

บทที่ ๓

ทฤษฎี



๓.๑ กระบวนการย่อยสลายขยะภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน (Anaerobic Digestion of Garbage Process)

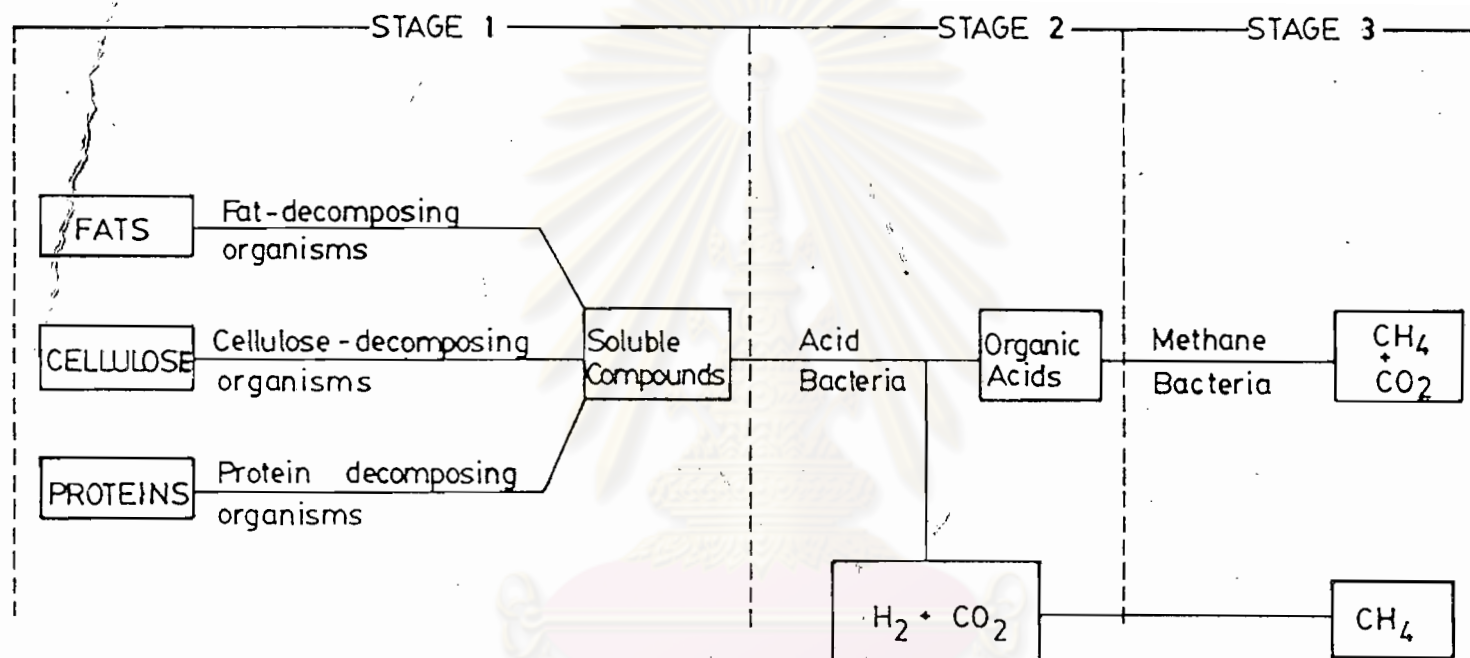
ในปัจจุบันจากการศึกษาทางด้านจุลชีว (Microbiology) และเคมี (Chemistry) ของระบบการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนอย่างละเอียดและลึกซึ้ง ทำให้สามารถแบ่งขั้นตอนการย่อยสลายได้อย่างเหมาะสม เป็น ๓ ขั้นตอนคือ

- ก) การแตกสลายโพลีเมอร์ (Polymer break down)
- ข) การสร้างกรด (Acid production)
- ค) การสร้างมีเทน (Methane production)

ขั้นตอนที่ ๑ การแตกสลายโพลีเมอร์

ในขั้นนี้สารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปโมเลกุลใหญ่ เช่น โปรตีน (Proteins), ไขมัน (Fats) และคาร์โบไฮเดรต (Carbohydrates) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของเซลลูโลส (Cellulose) และส่วนประกอบต่างๆ ของเนื้อเยื่อพืช (Plant fiber) เช่น เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (Lignin) แบบที่เรย์ไม่สามารถที่จะย่อยสลายสิ่งเหล่านี้ได้ทันที จำเป็นจะต้องส่งเอนไซม์ (Enzymes) ออกมาภายนอกเซลล์ เพื่อให้โมเลกุลใหญ่ๆ เหล่านี้แตกตัวออกเป็นโมเลกุลเล็กๆ หรือเป็นสารละลาย (solubilize) เสียก่อน เอนไซม์ที่แบบที่เรย์ส่งออกมาได้แก่ Cellulolytic, Lipolytic และ Proteolytic

โดยที่ Cellulolytic จะทำหน้าที่ในขั้นวิกฤติ (Critical) ที่สุด คือ ทำให้สารประกอบเชิงซ้อน (Complex) แตกตัวออกเป็นสารประกอบอย่างง่าย (Simple) สารละลาย (Soluble) และสารประกอบอินทรีย์ (Organic component) (๔๒)



ภาพที่ ๑ การย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เป็นของแข็งภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน (42)

(ANAEROBIC FERMENTATION OF ORGANIC SOLID)

สำหรับส่วนที่ใหญ่ที่สุดของสารอินทรีย์ใน sewage sludge, มูลสัตว์, ของเหลือจากการเกษตรและขยะก็คือ เซลลูโลส ดังแสดงในตารางที่ ๑

องค์ประกอบ (Component)	เปอร์เซ็นต์คิกจากน้ำหนักแห้ง (% Dry weigh basis)			
	Sewage Sludge (32)	Manure of Lying Hens (24)	Solid Wastes (46)	Beef Cattle (18)
Hemicellulose	6.0	16.9	11.9	22.3
Cellulose	34.5	35.8	28.3	11.6
Lipids	14.0	6.2	-	-
Protein	19.0	4.25*	28.75*	18.2*
Ash	34.0	18.2	24	26.3

ตารางที่ ๑ แสดงองค์ประกอบทางเคมีของ Sewage sludge, Solid Wastes, Manure of Lying Hens, Beef Cattle Manure

\* จาก (๒๔) Crude protein = Total Nitrogen x 6.25

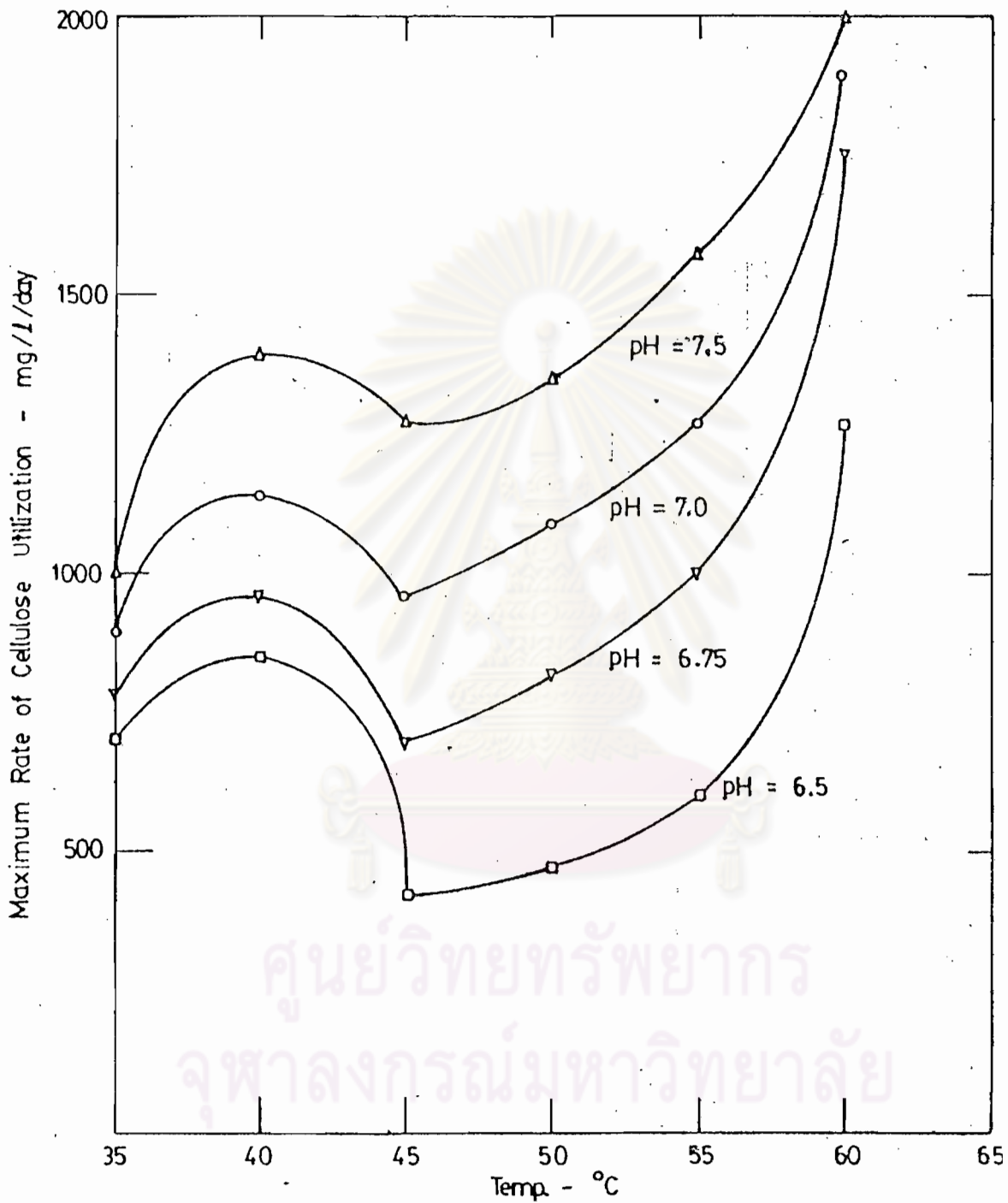
การเปลี่ยนเซลลูโลสและสารประกอบเชิงซ้อนอื่นๆให้เป็นสารพวกโมโนเมอร์ (Monomers) อย่างง่ายๆ ในบางครั้งอาจเป็นขั้นตอนที่ช้าที่สุด (Rate limiting step) ในการผลิตมีเทน (Methane production) ก็ได้ จากผลการทดลองของ Chan และ Pearson (๔) พบว่า การไฮโดรไลซิสเซลลูโลสนั้น จะเป็นขั้นตอนที่ช้าที่สุดของการเปลี่ยนเซลลูโลสไปเป็นมีเทน ซึ่งสอดคล้องกับผลของ Pfeffer (๔๔) ที่ได้ศึกษาการย่อยสลายขยะจากชุมชน (Municipal Solid Wastes) ที่อุณหภูมิระหว่าง ๓๕ ถึง ๖๕ องศาเซลเซียส

ตารางที่ ๒ และภาพที่ ๒ นี้ แสดงให้เห็นว่าอัตราการไฮโดรไลซิสเซลลูโลสขึ้นอยู่กับชนิดของสารอาหารและความเข้มข้นของแบคทีเรียรวมทั้งสภาวะแวดล้อมต่างๆ เช่น พีเอช (pH) และอุณหภูมิ

ตารางที่ ๒ แสดงอัตราการไฮโดรไลซิสของเซลลูโลสภายใต้สภาวะการหมักแบบไร้ออกซิเจน (๔๔)

(Summary of Hydrolysis Rate of Cellulose. in Anaerobic Fermentation)

Authority	System and Culture	Initial Cellulose Concentration (mg/l)	Cellulose Material	pH	Hydrolysis Rate (mg/l-day)
Maki	Batch, mixed 2 pure cultures from sewage, 38°C, mesophilic	2,000	Whatman's # 1 filter paper	6.8	(1) 260 (2) 660
Heukelekian	Batch, mixed culture from sewage, 25°C mesophilic	3,120	Cellulose in sewage sludge	7.4	142
McBee	Batch, pure culture from soil and manure, 55°C, thermophilic	(1) 744 (2) 2,980	Absorbent cotton	-	(1) 149 (2) 426
Stranks	Batch, mixed culture from rumen, 60°C, thermophilic	41,200	Whatman's # 2 filter paper	6.5	11,400



