้องกันไม่ควรเข้าไปในพื้นที่อับอากาศซึ่งมีปริมาณสารพิษเกินค่า Ceiling
- เปอร์เซ็นต์ปริมาตร/ ปริมาตร หมายถึง ปริมาตรของก๊าซคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ต่อปริมาตรของอากาศ
- ppm. (Part per million) หมายถึง ส่วนในล้านส่วน
- ANSI หมายถึง American National Safety Institute
- NIOSH หมายถึง National Institute for Occupational Safety and Health
- OSHA หมายถึง Occupational Safety and Health Administration
- ACGIH หมายถึง A committee of American Conference of Government Industrial Hygienists
- IDLH หมายถึง Immediately Dangerous to Life and Health Concentrations คือ ค่าความเข้มข้นของสารเคมีสูงสุดเมื่อเกิดความบกพร่องจากอุปกรณ์ป้องกันการหายใจแล้วสามารถอพยพออกจากบริเวณนั้นภายใน 30 นาที โดยปราศจากอุปกรณ์ป้องกันการหายใจและไม่ก่อให้เกิดอาการระคายเคืองอย่างรุนแรงหรือมีผลต่อสุขภาพอนามัย

9.6.2 ก๊าซและความเป็นพิษ

ก๊าซชีวภาพ คือก๊าซที่เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ ภายใต้สภาวะที่ปราศจากออกซิเจน ประกอบด้วยก๊าซหลายชนิด ส่วนใหญ่คือก๊าซมีเทน (CH_4) ประมาณ 50-70 เปอร์เซ็นต์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ประมาณ 30-50 เปอร์เซ็นต์ และก๊าซอื่นๆ เช่น ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) ก๊าซไนโตรเจน และน้ำ เป็นต้น นอกจากนั้นก๊าซอื่นๆ ที่เกิดขึ้นจากการสลายตัว เป็นก๊าซที่ไม่มีอันตรายโดยตรงหรือไม่ทราบอันตราย แต่มีกลิ่นซึ่งรบกวน ก๊าซชนิดต่างๆ มีคุณสมบัติทางฟิสิกส์และทางเคมี ก่อให้เกิดพิษต่อคน สัตว์ และพืชได้ในลักษณะต่างๆ กัน ถ้าก๊าซเหล่านี้มีปริมาณที่สูงมาก อาจทำให้ปริมาณก๊าซออกซิเจนลดต่ำลงมากจนคนหมดสติหรือตายได้ถ้าช่วยไม่ทัน บางชนิดมีผลรบกวนต่อระบบประสาท บางชนิดมีผลระคายเคืองต่อเนื้อเยื่อบุในทางเดินหายใจและนัยน์ตา ซึ่งก๊าซที่มีความเป็นพิษในระบบก๊าซชีวภาพนั้น สามารถแบ่งได้ดังนี้

9.6.2.1 ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen sulphide) หรือ H_2S

ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ เป็นก๊าซไม่มีสี แต่มีกลิ่นเหมือนไข่เน่า ละลายได้ในน้ำ น้ำมันเชื้อเพลิง แอลกอฮอล์ เกิดจากการทำปฏิกิริยาของซัลไฟด์ของเหล็กกับกรดซัลฟูริคหรือกรดไฮโดรคลอริค หรือเกิดจากการเน่าเปื่อยของสารอินทรีย์ที่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นก๊าซติดไฟได้ เมื่อติดไฟแล้วจะให้เปลวไฟสีน้ำเงินและเกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออกมา ในก๊าซชีวภาพ นั้น ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยจุลินทรีย์ชนิดไม่ใช้อากาศในระบบบำบัดน้ำเสียหรือหลุมฝังกลบขยะ และถึงแม้ว่าก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ จะมีปริมาณน้อยมากในก๊าซชีวภาพแต่ยังคงมีอันตรายต่อสุขภาพเช่นกัน โดยการสัมผัสก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เพียงเล็กน้อยทำให้เกิดการระคายเคืองต่อดวงตาและปอด และถ้าหากสูดดมเข้าไปมากๆ อาจจะมีผลทำให้เสียชีวิตได้

ค่ามาตรฐานและความเป็นพิษของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

PEL/TWA	10 ppm
STEL	15 ppm
IDLH	300 ppm

9.6.2.2 ก๊าซมีเทน (Methane) หรือ CH_4

ก๊าซมีเทน เป็นก๊าซที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น แต่สามารถติดไฟได้ ซึ่งทำให้เกิดภาวะการขาดก๊าซออกซิเจน (Asphyxiant) ก๊าซมีเทน จะไม่ทำให้เกิดอาการระคายเคืองต่อตา จมูก และคอ แต่อาจทำให้เกิดอาการวิงเวียนศีรษะ หายใจติดขัด และหมดสติได้ ถ้าสูดดมเข้าไป มีเทนที่อยู่ในรูปของของเหลว จะไม่เป็นอันตรายต่อผิวหนัง เนื่องจากมีคุณสมบัติในการระเหยกลายเป็นไอได้อย่างรวดเร็ว แต่อย่างไรก็ตาม อาจทำให้เนื้อเยื่อตายได้เนื่องจากความเย็นจัด (Frostbite)

9.6.2.3 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide) หรือ CO_2

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นก๊าซที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น แต่ทำให้เกิดภาวะการขาดออกซิเจน (Asphyxiant) ได้ นอกจากนี้ การสัมผัสกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อยู่ในรูปของแข็ง อาจทำให้เกิดอาการไหม้ในบริเวณผิวหนังที่สัมผัสได้ ส่วนการสูดดมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ อาจทำให้เกิดอาการวิงเวียนศีรษะ คลื่นไส้ มึนงง หัวใจเต้นผิดปกติ และหายใจติดขัด ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าความเป็นอันตรายต่อชีวิตและสุขภาพ (Immediately Dangerous to Life and Health value : IDLH) เท่ากับ 40,000 ppm และค่า Threshold limit เท่ากับ 5,000 ppm

9.6.2.4 ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ (Carbon monoxide) หรือ CO

ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ เป็นก๊าซไม่มีสี ไม่มีกลิ่น และหากมีปริมาณมากจะเป็นพิษ เมื่อเข้าสู่ร่างกายโดยผ่านทางปอดแล้วจะแทรกซึมเข้าไปกับระบบไหลเวียนของเลือด ทำให้การทำงานของต่อมและเนื้อเยื่อต่างๆ ในร่างกายมีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนออกซิเจนลดลง สำหรับคนที่เป็นโรคหัวใจ เมื่อสัมผัสก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์เข้าไปมักจะเกิดผลรุนแรง ส่วนคนปกติทั่วไปจะเกิดผลต่างกันขึ้นอยู่กับสุขภาพของแต่ละบุคคล ได้แก่ ความสามารถในการมองเห็นความสามารถในการทำงานลดลง ทำให้เฉื่อยชาไม่กระฉับกระเฉง การเรียนรู้แย่ และไม่สามารถทำงานซับซ้อนได้

ค่ามาตรฐานและความเป็นพิษของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์

