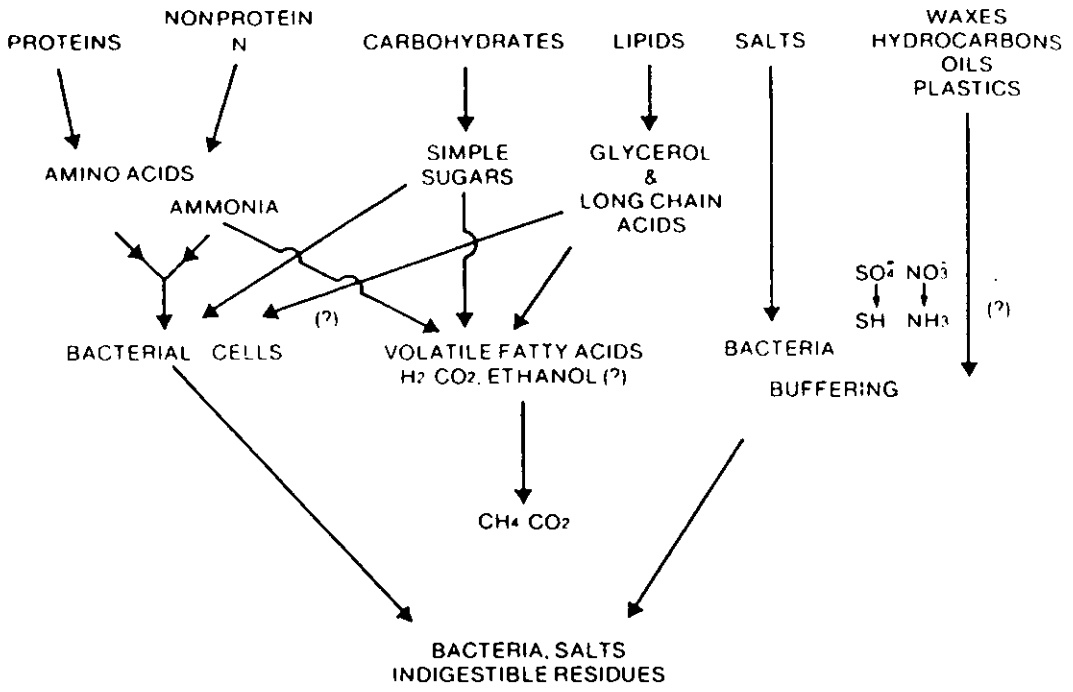
ตอนที่ 1 กาซชีวภาพกับสิ่งแวดล้อมในชีวิตประจำวัน

ในการดำรงชีวิตของมนุษย์ได้มีสารอินทรีย์ที่จะกำจัดทิ้ง ซึ่งเป็นวัตถุดิบสำหรับการหมักในสภาพไร้ออกซิเจน ได้กาซชีวภาพมาใช้เป็นเชื้อเพลิง และยังเป็นการกำจัดมลพิษไม่ให้ลงสู่ดิน แหล่งน้ำ และอากาศได้อย่างดียิ่ง

1. วัตถุดิบใช้ในการผลิตกาซชีวภาพ

วัตถุดิบสำหรับผลิตกาซชีวภาพได้แก่สารอินทรีย์ ซึ่งปกติได้จากสิ่งมีชีวิต ทั้งพืช สัตว์ และจุลินทรีย์ พืชและสัตว์อาจจะให้วัตถุดิบทั้งขณะมีชีวิตอยู่ และตายแล้ว สารอินทรีย์ทุกชนิดมีคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบ ที่เป็นองค์ประกอบของมีเทน ซึ่งเป็นกาซที่เป็นเชื้อเพลิงในกาซชีวภาพ ในธรรมชาติจะพบกาซชีวภาพตามหนอง บึง คู คลอง ที่มีสารกำจัดจากสิ่งมีชีวิตไปทับถมอยู่ แบคทีเรียเป็นตัวเปลี่ยนสารอินทรีย์เหล่านั้น ให้เป็นกาซชีวภาพ

การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบต่าง ๆ จะมีการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ กันตามสารประกอบที่ถูกเปลี่ยน Barnett และคณะ (Barnett et al.,1978) ได้รวบรวมการสลายของสารต่าง ๆ แล้วเขียนแผนผัง ดังรูปที่ 1 เพื่อให้เข้าใจได้ง่ายขึ้น ในการแสดงการสลายและผลที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงเหล่านั้น



รูปที่ 1 Most organic wastes consist of a range of materials that can be fermented following this general scheme (adapted from Hobson et al., 1974)

วัตถุดิบที่นำมาใช้ผลิตกาซชีวภาพ ปกติจะได้จากของกำจัดทิ้ง ในชีวิตประจำวัน เช่น ขยะ น้ำทิ้ง ของที่กำจัดจากสัตว์ วัสดุกำจัดทิ้งจากการเกษตรและอุตสาหกรรม จะเห็นว่ามีวัตถุดิบที่มีส่วนประกอบแตกต่างกันมาก เพื่อจะให้การหมักประสบความสำเร็จ ในการผลิตกาซชีวภาพที่มีมีเทนสูง ขบวนการเหมาะสมกับวัสดุที่จะกำจัดทิ้ง ซึ่งนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตกาซชีวภาพและสิ่งแวดล้อม จึงมีผู้พยายามค้นคว้าทดลองเพื่อใช้หลักเกณฑ์ทางวิทยาศาสตร์เข้าช่วย

ไนโตรเจนซึ่งเป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์พวกโปรตีน ถึงแม้จะไม่มีส่วนเกี่ยวข้องเป็นองค์ประกอบในกาซชีวภาพ แต่ก็เป็นส่วนสำคัญสำหรับขบวนการดำรงค์ชีพ และเพิ่มจำนวนของแบคทีเรียซึ่งเป็นผู้ทำให้สารอินทรีย์เปลี่ยนเป็นกาซชีวภาพ ถ้าขาดไนโตรเจน หรือไนโตรเจนมีน้อย จะจำกัดการเจริญและกิจกรรมของแบคทีเรีย แต่ถ้ามีมากเกินไปจะพบว่าให้ผลเสีย เพราะจะเป็นเหตุให้มีการ

ปล่อยแอมโมเนียออกมา ซึ่งจะเป็นพิษต่อแบคทีเรีย ปริมาณของไนโตรเจนสัมพันธ์กับคาร์บอน จะสอดคล้องพอเพียง ถ้าจะมีไนโตรเจน 1 ใน 30 ของคาร์บอน โดยน้ำหนัก (N:C = 1:30 หรือ C:N = 30:1 = 30) อัตราส่วน C/N นี้ คิดรวมปริมาณคาร์บอนในสารประกอบต่าง ๆ ที่มีในที่นั้น เช่น คาร์บอนที่มีในโปรตีนด้วย (Maramba, 1978)

สารประกอบบางอย่างมีคาร์บอนปริมาณสูง เช่น ลิกนิน ซึ่งพบในไม้ แต่พบว่าแบคทีเรียย่อยสลายได้ยาก จึงไม่เป็นไปตามอัตราส่วน C/N=30 นี้ สารประกอบที่ใช้ศึกษากันมากในการผลิตกาซชีวภาพได้แก่กรดอะซิติก กลีเซอรอล เอทธิลแอลกอฮอล์ เมทธิลแอลกอฮอล์ และสารประกอบคาร์บอนอื่น ๆ

ปัจจุบันคนมีมากขึ้น ต้องการผลิตผลจากสัตว์มากขึ้น จนเกิดปัญหาเป็นมลพิษในสิ่งแวดล้อม เพราะมูลสัตว์ปกติจะให้กาซซึ่งมีกลิ่นกระจายทั่วไป เป็นการยากที่จะกำจัดมูลสัตว์ ถ้าจะใช้วิธีเผาทำลายมูลสัตว์ ก็มีน้ำมากและมีกลิ่นขณะเผา ถ้าจะกระจายเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในธรรมชาติ โดยไม่ก่อความเดือดร้อน ก็ต้องการพื้นที่มากมาย จากการสัมมนาในที่หลายแห่งในสหรัฐอเมริกาและที่อื่น ๆ อีก สรุปได้ว่าการกำจัดมูลสัตว์ที่เหมาะสมที่สุดคือ การหมักให้ได้กาซมีเทน เพราะได้รับผลพลอยได้คุ้มค่าในการลงทุนกำจัดของเสีย

วัตถุดิบที่ใช้ผลิตกาซชีวภาพส่วนใหญ่ผลิตจากมูลสัตว์หลายชนิด เรียกของเสียจากมูลสัตว์ หรือ dung แต่การศึกษาเกี่ยวกับธรรมชาติ และองค์ประกอบของมูลสัตว์ต่าง ๆ ยังมีน้อย คงจะต้องรีบเร่งศึกษา เพื่อให้ทันกับการเพิ่มของมูลสัตว์ ส่วนประกอบ dung ได้แก่

1. อาหารที่กินเข้าไปอาจเป็นส่วนที่ย่อยไม่ได้ หรือย่อยไม่หมด และส่วนที่ทางเดินอาหารไม่ได้ดูดซึมไว้

2. แบคทีเรียที่อยู่ปกติในทางเดินอาหาร ซึ่งจะมีปนออกมาประมาณ 40 เปอร์เซนต์ของมูลสัตว์ทั้งหมด

3. สารที่สร้างขึ้นในทางเดินอาหาร

4. ส่วนที่เหลือจากการย่อยสลายของแบคทีเรียที่อยู่ในทางเดินอาหาร

อาหารสัตว์โดยทั่วไปจะประกอบด้วยโปรตีน คาร์โบไฮเดรตและไขมัน

จึงมีแบคทีเรียชนิดทำหน้าที่ย่อยสลาย ซึ่งปกติอาศัยอยู่ตามทางเดินอาหารของสัตว์ (rumen) มีหลายจำพวก (Hobson, 1969) ดังนี้

พวก hydrolyse โปรตีนคือ proteolytic bacteria

พวก hydrolyse แป้งคือ amylolytic bacteria

พวก hydrolyse เซลลูโลสคือ cellulolytic bacteria

พวก hydrolyse ไลปิดคือ lipolytic bacteria

พวกผลิตมีเทน คือ methanogenic bacteria

เซลของแบคทีเรียเหล่านี้ จะปนออกมากับมูลสัตว์ประมาณ 20 - 40 เปอร์เซนต์ของมูลสัตว์ ส่วนประกอบของมูลสัตว์ผันแปรตามชนิดของสัตว์ อายุของสัตว์ ส่วนประกอบของอาหารสัตว์และอื่น ๆ มูลสัตว์ถ้าทิ้งไว้นานกว่า 2 วัน จะผลิตกาซชีวภาพไม่ดี และเกิดปัญหามลพิษมากขึ้น

ส่วนประกอบของวัตถุต่าง ๆ ที่นำมาใช้ในการผลิตกาซชีวภาพ ได้มีการศึกษากันมากแล้ว ตามตารางที่ 1 ได้ยกมาพอเป็นตัวอย่างในการคำนวณว่าควรผสมอย่างไร จึงจะให้ C/N=30

วัตถุที่ใช้ผลิตกาซชีวภาพ	Total solids (%)	Volatile solid % of T.S.	C (%)	N (%)	C/N
A. Animal Dung					
1.สุกร	25	80.7	38.3	2.8	13.7
2.วัว	16	77	35.8	1.8	19.9
3.ไก่	48	77.4	35.7	3.7	9.65
4.เป็ด	53	23.6	21.9	0.8	27.4
5.นกกระทา(นกคุ่ม)	30	81.8	33.7	5.0	6.74

ตารางที่ 1 (ต่อเนื่อง)