ภาพที่ ๒ ผลของอุณหภูมิและพีเอชต่ออัตราสูงสุดของการใช้เซลลูโลส ( ๔๔ )  
( THE EFFECT OF TEMPERATURE AND PH ON THE MAXIMUM -  
RATE OF CELLULOSE UTILIZATION )



## ขั้นตอนที่ ๒ การสร้างกรด

แบคทีเรียที่ทำหน้าที่ในขั้นตอนนี้ มีชื่อเรียกว่า " Acetogenic Bacteria"

อาจจะเป็นพวก Facultative หรือ Anaerobic ก็ได้ จะทำการย่อยสลายโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่แตกตัวจากโมเลกุลใหญ่จากขั้นตอนแรก ให้เป็นกรดอินทรีย์ (Organic acids) ซึ่งได้แก่ acetic acid, propionic acid, lactic acid อย่างไรก็ตาม กรดอะซิติก (Acetic acid) น่าที่จะเป็นอาหารที่สำคัญที่สุดสำหรับการเกิดมีเทน (Methane formation) เพราะจากการศึกษาอย่างถี่ถ้วนชี้ให้เห็นว่า ๗๐ เปอร์เซ็นต์ของมีเทนเกิดจากกรดอะซิติก (๒๕) และกรดอะซิติกนี้ก็เกิดมาจาก acetate ซึ่งได้มาจากปฏิกิริยารวม (Co-reaction) ของคาร์บอนไดออกไซด์รีดักชัน (Carbondioxide reduction) กับก๊าซไฮโดรเจน (๕)

## ขั้นตอนที่ ๓ การสร้างมีเทน

กรดอะซิติกที่เกิดจากขั้นตอนที่สองนั้น จะกลายมาเป็นสารอาหาร (Substrate) สำหรับกลุ่มแบคทีเรียชนิดที่คงอยู่ในสภาวะไร้ออกซิเจนอิสระ (Obligate Anaerobic) ซึ่งแบคทีเรียกลุ่มนี้มีชื่อเรียกว่า "Methanogenic Bacteria" จะทำการย่อยสลายกรดอะซิติกให้เกิดเป็นมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) และคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) มีเทนที่เกิดขึ้นนี้จะรวมกับมีเทนที่เกิดจากการที่แบคทีเรียรีดิวซ์ (Reduce) คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนหรือฟอร์มเมท (Formate) ที่เกิดจากแบคทีเรียชนิดอื่นเป็นปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นทั้งหมดของระบบ (๓๔) ซึ่งก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนนี้จะไม่ละลายในน้ำและจะออกไปในรูปของก๊าซ มันสามารถที่จะเก็บแล้วนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงที่เป็นประโยชน์ได้ สำหรับคาร์บอนไดออกไซด์บางส่วนจะออกไปในรูปของก๊าซ และบางส่วนก็จะละลายในน้ำแล้วทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออน ( $\text{OH}^-$ ) ในระบบ เกิดเป็นไบคาร์บอเนตไอออน ( $\text{HCO}_3^-$ ) ผลจากการหมุนเวียนของคาร์บอนไดออกไซด์นี้ทำให้เกิดมีผลขององค์ประกอบต่างๆในระบบ เช่น พีเอช, ความเข้มข้นของไบคาร์บอเนต, อุณหภูมิ และความเข้มข้นของสารอาหาร (substrate concentration) (๔๐)

### ๓.๒ แฟกเตอร์ที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบ ( Factor Affecting System Stability)

เนื่องจากในระบบย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน ประกอบด้วยแบคทีเรียที่ทำหน้าที่ในการสร้างกรด ( Acid Former) และที่ทำหน้าที่ในการสร้างก๊าซมีเทน ( Methane Former) ดังนั้นเพื่อที่จะควบคุมให้ระบบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ จำเป็นจะต้องทำให้แบคทีเรียต่างๆ เหล่านี้ อยู่ในสภาวะที่สมดุลกัน ซึ่งจะต้องขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ ๒ ประการ คือ แฟกเตอร์ทางด้านสิ่งแวดล้อม ( Environmental Factor) และ แฟกเตอร์ทางด้านปฏิบัติการ ( Operational Factor ) (๒๖) (๒๗) (๒๘)

ตารางที่ ๓ แฟกเตอร์ทางด้านสิ่งแวดล้อมและแฟกเตอร์ทางด้านปฏิบัติการ

แฟกเตอร์ทางด้านสิ่งแวดล้อม	แฟกเตอร์ทางด้านปฏิบัติการ
พีเอช (pH)	ระยะเวลาในการหมัก (Retention Time)
ความเป็นด่าง (Alkalinity)	ความเข้มข้นของสารอาหาร (Concentration of Substrate)
ความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่าย (Volatile Acid Concentration)	อัตราการจ่ายสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate)
อุณหภูมิ (Temperature)	องค์ประกอบของสารอาหาร (Composition of Organic Substrate)
อาหารเสริม (Nutrients)	ความสามารถในการผสม (Degree of Mixing)
สารพิษ (Toxic Materials)	ปริมาณความร้อนและสมดุลทางความร้อน (Heating and Heat Balance)

### ๓.๒.๑ แฟกเตอร์ทางค่านสิ่งแวดล้อม (Environmental Factor)

#### พีเอช ( pH )

ค่าพีเอช สามารถที่จะใช้เป็นตัวบ่งชี้ถึงสภาวะภายในถังหมักไร้ออกซิเจนได้ แต่ก็มีปัญหา คือ มันเปลี่ยนแปลงช้าในขณะที่กรโคเวลาไหลเพิ่มมากขึ้นแต่ค่าพีเอชกลับเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากผลของการบัฟเฟอร์ ( Buffering effect ) ของความเป็นค่างภายในถังหมักนั่นเอง ดังนั้นค่าพีเอชจึงเป็นตัวบ่งชี้ที่แสดงผลออกมาได้ช้าสำหรับการแก้ไขสภาวะในถังหมัก เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความเข้มข้นของกรโคเวลาไหลและปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้น แต่อย่างไรก็ตามพีเอชก็ยังเป็นสิ่งสำคัญในการควบคุมระบบการหมักแบบไร้ออกซิเจน ดังรายงานของ McCarty (๓๗) ว่าระบบจะทำงานได้ดีในช่วงพีเอชระหว่าง ๖.๖ ถึง ๗.๖ สำหรับค่าที่เหมาะสมจะอยู่ประมาณ ๗.๐ ถึง ๗.๒ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ผ่านมาของ Heukelekian และ Heinemann (๒๓), Andrew (๓) นอกจากนี้พีเอชในช่วงดังกล่าวนี้แล้ว การหมักแบบไร้ออกซิเจนจะมีประสิทธิภาพลดลง สำหรับพีเอช ๖.๒ และที่ต่ำกว่านี้ การทำงานของระบบจะล้มเหลวเพราะไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) จะกลายเป็นพิษต่อพวก methane formers ซึ่ง McCarty และ McKinney (๓๕) ใ้จัด  $H^+$  ไว้อยู่ในพวก " Toxic Cation " ภัย

จากการทดลองของ Dague (๓๓) พบว่าที่พีเอชต่ำกว่า ๖.๕ จะยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียพวกที่ผลิตมีเทน โดยไม่คำนึงถึงความเข้มข้นของกรโคเวลาไหล ทั้งนี้เขาพบว่าที่ พีเอชต่ำกว่า ๖.๕ และความเข้มข้นของกรโคเวลาไหลประมาณ ๕,๔๐๐ มิลลิกรัม/ลิตร ก๊าซจะไม่เกิดขึ้น แต่เมื่อเปรียบเทียบกับที่ พีเอช ๗.๐ หรืออยู่ระหว่าง ๖.๕ กับ ๗.๐ ความเข้มข้นของกรโคเวลาไหลก็เท่าเดิมปรากฏว่ามีก๊าซเกิดขึ้น และในขณะที่ความเข้มข้นของกรโคเวลาไหลเพิ่มมากกว่าเดิมอีก ๒,๐๐๐ มิลลิกรัม/ลิตร คือประมาณ ๗,๒๐๐ มิลลิกรัม/ลิตร แต่ยังคงทำการควบคุมพีเอชไว้ได้ ผลปรากฏว่าปริมาณก๊าซเกิดมากขึ้น

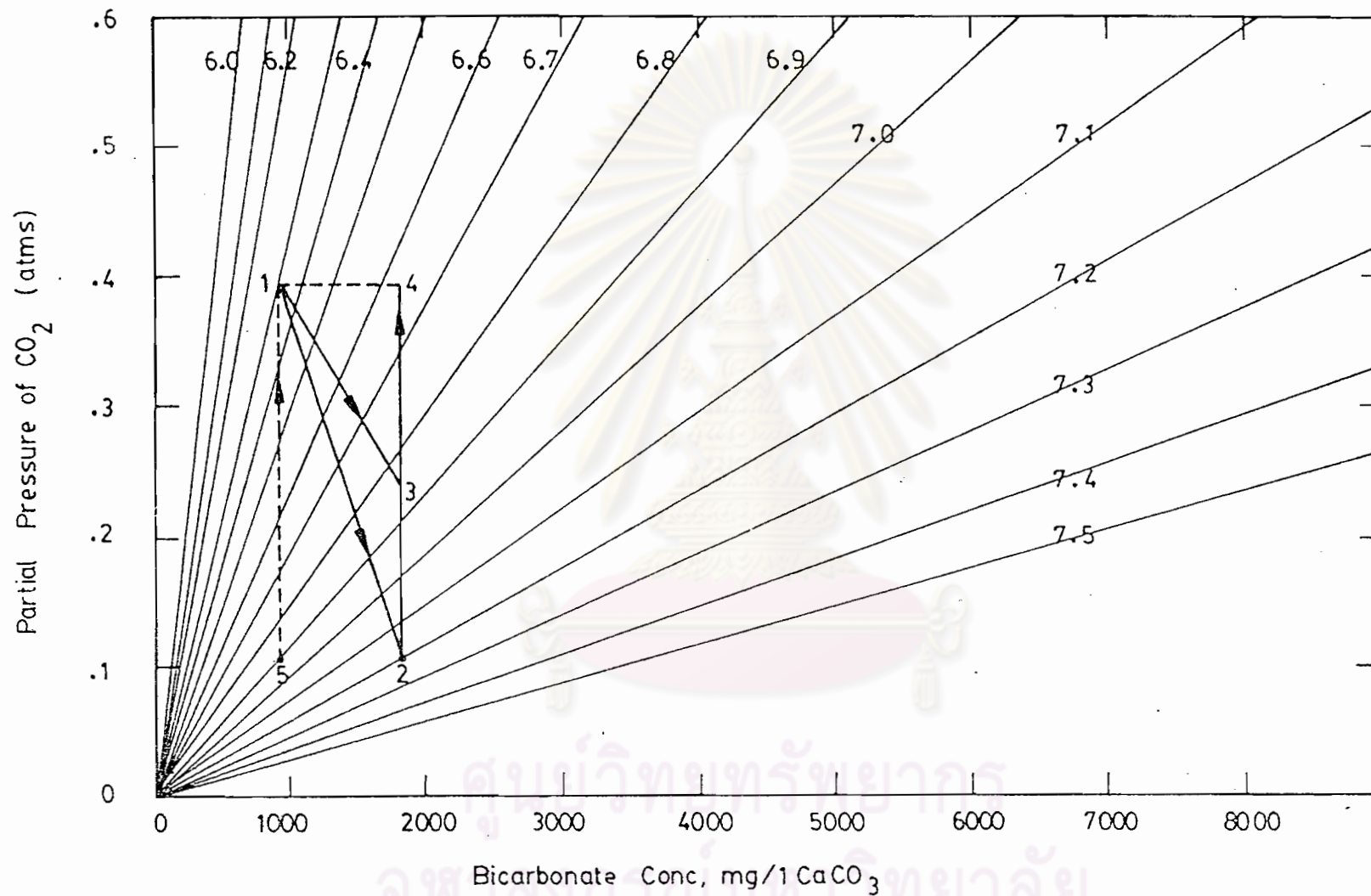


ส่วนวิธีการแก้ไขสาเหตุของการยับยั้ง (Inhibition) ที่เกิดเนื่องจากการลดลงอย่างมากของพีเอช ก็คือทำให้  $H^+$  เป็นกลางด้วย การเติมค่างเขาไปควบคุมพีเอชอยู่ระหว่าง ๗.๐ ถึง ๗.๕