PEL/TWA	35 ppm
STEL	N/A
IDLH	1,200 ppm

9.6.2.5 ก๊าซไนตรัสออกไซด์ (Nitrous oxide) หรือ N_2O

ก๊าซไนตรัสออกไซด์ ที่อุณหภูมิห้องจะเป็นก๊าซไม่มีสีและไม่ติดไฟ แต่มีกลิ่นหอมอ่อนๆ และมีรสหวานเล็กน้อย จึงมีการนำก๊าซไนตรัสออกไซด์ไปใช้ในการผ่าตัดและทางทันตกรรมเพื่อให้เกิดอาการชาและเพื่อการระงับความปวด โดยทั่วไปรู้จักกันในชื่อ “ก๊าซหัวเราะ” เนื่องจากเมื่อสูดดมแล้วจะให้ความรู้สึกเคลิ้มสุขหรือครึ้มใจ เป็นคุณสมบัติที่ทำให้มีการใช้เป็นยาดม สามารถทำให้เสพติดได้ ซึ่งก๊าซไนตรัสออกไซด์อาจจะเกิดขึ้นได้เมื่อไนไตรท์และไนเตรทถูกย่อยสลายในสภาพที่ไม่มีอากาศ เช่น กระบวนการ denitrification หรือ เมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นของแอมโมเนียในสภาวะที่มีอากาศ ของเชื้อตะกอนจุลินทรีย์ที่ถ่ายออกจากระบบบำบัดน้ำเสีย การสูดดมก๊าซไนตรัสออกไซด์ทำให้เกิดอาการมึนงง เวียนศีรษะ จนถึงขาดอากาศหายใจ และทำให้หมดสติได้ ทำให้สติสัมปชัญญะ ความสามารถในการรับรู้รับฟัง และความคล่องแคล่วของร่างกายลดลงชั่วขณะ ที่สำคัญการสัมผัสก๊าซไนตรัสออกไซด์ติดต่อกันเป็นประจำอาจส่งผลร้ายต่อระบบสืบพันธุ์ของหญิงตั้งครรภ์ได้

ค่ามาตรฐานและความเป็นพิษของก๊าซไนตรัสออกไซด์

PEL/TWA	50 ppm
STEL	N/A
IDLH	N/A

9.6.2.6 ก๊าซแอมโมเนีย (Ammonia) หรือ NH_3

ก๊าซแอมโมเนียในระบบก๊าซชีวภาพ อาจเกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีองค์ประกอบของไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนีย ก๊าซแอมโมเนียเป็นก๊าซไม่มีสี แต่มีกลิ่นฉุน มีความเป็นพิษ และกัดกร่อน มีอันตรายต่อร่างกายเมื่อสัมผัสทางจมูก ตา ผิวหนัง อาการทั่วไป คือ ระคายเคือง อึดอัดหายใจไม่สะดวก เจ็บคอ แน่นหน้าอก ปอดและหลอดลมอักเสบ น้ำท่วมปอด ผลต่อระบบประสาทส่วนกลาง คลื่นไส้ อาเจียน เกร็งชัก ความดันโลหิตเพิ่ม ตาบอด ผิวหนังเป็นแผลเนื่องจากความเย็น ถ้าได้รับปริมาณสูงทำให้เสียชีวิตได้ในทันที กรณีสัมผัสที่ผิว จะมีลักษณะระคายเคือง คัน คล้ายเป็นโรคผิวหนัง อาการมากน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณ ระยะเวลา และความต้านทานของแต่ละบุคคล สำหรับอันตรายอื่นๆของก๊าซแอมโมเนีย ยังไม่ปรากฏรายงานว่าเป็นสารก่อมะเร็ง และเปลี่ยนแปลงลักษณะพันธุกรรมในมนุษย์

ค่ามาตรฐานและความเป็นพิษของก๊าซแอมโมเนีย

PEL/TWA	25 ppm
STEL	35
IDLH	300 ppm

9.6.3 สถานที่อับอากาศ

(**ที่มา ;** แนวปฏิบัติเพื่อความปลอดภัยในการปฏิบัติงานในสถานที่อับ กรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน)

9.6.3.1 ความหมายของสถานที่อับอากาศ

สถานที่อับอากาศ (Confined Spaces) หมายถึง สถานที่ทำงานที่มีทางเข้าออกจำกัด มีการระบายอากาศตามธรรมชาติไม่เพียงพอที่จะทำให้อากาศภายในอยู่ในสภาพถูกสุขลักษณะ และปลอดภัย ซึ่งอาจเป็นที่สะสมของสารเคมีเป็นพิษ สารไวไฟ รวมทั้งออกซิเจนไม่เพียงพอ เช่น ถังน้ำมัน ถังปฏิกรณ์ ไซโล ท่อ ถัง ถ้ำ บ่อ อุโมงค์ เตา ห้องใต้ดิน ภาชนะ หรือสิ่งอื่นที่มีลักษณะคล้ายกันนี้ **สำหรับระบบผลิตก๊าซชีวภาพบริเวณอับอากาศจะเป็นบริเวณที่มีก๊าซชีวภาพปรากฏ ได้แก่ ในถังปฏิกรณ์ บ่อ Sump บ่อถ่ายตะกอนเชื้อ หลุมแยกน้ำคอนเดนเสทออกจากก๊าซ หลุม(บ่อ)สำหรับงานบริการซ่อมท่อน้ำเสีย ท่อก๊าซ หรือสูบน้ำเสีย สูบน้ำคอนเดนเสทที่แยกจากก๊าซชีวภาพ เป็นต้น** การพิจารณาว่าพื้นที่ใดจัดเป็นพื้นที่อับอากาศ มีปัจจัยในการพิจารณาดังนี้

1) พื้นที่ซึ่งปริมาตรมีขนาดเล็ก ก๊าซหรือไอที่เกิดขึ้นในบริเวณนั้น ไม่สามารถระบายออกไปได้ ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ที่อยู่ในบริเวณนั้น อาจสูดดมเอาก๊าซพิษเข้าไปในร่างกายหรือมีออกซิเจนไม่เพียงพอ รวมถึงอาจมีก๊าซที่ติดไฟได้ในบริเวณนั้น
2) ผู้ปฏิบัติงานคนอื่นๆที่อยู่นอกพื้นที่นั้นจะเข้าไปสังเกตการณ์ หรือช่วยเหลือผู้ที่กำลังปฏิบัติงานได้ยาก
3) ช่องเปิด ทางเข้า-ออก อยู่ไกลจากจุดปฏิบัติงาน มีขนาดเล็ก หรือมีจำนวนจำกัด

รูปที่ 9.26 แสดงตัวอย่างพื้นที่อับอากาศ

9.6.3.2 อันตรายจากการปฏิบัติงานในสถานที่อับอากาศ

อันตรายจากการปฏิบัติงานในสถานที่อับอากาศ อาจมีอันตรายต่อสุขภาพพนักงานและความเสียหายอย่างอื่น เช่น ทรัพย์สิน หรืออาจถึงชีวิตเลยก็ได้ ซึ่งสรุปพอสังเขปได้ดังนี้

1) การขาดออกซิเจน ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของระบบการผลิตก๊าซชีวภาพที่เป็นระบบย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ชนิดไม่ใช้อากาศ ลักษณะของระบบจึงไม่มีอากาศอยู่แล้ว และในขณะที่มีการผลิตก๊าซชีวภาพ บริเวณที่เหนือขึ้นไปของชั้นหรือผิวด้านบนของปฏิกิริยาย่อยสลายสารอินทรีย์ ไม่ว่าจะเป็นปริมาตรที่ปิดหรือกึ่งปิด (ไม่มีการระบายอากาศที่เพียงพอ) จึงเต็มไปด้วยก๊าซชีวภาพ บรรยากาศดังกล่าวจึงขาดออกซิเจน
2) ไฟไหม้เนื่องจากการระเบิดของก๊าซที่ติดไฟได้ (Combustible Gas) ได้แก่ ก๊าซในตระกูลมีเทนและก๊าซอื่นๆ
3) อันตรายจากการสูดดมก๊าซพิษอื่นๆ
4) ประสิทธิภาพของการมองเห็นลดลงเนื่องจากแสงสว่างไม่เพียงพอหรือฝุ่นละออง
5) เสียงดัง
6) อุณหภูมิสูง
7) การหนีออกจากพื้นที่เมื่อเกิดกรณีฉุกเฉินมีอุปสรรค