วัตถุที่ใช้ผลิตกาซชีวภาพ	Total solids (%)	Volatile solids % of T.S.	C (%)	N (%)	C/N
B.Household Wastes					
1.มูลคน(Night soil)	15	90	47.7	7.1	6.72
2.Kitchen waste	31	92	54.3	1.9	28.60
C.Crop Residues(air-dry)					
1.ฟางข้าว	86	92	43.9	1.2	56.6
2.ลำต้นใบข้าวโพด	89	79	35.7	0.7	51.0
3.ซังข้าวโพด	82	96	49.9	1.0	49.9
4.เปลือกถั่วลิสง	90	95.5	52.7	1.7	31.0
5.ชานอ้อย	-	95.5	-	0.40	-
D.อื่น ๆ					
1.ผักตบชวา(* water hyacinth)	6.90	74.0	32.4	1.20	27.0
2.บัว(water lily)	5	77	33.0	2.9	11.4
3.Grass trimming	15	87	39.2	2.5	15.7

*=Vaidyanathan et al.,1984

ตารางที่ 1 Total solids, volatile solids และ % ของคาร์บอน ไนโตรเจน และ C/N ของวัตถุที่ใช้ในการผลิตกาซชีวภาพ (adapted from Maramba, 1978)

ในวัตถุดิบที่จะนำมาหมักกาซชีวภาพ อาจจะมีสารบางอย่าง ซึ่งถ้ามีปริมาณสูงอาจจะทำให้การหมักล้มเหลวได้ ทั้งนี้เพราะสารเหล่านั้นไปยับยั้งการ

เจริญของแบคทีเรีย ซึ่งเป็นกลไกสำคัญในการผลิตกาซชีวภาพ สิ่งที่มายับยั้ง (inhibitor) มีดังนี้

Jewell และคณะ (Jewell et al., 1978) ได้พบว่าจะมีสภาพเป็นพิษต่อการหมักกาซชีวภาพแบบไร้ออกซิเจนเมื่อมี

ซัลไฟด์ มากกว่า	200 mg/l
โลหะหนักที่ละลายในน้ำ มากกว่า	1 mg/l
โซเดียมอิออน	5000-8000 mg/l
โปแตสเซียมอิออน	4000-10000 mg/l
แคลเซียมอิออน	2000-6000 mg/l
แมกนีเซียมอิออน	1200-3500 mg/l
แอมโมเนีย	1700-4000 mg/l

Halbert (Halbert, 1981) ได้รวบรวมไว้ดังนี้ โลหะหนักต่าง ๆ จะเป็นพิษ ทำให้การหมักกาซชีวภาพล้มเหลวได้ต่าง ๆ กัน และมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องได้แก่ pH และปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ โลหะหนักขณะอยู่ในสภาพอิออนเป็นสิ่งที่เป็นพิษ ถ้าอยู่ในสภาพเป็นเกลือที่ไม่แตกตัว จะไม่เป็นพิษ พวกโลหะหนักมักจะแยกตัวออกมาหลังจากถูกหมัก และสารประกอบถูกย่อยไปเรื่อย ๆ ดังนั้นเวลาที่หมัก จึงสัมพันธ์กับปริมาณของโลหะหนักที่จะเป็นพิษ ดังนี้

1. สังกะสี (Zn) จะค่อยเพิ่มขึ้นจนถึงประมาณ 200 mg/l หลังจากหมักได้ 35 วัน แต่ถ้ามีคาร์บอนไดออกไซด์มากจะได้ $ZnCO_3$ ซึ่งไม่แตกตัว จึงไม่เป็นพิษ จะเป็นพิษเมื่อ pH สูงกว่า 7.6

2. แคดเมียม (Cd) จะทำให้การหมักเริ่มไม่เป็นผลดีเมื่อมีแคดเมียม 180 mg/l pH ตั้งแต่ 7.2 ขึ้นไป

3. ทองแดง(Cu) จะสูงขึ้นเป็น 190 mg/l ภายใน 100 วัน จะเป็นพิษเมื่อมีทองแดง 170 mg/l

4. เหล็ก (Fe) จะเป็นพิษเมื่อมีความเข้มข้น 2600 mg/l ที่ pH สูงกว่า 6.4 ถ้ามีคาร์บอนได้ออกไซด์มาก จะเปลี่ยนเป็น $FeCO_3$ ซึ่งจะไม่ละลายน้ำ ทำให้ไม่เป็นพิษ

5. โครเมียม (Cr) จะเป็นพิษเมื่อมีโครเมียม 450 mg/l

สารพวกปฏิชีวนะและ chemotherapeutic อาจจะทำให้การหมักกาซชีวภาพไม่ได้ผลดี เหล่านี้อาจจะติดมากับมูลสัตว์ที่ได้รับสารเหล่านี้มากเกินไปเพื่อจุดประสงค์บางอย่าง Sandkvist และคณะ (Sandkvist et al., 1985) ได้ทดลองกับการหมักมูลสุกรในสวีเดน โดยหมักมูลสุกรกับสารเหล่านี้

1. Oxytetracycline-hydrochloride 100 mg/l manure
2. Benzyl penicillin-procain salt 80,000 IU/l manure
3. Dehydrostreptomycin-sulfate 100 mg/l manure
4. Sulfadoxine 120 mg/l manure
5. Trimethoprim 24 mg/l manure

ได้พบว่าทำให้ผลิตกาซชีวภาพลดลงมาก เมื่อเปรียบเทียบกับการหมักที่ไม่ได้ใส่สารเหล่านี้

ออกซิเจนถ้ามีโอกาสเข้าไปขณะกำลังหมักจะไปทำให้ methanogenic bacteria ไม่สามารถเจริญได้ จึงทำให้การหมักกาซชีวภาพล้มเหลวได้

นอกจากนี้ยังมีผู้พยายามทดลองศึกษาสารอื่น ๆ ที่มีโอกาสจะเข้ามาผสมในการหมักกาซชีวภาพ เพราะสารเหล่านี้มักจะปนอยู่กับวัตถุดิบซึ่งเป็นของกำจัดทิ้ง ได้แก่

detergents เช่น พวกผงซักฟอก

disinfectants เช่น สารฆ่าเชื้อต่าง ๆ

chlorinated compounds ได้แก่พวกสารประกอบที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบ เช่น ดีดีที (DDT) หรือ hexachlorophene, carbon tetrachloride

2. ขบวนการผลิตกาซชีวภาพ

2.1 Starter

ในการหมักสารอินทรีย์เพื่อให้ได้กาซชีวภาพ ต้องอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์หลายจำพวก ในการเปลี่ยนจากสารอินทรีย์หลาย ๆ ชนิด จนกระทั่งได้มีเทน ในที่นี้จะจำกัดอยู่เฉพาะจุลินทรีย์จำพวกแบคทีเรีย ดังนั้นเมื่อจะเริ่มต้นหมักกาซชีวภาพจากวัตถุอะไร จึงควรจะแน่ใจว่ามีแบคทีเรียที่จำเป็นในการเปลี่ยนแปลงต่อเนื่องไปจนได้มีเทน ซึ่งจะทำได้โดยนำเชื้อผสม (mixed culture) มาหมักกับสารอินทรีย์ที่จะใช้เลี้ยงในปริมาณไม่มาก ในสภาพไร้ออกซิเจน เพื่อให้เชื้อเหล่านั้นมีการปรับตัวให้ได้เชื้อจำพวกต่าง ๆ เหมาะสมที่จะเปลี่ยนแปลงช่วงต่าง ๆ จนได้มีเทน แล้วจึงนำไปผสมกับวัตถุดิบที่จะเริ่มต้นในการหมักกาซชีวภาพที่จะใช้งานต่อไป ถ้ามีการหมักกาซชีวภาพของที่อื่นอยู่แล้ว ก็นำของเหลวที่ผ่านการหมักแล้ว เรียก sludge มาผสม เมื่อเริ่มต้นจะทำการหมักถังใหม่ เรียกของเหลวที่มีแบคทีเรียเหมาะสมที่นำมาผสมเริ่มต้นนี้ว่า starter

Maramba (Maramba, 1978) พบว่าจะได้ผลสูงสุดเมื่อใช้ starter ไม่น้อยกว่า 20% ของของเหลวที่จะเริ่มต้นหมัก (starting slurry) และถ้า starter นั้น ได้จาก digester slurry ที่อยู่ในระยะ active growth phase จะให้กาซชีวภาพได้ดีกว่า digester slurry ที่อายุมาก ๆ

แบคทีเรียที่เกี่ยวข้องในการหมักในสภาพไร้ออกซิเจนแล้วให้กาซชีวภาพ ในธรรมชาติจะหาได้จากแหล่งต่อไปนี้

ก. มูลสัตว์

มูลสัตว์ได้มาจากทางเดินอาหาร ประกอบด้วยของที่ไม่ถูกย่อย หรือย่อยแล้วแต่ไม่ถูกดูดซึม เมื่อผ่านมาถึงลำไส้ แบคทีเรียหลายชนิดที่อยู่ในลำไส้เป็นปกติจะย่อยสลายต่อไป ดังนั้นในมูลสัตว์จึงมีทั้งอาหารและเซลของแบคทีเรีย ซึ่งเจริญอยู่ในสภาพเกือบไร้ออกซิเจน อาหารที่ผ่านมายังลำไส้มีทั้งโปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมัน จะถูกย่อยสลายเป็นสารประกอบเล็กลงจนบางปฏิกริยาให้กาซออกมา ได้แก่คาร์บอนไดออกไซด์ และมีเทน จำนวนมาก อาจจะมีไนโตรเจน ออกซิเจน ไฮโดรเจน ไฮโดรเจนซัลไฟด์ และคาร์บอนมอนอกไซด์บ้างเล็กน้อย (Hobson, 1969)

Milano และ Syahrul (Milano and Syahrul 1984) ได้ทำ starter โดยใช้ทั้งของเหลวและของแข็งจากลำไส้วัวที่ถูกฆ่าใหม่ ๆ ผสมกับมันสำปะหลัง เพื่อใช้ผสมในการหมักกาซชีวภาพ

นอกจากนี้ ยังมีผู้แยกแบคทีเรียจากทางเดินอาหารของสัตว์ต่าง ๆ และพบว่าแบคทีเรียเหล่านั้นย่อยสลายสารอินทรีย์แล้วให้สารที่จะเปลี่ยนต่อไปให้มีเทน หรืออาจจะเปลี่ยนสารต่าง ๆ มาเป็นมีเทน ตัวอย่างเช่น

Bryant และคณะ (Bryant et al., 1958b) ได้แยก Bacteroides ruminicola และ Succinimonas amylolytica จากลำไส้วัว สามารถเปลี่ยนคาร์โบไฮเดรตให้เป็นกรดซักซินิก (succinic acid) กรดอะซิติก และกรดฟอร์มิก

Bryant และคณะ (Bryant et al., 1958b) ได้แยกแบคทีเรียจากลำไส้วัวหลาย ๆ ตัว ซึ่งเลี้ยงด้วยอาหารต่าง ๆ กัน ได้พบ Ruminococcus flavefaciens ย่อยสลายเซลลูโลสเป็น reducing sugars แล้วสลายต่อเป็นกรดซักซินิก กรดอะซิติก และกรดฟอร์มิก Ruminococcus albus ย่อยสลายเซลลูโลสเป็น reducing sugars แล้วสลายต่อเป็นกรดอะซิติก กรดฟอร์มิก เอทธานอล และกาซไฮโดรเจน และยังได้พบ Cillobacterium cellulosolvens ซึ่งสามารถย่อยสลายเซลลูโลสได้

Miller และคณะ (Miller et al., 1984) ได้แยก Methanobrevibacter smithii จากลำไส้คน เป็นแบคทีเรียซึ่งทำให้ไฮโดรเจนกับคาร์บอนไดออกไซด์ ทำปฏิกริยากันได้มีเทน

Bryant (Bryant, 1959) ได้รวบรวมแบคทีเรียที่พบในลำไส้สัตว์ต่าง ๆ มากมาย ซึ่งมีผู้แยกมาได้ และพบว่าสามารถเปลี่ยนสารอินทรีย์ให้เป็นมีเทน หรือสารที่จะเปลี่ยนต่อไปให้มีเทน