### วิธีการปรับพีเอชในถังหมักออกซิเจน

สารเคมีที่ใช้เพิ่มพีเอชให้กับถังหมักมีหลายอย่าง เช่น ปูนขาว,  $NaHCO_3$ ,  $NaOH$  หรือ  $Na_2CO_3$  เป็นต้น ถ้าใช้  $NaOH$  หรือปูนขาว หรือ  $Na_2CO_3$  สมดุลทางไอออนิกจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้  $CO_2$  ถูกดึงออกจากบรรยากาศของก๊าซที่อยู่ในถังหมัก เขาไปทดแทนส่วนของ  $CO_2$  ในน้ำ ซึ่งถูกทำลายไปโดยสารละลายค่างที่เติมลงไปเพื่อสร้างความเป็นกลางไบคาร์บอเนต ยกตัวอย่างเช่น ถ้าสถานะเริ่มต้นของถังหมักอยู่ที่ค่าแห่ง ๑ ในภาพที่ ๓ การเติม  $NaOH$  หรือ  $Ca(OH)_2$  ทำให้ partial pressure ของ  $CO_2$  ลดลงและไบคาร์บอเนตเพิ่มขึ้นจุดสมดุลจะเลื่อนไปอยู่ที่จุดที่ ๒ แต่อย่างไรก็ตามแบคทีเรียจะสร้าง  $CO_2$  ขึ้นมาใหม่ ทำให้ partial pressure ของ  $CO_2$  เพิ่มขึ้นไปอยู่ที่ระดับเดิม จุดสมดุลจึงเลื่อนจากจุด ๒ ไปอยู่ที่จุด ๔ เป็นผลให้พีเอชลดลงทั้งที่ความเป็นค่างยังคงเดิมอยู่ ถ้า  $Na_2CO_3$  มีจำนวนโมลเท่ากันถูกเติมลงไปแทน จุดสมดุลจะเลื่อนจากจุด ๑ ไปอยู่ที่จุด ๓ ก่อนที่จะไปหยุดที่จุด ๔ ด้วยเหตุผลเดียวกัน ในทำนองเดียวกันถ้า  $NaHCO_3$  จำนวนเท่ากันถูกใช้แทน สมดุลจะเลื่อนจากจุด ๑ ไปอยู่ที่จุด ๔ โดยตรง ทั้งนี้เพราะว่า  $CO_2$  ในถังหมักไม่ถูกดึงไปใช้สร้างคาร์บอเนต (เพราะเราเติมคาร์บอเนตลงไปนั่นเอง) อนึ่งการกำจัด  $CO_2$  ออกจากก๊าซในถังหมักโดยตรงก็อาจช่วยให้พีเอชสูงขึ้นได้ ในกรณีนี้จุดสมดุลจะเลื่อนจากจุด ๑ ไปจุด ๕ แต่เมื่อแบคทีเรียสร้าง  $CO_2$  ขึ้นมาใหม่ จุดสมดุลจะเลื่อนกลับไปอยู่ที่จุด ๑ อีก การปรับพีเอชแบบนี้จึงไม่ใช่วิธีการถาวรและไม่อาจใช้ได้

ตัวอย่างข้างบนนี้แสดงว่าสารเคมีที่ใช้ควบคุมพีเอชอาจแบ่งได้เป็นสองประเภท ชนิดแรกสามารถให้คาร์บอเนตกับน้ำได้โดยตรง ชนิดที่สอง ใช้วิธีจับ  $CO_2$  หรือ  $H_2CO_3$  และเปลี่ยนให้เป็นคาร์บอเนต การเลือกใช้สารเคมีชนิดใดนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยที่ต้องพิจารณา ๒ อย่าง ปัจจัยข้อแรก เกี่ยวข้องกับผลของการเติมสารเคมี สารเคมีที่จับ  $CO_2$  ทำให้

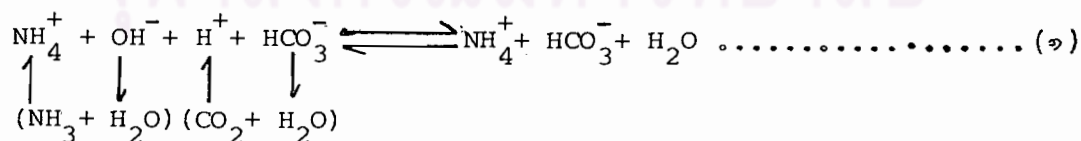


ภาพที่ ๓ ความสัมพันธ์ในทางทฤษฎีระหว่าง CO<sub>2</sub> pH และความเป็นต่างของถังหมักไร้ออกซิเจน

พีเอชสูงเกินความต้องการก่อนเสมอ จากนั้น  $\text{CO}_2$  ที่สร้างใหม่จะทำให้พีเอชค่อยลดลงไปจนถึงจุดที่ต้องการ ถ้าปริมาณของสารเคมีที่ต้องการใช้อยู่ในระดับสูง การเติมลงไปทีเดียว อาจทำให้พีเอชเพิ่มขึ้นสูงจนถึงระดับที่อาจเป็นพิษได้ กวดยเหตุนี้การเติมสารเคมีที่จับ  $\text{CO}_2$  จึงค่อยๆเติมทีละน้อยอย่างช้าๆเพื่อให้การเปลี่ยนแปลงของพีเอชเป็นไปอย่างช้าๆ ส่วนการเติมสารเคมีประกอบไบคาร์บอเนตโดยตรงนั้นไม่มีผลแบบที่เกิดขึ้นกับสารจับ  $\text{CO}_2$  ทำให้มีความสะดวกกว่าทำให้สามารถเติมสารเคมีและปรับพีเอชได้ละเอียดและแม่นยำ ปัจจัยข้อที่สองคือความสามารถในการละลายน้ำของสารที่เป็นผลสุดท้ายของปฏิกิริยา (การเติมปูนขาวให้กับถังหมัก จะทำให้ความเป็นด่างเพิ่มขึ้นเนื่องจากปูนขาวจะรวมกับ  $\text{CO}_2$  หรือ  $\text{H}_2\text{CO}_3$  ทำให้ได้สารไบคาร์บอเนต แต่เนื่องจากแคลเซียมไบคาร์บอเนตมีขีดจำกัดในการละลายน้ำอยู่ที่ประมาณ ๕๐๐-๑๐๐๐ มก/ล การเติมปูนขาวเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดตะกอนหินปูน ( $\text{CaCO}_3$ ) ซึ่งไม่ละลายน้ำ เป็นเหตุให้เกิดการกัก  $\text{CO}_2$  โดยที่ความเป็นด่างไบคาร์บอเนตไม่เพิ่มขึ้น การลดลงของ  $\text{CO}_2$  ทำให้ Partial Pressure ของ  $\text{CO}_2$  ลดลงควย พีเอชจึงสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่เนื่องจากความเป็นด่างไม่ได้เพิ่มความขึ้นควย จึงทำให้พีเอชไม่มีเสถียรภาพ ทั้งนี้ที่แบคทีเรียผลิต  $\text{CO}_2$  ขึ้นมาใหม่ พีเอชจะลดลงอย่างรวดเร็วทันที

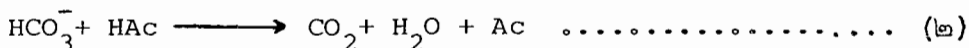
### ความเป็นด่าง (Alkalinity)

ความเป็นด่างในถังหมักไร้ออกซิเจน ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของไบคาร์บอเนต (Bicarbonate) ซึ่งความเป็นด่างไบคาร์บอเนตนี้เกิดมาจากปฏิกิริยาระหว่างแอมโมเนีย (Ammonia) กับคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ให้อยู่ในรูปของแอมโมเนียมไบคาร์บอเนต (Ammonium Bicarbonate) ดังสมการที่ ๑



การสร้างความเป็นด่างตามธรรมชาติ มีความสำคัญคือจะเป็นบัฟเฟอร์ที่ดีให้แกระบบที่จะควบคุมพีเอชให้อยู่ระหว่าง ๖.๘ ถึง ๗.๒ อย่างไรก็ตามเมื่อความ

เข้มข้นของกรดไวลาไทล์ภายในระบบเพิ่มมากขึ้น ความเป็นด่างไบคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติก็จะถูกทำลายไปและถูกแทนที่โดย Volatile - Acid Alkalinity (VAA) ดังสมการที่ ๒



การทำลายความสามารถในการบัฟเฟอร์นี้ เป็นสาเหตุทำให้พีเอชลดลง

ถึงแม้ว่าความเป็นด่างจะมีความจำเป็นในการควบคุมสภาวะสมดุลของการหมักก็ตาม แต่ความเป็นด่างอย่างเฉียวไม่สามารถที่จะช้ถึงปัญหาที่จะเกิดขึ้นในการหมักได้ นอกจากจะช้เปรียบเทียบกับความเข้มข้นของกรดไวลาไทล์ ค่าความเป็นด่างที่แสดงในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate) ควรจะสูงกว่าค่าความเข้มข้นของกรดไวลาไทล์ที่อยู่ในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนตเช่นเดียวกัน เมื่อความเข้มข้นทั้งสองเท่ากัน ความสามารถในการบัฟเฟอร์ก็จะลดลงเหลือเพียงเล็กน้อย ปัญหาที่จะเกิดขึ้นทันที

ภาพที่ ๔ แสดงให้เห็นว่าความเป็นด่างไบคาร์บอเนต ควรจะรักษาให้อยู่ในระดับอย่างน้อย ๑,๐๐๐ มก/ล สมมูลกับ CaCO<sub>3</sub> เพื่อที่จะให้แน่ใจว่าเพียงพอในการควบคุมพีเอชอยู่ได้ การหาค่าความเป็นด่างไบคาร์บอเนต (Bicarbonate Alkalinity) จำเป็นจะต้องหาค่าความเข้มข้นของกรดไวลาไทล์และค่าความเป็นด่างทั้งหมด (Total Alkalinity) มาก่อน เมื่อทราบค่าเหล่านี้แล้วจึงนำมาคำนวณหาความเป็นด่างไบคาร์บอเนตได้จากสมการที่ ๓ ซึ่งได้รับการพัฒนาขึ้นมาครั้งแรกโดย Pohland และ Bloodgood (๕๘) และต่อมาได้รับการปรับปรุงโดย McCarty (๓๗)

$$\text{BA} = \text{TA} - (0.85) (0.833) \text{TVA} \dots\dots\dots (๓)$$

เมื่อ

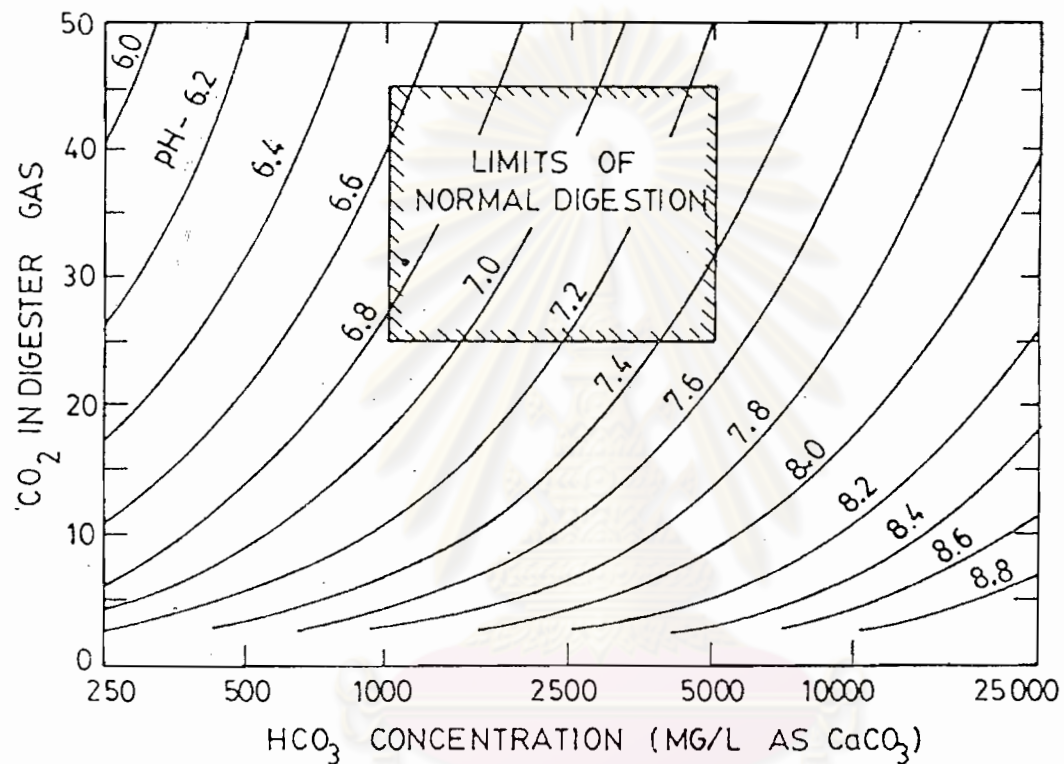
BA = ความเป็นด่างไบคาร์บอเนต (Bicarbonate Alkalinity) ;