9.6.3.3 การควบคุมความเสี่ยงในการเข้าทำงานในสถานที่อับอากาศ

ในการลดความเสี่ยงต่อการได้รับอันตรายสามารถดำเนินการได้ดังต่อไปนี้

1) **หลีกเลี่ยงการเข้าไปในสถานที่อับอากาศ** เช่น จัดให้มีวิธีการทำงานโดยที่ไม่ต้องส่งคนเข้าไปข้างใน อาทิเช่น

ก. การเลือกใช้เครื่องมือที่เหมาะสมสำหรับงานตรวจสอบ การเข้าสุ่มตัวอย่างหรือ การทำความสะอาด

ข. การเลือกใช้กล้องที่บังคับด้วย Remote control สำหรับงานตรวจสอบภายในถังขนาดใหญ่

2) **กรณีที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงการเข้าไปปฏิบัติงานภายในได้ ต้องมีระบบการทำงานอย่างปลอดภัย** ได้แก่

ก. จัดให้มีผู้ควบคุมงานเข้าดูแลรับผิดชอบ

ข. ดำเนินการโดยผู้ปฏิบัติงานได้รับการฝึกอบรมที่เหมาะสม และมีความรู้ความสามารถในการเข้าทำงานในสถานที่อับอากาศได้อย่างปลอดภัย

ค. ตัดการทำงานของเครื่องจักร, กระแสไฟฟ้า, การป้อนวัสดุ (Isolation)

ง. ทำความสะอาดก่อนเข้าดำเนินการ

จ. มีการตรวจสอบและดำเนินการให้มีช่องทางเข้าที่มีขนาดเหมาะสม

ฉ. มีการระบายอากาศที่เหมาะสม

ช. มีการตรวจสอบ วัดสภาพบรรยากาศในที่อับอากาศ (ปริมาณออกซิเจน, สารพิษ)

ซ. มีการใช้เครื่องมือที่เหมาะสมกับประเภทของงาน และมีแสงสว่างเพียงพอ

ฌ. มีการใช้เครื่องช่วยหายใจที่เหมาะสม

9.6.3.4 การปฏิบัติงานในสถานที่อับอากาศอย่างปลอดภัย

ก่อนเข้าทำงานในสถานที่อับอากาศ

ก. ตรวจสอบปริมาณออกซิเจน สารเคมี และก๊าซอื่นๆ เพื่อให้แน่ใจว่าจะไม่มีการขาดออกซิเจน หรือเกิดการระเบิด หรือมีความเป็นพิษเกิดขึ้น ซึ่งในระบบบำบัดน้ำเสียชนิดไม่ใช้อากาศหรือระบบผลิตก๊าซชีวภาพนั้น มีก๊าซที่ต้องตรวจวัดปริมาณดังนี้ $\%O_2$, $\%CH_4$, $\%CO_2$ และ $\% H_2S$

ข. จัดให้มีใบอนุญาตทำงานในพื้นที่อับอากาศ

ค. หากพบว่าสถานที่อับอากาศไม่อยู่ในสภาพที่ปลอดภัย จะต้องทำการระบายอากาศจนกว่าจะอยู่ในสภาพที่ปลอดภัย

ง. ผู้ปฏิบัติงานต้องทำความคุ้นเคยกับพื้นที่ทำงานนั้นเป็นอย่างดี รู้วิธีการออกจากสถานที่นั้นได้อย่างรวดเร็วเมื่อเกิดเหตุฉุกเฉิน

จ. วางแผนการทำงาน แบ่งหน้าที่ความรับผิดชอบให้ผู้ปฏิบัติงานทุกคนเข้าใจ รวมทั้งจัดอบรมด้านความปลอดภัยอยู่เสมอ

ขณะทำงานในสถานที่อับอากาศ

ก. ตรวจสภาพอากาศเป็นระยะและอาจต้องมีการระบายอากาศตลอดเวลาถ้าจำเป็น

ข. ผู้ปฏิบัติงานต้องรู้สภาพอากาศขณะทำงานตลอดเวลา

ค. จัดให้มีผู้ช่วยซึ่งผ่านการอบรมการช่วยเหลือผู้ประสบภัย เฝ้าอยู่ปากทางเข้าออกตลอดเวลาทำงาน และสามารถติดต่อสื่อสารกับผู้ปฏิบัติงานข้างในได้ตลอดเวลา

ง. ห้ามผู้ไม่มีหน้าที่เกี่ยวข้องเข้าไปในสถานที่อับอากาศ

จ. ห้ามสูบบุหรี่

ฉ. จะต้องติดป้ายแจ้งข้อความเตือน **“บริเวณอันตรายห้ามเข้าโดยไม่ได้รับอนุญาต”** พร้อมจัดทำระบบ Lock Out/Tag Out ที่เครื่องจักรกล ระบบไฟฟ้า ฯลฯ เพื่อป้องกันบุคคลอื่นที่ไม่เกี่ยวข้องกับการทำงานเข้ามารบกวน หรือเปลี่ยนแปลงสภาพเงื่อนไขภายในพื้นที่อับอากาศ

ช. หากจำเป็นต้องพ่นสีหรือมีน้ำมันชนิดระเหย หรือต้องทำให้เกิดความร้อนหรือประกายไฟต้องมีมาตรการป้องกันที่เหมาะสม

ซ. ผู้ปฏิบัติงานต้องสวมใส่อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคลตามสภาพของงานและต้องมีเครื่องดับเพลิงประจำอยู่ในบริเวณที่มีการปฏิบัติงาน

ฌ. ปฏิบัติงานถูกต้องตามขั้นตอนการปฏิบัติ (ถ้ามี)

การเตรียมการสำหรับเหตุฉุกเฉิน

ก. ถ้ามีผู้ปฏิบัติงานคนใดคนหนึ่งเกิดบาดเจ็บ หรือเป็นอันตรายในพื้นที่อับอากาศ ห้ามผู้ปฏิบัติงานที่ไม่ได้รับการฝึกฝนมาหรือไม่มีอุปกรณ์ป้องกันที่เหมาะสมเข้าไปช่วยเหลือเนื่องจากอาจเป็นอันตรายได้

ข. ต้องจัดเตรียมเครื่องช่วยหายใจชนิดที่จ่ายอากาศทางสายอากาศ หรือท่ออัดอากาศให้ผู้กู้ภัย โดยต้องพร้อมที่จะใช้งานตลอดเวลา

ค. ขอความช่วยเหลือเพิ่มเติมก่อนที่จะเข้าไปช่วยเหลือผู้เคราะห์ร้าย

ง. หากผู้ที่คอยช่วยเหลือเฝ้าคุมอยู่ภายนอกสังเกตเห็นว่า ผู้เข้าไปทำงานในที่อับอากาศมีท่าทางผิดปกติจะต้องรีบนำออกมาทันที

จ. เมื่อช่วยผู้ได้รับอันตรายออกมาได้แล้ว หากสังเกตว่าเสื้อผ้าเปื้อนสารพิษจะต้องรีบถอดออก แล้วให้การปฐมพยาบาลเบื้องต้น จากนั้นให้รีบนำส่งแพทย์โดยเร็ว