ข. ในดิน

แบคทีเรียหลายชนิดที่เกี่ยวข้องกับการหมักกาซชีวภาพ มีกระจายอยู่ในดินที่มีสารอินทรีย์ทับถมอยู่นาน ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งตามดิน โคลน ในคูน้ำที่มีใบไม้ทับถมอยู่ เพราะมีสภาพไร้ออกซิเจนได้ง่าย

เกษรและ Oi (เกษร และ Oi, 2527) ได้เก็บดิน น้ำ และ

โคลน ที่มีการทับถมของมูลสัตว์ พืช และอินทรีย์วัตถุ ในบริเวณวิทยาเขตกำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และหมู่บ้านเสืออีด่าง ตำบลสระพัฒนา อำเภอกำแพง-แสน จังหวัดนครปฐม มาทำการหมักกับสารอินทรีย์ได้แก่ กลูโคส polypeptone และยีสต์เอกแทรกต์ พบว่าที่ใดที่มีการทับถมของอินทรีย์วัตถุเป็นที่ที่มีโอกาสที่จะได้แบคทีเรียเชื้อผสมที่สามารถหมักอินทรีย์วัตถุต่าง ๆ เป็นกาซมีเทน

Dhavises และ Oi (Dhavises and Oi, 1985) ได้ใช้เชื้อผสมที่คัดเลือกจากไร่ข้าวโพด ซึ่งเลี้ยงเก็บไว้โดยให้หมักอยู่ด้วยดินผสมพืช ซึ่งมีเซลลูโลสสูง กับยีสต์เอกแทรกต์และ polypeptone แล้วนำมาทดลองหมักโดยใช้เซลลูโลสเป็นแหล่งคาร์บอน พบว่าให้กาซมีเทนได้

Jones และ Simon (Jones and Simon,1985) ได้ศึกษาการผลิตอะซิเตท โดย acetogens กับมีเทน โดย methanogens ในตะกอนที่ทะเลสาบน้ำจืด Blelham Tarn ที่ Lake District ในอังกฤษ ได้พบว่ามีการผลิตอะซิเตท แล้วเปลี่ยนต่อไปเป็นมีเทนจะเกิดขึ้นไม่สม่ำเสมอกันตลอดปี ทั้งนี้เพราะมีสารอินทรีย์มาสะสมไม่เท่ากัน

ดังนั้นในการเริ่มต้นผลิตกาซชีวภาพ ถ้าไม่มี sludge จากที่อื่นก็ควรใช้ starter จากมูลสัตว์หรือโคลนที่มีพืชทับถมกันอยู่นาน ๆ ในสภาพไม่สัมผัสกับอากาศ เช่น ตามคูน้ำ อาจจะใช้ทั้งสองอย่างมาหมักในสภาพไร้ออกซิเจนก็ได้

2.2 <u>การพัฒนาแบบโรงผลิตกาซ</u> (developed biogas plant design)

เมื่อสารอินทรีย์ถูกย่อยสลาย มีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมี ทำให้ได้สารต่าง ๆ กันไป จะได้สารอะไรขึ้นอยู่กับสภาพที่ถูกย่อยสลาย ถ้าการย่อยสลายเกิดขึ้นในที่มีออกซิเจน (aerobic decomposition) จะได้แอมโมเนีย คาร์บอนไดออกไซด์ และความร้อนจำนวนมาก ซึ่งจะกระจายไปในบรรยากาศ ส่วนที่เป็นของแข็งจะยังคงอยู่ในสภาพดิน ถ้าการย่อยสลายเกิดในที่ไม่มีออกซิเจน (anaerobic decomposition) จะให้กาซชีวภาพและของเหลว ประกอบด้วยน้ำและสารที่ถูกย่อยแล้ว เรียก sludge ซึ่งถูกเก็บอยู่ในถังย่อยสลาย

<u>การออกแบบโรงผลิตกาซชีวภาพ</u>

สภาพที่จะผลิตกาซชีวภาพได้ดี จะต้องมีการย่อยสลายในสภาพไร้

ออกซิเจน ซึ่งจะยิ่งเป็นผลดีในการควบคุมมลพิษ (pollution) การย่อยสลายจะได้ผลดีที่สุดเมื่อมีสภาพ (optimum condition) ดังนี้

1. จะต้องมีแบคทีเรียที่เหมาะสม และปริมาณเพียงพอที่จะย่อยสลายวัตถุดิบนั้น

2. มีวัตถุดิบซึ่งละลายน้ำได้ดี มีปริมาณอาหาร และส่วนประกอบพอเหมาะ สำหรับการเจริญของแบคทีเรียต่าง ๆ โดยเฉพาะส่วนประกอบของ C/N = 30 : 1

3. ไม่มีอากาศและสารที่ให้ออกซิเจน ต้องมีสภาพไม่มีออกซิเจนเลยแม้แต่น้อย

4. ความเป็นกรดและเป็นด่าง ควรจะมี pH6.5-8 ปกติ จะมีไบคาร์บอเนตเป็นตัวปรับสภาพความเป็นกรดและเป็นด่าง

5. อุณหภูมิที่มีการหมักในสภาพไร้ออกซิเจน พอจะแบ่งได้เป็น 3 ช่วง (Lettinga et al., 1981) ได้แก่

ก. การย่อยที่อุณหภูมิสูง(thermophilic digestion) อุณหภูมิระหว่าง 50-65°C พวกแบคทีเรียที่ชอบอุณหภูมิสูง (thermophile) จะทำงานได้ดี

ข. การย่อยที่อุณหภูมิปานกลาง (mesophilic digestion) อุณหภูมิระหว่าง 20-42°C พวกแบคทีเรียที่ชอบอุณหภูมิปานกลาง (mesophile) จะทำงานได้ดี

ค. การย่อยที่อุณหภูมิต่ำ (psychrophilic digestion) อุณหภูมิระหว่าง 0-20°C พวกแบคทีเรียที่ชอบอุณหภูมิต่ำ จะทำงานได้ดี

Hashimoto (Hashimoto, 1983) พบว่าอุณหภูมิขณะหมักจะมีผลต่อเวลาที่ใช้ในการหมัก หมักที่อุณหภูมิสูงจะให้กาซได้ในระยะเวลาสั้นกว่าหมักที่อุณหภูมิต่ำ ส่วนกาซที่ผลิตทั้งหมดต่อวัตถุดิบเท่ากัน จะมีปริมาณใกล้เคียงกัน ดังนั้นพวกที่หมักที่อุณหภูมิต่ำ จึงต้องการเวลาตั้งแต่ใส่ของผสม (fresh slurry) ลงหมักจนถึงเวลากำจัดทิ้ง (retention time) มาก ในประเทศหนาวจึงต้องเลือกระหว่างใช้เวลาหมักนานที่อุณหภูมิต่ำ กับหมักที่อุณหภูมิสูง แล้วนำกาซชีวภาพที่ได้ มาใช้ในการให้ความร้อน ถังหมักทำให้ได้กาซไปใช้ประโยชน์น้อยลง

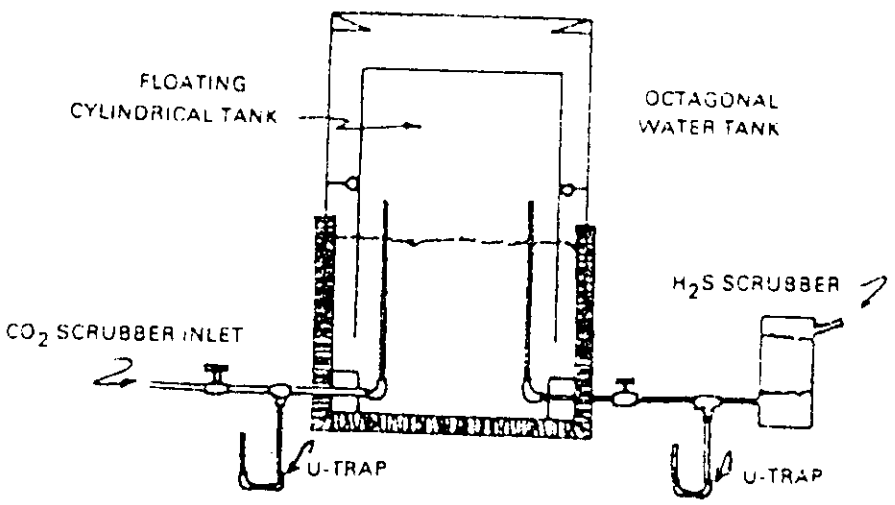
6. ระยะเวลาที่ให้กาซปริมาณสูงสุดคุ้มค่า

7. สารที่ถูกย่อยแล้วจะต้องไม่จับกันแน่นอยู่บนพื้นผิวเพราะจะกั้นไม่ให้กาซขึ้นมาจากผิวของเหลวที่หมัก

โรงผลิตกาซชีวภาพที่ออกแบบสำหรับผลิตกาซชีวภาพ ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนคือ

1. ส่วนเก็บกาซ (gasholder) เป็นส่วนที่เก็บกาซที่เกิดขึ้นเพื่อคอยการใช้ มี 2 แบบ

ก. ส่วนเก็บกาซแยกจากถังผลิตกาซ (digester) โดยมีถังรูปโดมคว่ำลงในถังน้ำ เพื่อให้กาซแทนที่น้ำ มีท่อนำกาซจากถังผลิตกาซมาสู่ถังเก็บกาซและมีท่อนำกาซไปใช้ ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 Floating dome gasholder for split-type biogas plant (Maramba, 1978)

การเก็บกาซแยกจากถังผลิตกาซนี้ อาจใช้วิธีเก็บกาซด้วยถุงแบบบอลลูนก็ได้

ข. เก็บกาซชีวภาพในถังผลิตกาซเหนือของเหลวที่หมัก (digester slurry) เมื่อมีกาซชีวภาพมากของเหลวที่หมักอยู่จะถูกดันกลับ ทางด้านบนของถังผลิตกาซจะมีท่อนำกาซไปใช้

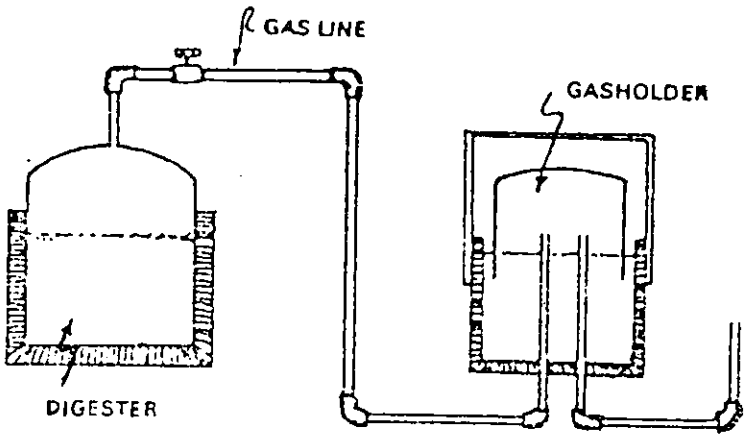
2. ถังผลิตกาซชีวภาพ (digester) เป็นส่วนที่มีสารอินทรีย์ถูกย่อยในสภาพไร้ออกซิเจน แล้วให้กาซชีวภาพมีสภาพเป็นถังป้องกันออกซิเจนจากภายนอกเข้าไป ป้องกันกาซที่ผลิตได้ออกมาสู่ภายนอก และป้องกันน้ำมิให้เพิ่มเข้าไป หรือหายไปโดยไม่เจตนา เพราะจะทำให้ความเข้มข้นของสิ่งที่กำลังหมักเปลี่ยนแปลงไปจากความเข้มข้นที่เหมาะสม การหมุนเวียนของของเหลวในถังผลิต ถ้าไม่ดีพอจะทำให้กากที่เหลือจากการย่อยจับกันเป็นปึก (scum) ที่ผิวด้านบน ทำให้กาซผ่านขึ้นจากของที่หมักอยู่ไม่สะดวก วัตถุดิบ (fresh slurry) ที่เติมเข้าไปจะผสมกับของเหลวในถังผลิตกาซไม่ได้ดี