มก/ล สมมูลกับ CaCO<sub>3</sub>

TA = ความเป็นด่างทั้งหมด (Total Alkalinity) ; มก/ล สมมูลกับ CaCO<sub>3</sub>

TVA = ความเข้มข้นทั้งหมดของกรดไวลาไทล์ (Total Volatile Acid Concentration) ; มก/ล สมมูลกับกรดอะซิติก

013147



ภาพที่ ๔ ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและความเข้มข้นของไบคาร์บอเนต (36)

(RELATIONSHIP BETWEEN PH AND BICARBONATE CONCENTRATION)

ค่ามิลลิกรัมต่อลิตรสมมูลกับกรโคะซิติก เมื่อเปลี่ยนให้เท่ากับความเป็นด่าง สมมูลกับ  $\text{CaCO}_3$  (Alkalinity as  $\text{CaCO}_3$ ) ทำได้โดยการคูณด้วย ๐.๘๓๓ ส่วนค่า ๐.๘๕ นั้นหมายความว่า มีเพียง ๘๕ เปอร์เซ็นต์ของ Volatile Acid Alkalinity ที่วัดได้จากการไทเทรต (Titrate) ของความเป็นด่างรวมจนถึงพีเอช ๘ สมการนี้สมมติว่าไม่มีความเข้มข้นของสารอื่น ๆ เช่น ฟอสเฟต (Phosphate) , ซิลิเกต (Silicate) หรือกรโคะซิติก (Acid salts) อื่น ๆ ซึ่งสามารถให้ความเป็นด่างได้เช่นกัน

สำหรับค่าความเป็นด่างไบคาร์บอเนตที่เหมาะสม เพื่อที่จะให้มีความสามารถในการบัฟเฟอร์ (Buffering Capacity) อย่างเพียงพออยู่ในช่วงระหว่าง ๒,๕๐๐ ถึง ๕,๐๐๐ มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่ง Graef และ Andrew (๑๗) พบว่า การเพิ่มความเป็นด่างไบคาร์บอเนตจะทำให้ระบบมีความสามารถที่จะทนทานต่อการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของสารอาหาร ตัวอย่างเช่น ที่ SRT ๑๕ วัน การเพิ่มค่าความเป็นด่างไบคาร์บอเนตจาก ๓,๐๐๐ เป็น ๔,๐๐๐ มิลลิกรัมต่อลิตร จะทำให้เสถียรภาพ (Stability) ของระบบเพิ่มขึ้นอีกประมาณ ๑๐ เปอร์เซ็นต์

### กรโคะซิติก (Volatile Fatty Acid)

เป็นที่ทราบกันอยู่แล้วว่า กรโคะซิติกเป็นอาหารที่สำคัญของแบคทีเรียพวกที่สร้างมีเทน (Methanogenic Bacteria) ในการที่จะผลิตก๊าซมีเทนออกมา แต่ผลในทางตรงข้าม (Adverse effect) ของมันก็คือ ที่ความเข้มข้นสูงอาจจะเป็นพิษต่อแบคทีเรียพวกที่สร้างมีเทนได้

ในปี ค.ศ. ๑๙๔๗ "Buswell" (๑) ได้กล่าวไว้ว่า กรโคะซิติก (VFA) ภายในถังหมัก จะต้องไม่เกิน ๒,๐๐๐ - ๓,๐๐๐ มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจจะกล่าวได้ว่าการที่ VFA เกิน ๒,๐๐๐ มิลลิกรัมต่อลิตร สมมูลกับกรโคะซิติกจะเป็นผลทำให้ปริมาณก๊าซลดลง และอาจจะหยุดยั้งขั้นตอนการเกิดมีเทน โดยไม่คำนึงถึงพีเอช (pH) เลย และการเติมด่างเข้าไปก็จะไม่ช่วยให้ดีขึ้น

ต่อมา Andrew (๔) พบว่ากรโคะซิติก ที่มีอยู่ในขบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนนี้มี ๒ รูปแบบคือ ชนิดที่แตกตัว (Ionized),  $\text{S}^-$  และ ไม่แตกตัว (Unionized),  $\text{HS}$  โดยที่กรโคะซิติกไม่แตกตัว (Unionized acid) เป็นฟังก์ชันของพีเอช และความเข้มข้น

### ของกรดโวลาทิลทั้งหมด (Total volatile acid)

คังสมการ

$$HS = \frac{(H^+)(S)}{K_a} \dots\dots\dots (๔)$$

- HS = ความเข้มข้นของกรดที่ไม่แตกตัว (Unionized acid concentration)
- H<sup>+</sup> = ความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน (Hydrogen ion concentration)
- S = ความเข้มข้นของกรดทั้งหมด (Total acid concentration)
- K<sub>a</sub> = ค่าคงที่ของการแตกตัว (Ionization constant)

กรดนี้จะทำปฏิกิริยากับความเป็นด่างไบคาร์บอเนต (Bicarbonate alkalinity)

เกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ดังนั้นจึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบและอัตราการเกิดของก๊าซ ซึ่งจากการเพิ่มขึ้นของ CO<sub>2</sub> และการลดลงของความเป็นด่างนี้เป็นสาเหตุให้พีเอชลดลง ทั้งการเพิ่มขึ้นของกรดโวลาทิลและการลดลงของพีเอชนี้เองจะเป็นผลให้ความเข้มข้นของกรดโวลาทิลที่ไม่แตกตัว (Unionized volatile acid conc.) เพิ่มมากขึ้น จนถึงระดับที่ยับยั้งแบคทีเรียพวกที่สร้างมีเทนได้เพราะว่าผนังเซลล์ของแบคทีเรียจะยอมให้โมเลกุลที่ไม่แตกตัวซึมผ่านได้ดีกว่าในสภาวะที่มันแตกตัวเป็นไอออน (Ion) แล้ว เพราะฉะนั้นกรดโวลาทิลส่วนใหญ่จะถูกแบคทีเรียใช้มากขึ้นที่พีเอชต่ำ และทันทีที่กรดโวลาทิลแตกตัวภายในเซลล์จะทำให้พีเอชลดลง เป็นผลทำให้เอนไซม์ (Enzyme) มีฤทธิ์เปลี่ยนแปลงไปในทางตรงกันข้าม สมมติฐานนี้ใช้อธิบายถึงปรากฏการณ์ที่กรดโวลาทิลมีฤทธิ์ยับยั้งอย่างรุนแรงในขณะที่มีพีเอชต่ำ (ต่ำกว่าพีเอช ๕.๕)

Velsen (๕๕) ได้ทำการศึกษการย่อยสลายของมูลสุกร เขาพบว่าไม่มีผลในทางตรงกันข้ามของกรดโวลาทิล แม้ว่าความเข้มข้นจะสูงถึง ๕,๐๐๐ มิลลิกรัมต่อลิตร ถ้ามีการควบคุมพีเอชให้อยู่ระหว่าง ๗.๕ ถึง ๘ ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับแนวความคิดของ Andrew (๒) ที่อธิบายถึงผลของการคุมพีเอชในถังหมักให้สูง (ประมาณ ๘) แม้ว่าความเข้มข้นของ กรดโวลาทิลจะเกิน ๑๐๐ meq. ต่อลิตร ระบบก็ยังคงทำงานได้ตามปกติ

## อุณหภูมิ (Temperature)

เป็นสิ่งสำคัญในระบบการหมักไร้ออกซิเจน คือในขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น อัตราการทำปฏิกิริยา (Reaction Rate) ก็จะเร็วขึ้นด้วย (๑๑) (๔๕) (๕๖) ซึ่งเป็นผลทำให้ระยะเวลาในการหมัก (Retention time) ลดลง ดังแสดงในภาพที่ ๕

สำหรับอุณหภูมิที่ใช้ในการหมักแบบไร้ออกซิเจน สามารถแบ่งได้ออกเป็น ๒ ช่วง คือ

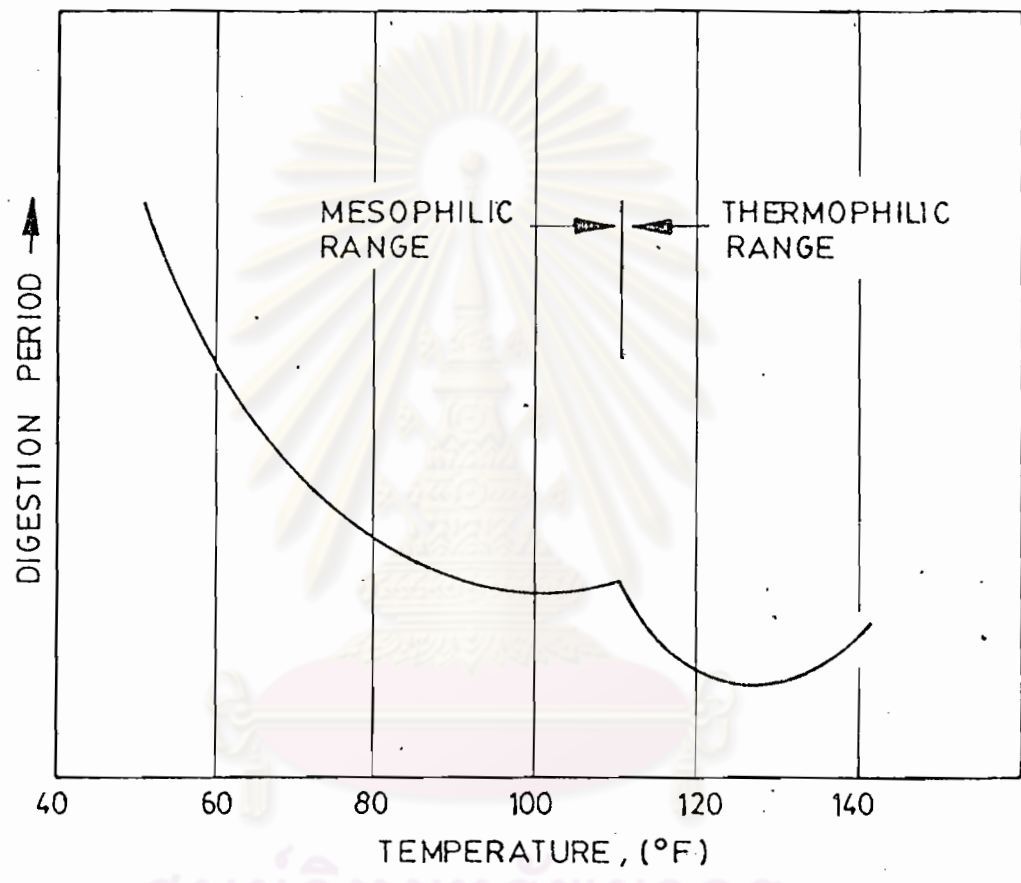
- Mesophilic Temperature อุณหภูมิจะอยู่ระหว่าง ๒๑°C ถึง ๔๐°C ส่วนอุณหภูมิที่เหมาะสมในช่วงนี้คือจาก ๓๕°C - ๔๐°C

- Thermophilic Temperature อุณหภูมิจะอยู่ระหว่าง ๕๐°C ถึง ๖๐°C ส่วนอุณหภูมิที่เหมาะสมในช่วงนี้คือจาก ๕๓°C - ๖๐°C

ในการทดลองถึงผลของอุณหภูมิต่อการหมักไร้ออกซิเจนในผลที่ขัดแย้งกันในตอนแรก ๆ คือ จากการทดลองของ Rudolf (๕๑), Hatfield กับคณะ (๕๐) และ Heukelikean (๕๒) ได้ผลออกมาว่าไม่มีข้อใด ๆ ในที่จะเพิ่มอุณหภูมิภายในถังหมักให้สูงกว่า ๒๕°C สำหรับ Malina (๓๓) พบว่าปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ ๓๒°C สูงกว่าที่อุณหภูมิ ๕๒°C ซึ่งผลที่ได้ไปขัดแย้งกับการทดลองของ Fair และ Moore (๑๔) ที่แสดงให้เห็นว่าปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ ๖๐°C จะสูงเป็น ๑.๒๕ เท่าของที่อุณหภูมิ ๒๕°C