9.6.4 ขั้นตอนการตรวจวัดในการทำงานในสถานที่อับอากาศ

เนื่องด้วยปัจจัยอันตรายจากการทำงานในพื้นที่อับอากาศ ส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับปริมาณอากาศ หรือก๊าซในบริเวณนั้น ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อผู้ปฏิบัติงาน นอกเหนือจากการจัดการความปลอดภัยด้านอื่นๆแล้ว การตรวจสอบสภาพอากาศในพื้นที่อับอากาศถือว่าเป็นสิ่งสำคัญที่สุด การตรวจวัดความปลอดภัยในที่นี้จึงเน้นที่การตรวจสอบสภาพอากาศในพื้นที่อับอากาศ

9.6.4.1 วิธีการตรวจวัดสภาพอากาศ

ก. กำหนดตำแหน่งตรวจวัดให้ครอบคลุมพื้นที่ปฏิบัติงาน

ข. ใช้เครื่องมือตรวจสอบปริมาณก๊าซไปตรวจวัดตามจุดที่กำหนด

ค. บันทึกข้อมูลที่ตรวจวัดได้ และนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน

9.6.4.2 ชนิดของก๊าซที่ตรวจวัด

โดยทั่วไปชนิดของก๊าซที่จะตรวจวัดขึ้นอยู่กับพื้นที่อับอากาศที่ปฏิบัติงานนั้นๆ ซึ่งแต่ละแห่งจะแตกต่างกันออกไป แต่สำหรับระบบก๊าซชีวภาพนั้น มีก๊าซที่ควรตรวจสอบอย่างน้อย 4 ชนิด ดังนี้

ก. ก๊าซออกซิเจน (O_2) หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ ปริมาตร/ปริมาตร

ข. ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) หน่วยเป็น ppm

ค. ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) หน่วยเป็น ppm.

ง. ก๊าซติดไฟได้ (Combustible gas) หน่วยเป็น % LEL

9.6.4.3 ค่ามาตรฐาน

ก. ข้อกำหนดของประกาศคณะกรรมการรัฐวิสาหกิจสัมพันธ์ เรื่องความปลอดภัยในการทำงานในพื้นที่อับอากาศ กำหนดมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง ดังต่อไปนี้

- ออกซิเจนไม่ต่ำกว่า 18 % (V/ V)
- ไฮโดรเจนซัลไฟด์ 50 ppm. ในเวลา 10 นาที

- ก๊าซที่ติดไฟได้ต้องมีความเข้มข้นได้ไม่เกิน 20% ของค่า LEL ของแต่ละชนิด เช่น ค่า LEL ของก๊าซมีเทน(CH_4) คือ 5% ดังนั้น 20% ของค่า LEL ของก๊าซมีเทนจึงเท่ากับ 1%

ข ค่ากำหนดการสัมผัสก๊าซในพื้นที่อับอากาศของสำนักบริหารความปลอดภัยและสุขภาพในการทำงานแห่งชาติสหรัฐฯ (Occupational Safety and Health Administration : OSHA) กำหนดค่าจำกัดการสัมผัสที่ยอมรับได้ หรือ PEL (Permissible Exposure Limits) ของก๊าซในพื้นที่อับอากาศไว้ดังต่อไปนี้

- ออกซิเจน (O_2)

Low	:	19.5%
High	:	23.5%

- คาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO)

Ceiling	:	200 ppm
TWA	:	35 ppm
STEL	:	N/A

- ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S)

Ceiling	:	N/A
TWA	:	10 ppm
STEL	:	15 ppm

- ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2)

Ceiling	:	N/A
TWA	:	2 ppm
STEL	:	5 ppm

- ค่า LEL ของก๊าซมีเทน (CH_4)

LEL	:	5 %

(**ที่มา** ; ชมรมอาชีวอนามัยและความปลอดภัย มสธ http://www.safety-stou.com/)

9.7 การปฐมพยาบาล

(**ที่มา ;** www.npc-se.co.th/)

9.7.1 การปฐมพยาบาลเบื้องต้น (First Aid)

หายใจก๊าซพิษเข้าไป : ให้เคลื่อนย้ายผู้ป่วยออกสู่บริเวณที่มีอากาศบริสุทธิ์ถ้าผู้ป่วยหยุดหายใจให้ช่วยผายปอด ถ้าหายใจลำบากให้ออกซิเจนช่วย และส่งไปพบแพทย์ทันที

สารเคมีสัมผัสถูกผิวหนัง : ให้ฉีดล้างผิวหนังทันทีโดยให้น้ำไหลผ่านอย่างน้อย 15 นาที พร้อมถอดเสื้อผ้าและรองเท้าที่ปนเปื้อนสารเคมีออก และไปพบแพทย์ ซักทำความสะอาดเสื้อผ้าและรองเท้าก่อนนำกลับมาใช้ใหม่

ก๊าซพิษหรือสารเคมีเข้าตา : ให้ฉีดล้างตาโดยให้น้ำไหลผ่านอย่างน้อย 15 นาที กระพริบตาถี่ๆ อย่าให้น้ำล้างตาไหลผ่านหน้า ถ้ายังมีอาการระคายเคืองอยู่ให้ล้างซ้ำอีก 15 นาที

9.7.2 การปฐมพยาบาลเมื่อผู้ป่วยหมดสติ

- **อาการหมดสติ** ถือเป็นภาวะร้ายแรง ถ้าหากไม่ได้รับการรักษาได้ทันท่วงที มักจะตายได้รวดเร็ว ผู้ป่วยจะมีอาการหมดสติ และหมดความรู้สึกทุกอย่าง ปลุกอย่างไรก็ไม่ยอมตื่น นอกจากนี้ยังอาจมีอาการหายใจไม่ปกติ (เช่น หอบ หายใจขัด) ความดันโลหิตอาจจะสูง อาจมีอาการอัมพาตของแขนขา ปากเบี้ยว ตัวเกร็ง ชักกระตุก คอแข็ง หรือมีไข้สูง ถ้าเป็นรุนแรงอาจหยุดหายใจ และหัวใจหยุดเต้น

9.7.3 วิธีการปฐมพยาบาล

ก. ในกรณีที่ผู้ป่วยหยุดหายใจ ให้ช่วยผายปอดด้วยการเป่าปากทันที ซึ่งสามารถกระทำได้ ดังนี้

- จับผู้ป่วยนอนหงายบนพื้นแข็งๆ เช่น พื้นห้องหรือกระดานแข็งแล้วเปลื้องเสื้อผ้าเครื่องนุ่งห่มให้หลวม
- ใช้นิ้วมือล้วงเอาเศษอาหาร เสมหะ ฟันปลอม สิ่งแปลกปลอมออกจากปากของผู้ป่วย

รูปที่ 9.27 แสดงการผายปอด

- จับศีรษะผู้ป่วยหงายไปข้างหลัง โดยใช้มือข้างหนึ่งรองอยู่ใต้คอผู้ป่วยและยกคอขึ้น (หรือใช้หมอนหรือผ้าห่มหนุนไหล่ให้สูงขึ้น) แล้วใช้มืออีกข้างหนึ่งวางที่หน้าผากผู้ป่วยและกดลงแรงๆ ให้คางของผู้ป่วยยกขึ้น
- ใช้นิ้วหัวแม่มือและนิ้วชี้ของมือข้างที่วางอยู่บนหน้าผากผู้ป่วยบีบจมูกผู้ป่วยให้แน่น สูดหายใจเข้าแรงๆ แล้วใช้ปากประกบปากของผู้ป่วย (จะใช้ผ้าบางๆ รองหรือไม่ก็ได้) พร้อมกับเป่าลมหายใจเข้าแรงๆ เสร็จแล้วยกปากขึ้น สูดลมหายใจเข้าแรงๆ แล้วเป่าลมหายใจเข้าปากผู้ป่วยซ้ำอีกครั้ง ในระยะแรกให้ทำการเป่าปากผู้ป่วยติดๆ กัน 4 ครั้ง ต่อไปเป่าประมาณนาทีละ 12 ครั้ง (ทุก ๆ 5 วินาที)