<u>ชนิดของถังผลิตกาซชีวภาพ</u>

อาจแบ่งถังผลิตกาซชีวภาพออกเป็น 2 พวก ตามวิธีการเติมวัตถุดิบ ได้แก่

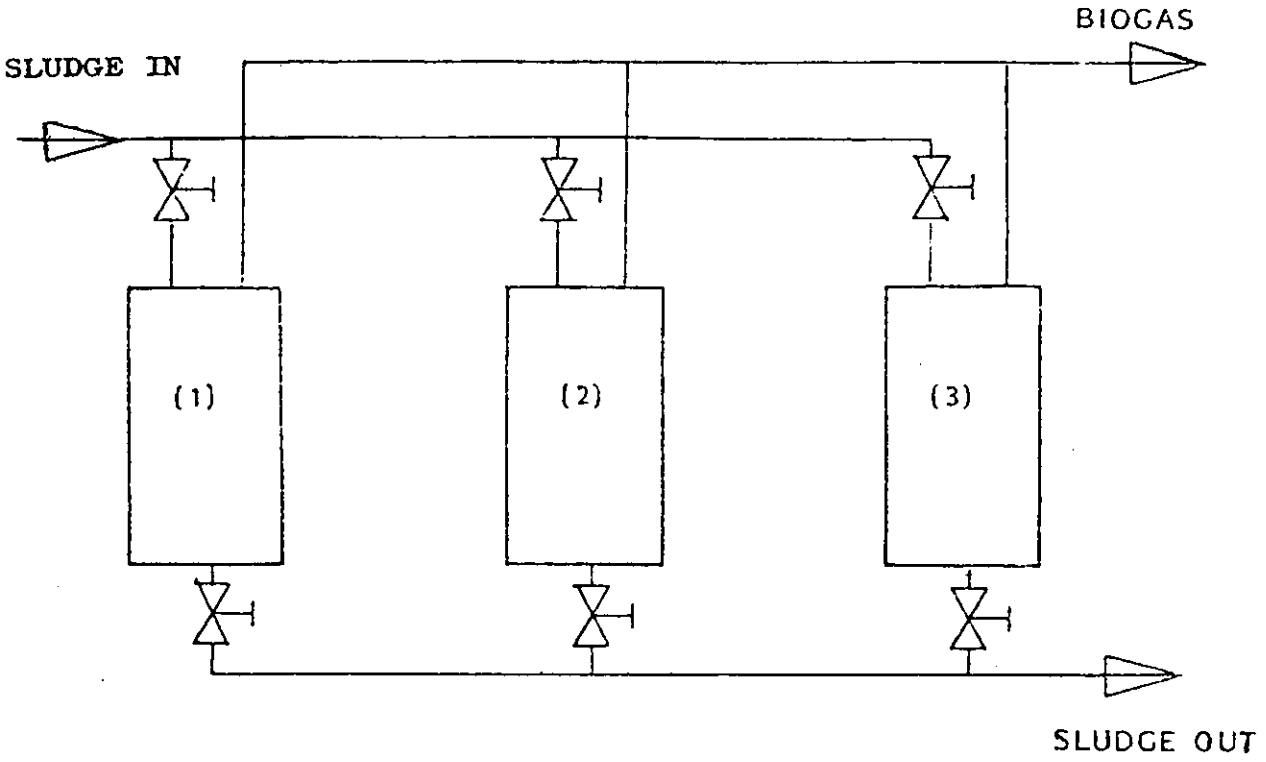
1. Batch-fed digester เป็นถังผลิตกาซที่มีการใส่วัตถุดิบผสม starter แล้วปิด เมื่อเกิดการย่อยสลายให้กาซชีวภาพระยะเวลาหนึ่ง แล้วปริมาณกาซจะลดลง จะต้องมีการเปิดเอา sludge ออก แล้วผสมวัตถุดิบและ sludge บางส่วนลงไปเป็นการเริ่มต้นใหม่ วิธีนี้มีประโยชน์ในการศึกษาปฏิกริยาต่าง ๆ เกี่ยวกับการผลิตกาซชีวภาพ

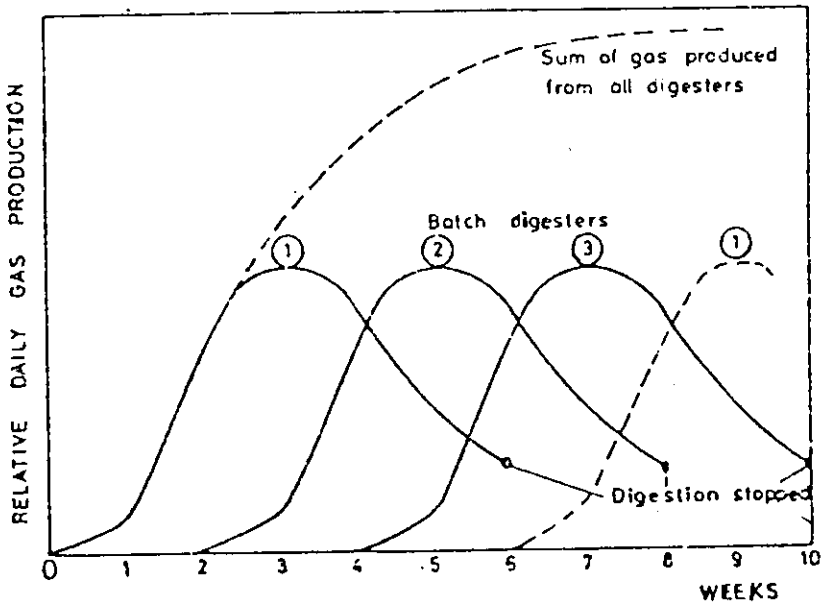
ได้มีการสร้างโรงผลิตกาซชีวภาพใช้ในกัลกัตตา ประเทศอินเดีย เรียก Belur Math Gobar gas plant (Maramba, 1978) ถังผลิตกาซสร้างบนพื้นดิน มีผนังก่อด้วยอิฐ มีถังเหล็กรูปโดมครอบอยู่ด้านบน จากโดมต่อท่อนำกาซที่เกิดขึ้นไปเก็บในถังเก็บกาซ ซึ่งแยกต่างหาก ถังเก็บกาซประกอบด้วยถังเหล็กครอบอยู่ในถังคอนกรีต เก็บกาซโดยการไล่น้ำออก ทำให้ตัวถังลอยตัวขึ้น จากถังมีท่อนำกาซไปใช้ ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 Belur Math Gobar gas plant (Maramba, 1978)

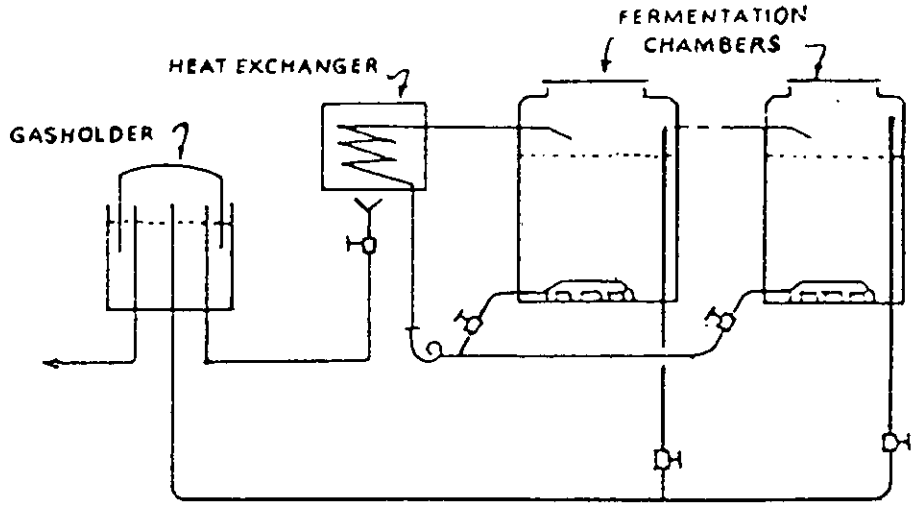
ถ้าจะใช้ batch-fed digester ผลิตกาซชีวภาพในชีวิตประจำวัน จะต้องมีถังผลิตกาซหลาย ๆ ถัง ดังตัวอย่างเป็น three batch-fed digester ซึ่งจะได้ปริมาณกาซต่อเนื่องกัน เพราะเริ่มหมักต่อเนื่องกัน (Frank and Stephan, 1983) ดังรูปที่ 4





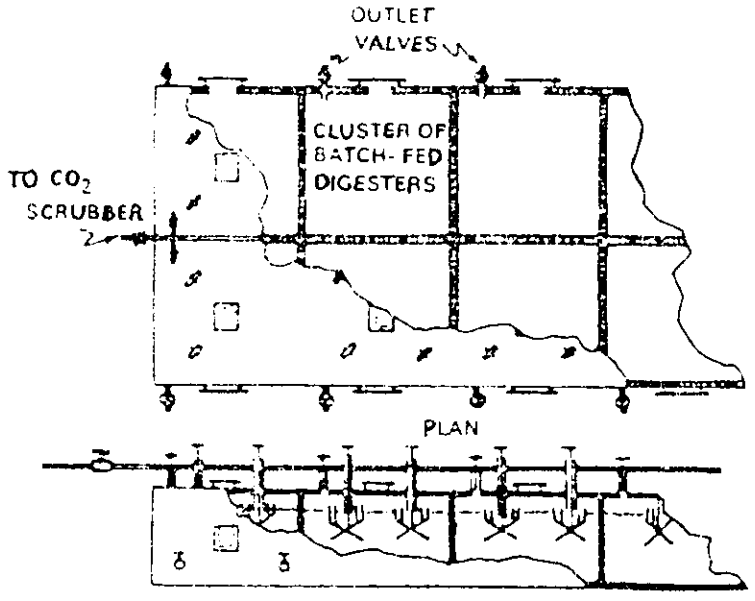
รูปที่ 4 Three batch-fed digester (ก) และกราฟแสดงปริมาณกาซที่เกิดขึ้น (ข) (Frank and Stephan, 1983)

France's Duccellier-Isman system ประกอบด้วยถังผลิตกาซ 2 ถัง มีเครื่องปั้มวัตถุดิบเพื่อให้ผ่านแหล่งให้ความร้อน โดยใช้กาซชีวภาพที่ได้เป็นเชื้อเพลิง มีถังเก็บกาซแยกจากถังผลิต ดังรูปที่ 5 โรงผลิตกาซชีวภาพแบบนี้ออกแบบสำหรับตั้งในที่อุณหภูมิต่ำ เช่น ฝรั่งเศส



รูปที่ 5 Duccellier-Isman system (Maramba, 1978)

Maramba (Maramba, 1978) ได้ออกแบบที่ Maya farms ในฟิลิปปินส์ สำหรับใช้ของเสียจากอุตสาหกรรมทางเกษตรเป็นวัตถุดิบ ประกอบด้วยถังผลิตกาซชีวภาพ มีจำนวนเท่ากับจำนวนวันที่จะใช้หมัก (retention time) แล้วเพิ่มอีก 1 ถัง ความจุของแต่ละถังเท่ากับของเสีย ซึ่งผสมน้ำเรียบร้อยแล้วในแต่ละวันรวมกับ starter มีการบรรจุถังผลิตกาซใหม่วันละ 1 ถังทุกวัน ทำให้มีกาซใช้ต่อเนื่อง เพื่อให้การลงทุนต่ำ จึงใช้วิธีสร้างถังรูปสี่เหลี่ยมเป็นหมู่ใช้ผนังร่วมกันสร้างบนดินเพื่อสะดวกในการกำจัด sludge และของแข็งถ้ามี มีถังเก็บกาซแยกต่าง ๆ ดังรูปที่ 6