อย่างไรก็ตามเมื่อไม่นานมานี้ Maly และ Fadrus (๓๔) ได้ทำการทดลองใน Batch Culture ที่อุณหภูมิที่ ๒๐°C ๓๐°C และ ๕๐°C ผลปรากฏว่าที่อุณหภูมิสูง อัตราการเกิดก๊าซในช่วงแรกจะเร็วกว่าที่อุณหภูมิต่ำ ส่วนปริมาตรก๊าซสุดท้ายที่ได้ (Final volume attained) ในช่วงเวลาที่ใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์นานมากที่สุดนั้น ให้ผลเช่นเดียวกัน แต่โปรตีนจะถูกย่อยสลายมากขึ้นที่อุณหภูมิสูงขึ้น Cooney และ Wise (๑๑) ได้ใช้ระบบมาทำการหมักที่ระยะเวลา (Retention time) ๓๐ วัน และอุณหภูมิ ๖๕°C เขาพบว่าการทำงานของระบบดีขึ้น และให้ปริมาตรของก๊าซมากกว่าช่วง Mesophilic ถึง ๕๐ เปอร์เซ็นต์ Pfeffer (๔๕)





ภาพที่ ๕ ผลของอุณหภูมิต่อระยะเวลาการย่อยละลาย (10)

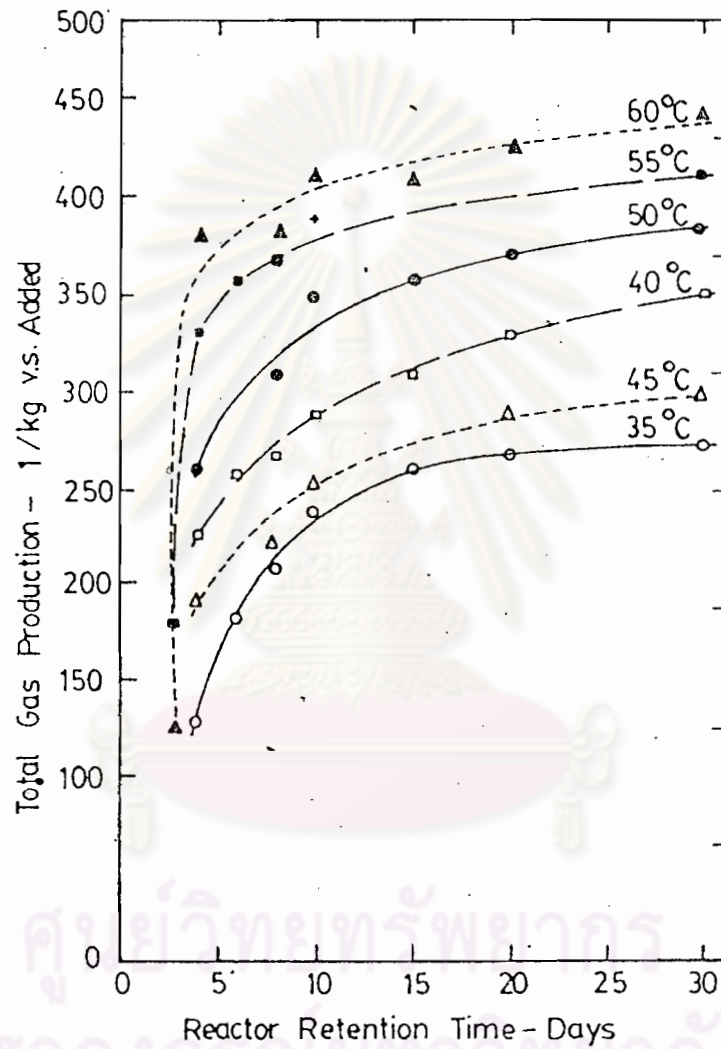
( INFLUENCE OF TEMPERATURE ON DIGESTION TIME )

ก็ใช้ขยะบคเช่นเดียวกันพบว่าเกิดการมากขึ้นและอัตราการใช้สารอาหาร (Substrate Utilization Rate) ก็สูงขึ้นด้วยดังแสดงในภาพที่ ๖ ซึ่งเขาได้พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในช่วง Mesophilic คือ  $40^{\circ}\text{C}$  และอุณหภูมิที่เหมาะสมในช่วง Thermophilic คือที่  $55^{\circ}\text{C}$  โดยที่การทดลองนี้มีโคที่อุณหภูมิสูงเกินกว่า  $60^{\circ}\text{C}$  คือมา Pfeffer และ Liebman (๔๖) ได้พบว่าจะเกิดการยับยั้งคอแบคทีเรียพวกที่สร้างมีเทน (Methanogenic Bacteria) ที่อุณหภูมิประมาณ  $60^{\circ}\text{C}$  Hashimoto และ Furukawa (๑๘) ใช้ อุจจาระสังเคราะห์ (Synthetic Night Soil) ในการหมักแบบไร้ออกซิเจนที่อุณหภูมิ ตั้งแต่  $25^{\circ}\text{C}$  ถึง  $55^{\circ}\text{C}$  เขาพบว่าปริมาณก๊าซจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มจาก  $25^{\circ}\text{C}$  จนถึง  $35^{\circ}\text{C}$  หลังจากนั้นอัตราการเกิดก๊าซจะลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น และที่อุณหภูมิสูงกว่า  $40^{\circ}\text{C}$  อัตราการเกิดก๊าซก็ยังไม่ดีขึ้น

ส่วนการทดลองในลักษณะสเกลใหญ่ (Full Scale) ที่อุณหภูมิช่วง Thermophilic ได้มีการทำกันที่ Hyperion Treatment Plant ในลอสแอนเจลิส, แคลิฟอเนีย สหรัฐอเมริกา เมื่อเดือน เมษายน ค.ศ. ๑๙๖๒ โดย Garber และคณะ (๑๕) ต่อมาได้มีการทดลองในลักษณะสเกลใหญ่อีกที่ West - Southwest Sewage Treatment Work ชิคาโก, อิลลินอย สหรัฐอเมริกา โดย Rimkus กับคณะ (๕๐) ซึ่งผลการทดลองปรากฏว่าได้ผลดี สำหรับการหมักไร้ออกซิเจนที่อุณหภูมิในช่วง Thermophilic ส่วนรายละเอียดเกี่ยวกับผลการทดลองทั้งหมดที่กล่าวมานี้ แสดงไว้ใน ตารางที่ ๔



## Anaerobic Digestion Processes



ภาพที่ ๖ ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการหมักต่อการเกิดก๊าซจากขยะ (44)

(THE EFFECT OF TEMPERATURE AND RETENTION TIME

ON THE PRODUCTION OF GAS FROM URBAN REFUSE )

ตารางที่ ๘ แสดงผลการทดลองต่าง ๆ เกี่ยวกับผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อการเกิดก๊าซ

Fair และ Moore (14)		Hatfield และคณะ (๒๐)		Rudoff (๕๑)		UARL (๕๕)		Hashimoto และ Furukawa(๑๙)	
Temp. (° c)	Gas (ml/g)	Temp. (° c)	Gas (ml/g)	Temp. (° c)	Gas (ml/g)	Temp. (° c)	Gas (ml/g)	Temp. (° c)	Gas (ml/g)
๑๐	๔๕๐	๑๑.๕	๕๐๐	๑๐	๑๓๐	๓๓	๘.๕๘	๒๕	๑๕๐๐
๑๕	๕๓๐	๑๘.๓	๕๐๐	๑๘	๒๕๐	๔๔	๓.๘๒	๒๕	๑๖๑๐๐
๒๐	๖๑๐	๒๕.๓	๕๕๒	๒๔	๓๒๐	๕๕	๘.๕๘	๓๓	๑๓๐๐
๒๕	๗๑๐	๓๑.๘	๕๗๒	๒๕.๕	๕๐๐			๕๐	๑๓๐๐
๓๐	๗๖๐	๓๕.๒	๕๖๖	๓๕	๕๐๐			๕๕	๓๘๕
								๕๐	๕๕๐
								๕๕	๕๘๐

ศูนย์วิทยุวิทยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๔ กอ

Cooney และ Wise (๑๑)		Maly และ Fadrus (๓๔)		Pfeffer, J.T (๔๕)		Rimkus, R.R. (๕๐)		Garber, W.F. (๑๖)	
Temp. (°c)	Gas (l/d)	Temp. (°c)	Gas (ml/l sludge)	Temp. (°c)	Gas (l/g)	Temp. (°c)	Gas (m <sup>3</sup> /kg)	Temp. (°c)	Gas (m <sup>3</sup> /kg)
๓๗	๑๑.๖๑	๒๐	๑๐๖๖๐	๓๕	๐.๒๕๕	๓๕.๕	๐.๓๒	๓๕.๖	๐.๗
๔๒	๓.๓๕	๓๐	๑๑๗๑๐	๔๐	๐.๓๗๕	๔๒.๗	๐.๕๐	๔๕	๐.๗๕
๔๕	๑.๕๕	๕๐	๑๑๕๒๐	๔๕	๐.๓๑๓				
๔๕	๒.๒๓			๕๐	๐.๕๐๐				
๔๕	๑.๐๒			๕๕	๐.๕๒๖				
๔๗	๑.๒๒								
๖๕	๑๕.๕๕								

ศูนย์วิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## อาหารเสริม (Nutrients)

แบคทีเรียจำพวกที่ไม่ต้องการออกซิเจน (Anaerobic bacteria) มีความต้องการสารอาหารจำพวกไนโตรเจน ( $N_2$ ) , ฟอสฟอรัส (P) และสารอาหารอื่น ๆ ที่ช่วยในการเจริญเติบโตเช่นเดียวกับพวกที่ใช้ออกซิเจน (Aerobic bacteria) เพราะฉะนั้นการควบคุมสภาวะให้เหมาะสม ก็คือการใส่อาหารเสริมลงไปให้เพียงพอแก่ความต้องการ เพราะถ้าของเสีย (waste) ที่จะเข้าสู่ระบบนั้นมีคุณสมบัติแตกต่างกันออกไป โดยที่สลัดจ์ที่เกิดจากของเสียจากชุมชน (Municipal waste sludge) จะมีสารประกอบที่ความต้องการอยู่ในปริมาณที่เพียงพอแล้ว แต่ของเสียที่มาจากโรงงานอุตสาหกรรม หรือขยะจากชุมชนในบางครั้งไม่มี จึงจำเป็นต้องเติมลงไปให้เพียงพอ

McCarty (๑๖) ได้คำนวณปริมาณของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่ต้องการ โดยคิดจากค่าเฉลี่ยของสูตรทางเคมีของเซลล์  $C_5H_9O_3N$  ซึ่งจะต้องมีไนโตรเจนอยู่ประมาณ ๑๑. เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักเซลล์ที่เป็นของแข็งระเหย (Cell volatile solid weight) และจะต้องการฟอสฟอรัสประมาณ ๑ ใน ๕ ของน้ำหนักเซลล์ที่เป็นของแข็งระเหย นอกจากไนโตรเจนและฟอสฟอรัสแล้วยังมีสารชนิดอื่นที่ทำหน้าที่ในการกระตุ้น (Stimulate) เมื่อมีความเข้มข้นค่า ๆ และจะยับยั้ง (Inhibite) ที่ความเข้มข้นสูงขึ้นไป ดังแสดงในตารางที่ ๕

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๕ ความเข้มข้นในการกระตุ้นและยับยั้งของอัลคาไลและอัลคาไลเอิร์ทที่เป็น  
 ปรจุล (Stimulatory and Inhibitory Concentration of  
 Alkali and Alkaline-Earth Cation) (๓๘)

ไอออนลบ (Cation)	ความเข้มข้น, มก./ล. (Concentration; mg/l)		
	มีฤทธิ์กระตุ้น (Stimulation)	มีฤทธิ์ยับยั้งปานกลาง (Moderately Inhibitory)	มีฤทธิ์ยับยั้งรุนแรง (Strong Inhibitory)
โซเดียม	๑๐๐ - ๒๐๐	๓,๕๐๐ - ๕,๕๐๐	๘,๐๐๐
โพแทสเซียม	๒๐๐ - ๔๐๐	๒,๕๐๐ - ๔,๕๐๐	๑๒,๐๐๐
แคลเซียม	๑๐๐ - ๒๐๐	๒,๕๐๐ - ๔,๕๐๐	๘,๐๐๐
แมกนีเซียม	๓๕ - ๑๕๐	๑,๐๐๐ - ๑,๕๐๐	๓,๐๐๐