รูปที่ 9.28 แสดงการผายปอดด้วยวิธีการเป่าปาก

- ถ้าผู้ป่วยมีอาการหัวใจหยุดเต้น (คลำชีพจรหรือฟังเสียงหัวใจไม่ได้) ให้ทำการนวดหัวใจทันทีประมาณวินาทีละ 1 ครั้ง (60 ครั้ง ต่อนาที) ถ้ามีผู้ทำการช่วยเหลือเพียงคนเดียว ให้นวดหัวใจ 5 ครั้ง แล้วเป่าปา 1 ครั้ง สลับกันไปเรื่อยๆ แต่ถ้ามีผู้ช่วยเหลือ 2 คน ให้คนหนึ่งทำการนวดหัวใจ 5 ครั้ง สลับกับเป่าปาก 1 ครั้ง (โดยอีกคนหนึ่ง)

ข. ในกรณีที่ผู้ป่วยยังหายใจได้เอง ให้ทำการปฐมพยาบาลดังนี้

- จับผู้ป่วยนอนหงายและจับศีรษะให้หงายขึ้นมากๆ และใช้นิ้วล้วงเอาอาเจียน เสมหะ ฟันปลอม สิ่งแปลกปลอมออกจากปากของผู้ป่วย
- เปลื้องเสื้อผ้าเครื่องนุ่งห่มให้หลวมๆ
- ห้ามให้ผู้ป่วยกินหรือดื่มอะไรทางปาก
- ถ้าสงสัยผู้ป่วยมีกระดูกหัก ต้องระมัดระวังในการเคลื่อนย้ายผู้ป่วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าสงสัยกระดูกคอหรือกระดูกสันหลังหัก

- ถ้าแน่ใจว่าไม่มีกระดูกหัก ให้จัดท่าผู้ป่วยอยู่ในท่าพักฟื้น (recovery position) โดยจับให้ผู้ป่วยนอนตะแคงข้างและให้ศีรษะอยู่ต่ำกว่าส่วนอื่นๆของร่ากายเล็กน้อย เพื่อให้ผู้ป่วยหายใจสะดวก และป้องกันมิให้สำลักเอาเศษอาหาร หรือเสมหะเข้าไปในปอด เป็นเหตุให้เกิดอันตรายได้
- ใช้ผ้าห่มคลุมตัวผู้ป่วย เพื่อให้ร่างกายอบอุ่น
- นำผู้ป่วยส่งโรงพยาบาลทันที ถ้าผู้ป่วยมีภาวะขาดน้ำควรให้น้ำเกลือ (5% D/NSS) ไประหว่างทางด้วยและควรติดตามผู้ป่วยไปด้วย เพื่อทำการช่วยผายปอดถ้าเกิดหยุดหายใจระหว่างทาง

ค. ข้อแนะนำ

ผู้ป่วยที่มีอาการหมดสติ ควรนำส่งโรงพยาบาลทุกราย ยกเว้นในรายที่สงสัยจะมีสาเหตุจากภาวะน้ำตาลในเลือดต่ำ เช่น มีประวัติอดข้าว ดื่มเหล้าจัด หรือใช้ยาเบาหวาน อาจให้การรักษาเบื้องต้นด้วยการฉีดกลูโคสชนิด 50 % จำนวน 50 มล. เข้าทางหลอดเลือดดำ อาจช่วยให้ผู้ป่วยฟื้นคืนสติภายใน 15 – 30 นาที ถ้าไม่ได้ผล ควรส่งโรงพยาบาลทันที

(**ที่มา** ; www.npc-se.co.th/)

9.8 ตัวอย่างแบบฟอร์มต่างๆ

9.8.1 ตัวอย่างแบบฟอร์มการขออนุญาตเข้าทำงานในสถานที่อับอากาศ

(**ที่มา** ; http://www.shawpat.or.th/safety_form/a1.pdf)

ใบขออนุญาตเข้าทำงานในพื้นที่อับอากาศ หมายเลขที่ ______________________

ใบขออนุญาตเข้าทำงานในพื้นที่อับอากาศนี้ มีผลบังคับใช้ตั้งแต่วันที่ ___/___/___ ถึง ___/___/___
(กำหนดให้ไม่เกิน 14 วัน)

ระบุพื้นที่ ____

รายละเอียดของงานที่ทำ ____
____
____

มีงานที่เกี่ยวกับความร้อนด้วยหรือไม่	ใช่ ❑	ไม่ใช่ ❑
มีการระบายอากาศพอเพียงหรือไม่	ใช่ ❑	ไม่ใช่ ❑
ต้องมีการติดตั้งเครื่องระบายอากาศเพิ่ม หรือไม่	ใช่ ❑	ไม่ใช่ ❑
ต้องมีหน้ากากช่วยหายใจแบบเต็มหน้า หรือไม่	ใช่ ❑	ไม่ใช่ ❑
มีแสงสว่างเพียงพอ หรือไม่	ใช่ ❑	ไม่ใช่ ❑
ต้องการทำความสะอาดเพิ่มเติม หรือไม่	ใช่ ❑	ไม่ใช่ ❑
ต้องการตรวจวัดอุณหภูมิ หรือไม่	ใช่ ❑	ไม่ใช่ ❑
ต้องมีการตรวจสอบพื้นด้วย หรือไม่	ใช่ ❑	ไม่ใช่ ❑
ตรวจสอบอันตรายเหนือศีรษะ หรือไม่	ใช่ ❑	ไม่ใช่ ❑
ใช้ที่กั้นรอบบริเวณพื้นที่อับอากาศ หรือไม่	ใช่ ❑	ไม่ใช่ ❑
ต้องมีการติดประกาศเตือนไว้ในพื้นที่อับอากาศ หรือไม่	ใช่ ❑	ไม่ใช่ ❑
มีการนำสารเคมีมาใช้ในที่พื้นที่อับอากาศ หรือไม่	ใช่ ❑	ไม่ใช่ ❑

มีสารเคมีอะไรบ้าง ____

การป้องกันเพิ่มเติม (โปรดระบุ)
____
____

ตรวจสอบชนิดของก๊าซใดดังต่อไปนี้

☐ ไฮโดรเจนไซยาไนด์ ☐ ก๊าซที่ทำให้เกิดการระเบิด ☐ ออกซิเจน

ความถี่ในการตรวจสอบก๊าซ

☐ ก่อนเริ่มงาน ☐ ทุกชั่วโมง ☐ ตลอดเวลา

อุปกรณ์ป้องกันภัยส่วนบุคคลที่จำเป็น

☐ แว่นตานิรภัย ☐ หน้ากากนิรภัย ☐ เข็มขัดนิรภัย
☐ รองเท้าบู๊ทยาง ☐ ชุดคลุมแบบใช้ครั้งเดียวทิ้ง ☐ ถุงมือ
☐ อุปกรณ์ช่วยหายใจ ☐ ชุดกันฝน ☐ ปลั๊กลดเสียง