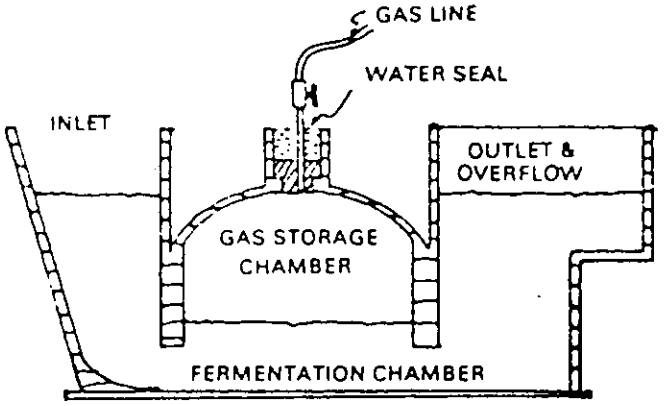


รูปที่ 6 Batch-fed digester สำหรับอุตสาหกรรมเกษตรที่ Maya farms (Maramba, 1978)

2. Continuous-fed digester เริ่มต้นผสมเช่นเดียวกับ batch-fed digester ต่อจากนั้นมีการเติมวัตถุดิบที่ผสมน้ำแล้วต่อเนื่องจะได้กาชชีวภาพออกมาใช้สม่ำเสมอ และมี sludge กำจัดออกมาต่อเนื่องกันจนกว่าจะเปิดถังผลิตกาชทำความสะอาดบางครั้ง ขณะเปิดทำความสะอาดจะไม่มีกาชใช้ชั่วคราว ถ้ามีถังผลิตกาชถังเดียว ดังนั้นจึงมีการแก้ปัญหาโดยมีมากกว่า 1 ถัง ถ้ามีถังผลิตกาช 2 ถัง เมื่อทำความสะอาดถังหนึ่ง กาชจะยังมีใช้ เพียงแต่ปริมาณกาชลดไปครึ่งหนึ่ง ปริมาตรของถังผลิตกาชขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่มีเติมในแต่ละวัน และ retention time ถ้าไม่เติมวัตถุดิบตลอดเวลา เช่น เติมวันละครั้ง อาจเรียก semicontinuous-fed digester แบบนี้เป็นที่นิยมใช้ในการผลิตกาชชีวภาพทั่ว ๆ ไป ได้มีมีการออกแบบเพื่อให้เหมาะสมกับความต้องการในแต่ละแห่งมากมาย ในที่นี้จะยกมาเพียงบางแบบดังนี้

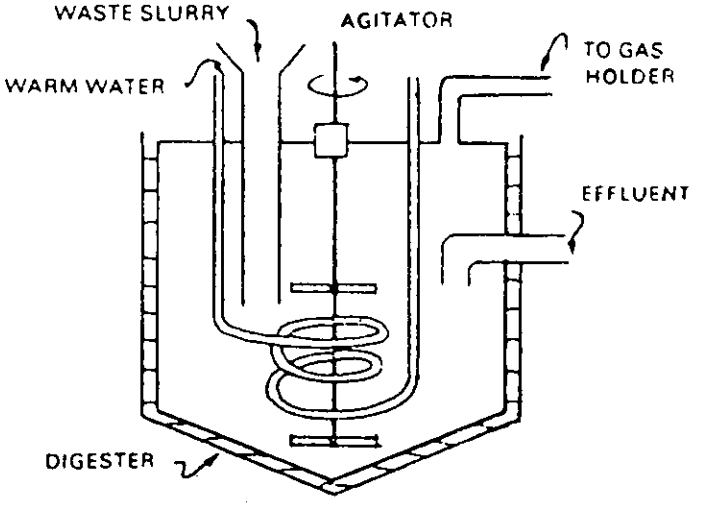
China biogas plant ถังผลิตกาชทำหน้าที่เป็นถังเก็บกาชด้วย เมื่อกาชเกิดขึ้นมากจะไล่ digester slurry ให้ต่ำลง เมื่อกาชถูกใช้หมดไป digester slurry จะขึ้นไปแทนที่ มีที่เติมวัตถุดิบด้านหนึ่ง อีกด้านหนึ่งเป็นทาง

กำจัด sludge ที่ลันขึ้นมา ตั้งอยู่ในพื้นดินได้ เพราะการกำจัด sludge สะดวก และทำให้ถังผลิตกาซไม่สูญเสียความร้อนไปกับอากาศ ดังรูปที่ 7



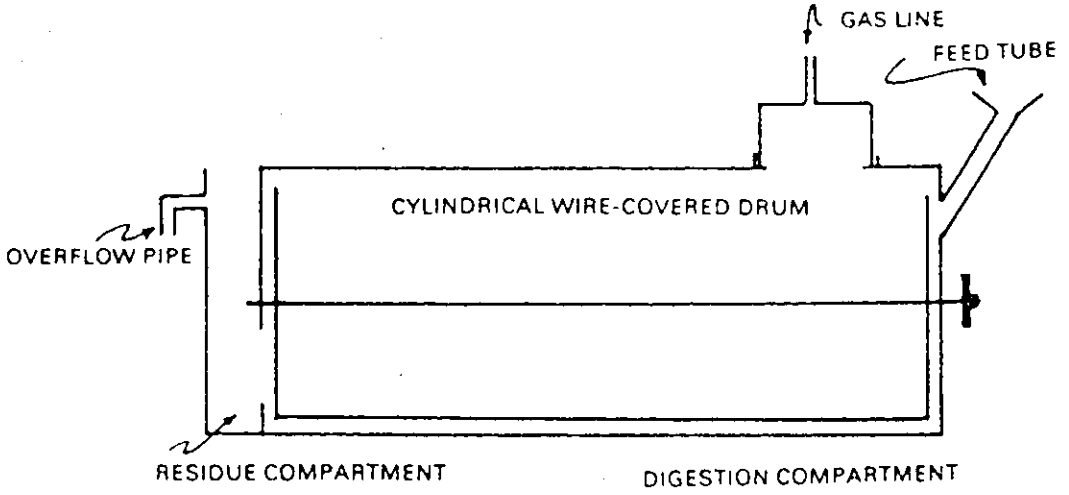
รูปที่ 7 China biogas plant (Maramba, 1978)

ได้มีการออกแบบถังหมักกาซชีวภาพใช้ในการหมักมูลสุกร ใช้ในประเทศญี่ปุ่น ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำ ถังผลิตกาซเป็นถังเหล็กมีเครื่องกวนและเครื่องให้ความร้อนอยู่ภายใน เมื่อได้กาซต่อท่อไปเก็บในที่เก็บกาซ ดังรูปที่ 8



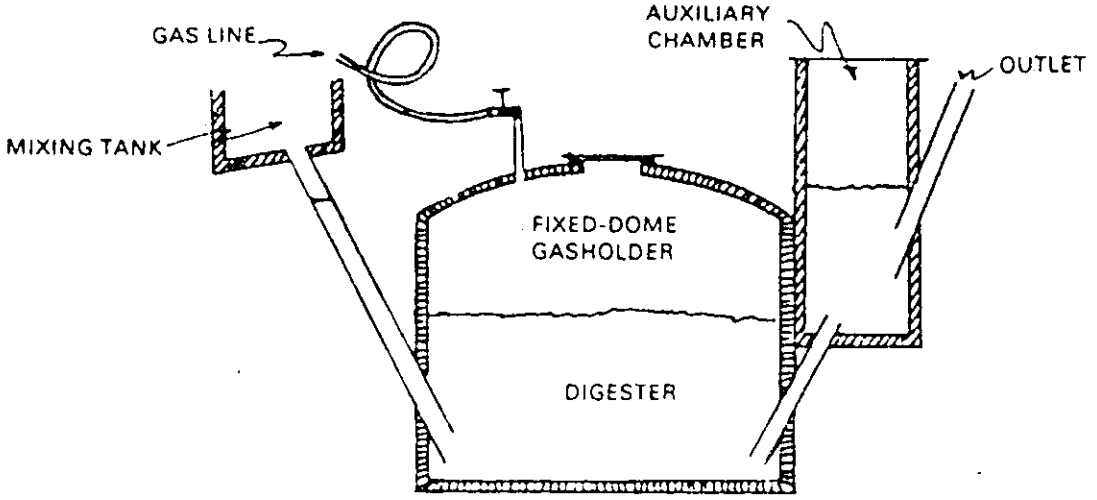
รูปที่ 8 Anaerobic digestion of pig manure, Japan (Maramba, 1978)

Buswell และ Boruff แห่งมหาวิทยาลัยอิลลินอยส์ ได้ออกแบบถังผลิตกาซชีวภาพเป็นรูปทรงกระบอก และมีถังทรงกระบอกซึ่งหมุนได้อยู่ข้างใน มีทางเติมวัตถุดิบลงใน feed tube และ sludge ออกทาง overflow pipe กาซที่ได้ไปตามท่อเข้าสู่ที่เก็บกาซ ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 Drum digester for fibrous materials (Maramba, 1978)

Fixed-dome continuous-fed biogas plant ซึ่ง Maya farms ในฟิลิปปินส์ ได้ดัดแปลงมาจาก China biogas plant โดยใช้ท่อคอนกรีตขนาดต่าง ๆ แทนการก่ออิฐ เป็นการประหยัดแต่มีข้อจำกัดที่ปริมาตรที่เก็บกาซ เปลี่ยนแปลงได้น้อยกว่า ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 Fixed-dome continuous-fed biogas plant (Maramba, 1978)

Central Library
Prince of Songkhla University

จากแบบต่าง ๆ ของโรงผลิตกาซที่นำมาแสดงเพียงบางแบบนี้ จะพบว่ามีหลักการเช่นเดียวกันคือ ถังผลิตกาซและที่เก็บกาซอากาศต้องเข้าไม่ได้ มีทางนำกาซออกมาเก็บหรือออกมาใช้ มีวัตถุดิบเป็นของเหลวเพื่อให้จุลินทรีย์ได้ใช้และเปลี่ยนเป็นกาซชีวภาพได้สะดวก บางแบบอาจมีเครื่องกวนตามความจำเป็นของวัตถุดิบบางอย่าง บางแบบมีการให้ความร้อนเพิ่ม ซึ่งจำเป็นสำหรับบริเวณที่ตั้งมีอุณหภูมิต่ำ สำหรับประเทศไทยโชคดีเกี่ยวกับปัญหาด้านนี้ จึงเหมาะสมที่จะสนับสนุนให้มีการผลิต และใช้กาซชีวภาพกันให้กว้างขวาง เพื่อจะได้พลังงานทดแทน และกำจัดของเสีย ไม่ให้เพิ่มมลพิษในสิ่งแวดล้อม

3. ผลจากการหมักสารอินทรีย์ในสภาพไร้ออกซิเจน

เมื่อเกิดการหมักของสารอินทรีย์ในสภาพไร้ออกซิเจน จะได้กาซชีวภาพ และสารที่ถูกย่อยแล้ว อยู่ในสภาพของเหลวที่เรียก sludge มีการค้นคว้าเพื่อจะนำผลที่ได้เหล่านั้น มาใช้ให้เป็นประโยชน์มากที่สุด โดยให้มีโทษน้อยที่สุด

3.1 ประโยชน์ของกาซชีวภาพ

กาซชีวภาพเป็นกาซที่มีค่าในแง่เชื้อเพลิงได้ เพราะมีกาซมีเทน ได้มีการศึกษาพบว่ากาซชีวภาพไม่ใช่กาซมีเทนบริสุทธิ์ แต่ประกอบด้วยมีเทน (CH_4) คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน และกาซอื่น ๆ อีกบ้างเล็กน้อย ได้มีการหาส่วนประกอบของกาซชีวภาพที่ได้จากโรงผลิตกาซชีวภาพหลายแห่ง พบว่าประกอบด้วยกาซต่าง ๆ ดังตารางที่ 2

Constituent	% ของกาซในกาซชีวภาพจากหลายโรงผลิตกาซชีวภาพ						
CH_4	42.5	61.0	62.0	67.0	70.0	73.7	75.0
CO_2	47.7	32.8	38.0	30.0	30.0	17.7	22.0
H_2	1.7	3.3	trace	-	-	2.1	0.2
N_2	8.1	2.9	trace	3.0	-	6.5	2.7