## สารพิษ (Toxic Material)

สำหรับของเสียที่มีความเข้มข้นของอินทรีย์สารและอนินทรีย์สารสูง ระบบย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนจะมีความรู้สึกต่อสิ่งเหล่านี้ได้ไวกว่าปกติ ซึ่งสิ่งเหล่านี้ได้แก่พวกเกลืออนินทรีย์ (Inorganic Salt) รวมทั้งสารประกอบอินทรีย์พิษ (Toxic organic compound) ส่วนพวกอัลคาไลน์ (Alkali) และโลหะอัลคาไลน์เอิร์ธ (Alkaline earth-metal) นั้น จะมีความเข้มข้นที่แน่นอนในการยับยั้งและเป็นพิษ สำหรับค่าสูงสุดที่ยังไม่เป็นพิษ (Threshold) จะแปรเปลี่ยนไปขึ้นอยู่กับว่าโลหะนั้นจะมีปฏิกิริยาโดยตัวมันเอง (Act singly) หรือ ปฏิกิริยารวมกัน (Combination) อย่างเช่น แอมโมเนีย เมื่ออยู่ในรูปของ  $\text{NH}_3$  จะยับยั้งเมื่อมีความเข้มข้นสูงเพียงพอ ซึ่งอยู่ระหว่าง ๑,๕๐๐ - ๓,๐๐๐ มิลลิกรัมต่อลิตรและที่พีเอชสูงกว่า ๙.๔ แต่ที่ความเข้มข้นสูงกว่า ๓,๐๐๐ มิลลิกรัมต่อลิตร แอมโมเนียมไอออน ( $\text{NH}_4^+$ ) เพียงอย่างเดียวก็จะเป็นพิษอย่างรุนแรงโดยไม่คำนึงถึงค่าพีเอชเลย (๓๘)

ส่วนพวกสารพิษอื่น ๆ ก็มี ซัลไฟด์ (Sulfide) โลหะหนัก (Heavy metal) และพวกสารอินทรีย์ที่เป็นพิษ (Toxic organic material) ความเข้มข้นของสารละลายซัลไฟด์จะแปรเปลี่ยนไประหว่าง ๕๐ ถึง ๑๐๐ มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งสามารถจะยักยั่นได้เล็กน้อยหรือมีเซนนิกต้องมีการทำให้คุ้นเคย (Acclimatize) เสียก่อน นอกจากนี้สารละลายทองแดง เกลือนิเกิล ที่ความเข้มข้นต่ำ ก็อาจจะทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับพิษของโลหะหนักในระบบไตเช่นเดียวกับสารอินทรีย์หลาย ๆ ชนิดที่มีผลในการยับยั้ง นับตั้งแต่ Organic solvent จนถึงพวก Common material หลาย ๆ ชนิด เช่น แอลกอฮอล์ (Alcohols.) และพวก Long chain fatty acid ที่มีความเข้มข้นสูง (๓๘)

ดังนั้นถ้าจะให้แบคทีเรียมีความสามารถที่จะทนทานต่อสารพวกที่ยับยั้งเหล่านี้ได้ ก็จำเป็นจะต้องมีการทำให้ระบบคุ้นเคย (Acclimatize) กับสารเหล่านี้เสียก่อน สำหรับวิธีการที่จะป้องกันมิให้เกิดเป็นพิษและการยับยั้งขึ้นในระบบสามารถทำได้ดังต่อไปนี้ (๓๒)

- ถ้าจักสาร เหล้าที่ออกมาจากของเสียจะเข้าสู่ระบบ หรืออาจจะทำให้สารนั้นหมดสภาพความเป็นพิษลงด้วยการคกตะกอน

- ทำการเจือจางของเสียที่มีพิษให้ต่ำกว่าค่า "Toxic Threshold" ที่จะเป็นอันตราย



- เกมสารพวก antagonistic ลงไปในของเสีย

๓.๒.๒) แฟกเตอร์ทางกานปฏิบัติงาน ( Operating Factor )

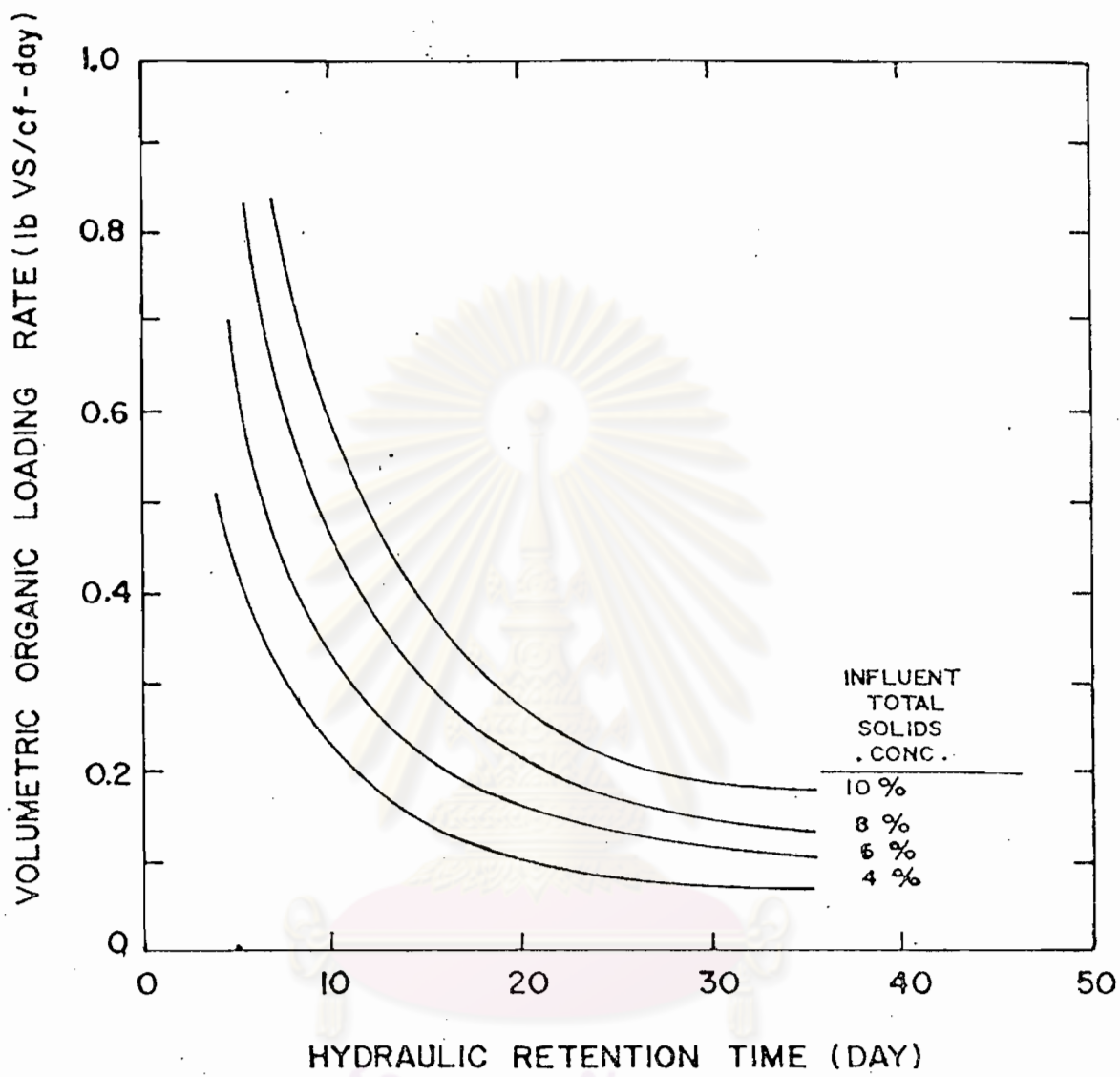
ระยะเวลาในการหมัก - อัตราการไหลสารอินทรีย์ - ความเข้มข้นของของแข็ง

(Retention Time-Organic Loading Rate-Solid Concentration)

Sawyer (๕๒) เป็นผู้หาความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการหมัก อัตราการไหลอินทรีย์สาร ความเข้มข้นของของแข็ง สัมพันธ์จากชุมชน ตามภาพที่ ๘

อัตราที่ของเสียถูกใส่เข้าไปในถังหมัก เรียกว่า "Volumetric Organic Loading Rate" [VOLR] มีหน่วยเป็น ปอนด์ของของแข็งระเหยที่ใส่เข้าไปต่อลูกบาศก์ฟุตของปริมาตรถังหมักต่อวัน ( $lb\ VS / ft^3 - day$ ) หรือกิโลกรัมของของแข็งระเหยต่อลูกบาศก์เมตรของถังหมักต่อวัน ( $kg\ VS/m^3 - day$ ) อัตราการไหลคั่ง (loading rate) ที่แตกต่างกันสามารถทำได้โดยการเปลี่ยนอัตราการไหลที่ไหลผ่านถังหมัก หรือโดยการเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของของแข็งที่ใส่เข้าไปในทางปฏิบัติวิธีที่ใช้กันทั่ว ๆ ไปในการเปลี่ยนอัตราการไหลคั่ง ก็คือ การเปลี่ยนอัตราการไหล ซึ่งจะมีผลต่อระยะเวลาที่ของเหลวอยู่ในระบบ (Hydraulic Retention Time; HRT) ของถังหมัก

ค่านิยามของ HRT ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ (Parameter) หลักในการออกแบบระบบกำจัดของเสีย (๓๐) ตามทฤษฎี HRT จะแทนเวลาที่ของเสียอยู่ในถังหมักและสามารถทำได้โดยการหารปริมาตรของถังหมักด้วยปริมาณของเสียที่ไหลผ่านถังหมักคือ หน่วยเวลา ค่า HRT จะมีความหมายเหมือนกันกับ "Solid Retention Time" (SRT) สำหรับในกรณีที่ไม่มีการหมุนเวียนสลัดจ์ ซึ่งค่า SRT นี้เป็นตัวเลขที่สำคัญที่สุดในการปฏิบัติการควบคุมและออกแบบระบบการหมักแบบไร้ออกซิเจน โดยมันจะแทนค่าเฉลี่ยของเวลาจุลชีพอยู่ในระบบและสามารถที่จะหาได้โดยการหารจำนวนปอนด์หรือกิโลกรัมของของแข็งระเหยในระบบด้วยจำนวนปอนด์หรือกิโลกรัมของของแข็งระเหยที่ออกจากระบบ

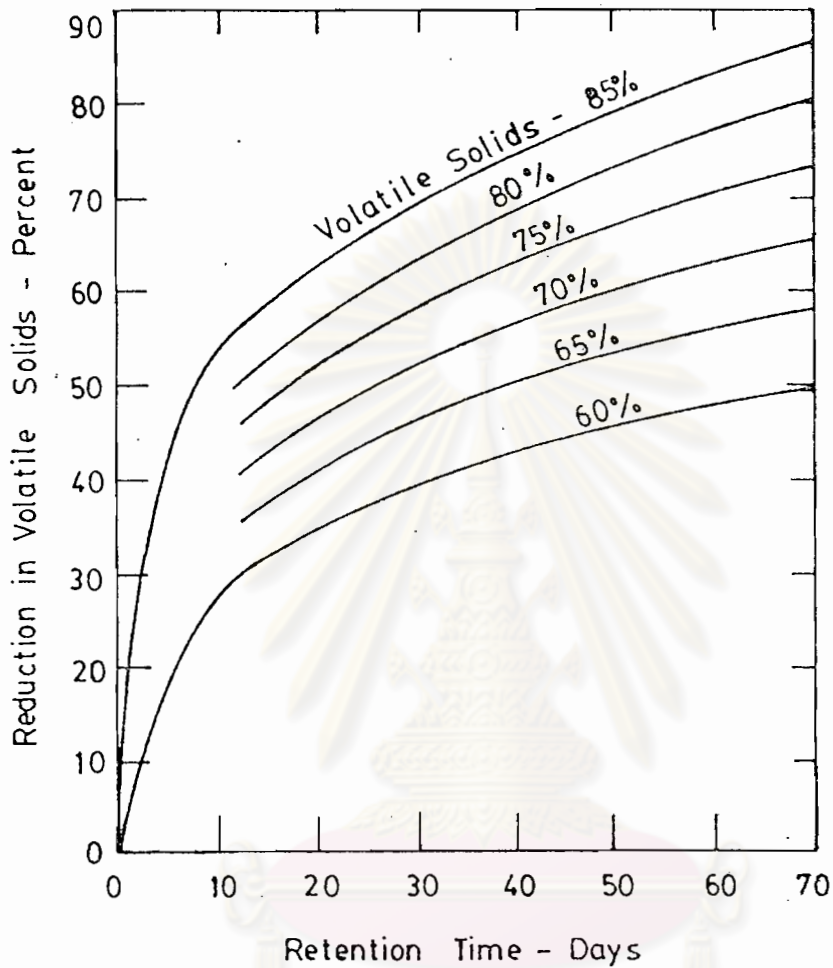


ภาพที่ ๗ ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการจ่ายสารอินทรีย์ , ความเข้มข้นของของแข็ง และระยะเวลาที่ของเหลวอยู่ในระบบ (52)  
(RELATIONSHIP BETWEEN VOLUMETRIC ORGANIC LOADING RATE, INFLUENT SOLID CONCENTRATION AND HYDRAULIC RETENTION TIME)