ได้แจ้งให้เจ้าหน้าที่หน่วยกู้ภัยทราบ ชื่อ ______________________________

งานในพื้นที่อับอากาศทั้งหมดได้ถูกตัดแยกส่วนงาน (Isolation) แล้ว เพื่อจะดำเนินการขออนุญาตเข้าทำงานในที่พื้นที่อับอากาศ พร้อมแนบแบบฟอร์มรายการตัดแยกส่วนงาน (Isolation List)

ชื่อ-นามสกุล (ตัวบรรจง) ของผู้ที่ทำการตัดแยกส่วนงาน ______________________________

ลายเซ็นต์ ______________________________

การอนุญาตเข้าทำงานในพื้นที่อับอากาศ

พื้นที่อับอากาศจะต้องอยู่ในสภาพที่ปลอดภัยก่อนที่บุคคลที่ได้รับอนุญาตเข้าพื้นที่อับอากาศจะเข้าไปทำงานจนงานเสร็จสมบูรณ์

ผู้มีอำนาจในการอนุมัติ

ชื่อ ___________________________ ลายเซ็นต์ ___________________________

วันที่ ____ / ____ / ____ เวลา ____________________

ผู้มีอำนาจในการอนุมัติตามคู่มือการปฏิบัติในการเข้าไปทำงานในพื้นที่อับอากาศ มีดังนี้

ผู้จัดการฝ่ายผลิต (Process Manager)
หัวหน้างานทั่วไป (General Foreman)
หัวหน้างานฝ่ายผลิตอาวุโส (Senior Process Supervisor)
หัวหน้างานกะ (Process Shift Supervisor)

การตรวจสอบก๊าซ

วันที่	เวลา	ชนิดของก๊าซ	%	ตรวจสอบโดย	ลายเซ็นต์

พนักงานสังเกตุการณ์ด้านนอก

วันที่	เวลา	ชื่อ-นามสกุล	ลายเซ็นต์ก่อนเข้าพื้นที่	ลายเซ็นหลังออกจากพื้นที่

พนักงานที่เข้าไปทำงานในพื้นที่อับอากาศ

วันที่	เวลาเข้า	เวลาออก	ชื่อ-นามสกุล	วันที่	เวลาเข้า	เวลาออก	ชื่อ-นามสกุล

การตัดตอนส่วนงาน (Isolation)

งานทั้งหมดในพื้นที่อับอากาศสามารถหยุดชั่วคราวได้ ซึ่งการอนุญาตเข้าไปในพื้นที่อับอากาศ จะยังสามารถเข้าไปได้อีกจนกระทั่งมีการยกเลิกใบขออนุญาตเข้าทำงานในที่พื้นที่อับอากาศ

ผู้มีอำนาจในการอนุมัติ

วันที่ ___/___/___ เวลา _____________

ชื่อ _____________ ลายเซ็นต์ _____________

การกลับเข้าทำงานหลังจากหยุดงานชั่วขณะ

ความเสี่ยงอันตรายจะยังคงถูกควบคุมไว้และสามารถกลับเข้าไปทำงานในพื้นที่อับอากาศได้อีก

ผู้มีอำนาจในการอนุมัติ

วันที่ ___/___/___ เวลา _____________

ชื่อ _____________ ลายเซ็นต์ _____________

ความเสร็จสมบูรณ์ของงาน

เมื่องานเสร็จสมบูรณ์ตามที่กำหนด บุคคลทั้งหมดจะต้องออกมาและนำเครื่องมือและสิ่งของทั้งหมด ออกมาจากพื้นที่อับอากาศ

ผู้มีอำนาจในการอนุมัติ

วันที่ ___/___/___ เวลา _____________

ชื่อ _____________ ลายเซ็น _____________

การยกเลิกใบขออนุญาตเข้าทำงานในพื้นที่อับอากาศ

ข้าพเจ้าได้ตรวจสอบพื้นที่อับอากาศและยืนยันว่าพื้นที่อับอากาศนั้นอยู่ในสภาพที่เหมาะสมและพร้อมที่จะทำงานได้ตามปกติ

ผู้มีอำนาจในการอนุมัติ

วันที่ ___/___/___ เวลา _____________

ชื่อ _____________ ลายเซ็น _____________

9.8.2 ตัวอย่างแบบฟอร์มใบอนุญาตเริ่มงานของผู้รับเหมา

(**ที่มา** ; ชมรมอาชีวอนามัยและความปลอดภัย มสธ., http://www.safety-stou.com/)

เลขที่...........................

บริษัท......................

ใบอนุญาตเริ่มงาน (สำหรับผู้รับเหมา)

1. ชื่องาน... พื้นที่ที่เข้าปฏิบัติงาน ....
   ชื่อผู้รับเหมา / หจก. / บริษัท.. จำนวนผู้ปฏิบัติงาน...
   ชื่อผู้ควบคุมงาน .... ชื่อผู้รับบริการ... หน่วยงาน..
2. รายการวัสดุอุปกรณ์ที่นำเข้ามาปฏิบัติงาน..
....
....

ลักษณะงาน ❑ อับอากาศ ❑ ที่สูง ❑ ไฟฟ้า ❑ สารแคมี ❑ อื่น ๆ ระบุ...................................

3. รายการความปลอดภัยที่ต้องดำเนินการพิจารณาก่อนเข้าปฏิบัติงาน

ลำดับ	รายการตรวจสอบ	ใช่	ไม่ใช่	หมายเหตุ
1	ได้ปิดกั้น / แยกอุปกรณ์บริเวณที่ปฏิบัติงานออกจากบริเวณอื่นจนปลอดภัย	❑	❑	
2	ได้ทำการตรวจสอบบริเวณพื้นที่ปฏิบัติงานปราศจากสารไวไฟหรือวัตถุติดไฟได้	❑	❑	
3	รับทราบกฎระเบียบความปลอดภัยของบริษัทฯ	❑	❑	
4	ได้ดำเนินการตรวจเช็ควัสดุอุปกรณ์/เครื่องมือ/เครื่องจักรที่ใช้งาน เช่น การ์ด,สายดิน อื่นๆ	❑	❑	
5	ต้องมีเครื่องดับเพลิงคือ ❑ เคมีดับเพลิง ❑ อื่น ๆ	❑	❑	
6	ได้รับการอบรมเกี่ยวกับความปลอดภัยในการทำงาน	❑	❑	

4. ได้เตรียมอุปกรณ์ป้องกันภัยส่วนบุคคลไว้ใช้งานดังนี้ ❑ แว่นตานิรภัย ❑ รองเท้านิรภัย
❑ หน้ากากเชื่อม ❑ ถุงมือ ❑ ปลั๊กอุดหู ❑ อื่น ๆ ระบุ ....

5. ข้าพเจ้าได้ตรวจสอบความปลอดภัยตามรายการที่ระบุข้างต้นเรียบร้อยแล้ว จึงอนุญาตให้ปฏิบัติงานได้ ในวันที่........................

เจ้าของงาน.. ผู้รับเหมา.. จป. วิชาชีพ...
หมายเหตุ : ....

6. ตรวจปิดงาน
❑ งานเสร็จสมบูรณ์ ❑ งานไม่เสร็จ

เจ้าของงาน.. ผู้รับเหมา... จป. วิชาชีพ...

9.8.3 ตัวอย่างแบบฟอร์มประเมินการปฏิบัติงานผู้รับเหมา/ผู้รับเหมาช่วง/ผู้ให้บริการ

(**ที่มา** ; ชมรมอาชีวอนามัยและความปลอดภัย มสธ., http://www.safety-stou.com/)

วันที่..........เดือน....................พ.ศ.............