ตารางที่ 2 (ต่อเนื่อง)

Constituent	% ของกาซในกาซชีวภาพจากหลายโรงผลิตกาซชีวภาพ						
H_2S	-	-	0.15	-	0.015	0.06	0.1
H_o (Btu/ft^3)	459	667	660	624	728	791	716
dv	1.04	0.87	0.92	0.86	0.85	0.74	0.78

ตารางที่ 2 ส่วนประกอบของกาซชีวภาพจากโรงผลิตกาซชีวภาพ 7 แห่ง (Resource and Education Association 1978)

การใช้กาซชีวภาพในสภาพเป็นเชื้อเพลิงแทนเชื้อเพลิงอื่น ๆ โดยรับจากแหล่งผลิตโดยตรง ทั้งนี้เพราะกาซชีวภาพไม่สามารถบรรจุถังในสภาพของเหลวได้เหมือนกาซที่ได้จากธรรมชาติ Liquefied petroleum gas (LPG) ซึ่งประกอบด้วยโปรเปน (propane) และบิวเทน (butane) ทั้งนี้เพราะมีเทนซึ่งเป็นกาซส่วนใหญ่ในกาซชีวภาพ มีจุดที่จะเป็นของเหลวต่ำมาก ดังตารางที่ 3

Chemical formula	CH_4
Molecular weight;	16.042
Boiling point at 14.696 psia (760 mm)	-258.68°F(-161.49°C)
Freezing point at 14.696 psia (760mm)	-296.46°F(-182.48°C)
Critical pressure:	673.1 psia(47.363 kg/cm^2)
Critical temperature;	-116.5°F (-82.5°C)
Specific gravity;	
Liquid (at-263.2°F(-164°C)	0.415
Gas (at 77°F(25°C) and	

ตารางที่ 3 (ต่อเนื่อง)

14.696 psia (760 mm)	0.000658
Specific volume at 60°F (15.5°C) & 14.696 psia (760 mm)	23.61 ft^3/lb (1.47 l/gm)
Calorific value 60°F (15.5°C) & 14.696 psia (760 mm)	1,112 Btu/ft^3 (38,130.71 kj/m^3)
Air required for combustion ft^3/ft^3	9.53
Flammability limits:	5 to 15 percent by volume
Octane rating	130
Ignition temperature:	1,202°F (650°C)
Combustion equation	$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$
O_2/CH_4 for complete combustion:	3.98 by weight
O_2/CH_4 for complete combustion:	2.0 by volume
CO_2/CH_4 from complete combustion:	2.74 by weight
CO_2/CH_4 from complete combustion:	1.00 by volume

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของกาซมีเทน

ข้อดีของการใช้กาซชีวภาพ (Maramba, 1978)

1. ให้ความร้อนได้สูงกว่ากาซอื่น ๆ
2. เผาไหม้แล้วไม่เป็นพิษ เพราะกาซอื่น ๆ เมื่อเผาไหม้แล้วจะให้กาซคาร์บอนมอนอกไซด์สูง
3. ไม่มีเขม่า
4. ไม่มีกลิ่น
5. มีอัตราการเผาไหม้สูง

6. ผลิตง่าย

7. วัตถุดิบไม่แพง

8. ช่วยกำจัดของเสียจากสิ่งแวดล้อม

ได้มีการใช้กาซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงได้หลายทางดังนี้

1. การหุงต้มอาหาร

2. ทำความอบอุ่น

3. จุดตะเกียงให้แสงสว่าง

4. ใช้กับตู้เย็นที่ใช้กาซ

5. ใช้กับเครื่องปั๊มน้ำที่ใช้กาซ

6. ใช้เป็นเชื้อเพลิงหมุน generator ผลิตไฟฟ้า

7. ใช้กับรถยนต์ก็ได้ แต่บรรจุกาซไปกับรถไม่ได้มากพอที่จะไปได้ไกล ๆ

เนื่องจากกาซชีวภาพ ยังมีกาซที่ไม่มีประโยชน์ในแง่เชื้อเพลิง เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ และอาจมีกาซให้โทษต่อเครื่องยนต์ที่เป็นโลหะเช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) และอาจจะมีสารอื่น ๆ ผสมอยู่อีก แต่การกำจัดกาซเหล่านี้ ก่อนนำกาซชีวภาพไปใช้บางอย่างก็ไม่จำเป็น จะมีความจำเป็นมากเมื่อนำไปใช้กับเครื่องยนต์ เพราะจะทำให้โลหะเป็นสนิม ดังนั้นจึงมีการค้นหาวิธีทำให้กาซชีวภาพบริสุทธิ์ (biogas purification) ดังต่อไปนี้

1. Particle ต่าง ๆ กำจัดโดยใช้วิธีกรองให้กาซผ่าน filter

2. ไอน้ำ กำจัดโดยทำให้เย็น ไอน้ำจะควบแน่น หรือให้กาซผ่านสารดูดความชื้น เช่น silica gel

3. ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) เกิดขึ้นจากสารพวกโปรตีน ถูกเปลี่ยนแปลงจากการหมักในสภาพไร้ออกซิเจน อาจจะมีได้ถึง 0.5 % v/v ไฮโดรเจนซัลไฟด์มีสภาพเป็นกาซพิษ เมื่อเกิดการเผาไหม้จะเปลี่ยนเป็นซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ซึ่งไม่มีกลิ่น แต่ให้โทษมากกว่าไฮโดรเจนซัลไฟด์ ถ้ากาซที่ใช้ในเครื่องยนต์มีไฮโดรเจนซัลไฟด์ผสมอยู่ จะทำให้ส่วนของเครื่องยนต์ที่เป็นโลหะเป็นสนิม และเมื่อกาซถูกเผาไหม้จะได้กาซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เมื่อมีน้ำอยู่ด้วยจะเกิด

กรดซัลฟูริค ทำให้ท่อต่าง ๆ และปล่องไฟเป็นสนิมเร็วมาก ถ้าเก็บกาซที่มีไฮโดรเจนซัลไฟด์ผสมอยู่ในถังที่บรรจุ ใช้ความดันสูงประมาณ 200 bar มีน้ำอยู่ด้วย จะทำให้ถังที่บรรจุเป็นสนิมอย่างรวดเร็ว กาซที่ใช้ใน internal combustion engines ปกติจะต้องมีไฮโดรเจนซัลไฟด์น้อยกว่า 50 - 100 ppm (Egger et al., 1985)

Jensen-holm (Jensen-holm, 1985) กำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยใช้สารเคมี (chemisorption) ดังนี้

ก. Iron oxide (Fe_2O_3) โดยเกิดปฏิกริยาดังนี้

$$2Fe_2O_3.X\ H_2O + 6H_2S \text{ -----> } 2Fe_2S_3 + 2(3 + X)H_2O$$

ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นมีขบวนการซับซ้อน และอาจมีปัญหาขึ้นได้เมื่อความชื้นและ pH ในขณะเกิดปฏิกริยาไม่พอเหมาะ การเพิ่มอากาศเข้าไปจะทำให้ปฏิกริยาการดูดไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นไปได้อย่างรวดเร็วต่อเนื่อง เพราะ Fe_2S_3 ที่เกิดขึ้นถูกออกซิเจนในอากาศเปลี่ยนต่อไปเป็นซัลเฟอร์ (S) กับ ion oxide ซึ่งจะทำหน้าที่จับไฮโดรเจนซัลไฟด์ต่อไปในลักษณะตัวเร่ง (catalyst) ดังปฏิกริยา

$$2Fe_2S_3 + 3O_2 + 2XH_2O \text{ ----> } 2Fe_2O_3.XH_2O + 6S$$

ในทางพฤตินัยได้มีการใช้ bog iron ore ซึ่งมี iron oxide เป็นองค์ประกอบ และมีน้ำอยู่ด้วยได้ใช้กันมานานแล้ว ในอุตสาหกรรมกาซเป็นวิธีกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ และไฮโดรเจนไซยาไนด์ (HCN) จากกาซถ่านหิน อาจใช้เศษเหล็กจากโรงงานเหล็ก (steel milling chip) แทน bog iron ore หลังจากขบวนการนี้ จะมีไฮโดรเจนซัลไฟด์เหลืออยู่น้อยกว่า 1 - 5 ppm

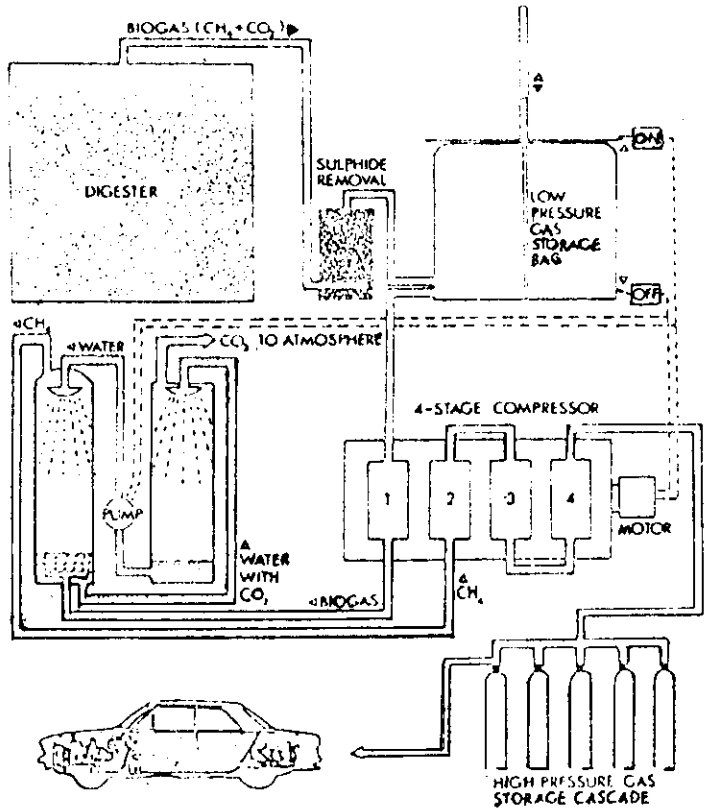
ข. สารละลายคาร์บอเนต (carbonate solution) หรือสารละลายแอมโมเนีย (ammonia water) ใช้วิธีพ่นเป็นฝอย แล้วให้กาซชีวภาพผ่าน ไฮโดรเจนซัลไฟด์และคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกกำจัดได้เช่นเดียวกัน และยังได้ผลพลอยได้ใช้เป็นปุ๋ย Jenson-holm ได้ทดลองใช้กาซคาร์บอนไดออกไซด์ 35 vol % และไฮโดรเจนซัลไฟด์ 0.5 vol % พบว่าใช้ 2 % สารละลายแอมโมเนียพ่น จะกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ 40 % และคาร์บอนไดออกไซด์ได้ 12 % ถ้าใช้สารละลายแอมโมเนีย 6 % สารละลายแอมโมเนียพ่นจะกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้