นอกจากนี้ค่า SRT ยังเป็นตัวสำคัญที่จะบอกระดับความมีเสถียรของของเสีย (๒๒) (Degree of Waste Stabilization) ที่ผ่านการบำบัดแล้ว การเพิ่ม SRT เป็นการเพิ่มเพิ่มประสิทธิภาพของระบบและจะมีปริมาณก๊าซเกิดมากขึ้น ตามภาพที่ ๔ ของ Rankin (๔๔) ได้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่าง SRT กับความมีเสถียรของของเสียที่ผ่านขบวนการบำบัด อย่างไรก็ตามเมื่อของเสียถูกทำให้เจือจาง ก็จะต้องใช้ระยะเวลาในการหมักนานและขนาดของถังหมักจะมีขนาดใหญ่ตามควย พร้อมทั้งปริมาณความร้อนที่ใช้ก็จะสูงตามไปควย

เมื่อ SRT ลดลงจำนวนเซลล์ที่เข้มแข็ง (Active) จะถูกล้างออกจากระบบ (Wash out) มากขึ้น แต่ถ้า SRT ต่ำกว่าเวลาที่ที่แน่นอนจุลินทรีย์จะถูกล้างออกจากระบบในอัตราที่เร็วกว่าที่มันจะเกิดขึ้นใหม่ ซึ่งจะเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ระบบล้มเหลว ระยะเวลาที่ต่ำสุดที่จุลินทรีย์จะอยู่ในระบบ (Minimum Solid Retention Time;  $\theta_m$ ) ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและชนิดของจุลินทรีย์ในระบบ ซึ่งชนิดของจุลินทรีย์นั้นจะขึ้นอยู่กับประเภทของสารอาหารที่ถูกใส่เข้าไป McCarty (๓๔) แนะนำถึงการควบคุมระบบว่า แม้เราจะสามารถควบคุมระบบให้ทำงานได้ใกล้เคียงกับ SRT ที่ต่ำสุด ( $\theta_m$ ) ประสิทธิภาพก็จะต่ำไปควย และการทำงานของระบบจะเลวลง ในทางปฏิบัติ SRT ควรจะมีค่าอย่างน้อยประมาณ ๒.๕ เท่าของ SRT ที่ต่ำสุด

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ ๘ การเปลี่ยนแปลงของของแข็งระเหยที่ถูกทำลายกับระยะเวลาในการหมัก (๔๙)

(VARIATION OF VOLATILE SOLID DESTRUCTION WITH  
DETENTION TIME)

## การกวน (Mixing )

การกวนเป็นสิ่งสำคัญในระบบการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน หลักการสำคัญก็คือ การทำให้สารอินทรีย์ในถังหมักอยู่ในสภาพแขวนลอย (Suspension) ทั้งนี้เพื่อที่จะให้เกิดการสัมผัส (Contact) กันระหว่างสารอาหาร (Substrate) กับจุลินทรีย์และเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบคัวย การกวนนั้นจะต้องให้เพียงพอที่จะป้องกันการเกิดการสะสมของสารอินทรีย์ตามจุดต่าง ๆ ของถังหมัก ทั้งยังทำให้ของเหลวภายในถังหมักมีสภาพเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenous )

กรรมวิธีในการกวนของเหลวภายในถังหมัก สามารถทำได้หลายวิธีดังนี้

- หมุนเวียนสลัดจ์คัวยปั๊ม (Recycling of sludge by pump )
- สูบอัดก๊าซไปทางคานกนของถังหมัก ( Pumping of compressed gas to the bottom of the digester )
- ใช้เครื่องกวน ( Mechanical mixing )
- ใช้การสูบผ่านท่อหน้า ( Pumping draft tube )

ซึ่งแต่ละวิธีก็จะมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันไป การที่จะหาวิธีการที่เหมาะสมและประหยัดที่สุดในการเลือกเครื่องกวนนั้น จำเป็นจะต้องศึกษาในรายละเอียดต่าง ๆ อย่างละเอียดและลึกซึ้ง

จากการศึกษาเกี่ยวกับการย่อยสลายในอัตราสูง (High rate digester) พบว่า ความเร็วตามเส้นรอบวง (Circulating Velocity) ที่บริเวณพื้นถังหมัก ประมาณ ๑.๕ ถึง ๓ ฟุตต่อวินาที จะไม่ทำให้เกิดการสะสมของสารต่าง ๆ สำหรับความเร็วต่ำสุดนั้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะของอนุภาค โดยที่ความเร็วที่เหมาะสมควรอยู่ประมาณ ๒.๕ ฟุตต่อวินาที จากรายงานของ WPCF (๕๔) เกี่ยวกับของเหลวที่มีความเข้มข้นสูง การกวนอย่างพอเพียงจะมีความสำคัญมาก เพราะว่าในบางครั้งมันเป็นการยากที่จะทำให้สารที่สะสมกันอยู่ลอยตัวขึ้นมา ส่วนการใช้ก๊าซหมุนเวียนผ่านเข้าไปในท่อหน้า สามารถทำได้โดยสูบอัดก๊าซเข้าไปในท่อที่เจาะรูตลอดแนวขนาดเท่า ๆ กันในอัตราที่เพียงพอที่จะกวน (Agitate) ให้ Sewage sludge ลอยตัวขึ้นมาได้ ค่าที่ใช้ในการออกแบบคือ ปริมาณชีวก๊าซ (Biogas) ๓๕ ถึง ๔๐ ลิตรต่อเวลาที่ต่อปริมาตรของถังหมัก ๑,๐๐๐ ลิตร

## พลังงานที่ใช้ในการกวน ( Mixing Energy )

McMahon (๘๑) ใช้ค่า ๐.๑๘๕ กำลังมาต่อดังหมักที่มีปริมาตร ๑,๐๐๐ ลูกบาศก์ฟุต และความเข้มข้นของของเหลวภายในดังหมักเท่ากับ ๘ เปอร์เซ็นต์ ส่วนสูตรต่อไปนี้เป็นใช้ในการคำนวณหา กำลังของ เครื่องกวนที่จะต้องใช้กับความเข้มข้นต่าง ๆ (๘๘)

$$P = 0.185 \times \frac{C}{4} \times V$$

P = กำลังที่ต้องการ (Power requirements); แรงม้า

C = ความเข้มข้นของของเหลวภายในดังหมัก (Reactor slurry concentration); เปอร์เซ็นต์

V = ปริมาตรของดังหมัก; ๑,๐๐๐ ลูกบาศก์เมตร

## ปริมาณความร้อนและสมดุลความร้อน (Heating and Heat Balance)

การให้ความร้อนแก่ของเหลวในดังหมัก เพื่อที่จะเพิ่มอุณหภูมิให้ได้ตามต้องการนั้นสามารถทำได้หลายวิธี เช่น

- ให้ความร้อนแก่ของเสียก่อนที่จะเข้าสู่ดังหมัก (Heating incoming slurry )

- ให้ความร้อนที่พื้นผิวโดยรอบของดังหมัก ( Heating the generator Skin )

- ใช้อากาศร้อนหมุนเวียน (Hot air circulation)

- ใช้น้ำร้อนหมุนเวียน ( Hot water circulation)

สำหรับปริมาณความร้อนที่ใช้สำหรับเพิ่มอุณหภูมิของของเสียก่อนที่จะเข้าสู่ดังหมักสามารถคำนวณได้จากสมการทางความร้อนในสมการที่ ๕

$$HI = S(C)(T_1 - T_0) \dots\dots\dots (๕)$$

S = อัตราการจ่ายของเสียเข้าสู่ดังหมัก (Feed stream); ปอนด์/ชม.

C = ค่าความร้อนจำเพาะ ( Specific heat constant); บีทียู/ปอนด์-องศาฟาเรนไฮต์

$T_1$  = อุณหภูมิของถังหมัก ; องศาฟาเรนไฮต์

$T_0$  = อุณหภูมิของของเสีย ; องศาฟาเรนไฮต์

HI = ปริมาณความร้อนที่ต้องการ (Heat required); บีทียู/ชม.

### สาเหตุในการล้มเหลวของระบบ ( Causes of Ultimate Failure )

จากการศึกษาถึงแฟกเตอร์ของสิ่งแวดล้อม ( Environmental Factor ) และแฟกเตอร์ในการทำงาน ( Operational Factor ) เพื่อที่จะให้ระบบทำงานอย่างมีประสิทธิภาพนั้น Graef และ Andrew (๑๗) ได้สรุปสาเหตุของการล้มเหลวในการควบคุมระบบกำจัดของเสียโดยวิธีการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนไว้ดังนี้คือ

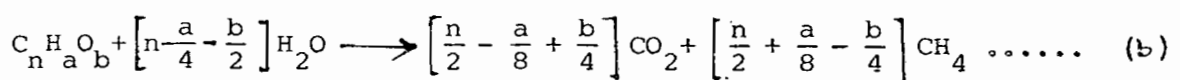
ก) การให้ของเหลวเข้าสู่ระบบมากเกินไป ( Hydraulic Overloading ) จะทำให้ระยะเวลาเก็บกักจุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบ ( Residence time ) ลดลงจนถึงจุดซึ่งจุลินทรีย์ไม่สามารถที่จะขยายพันธุ์ ( Reproduced ) ได้ทัน ก่อนที่จะถูกล้างออกจากระบบ

ข) การให้ปริมาณสารอินทรีย์ ที่เข้าสู่ระบบมากเกินไป ( Organic Overloading ) จะทำให้เกิดการสะสมของกรดไขมันอิสระ ซึ่งจะไปยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียพวกที่สร้างมีเทน

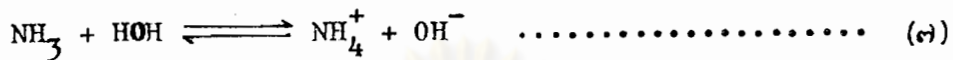
ค) การให้ปริมาณสารพิษที่เข้าสู่ระบบมากเกินไป ( Toxic Overloading ) เมื่อสารพิษเช่น โลหะหนัก, สารเคมี, แอมโมเนียและอออนลบ เข้าสู่ระบบมากเกินไป จะไปฆ่า "Methanogenic Organism" ซึ่งสาเหตุของการตายเกิดจากการสะสมของสารพิษ ที่ความเข้มข้นสูง

### ๓.๓ องค์ประกอบและปริมาณก๊าซที่ได้ออก ( Gas Composition and Gas Yield )

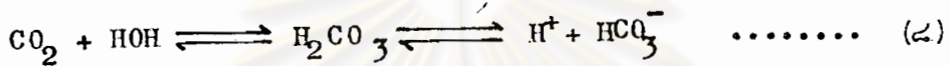
ในการเปลี่ยนคาร์โบไฮเดรต ( Carbohydrate ) ไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ และมีเทนนั้น สามารถที่จะทำนายปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจากความรู้ทางเคมีขององค์ประกอบของเสีย จากสมการที่ ๖ ซึ่งได้รับการพัฒนาโดย Buswell และ Mueller (๗)



อย่างไรก็ตามคาร์บอนไดออกไซด์ จะไม่ออกไปในรูปของก๊าซหมดแต่จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับน้ำและไฮดรอกไซด์ไอออน (Hydroxide Ions) ส่วนโปรตีน (Protein) จะถูกจุลินทรีย์ย่อยสลายเป็นแอมโมเนีย (Ammonia) ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับน้ำคั่งสมการที่ (๗)



ไฮดรอกไซด์ (Hydroxide) ที่เกิดขึ้นนี้ จะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ กลายเป็นไบคาร์บอเนตไอออนคั่งสมการที่ ๘ และ ๙



ดังนั้นสารอาหารที่มีองค์ประกอบของโปรตีนจะมีผลต่อปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์จริง ๆ ที่ถูกระบายออกมาจากสารละลายรวมทั้ง "Bicarbonate Buffer Capacity" ของระบบด้วย