1. ชื่อผู้ประเมิน.. ฝ่าย / แผนก..
   ชื่อ บริษัท / ห้างร้าน / ผู้รับเหมา..
   ปฏิบัติงานตั้งแต่วันที่.. ถึงวันที่ ....
   ลักษณะงานที่ปฏิบัติ...
   ....
   ....
   ....
2. ด้านความปลอดภัยในการทำงาน
   2.1 การใช้อุปกรณ์คุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคล (PPE) ❒ ดีมาก ❒ ดี ❒ พอใช้ ❒ ปรับปรุง
   2.2 การปฏิบัติตามวิธีปฏิบัติงานที่ปลอดภัย ❒ ดีมาก ❒ ดี ❒ พอใช้ ❒ ปรับปรุง
   2.3 สภาพเครื่องมือ / อุปกรณ์ / เครื่องจักร ❒ ดีมาก ❒ ดี ❒ พอใช้ ❒ ปรับปรุง
   2.4 การแต่งกายรัดกุมและปลอดภัย ❒ ดีมาก ❒ ดี ❒ พอใช้ ❒ ปรับปรุง
   2.5 การควบคุมทางด้านอัคคีภัย ❒ ดีมาก ❒ ดี ❒ พอใช้ ❒ ปรับปรุง
3. ด้านการปฏิบัติตามกฎระเบียบ
   3.1 การติดบัตรขณะปฏิบัติงาน ❒ ดีมาก ❒ ปรับปรุง
   3.2 การควบคุมและดูแลด้านความสะอาด ❒ ดีมาก ❒ ดี ❒ พอใช้ ❒ ปรับปรุง
4. อื่น ๆ ระบุ..
   ....
   ....
   ....

1. เจ้าของงาน ลงชื่อ.. ว/ด/ป...............
   แผนก / ฝ่าย ....

2. จป.วิชาชีพ ลงชื่อ.. ว/ด/ป...............
   แผนก / ฝ่าย ....

คะแนนประเมิน

1. ด้านความปลอดภัยในการทำงาน...............คะแนน
2. ด้านการปฏิบัติตามกฎระเบียบ..................คะแนน

   คะแนนเฉลี่ย ((ข้อ1 + ข้อ2)/2)..................คะแนน

หมายเหตุ

ดีมาก = 100 คะแนน , ดี = 80 คะแนน , พอใช้ = 70 คะแนน , ปรับปรุง = 50 คะแนน

9.8.4 ตัวอย่างแบบฟอร์มเข้าทำงานที่ต้องใช้ความร้อน (เชื่อม, ตัด, ทำให้เกิดประกายไฟ, ขุดเจาะ, เจียร และรังสี)

ใบอนุญาตให้ทำงานที่ต้องใช้ความร้อน (เชื่อม, ตัด, ทำให้เกิดประกายไฟ, ขุดเจาะ, เจียรและรังสี)

Hot Work Permit

1. ใบอนุญาตใช้เฉพาะวันที่..ตั้งแต่เวลา...............................น. ถึงเวลา...น.
   ชื่อแผนก / ผู้รับเหมา..ประเภทการทำงาน...
   สถานที่ / บริเวณที่ปฏิบัติงาน...ใบแจ้งงานเลขที่...
   ผู้ควบคุมงานชื่อ...
   ประเภทพื้นที่ ❑ ปกติ ❑ ที่สูง ❑ ฝุ่นมาก ❑ สารเคมี
   ❑ อื่น ๆ ระบุ...

2. รายชื่ออุปกรณ์ที่นำเข้ามาทำงานมีดังนี้
   ❑ เครื่องเชื่อมไฟฟ้าและก๊าซต่าง ๆ ❑ สว่านไฟฟ้า ❑ เครื่องเจียร
   ❑ ถังก๊าซสำหรับงานเชื่อม ❑ เครื่องเจาะ ❑ เครื่องตัด ❑ อื่น ๆ ....

3. รายการความปลอดภัยที่ต้องดำเนินการพิจารณาก่อนเข้าปฏิบัติงาน

ลำดับ	รายการตรวจสอบ	ใช่	ไม่ใช่	หมายเหตุ
1	มีการเคลื่อนย้ายวัตถุไวไฟออกจากพื้นที่	❑	❑	
2	มีการปิดกั้นวัตถุที่สามารถติดไฟได้ออกจากหน้างาน	❑	❑	
3	มีการระบายอากาศที่เหมาะสม	❑	❑	
4	มีการติดป้าย / สัญญาณเตือน / หรือกั้นเขต ให้ระวัง	❑	❑	
	อันตรายจากการปฏิบัติงาน	❑	❑	
5	มีการเตรียมถังดับเพลิง	❑	❑	
6	อื่นๆ...	❑	❑	

4. ได้เตรียมอุปกรณ์ป้องกันภัยส่วนบุคคลไว้ใช้งานดังนี้ ❑ แว่นตานิรภัย ❑ รองเท้านิรภัย
   ❑ หน้ากากเชื่อม ❑ ถุงมือ ❑ เครื่องดับเพลิง ❑ ปลั๊กอุดหู ❑ อื่น ๆ.........................

<u>การตรวจสอบก่อนเริ่มปฏิบัติงาน</u> (เลือกเฉพาะบุคคลที่เกี่ยวข้อง)

ข้าพเจ้าได้ร่วมกันตรวจสอบความเรียบร้อยของพื้นที่ปฏิบัติงานด้วยตนเองเรียบร้อยแล้วรายการต่อไปนี้

ฝ่ายปฏิบัติงาน .... ❑ พ.ซ่อมฯ ❑ ผู้ควบคุมงาน ❑...

(...)

หน่วยงานเจ้าของพื้นที่................................. ❑ หน.งาน ❑ หน.แผนก ❑ ผู้ประสานงานความปลอดภัย เวลา............น.

(.......................................)

<u>การตรวจสอบหลังปฏิบัติงานเสร็จ</u>

ข้าพเจ้าได้ร่วมกันตรวจสอบความเรียบร้อยของพื้นที่ปฏิบัติงานด้วยตนเองเรียบร้อยแล้วตามรายการต่อไปนี้

❑ จัดเก็บพื้นที่ปฏิบัติงานเรียบร้อย ❑ ปลดป้าย “ห้ามแตะ” ❑ ไม่มีแหล่งเชื้อเพลิงหลงเหลือ

❑ จัดเก็บเครื่องมือในการทำงานเรียบร้อย ❑ ....

พร้อมทั้งแจ้งให้ทางหน่วยงานเจ้าของพื้นที่ทราบการสิ้นสุดงาน

ฝ่ายปฏิบัติงาน .... ❑ พ.ซ่อมฯ ❑ ผู้ควบคุมงาน ❑...

(...)

หน่วยงานเจ้าของพื้นที่................................. ❑ หน.งาน ❑ หน.แผนก ❑ ผู้ประสานงานความปลอดภัย เวลา............น.

(.......................................)