85 % และคาร์บอนไดออกไซด์ได้ 68 %

4. คาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากกาซชีวภาพมีคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณสูง ทำให้ค่าความร้อนของกาซชีวภาพต่ำ เมื่อจะนำไปใช้ในการขับเคลื่อนยานพาหนะ จำเป็นจะต้องกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อให้มีมีเทนอย่างน้อย 85 % ซึ่งจะมีค่าใช้กับเครื่องยนต์ดีเซล โดยอาศัยคาร์บอนไดออกไซด์มีคุณสมบัติละลายในน้ำได้ดีกว่ามีเทน 25 เท่า ทำให้แยกคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากกาซชีวภาพได้ด้วยวิธีการชึ่ง Egger และคณะ (Egger et al., 1985) ได้ทดลองผ่านกาซชีวภาพที่ได้จากการหมักด้วยแรงดัน 9 bar ผ่านเข้าไปทางก้นถังที่มีน้ำพ่นทางด้านบน ขณะคาร์บอนไดออกไซด์สัมผัสกับละอองน้ำ จะละลายกาซชีวภาพผ่านออกทางด้านบนของถังส่วนน้ำที่ผ่านลงสู่ก้นถังจะต่อท่อไปยังถังอื่น ความดันจะลดลงคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายมา จะแยกตัวออกไปบ้าง น้ำจึงสามารถนำกลับมาใช้พ่นใหม่ได้ โดยผสมน้ำลงไปอีก 10 % เพื่อให้สามารถละลายคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีเหมือนเดิม และเนื่องจากไฮโดรเจนซัลไฟด์ก็ละลายในน้ำได้ดีกว่าคาร์บอนไดออกไซด์ ถึง 3 เท่า ดังนั้น ขณะแยกคาร์บอนไดออกไซด์ออก ไฮโดรเจนซัลไฟด์จึงถูกแยกออกด้วย จากผลการทดลองพบว่า อัตราการพ่นน้ำและอัตราการผ่านกาซมีความสำคัญต่อการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนซัลไฟด์ พบว่าได้พ่นน้ำ 43 ลิตร ต่อนาที ลงไปในถังที่ผ่านกาซชีวภาพ 7.7 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งมีมีเทน 85 % ไฮโดรเจนซัลไฟด์จะถูกกำจัดไปประมาณ 90 - 95 % และสูญเสียมีเทนไป 16 % ด้วย

สรุปแล้วการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนซัลไฟด์จะเกิดขึ้นได้พร้อม ๆ กัน และวิธีละลายในน้ำที่ความดันสูง เป็นวิธีกำจัดที่เสียค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด

Stewart และคณะ (Stewart et al., 1981) ได้ทำแผนการกำจัดกาซที่ไม่ต้องการออกจากกาซชีวภาพแล้วบรรจุในภาชนะ เพื่อใช้กับรถยนต์ ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 Schematic illustration of the washing and compression of biogas to provide compressed methane for fuelling vehicles. (Stewart et al., 1981)

กาซชีวภาพจากถังผลิตกาซ ผ่านเข้าสู่ด้านล่างของถังสารดูดไฮโดรเจนซัลไฟด์ แล้วผ่านกาซออกทางด้านบนเข้าสู่ถุงเก็บกาซที่มีความดันต่ำ แล้วผ่านออกไปยังเครื่องอัดความดัน 1 (compressor 1) ไปยังด้านล่างของถังที่มีน้ำพ่นจากข้างบน เพื่อละลายคาร์บอนไดออกไซด์ กาซชีวภาพจะผ่านต่อไปยังเครื่องอัดความดัน 2, 3 และ 4 (compressor 2, 3 และ 4) เพื่อไปสู่แหล่งบรรจุลงถังเก็บไว้ เพื่อใช้กับยานพาหนะ น้ำที่มีคาร์บอนไดออกไซด์ละลายอยู่ ต่อมาพ่นลงสู่ถังซึ่งมีทางเปิดสู่อากาศ คาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายอยู่ในน้ำ ส่วนมากจะแยกตัวออก น้ำที่ตกลงสู่ก้นถังผ่านเข้าเครื่องปั๊มไปใช้พ่น เพื่อดูดคาร์บอนไดออกไซด์ต่อไป การผ่านกาซตลอดวงจรควบคุมด้วย motor และ automatic switch

3.2 ประโยชน์ของ sludge

เมื่อมีคนกินเนื้อสัตว์เพิ่มขึ้น การเลี้ยงสัตว์ก็เพิ่มขึ้น ทำให้มีของเสียจากสัตว์เพิ่มมากจนเป็นปัญหา จึงมีการค้นคว้ากันอย่างรีบเร่งในสหรัฐอเมริกา เพื่อ

การกำจัดของเสีย ได้กาซชีวภาพมาใช้เป็นพลังงาน และของเหลวที่กำจัดออกมาจากการผลิตกาซชีวภาพ (sludge) นำมาค้นคว้าวิจัย เพื่อใช้ให้เป็นประโยชน์ได้หลายแนวทาง (Boersma, 1978) ดังนี้

1. ใช้เป็นปุ๋ยในการปลูกพืช เนื่องจากมีองค์ประกอบของธาตุไนโตรเจน โปแตสเซียม ฟอสฟอรัส ที่พืชต้องการอยู่มาก และยังทำให้ดินได้ปุ๋ยอินทรีย์ (humous) เพิ่มขึ้น อาจใช้ในสภาพที่ยังเป็นของเหลวไปผสมกับดิน หรือรดพืชโดยตรง หรือแยกเอาน้ำออกก่อนก็ได้

2. ใช้เลี้ยงสาหร่าย อาจใช้ของเหลวทั้งหมด หรือของเหลวที่ปล่อยให้ของแข็งตกตะกอนแล้วก็ได้สาหร่ายที่นิยมนำมาเลี้ยง ได้แก่พวกสาหร่ายเซลเดียว เช่น Chlorella และ Scenedesmus

3. ใช้เลี้ยงยีสต์และ microfungi ใช้ของเหลวที่ปล่อยให้ของแข็งตกตะกอนแล้วไปเลี้ยงยีสต์เช่น Candida acidothermophilum จะมีโปรตีน 45 ถึง 50 % w/w ส่วนพวก microfungi เช่น Paecilomyces varioti จะมีโปรตีน 55 - 60 % w/w พวก microfungi ดีกว่าในแง่ให้โปรตีนสูง และเอาน้ำออกได้ง่าย โดยการบีบน้ำออกเพราะมีลักษณะเป็นสาย ส่วนยีสต์ต้องไล่น้ำออกด้วยความร้อน

4. ใช้เลี้ยงแบคทีเรีย ใช้ของเหลวที่ปล่อยให้ของแข็งตกตะกอน แล้วมาเลี้ยงแบคทีเรียเพื่อจะได้ single cell protein แบคทีเรียที่เลี้ยงจะเป็นพวกที่ไม่เป็นพิษต่อสัตว์ และไม่ทำให้เกิดโรคกับคนและสัตว์ มักใช้เลี้ยงแบบ continuous culture แยกแบคทีเรียออกโดยวิธีให้ตกตะกอน ต้องหลีกเลี่ยงการย่อยสลายตัวมันเอง เมื่อทำให้แห้งแล้วจะมีโปรตีนประมาณ 50 - 75 % w/w

5. ใช้เลี้ยงปลา นำของเหลวที่ปล่อยออกมาไปเลี้ยงแบคทีเรีย, phytoplankton, zooplankton และ chironomides ซึ่งเป็นอาหารของปลาอีกต่อหนึ่ง โดยเลี้ยงปลาในที่เดียวกันนั้น

เปรมจิตได้ศึกษาการใช้ประโยชน์ของ sludge ในฟาร์มผสมผสาน (เปรมจิต, 2527) มีการทดลองและได้ผลดังนี้ นำมูลสุกรซึ่งมีอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) เป็น 22.5 ผสมกับน้ำในอัตราส่วน 1 : 1 หมักในสภาพไร้ออกซิเจน 30 วัน ได้กาซมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับหุงต้ม ส่วน

sludge ประกอบด้วย N : P : K เป็น 4 : 8 : 3 เปอร์เซนต์ตามลำดับ ใช้เป็นปุ๋ยสำหรับเพาะเลี้ยงสาหร่ายคลอเรลลาน้ำจืด และปลูกพืชผักสวนครัว สาหร่ายสีเขียวซึ่งให้โปรตีนสูง ผสมกับอาหารตามธรรมชาติในบ่อเลี้ยง ปล่อยลงสู่บ่อปลานิล ปรากฏว่าอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของปลานิลที่เลี้ยงนี้เป็น 4.31 ส่วนที่เลี้ยงตามธรรมชาติเป็น 2.35 ส่วนผักคะน้าที่ใส่ sludge ให้ผลผลิตสูงถึง 1097 กิโลกรัมต่อไร่ ขณะที่ใส่มูลสดให้ผลผลิต 599 กิโลกรัมต่อไร่ และใส่ปุ๋ยยูเรียให้ผลผลิต 480 กิโลกรัมต่อไร่ จากการวิจัยนี้จะเห็นว่า เมื่อมีการเลี้ยงสัตว์ได้มูลสัตว์นำมาใช้หมักกาซชีวภาพ แล้วนำ sludge ไปทำประโยชน์ต่อไปโดยการปลูกพืช และเลี้ยงปลา ซึ่งเป็นการหมุนเวียนทรัพยากรและช่วยลดมลภาวะในสิ่งแวดล้อม ซึ่งเหมาะสมอย่างยิ่งต่อสภาพในชนบท

3.3 <u>ผลต่อสิ่งมีชีวิตที่ทำให้เกิดโรค</u> (pathogen inactivation)

โรคที่เกิดกับสัตว์และพืช พอจะแบ่งได้เป็น 5 กลุ่ม ได้แก่

1. ไวรัส เช่น ไวรัสที่ทำให้เกิดโรค hepatitis gastroenteritis, poliomyelitis

2. โปรโตซัว เช่น โปรโตซัวที่ทำให้เกิดโรคบิด

3. แบคทีเรีย เช่น แบคทีเรียที่ทำให้เกิดโรคไทฟอยด์ พาราไทฟอยด์ บิด อหิวาต์ วัณโรค enteritis, salmonellosis

4. รา เช่น ราที่ทำให้เกิดโรคพืช

5. ไข่พยาธิ เช่น ไข่ของพวกพยาธิตัวกลม พยาธิตัวแบน พยาธิใบไม้

จากการนำสารอินทรีย์ที่ได้จากพืชและสัตว์ไปทำการหมัก เมื่อให้กาซชีวภาพแล้ว ได้นำ sludge ไปใช้ประโยชน์ต่าง ๆ กัน เช่น เป็นปุ๋ย นำไปเลี้ยงสาหร่าย ฯลฯ จึงมีปัญหาที่น่าศึกษาเกี่ยวกับสิ่งมีชีวิตที่ทำให้เกิดโรค (pathogen) ซึ่งอาจมีอยู่ในสารอินทรีย์ที่ได้จากสิ่งมีชีวิต ที่นำมาหมักให้กาซชีวภาพ เมื่อผ่านการหมักในสภาพไร้ออกซิเจนแล้ว สิ่งที่กำจัดออกมาจะยังมีสิ่งมีชีวิตเหล่านั้นอยู่รอดเพื่อแพร่เชื้อต่อไปหรือไม่ มีผู้สนใจศึกษาทดลอง ซึ่งพอสรุปได้ดังนี้

มีรายงานจาก National Academy Science, Washington เกี่ยวกับ Poliovirus จะตาย 98.5 % หลังจากอยู่ในถังหมักที่อุณหภูมิ 35°C เป็นเวลา 2 วัน (Nat. Acad. Sci., 1977)

Olsen (Olsen, 1985) ได้ทดลองใส่แบคทีเรียลงไปหมักในสภาพไร้ออกซิเจนที่อุณหภูมิ 35°C และ 53°C แบคทีเรียที่ใส่ลงไปในการทดลองได้แก่

Bacillus	cereus
Clostridium	perfringens type C
Erysipelothrix	rhusiopathiae
Escherichia	coli
Mycobacterium	paratuberculosis
Salmonella	dublin
Salmonella	typhimurium
Staphylococcus	aureus
Streptococcus	faecalis

พบว่าพวกแบคทีเรียที่สร้างสปอร์ได้แก่ Bacillus cereus และ Clostridium perfringens type C ยังคงอยู่รอดทั้งหมักที่ 35°C และ 53°C ส่วนพวกที่ไม่สร้างสปอร์จะลดลง 90 % ภายใน 1 - 3 วัน เมื่อหมัก 35°C และภายใน 0.4 - 1 ชั่วโมง ที่ 53°C

ปกติมูลของสัตว์ต่าง ๆ มักจะมีไข่ของพยาธิถูกกำจัดออกมาด้วย Arthur และคณะ (Arthur et al., 1981) ได้ทดลองโดยรวบรวมไข่พยาธิไปหมักในสภาพไร้ออกซิเจน แล้วศึกษาว่าไข่พยาธิสามารถฟักเป็นตัวหรือไม่เพียงไร ไข่พยาธิที่ทดลองได้แก่ไข่พยาธิของ Ascaris spp., Toxasaris leonina, Toxocara spp. และ Trichuris spp. หลังจากหมักที่ 35°C หมักแบบ continuous-fed digester ซึ่งใช้ retention time 14 วัน ได้พบว่าไข่พยาธิส่วนใหญ่ ฝอ มีสภาพเปลือกไข่ชำรุด รูปร่างเปลี่ยนไป สีหายไป หรือไซโต - ปลาสซึมเปลี่ยนแปลง ไม่มีความเป็นเนื้อเดียวสม่ำเสมอกัน (lack of cytoplasmic homogenicity) เมื่อเอาไข่ที่รวบรวมได้มาเพาะ พบว่าไข่ที่แยกมาจาก sludge ที่ปล่อยออกมาใหม่ ๆ มี 55.45 % ที่ฟักเป็นตัว ไข่ที่แยกมาจาก lagooned sludge จะมี 17 % ที่ฟักเป็นตัว

Olsen (Olsen, 1985) ได้ทดลองเอาไข่ nematode 3 ชนิด

มาหมักในสภาพไร้ออกซิเจน พบว่า

หมักที่ 35°C Cooperia oncophora จะตายภายใน 2-4 วัน

Oesophagostomum spp. จะตายภายใน 8-14 วัน

Ascaris suum จะตายภายใน 21-35 วัน

หมักที่ 53°C ทุกชนิดมีชีวิตอยู่ไม่เกิน 1 ชั่วโมง

Pike และคณะ (Pike et al., 1983) ได้ศึกษาไข่ของ Ascaris spp. และ Taenia saginata ได้พบว่าไข่ของ Ascaris spp. หมักที่ 49°C ระหว่าง 10 - 20 วัน 99 % ไม่สามารถฟักเป็นตัว ถ้าหมัก 35°C ยังฟักเป็นตัวได้ถึง 58 % ไข่ของ Taenia saginata หลังจากหมักในสภาพไร้ออกซิเจนที่ 35°C 3 วัน ไม่มีไข่ที่ฟักเป็นตัวเลย หมักที่ 55°C 3 ชั่วโมง ไม่มีไข่ที่ฟักเป็นตัวเลย

Turner และคณะ (Turner et al., 1983) ได้ทดลองเกี่ยวกับอิทธิพลของการหมักแบบไร้ออกซิเจนว่า มีผลต่อสิ่งมีชีวิตที่ทำให้เกิดโรคอย่างไร โดยใช้สิ่งมีชีวิตที่ทำให้เกิดโรคพืชดังนี้

Fusarium oxysporum เป็นราที่ทำให้เกิด wilt and root rot ของมะเขือเทศ คาร์เนชั่น และข้าว

Corynebacterium michiganense เป็นแบคทีเรียที่ทำให้เกิดโรค vascular wilt, canker and leaf fruit spot ของมะเขือเทศ มันฝรั่ง และยาสูบ

Globodera pallida เป็น nematode worm ซึ่งทำลายเนื้อเยื่อรากของ host เป็นพวก potato root eelworm

ได้พบว่าหลังจากการหมักแบบไร้ออกซิเจนที่อุณหภูมิ 35°C จะมีผลต่าง ๆ กันดังนี้

Fusarium oxysporum หมัก 28 ชั่วโมง จะตายไป 99 % และไม่พบเลยหลังจากหมัก 4 วัน

Corynebacterium michiganense หลังจากใส่เชื้อแล้วหมัก 5 วัน เชื้อตาย 99.9 % และไม่พบเลยในการหมัก 7 วัน

Globodera pallida หลังจากใส่ cyst และหมัก 3 วัน

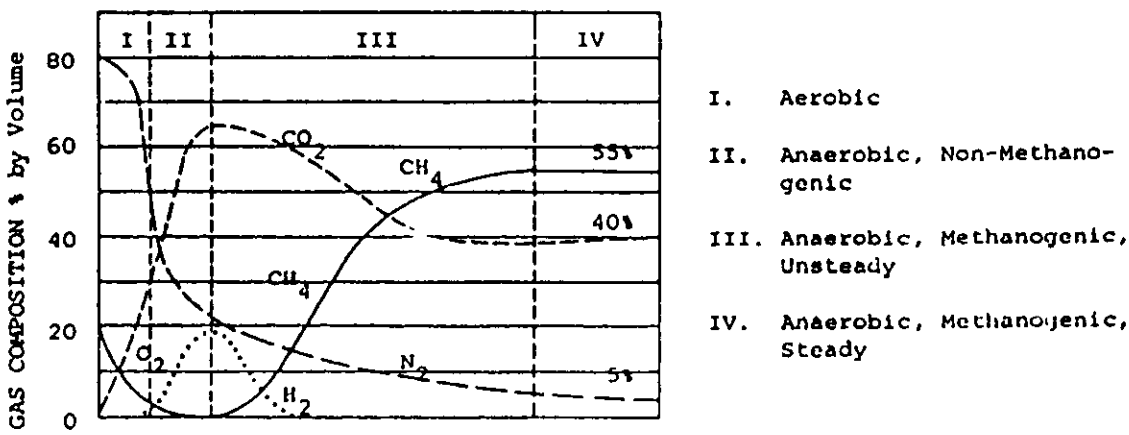
99 % cyst ไม่เป็นตัว หมัก 7 วัน จะไม่มีเป็นตัวเลย แต่ยังมี cyst ที่มี dead larvae อยู่ หมัก 10 วันไม่มีเหลือเลยแม้แต่ cyst ที่มี dead larvae

ถ้าหมักแบบไร้ออกซิเจน 2 - 3 วัน เชื้อโรคพืชจะตายเกือบหมด ถ้าจะให้แน่ใจปลอดภัยจากเชื้อโรคพืชในการจะเอาไปใช้เป็นปุ๋ย ควรจะใช้เวลาหมัก (retention time) 10 วัน ที่อุณหภูมิ 35°C

ในการใช้ sludge ใส่เป็นปุ๋ยในฟาร์ม การหว่านบนผิวดินจะเป็นสภาพที่เหมาะสมให้ไข่ออกเป็นตัว ดังนั้นเพื่อป้องกันการแพร่ของพยาธิเหล่านี้ ควรใช้วิธีใส่ปุ๋ยให้ลึกลงไปในดิน จะทำให้ไข่ฟักออกเป็นตัวได้ยาก ถึงแม้ว่าจะทำให้ไข่ของพยาธิรอดพ้นจากการตายด้วยแสงอุลตราไวโอเลท และความแห้งบนผิวดิน แต่เมื่อถูกฝังในดิน ไข่พยาธิจะได้รับออกซิเจนน้อย และไม่แพร่กระจายตามผิวดิน จึงไม่มีโอกาสเข้าสู่ host

3.4 <u>ผลจากการทิ้งขยะรวมกันอยู่ในดิน</u> (Landfill)

เมื่อมีการฝังสารอินทรีย์มาก ๆ ลงในดิน จะมีการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ในธรรมชาติ พอจะแบ่งเป็น 4 ระยะ (Willumsen, 1984) ดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 Time after placement. Ref.: Water, Air and Soil Pollution. Year 1980, number 13, page 157-172.

ระยะที่ 1 เป็นระยะที่มีการเจริญของพวก aerobic bacteria ทำให้ออกซิเจนหมดไปอย่างรวดเร็ว รวมทั้งสารที่ให้ออกซิเจนด้วย อุณหภูมิจะสูงขึ้น

อย่างมาก ช่วงนี้เป็นระยะเวลาสั้น ๆ โดยทั่วไปไม่เกิน 2 - 3 สัปดาห์

ระยะที่ 2 เป็นระยะที่มีการเจริญของพวก anaerobic bacteria คาร์บอนไดออกไซด์จะเพิ่มปริมาณขึ้นจนเกือบสูงสุด ไฮโดรเจนถูกผลิตขึ้น ไนโตรเจนเริ่มลดลงโดยพวก denitrified bacteria ระยะนี้ประมาณ 11 ถึง 45 วัน

ระยะที่ 3 พวก anaerobic และ methanogenic bacteria เพิ่มจำนวนขึ้น เป็นระยะที่มีเทนเพิ่มปริมาณขึ้นจากระยะที่ 1 จนถึงสิ้นระยะที่ 3 ใช้เวลาประมาณ 180 - 500 วัน

ระยะที่ 4 พวก anaerobic และ methanogenic bacteria เจริญต่อไปอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งมีผลให้เกิดมีเทนเพิ่มมากขึ้น

ช่วงเวลาจะแตกต่างกันมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับสภาพบรรยากาศ ความลึกของหลุมที่ฝัง สภาพของดินและอื่น ๆ อาจจะนานถึง 20 ปี

เมื่อเกิดกาซมีเทนขึ้นมาก ๆ กาซจะแพร่ไปตามดิน อาจเกิดการระเบิดเมื่อผสมกับอากาศ ถ้าอยู่ในที่ล้อมรอบด้วยสิ่งก่อสร้าง อาจจะเกิดไฟไหม้อย่างรุนแรง และระเบิดสิ่งกีดขวาง นอกจากนี้กาซมีเทนที่แพร่ไปตามดิน เป็นเหตุให้ต้นไม้และพืชต่าง ๆ ตายได้

เนื่องจากสารให้พลังงานมีราคาสูง ทำให้มีความโน้มเอียงที่จะมีผู้สนใจการค้นคว้า เพื่อเอากาซจาก landfill ซึ่งปล่อยทิ้งสูญเปล่า และมีเทนยังทำให้เกิดปัญหาดังกล่าวแล้วเพื่อนำมาใช้เป็นพลังงาน

Willumsen (Willumsen, 1984) ได้รวบรวมข้อมูลจาก 6 landfills ซึ่งมีขนาด อายุ และอยู่ในสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ กันในเดนมาร์ค ดังตารางที่ 4

Age year	Size Ha.	Volume mio.t.	Depth	Average watercontent	Average temperature °C
Viborg 8	7.0	0.35	8.0	20	11,5
Arhus 16	20.0	0.91	7.0	52	18,5
Odder 6	1.3	0.05	5.0	26	12,5
Tarm 5	4.0	0.21	5.0	23	12,5
Odense 8	70.0	2.10	18.0	22	24,5
Tune 10	7.0	1.40	19.0	27	36,2

ตารางที่ 4 Water content and temperature (Willumsen, 1984)

ส่วนประกอบของกาซที่ได้จาก landfill ทั้ง 6 และประมาณค่าความร้อนที่จะได้รับ ดังตารางที่ 5

	CH_4%	H_2%	CO_2%	O_2%	N_2%	Calorific value
Viborg	53.4	4.9	40.7	0.5	0.6	21,915
Arhus	53.5	2.2	42.0	0.7	2.0	19,914
Odder	48.8	4.3	45.1	0.5	1.3	18,546
Tarm	49.9	1.8	41.3	1.9	3.9	18,853
Odense	52.3	2.7	43.5	0.7	0.9	19,666
Tune	52.9	1.7	43.1	0.8	1.5	19,942

ตารางที่ 5 Gas composition (Willumsen, 1984)

นอกจากนี้ Willumsen ยังได้ทดลองทำ landfill ขึ้นในปี 1983 ในพื้นที่ 1 เฮคเตอร์ ลึก 5 - 11 เมตร จะใส่ขยะได้ประมาณ 380,000 ตัน แต่ในการทดลองนี้ใส่เพียง 50,000 ตัน ทดลองดูดกาซขึ้นมาใช้กับเครื่องยนต์ ผลิตกาซได้ประมาณ 20 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง แต่ยังมีปัญหาอีกมาก ถ้าจะนำกาซมาใช้