9.9 ป้ายเตือนความปลอดภัย

ในระบบผลิตและใช้ประโยชน์ก๊าซชีวภาพ มีสถานที่อันตรายที่มีสภาพบรรยากาศที่อาจเกิดการระเบิดจากสารไวไฟซึ่งก็คือก๊าซมีเทนที่เป็นองค์ประกอบหนึ่งของก๊าซชีวภาพ พื้นที่อันตรายที่อาจจะเกิดการระบิดนี้ถูกกำหนดให้เป็นโซน เพื่อให้ระมัดระวังในเรื่องของแหล่งจุดติดไฟต่างๆ หรืออุปกรณ์ที่จะนำมาใช้ในโซนดังกล่าวต้องเป็นอุปกรณ์ป้องกันการระเบิด นอกจากนี้ยังมีสถานที่อันตรายอื่นๆ ที่อาจจะก่อให้เกิดอุบัติภัยถึงขั้นเสียชีวิต เช่น อันตรายจากสถานที่อับอากาศ และอันตรายจากก๊าซพิษ เช่น ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ เป็นต้น ดังนั้น การติดป้ายเตือนจึงมีความจำเป็น และควรจะเป็นมาตรการต้นๆ ในเรื่องของความปลอดภัย เช่น การติดป้ายเตือนเรื่องห้ามนำแหล่งจุดติดไฟเข้ามาในบริเวณพื้นที่โซนที่กำหนด แจ้งเตือนพื้นที่ที่มีบรรยากาศที่อาจเกิดการระเบิด แจ้งเตือนเรื่องก๊าซพิษ และบริเวณพื้นที่อับอากาศต่างๆ เป็นต้น โดยป้ายควรจะอยู่บริเวณทางเข้า เห็นได้ชัดเจน ใช้สัญลักษณ์ หรือข้อความที่เป็นสากลและเป็นที่เข้าใจของผู้ที่พบเห็น

ตัวอย่างป้ายเตือนแสดงดังรูปข้างล่างนี้

ประเภทป้ายเตือนสารไวไฟ และบรรยากาศที่อาจเกิดการระเบิด

ประเภทป้ายห้าม

ประเภทป้ายเตือนเรื่องสารพิษ สารอันตราย

ประเภทป้ายเตือนเรื่องพื้นที่อับอากาศ

เอกสารอ้างอิง

1. คู่มือการตรวจสอบ ติดตั้งระบบและอุปกรณ์ไฟฟ้า ในพื้นที่อันตรายที่มีไอระเหยของสารไวไฟ สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย กรมโรงงานอุตสาหกรรม มิถุนายน 2548
2. Jurgen Kuhlmei, Explosion Protection in Europe, Electrical Equipment Fundamentals, Guidelines and Standards, 2003
3. Deutsche Montan, Fraunhofer UMSICHT, Non-binding guide of good practice for implementing Directive 1999/92/EC, Produced for the European Commission, Revise Draft 2002
4. EN 1127-1: 1997 "Explosive atmospheres - Explosion prevention and protection- Part 1: Basic concepts and methodology
5. AREA CLASSIFICATION FOR LANDFILL GAS EXTRACTION, UTILISATION AND COMBUSTION, INDUSTRY CODE OF PRACTICE, ESA ICoP 2, edition 1: Nov. 2005
6. Cooper Crouse-Hinds Ex Digest, A Comprehensive global guide to hazardous locations.

7. Cooper Crouse-Hinds Ex Digest, Hazardous Location Guide to the 2006 Canadian Electrical Code, 2006
8. PhoeNix CoNtaCt Gmbh & Co. KG, Explosion Protection Theory and Practice, Blomberg, Germany, 2007, www.phoenixcontact.com
9. IEC 60079-14, Explosive atmospheres Part 14: Electrical installations design, selection and erection, 2007
10. มาตรฐานการติดตั้งทางไฟฟ้าสำหรับประเทศไทย มาตรฐาน ว.ส.ท.(E.I.T. Standard 2004-45) มิถุนายน 2545
11. Daniel A. Crowl and Joseph F. Louvar, Chemical Pro cess Safety Fundamentals with Applications, 2nd ed., Prentice Hall international series in the physical and chemical engineering sciences, Prentice Hall PTR, NJ 07458, 2002
12. Lightning and surge protection for biogas plants, LIGHTNING PROTECTION GUIDE, www.dehn.de
13. แนวปฏิบัติเพื่อความปลอดภัยในการปฏิบัติงานในสถานที่อับอากาศ เอกสารประกอบการอบรมเจ้าหน้าที่ความปลอดภัยในการทำงาน ระดับเทคนิคขั้นสูง สถาบันความปลอดภัยในการทำงาน กรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน
14. ความปลอดภัยในสถานที่อับอากาศ ชมรมอาชีวอนามัยและความปลอดภัย มสธ http://www.safety-stou.com/
15. ใบอนุญาตให้ปฏิบัติงานในสถานที่อับอากาศ, http://www.shawpat.or.th/safety_form/a1.pdf
16. หมดสติ หน่วยเวชกรรมป้องกัน กองทัพบก 2550, www.npc-se.co.th/

ที่ปรึกษากิตติมศักดิ์

นายประพัฒน์ วนาพิทักษ์	อธิบดีกรมโรงงานอุตสาหกรรม
นายศุภชัย ศิริวัฒนเจริญชัย	รองอธิบดีกรมโรงงานอุตสาหกรรม
นายอุฤทธิ์ ศรีหนองโคตร	รองอธิบดีกรมโรงงานอุตสาหกรรม
นายชุมพล ชีวะประภานันท์	รองอธิบดีกรมโรงงานอุตสาหกรรม
นายประสงค์ นรจิตร์	ผู้อำนวยการสำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย

คณะกรรมการประสานและรับมอบงาน (กรมโรงงานอุตสาหกรรม)

นายธีระ หงส์รพิพัฒน์	วิศวกร เชี่ยวชาญ
นายศุภวัฒน์ ธาดาจารุมงคล	วิศวกรเครื่องกล ชำนาญการพิเศษ
นายวุฒิชัย วราภาสกุล	วิศวกรเครื่องกล ชำนาญการพิเศษ
นายสุทัศน์ มังคละคีรี	นักวิทยาศาสตร์ ชำนาญการพิเศษ
นายบวร สัตยาวุฒิพงศ์	วิศวกรเครื่องกล ชำนาญการพิเศษ
นายประสม ดำรงพงษ์	วิศวกรเครื่องกล ชำนาญการพิเศษ
นายปณตสรรค์ สูจยานนท์	วิศวกรเครื่องกล ชำนาญการพิเศษ
นายวิศิษย์ศักดิ์ กฤษณพันธ์	วิศวกรไฟฟ้า ชำนาญการพิเศษ
นางสาวณัฐอาภา อุไรกุล	วิศวกร ชำนาญการ

ที่ปรึกษาโครงการ (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี)

ดร.อรรณพ นพรัตน์	ผู้จัดการโครงการ และผู้เชี่ยวชาญระบบก๊าซชีวภาพ
นายทนงค์ ฉายาวัฒนะ	รองผู้จัดการโครงการและผู้เชี่ยวชาญระบบความปลอดภัยก๊าซชีวภาพและการใช้งานก๊าซชีวภาพ
นายวุฒิพงษ์ ศรีทองคำ	ผู้เชี่ยวชาญด้านงานสิ่งแวดล้อม
ดร.ชัยวัฒน์ แววศักดิ์	ผู้ช่วยผู้จัดการโครงการ นักวิจัยศูนย์ ECOWaste
ผศ.ดร.สุรชัย สนิทใจ	ผู้เชี่ยวชาญด้านงานวิศวกรรมเครื่องกล
ดร.เชิดชัย ประภานวรัตน์	ผู้เชี่ยวชาญด้านความปลอดภัยระบบไฟฟ้า
นางวิยะดา บุญเพ็ชร	ผู้ประสานงานโครงการ