McCarty (๓๖) ได้แสดงให้เห็นว่าก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นตามทฤษฎี จากการย่อยสลายอย่างสมบูรณ์ (Complete Stabilization) ของ ๑ กิโลกรัม BOD<sub>L</sub> หรือ COD เท่ากับ ๐.๓๔๘ ลูกบาศก์เมตรที่อุณหภูมิและความดันมาตรฐานและ ๑ กิโลกรัมของกลูโคสเมื่อย่อยสลายอย่างสมบูรณ์แล้วจะให้ปริมาตรก๊าซ ๐.๓๔๗ ลูกบาศก์เมตร

ส่วน Burford และ Varani (๖) ได้แสดงปริมาณก๊าซที่ได้ตามทฤษฎีจากองค์ประกอบหลักของพืชและมูลสัตว์ คั่งแสดงในตารางที่ ๖

ตารางที่ ๖ ปริมาณก๊าซที่ได้ตามทฤษฎี

องค์ประกอบ (Component)	% มีเทน	ก๊าซที่ได้ (Gas Yield)
		ลบ.ม/กก. ของแข็งระเหยที่อุณหภูมิห้อง
คาร์โบไฮเดรต (C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub> ) <sub>n</sub>	๕๐	๐.๔๘๖
ไขมัน (C <sub>50</sub> H <sub>90</sub> O <sub>6</sub> )	๗๐	๑.๕๓๕
โปรตีน (6C.2NH <sub>3</sub> .3H <sub>2</sub> O)	๔๘	๐.๕๘๗



ตารางที่ ๗ แสดงปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดจากการย่อยสลายวัสดุจำพวกพืชผัก (๕๓)

ชนิดของพืช	ลูกบาศก์เซนติเมตรของก๊าซชีวภาพ		หมายเหตุ
	ค็อกรัมของแข็ง ระเหยที่ใส่เข้า ไป (gm VS added)	ค็อกรัมของแข็ง ทั้งหมดที่ใส่เข้า ไป (gm TS added)	
สาหร่าย (Algae)	-	๒๕๐	
เปลือกกล้วย (Banana Skins)	-	๓๖๐	
ฟางข้าวบาร์เล่ (Barley Straw)	-	๑๕๐	
กะหล่ำปลี (Cabbage)	๓๕๒	-	ค็อกรัมของ แข็งระเหย ที่ถูกทำลายไป
แครอท (Carrots)	๖๕๓	-	ค็อกรัมของ แข็งระเหยที่ ถูกทำลายไป
ฟางป่อ (Flax Straw)	๓๓๓	๓๐๐	
ขยะเปียก (Garbage)	๕๐๐	-	ค่าเฉลี่ย
เศษหญ้า (Grass Clippings)	๓๕๐	-	ค่าเฉลี่ย
มันฝรั่ง (Potatoes)	๕๕๐	-	
กระดาษ (Paper)	๕๓๕	-	ค่าเฉลี่ยของ กระดาษหนึ่ง สี่พิมพ์
คณกก (Papyrus)	๕๓๐	-	
ฟางข้าว (Rice Straw)	๕๕๕	-	
สาหร่ายทะเล (Seaweed)	-	๓๐๐	
ผักบรซวา (Water Hyacinth)	-	๑๖๓	
ฟางข้าวสาลี (Wheat Straw)	๓๑๐	-	ค่าเฉลี่ย
ไม้ (Wood)	-	๕๐	

### ๓.๔ พลังงานจากก๊าซชีวภาพ ( Energy from Biogas )

Hawkes (๒๑) ได้กล่าวไว้ว่าพลังงานจากก๊าซชีวภาพนี้ ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของมีเทนที่มีอยู่ในก๊าซนั้น เช่น ก๊าซชีวภาพที่มีองค์ประกอบของมีเทนอยู่ ๗๐ เปอร์เซ็นต์ จะให้พลังงานออกมา ๒๖ เมกกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร ( MJ/M<sup>3</sup> ) และที่ ๕๕ เปอร์เซ็นต์ มีเทนจะให้พลังงานออกมา ๒๒ เมกกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร เมื่อคิดเป็นค่าเฉลี่ยแล้ว จะได้ว่า ที่ ๖๕ เปอร์เซ็นต์มีเทนในก๊าซชีวภาพทั้งหมดจะให้พลังงานออกมาประมาณ ๒๔ เมกกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร

#### ตารางที่ ๔ คุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของก๊าซมีเทน (Physical and Chemical Characteristic of Methane)

- สูตรทางเคมี (Chemical Formular)	: CH <sub>4</sub>
- น้ำหนักโมเลกุล (Molecular Weight)	: ๑๖.๐๔๒
- จุดเดือด (Boiling Point) ที่ ๑๔.๖๘๖ psia (๗๖๐ มม.)	: -๒๕๘.๖๘ F (-๑๖๑.๕๘ C)
- จุดเยือกแข็ง (Freezing Point) ที่ ๑๔.๖๘๖ psia (๗๖๐ มม.)	: -๒๕๖.๕๖ F (-๑๕๖.๕๘ C)
- ความดันวิกฤต (Critical Pressure)	: ๖๗๓.๑ psia (๔๗.๓๖๓ กก/ซม <sup>๒</sup> )
- อุณหภูมิวิกฤต (Critical Temperature)	: -๑๑๖.๕ F (-๗๖.๕ C)
- ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ของเหลว ที่ -๒๖๓.๒ F (-๑๖๔ C)	: ๐.๔๑๕
แก๊ส ที่ ๗๗ F (๒๕ C) และ ๑๔.๖๘๖ psia (๗๖๐ มม.)	: ๐.๐๐๐๖๕๕
- ปริมาตรจำเพาะ (Specific Volume) ที่ ๖๐ F (๑๕.๕ C) และ ๑๔.๖๘๖ psia (๗๖๐ มม.)	: ๒๓.๖๑ ลบ.ฟ/ปอนด์ (๑.๔๗ ลิตร/กรัม)



- ค่า Calorific ๖๐ F (๑๕.๕ C) และ  
๑๔.๖๘๖ psia (๗๖๐ มม.) : ๑,๐๑๒ บีทียู/ลบ.ฟ  
(๓๘,๑๓๐.๗๑ กิโลจูล/ม<sup>๓</sup>)
- อากาศที่ตองการสำหรับการเผาไหม้ ลบ.ฟ/ลบ.ฟ  
(Air required for combustion) : ๕.๕๓
- Flammability Limits : ๕ ถึง ๑๕ % โดยปริมาตร
- ค่า Octane rating : ๑๓๐
- อุณหภูมิในการจุดระเบิด (Ignition Temperature) : ๑,๒๐๒ F (๖๕๐ C)
- สมการการเผาไหม้ (Combustion Equation) :  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$
- $\text{O}_2/\text{CH}_4$  สำหรับการเผาไหม้สมบูรณ์  
(For Complete Combustion) : ๓.๕๕ โดยน้ำหนัก
- $\text{O}_2/\text{CH}_4$  สำหรับการเผาไหม้สมบูรณ์  
(For Complete Combustion) : ๒.๐ โดยปริมาตร
- $\text{CO}_2/\text{CH}_4$  จากการเผาไหม้ที่สมบูรณ์  
(From Complete Combustion) : ๒.๗๕ โดยน้ำหนัก
- $\text{CO}_2/\text{CH}_4$  จากการเผาไหม้ที่สมบูรณ์  
(From Complete Combustion) : ๑.๐๐ โดยปริมาตร

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ๕.๘ การศึกษาทางจลนศาสตร์ของการหมักแบบไร้ออกซิเจน (Fermentation Kinetics)

สำหรับระบบทวนสมบูรณ์ (Completely mixed) ที่ไม่มีการเวียนตะกอนกลับ (Solids recirculation) อัตราการเปลี่ยนแปลงของมวลแบคทีเรีย (Bacterial cell mass) และความเข้มข้นของสารอาหาร (Substrate Concentration) สามารถใช้สมการคิฟเฟอร์เรนเขียนทั้งสองนี้ได้

$$\frac{dM}{dt} = \mu M - \frac{M}{\theta} \dots\dots\dots (๑๐)$$

$$\frac{ds}{dt} = -F + \frac{S_0 - S}{\theta} \dots\dots\dots (๑๑)$$

โดยที่

$M$  = ความเข้มข้นของมวลเซลล์ (Cell mass concentration),  
มวล/ปริมาตร (mass/volume)

$\mu$  = อัตราการเจริญเติบโตเฉพาะของจุลินทรีย์ (Specific growth rate of micro-organism); เวลา<sup>-1</sup> (time<sup>-1</sup>)

$F$  = อัตราการใช้สารอาหารต่อปริมาตร (Volumetric substrate utilization rate); มวล/ปริมาตร-เวลา (mass volume<sup>-1</sup> time<sup>-1</sup>)

$S$  = ความเข้มข้นของสารอาหารที่ออกจากระบบและสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable effluent substrate concentration); มวล/ปริมาตร (mass/volume)

$S_0$  = ความเข้มข้นของสารอาหารที่เข้าสู่ระบบและสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable influent substrate concentration), มวล/ปริมาตร (mass/volume)

$\theta$  = ระยะเวลาที่ของเหลวอยู่ในระบบ (Hydraulic retention time); วัน (day)

$t$  = เวลา; วัน (Day)

ในการศึกษานี้ จะไม่นำเอาส่วนที่แบคทีเรียถูกทำลายไป (Bacterial decay term) มาคิด เพื่อให้ได้โมเดลอย่างง่าย ๆ สำหรับระบบกวนผสมและไม่มี การเวียนตะกอนกลับ ค่าเฉลี่ยของระยะเวลาที่แบคทีเรียอยู่ในระบบ (Solid retention time) จะเท่ากับระยะเวลาที่ของเหลวถูกกักอยู่ในระบบ (Hydraulic retention time)

ดังนั้น จะได้อัตราสัมพันธ์ระหว่าง  $F$  และ  $\mu$  เป็น

$$\mu = Yq = (Y/M) F \dots\dots\dots (๑๒)$$

$q$  = อัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ (Specific Substrate Utilization Rate)

$Y$  = ค่าคงที่ของการเจริญเติบโต (Growth Yield Constant) ภายใต้

สภาวะคงที่ (Steady State) สมการที่ ๑๐-๑๒ จะเป็นดังนี้

$$\mu = \frac{1}{\theta} \dots\dots\dots (๑๓)$$

$$F = (S_0 - S) / \theta \dots\dots\dots (๑๔)$$

$$M = Y (S_0 - S) \dots\dots\dots (๑๕)$$

CHEN และ HASHIMOTO ได้ประยุกต์และนำเอาโมเดลทางจลนศาสตร์ของการใช้สารอาหารที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ ( Specific growth rate ) กับความเข้มข้นของสารอาหาร (Substrate concentration) และแสดงออกมาในรูปของสมการที่ ๑๖

$$\frac{\mu}{\mu_m} = \frac{S/S_0}{K+(1-k)S/S_0} \dots\dots\dots (๑๖)$$

เมื่อ  $\mu_m$  = อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดของจุลินทรีย์ (Maximum specific growth rate of microorganism )

$K$  = ค่าคงที่ทางจลนศาสตร์ (Kinetic Conatant)

จากโมเดลนี้แสดงให้เห็นว่า อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดจะเกิดเมื่อมีการล้างออก (washout) นั่นคือ  $\mu \rightarrow \mu_m$  เมื่อ  $s \rightarrow s_0$  ดังนั้น ระยะเวลาเก็บกักจุลินทรีย์ค่าสูงสุดจะเป็นส่วนกลับของอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุด ดังสมการที่ ๑๗

$$\theta_m = \frac{1}{\mu_m} \dots\dots\dots (๑๗)$$

จากสมการที่ ๑๖ แสดงให้เห็นว่า  $\mu$  จะเป็นศูนย์เมื่อไม่มีการใช้สารอาหาร

สำหรับระบบกวนสมบูรณ์ ภายใต้สภาวะคงที่ เมื่อจัดสมการที่ ๑๓ และ ๑๖ จะได้เป็นดังสมการที่ ๑๘

$$\theta = \frac{1}{\mu_m} + (K/\mu_m) (s_0 - s) / s \dots\dots\dots (๑๘)$$

ดังนั้น  $\mu_m$  และ  $K$  สามารถหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\theta$  กับ  $(s_0 - s)/s$  ที่จุดตัดจะเท่ากับ  $\frac{1}{\mu_m}$  และความลาด (slope) เท่ากับ  $K/\mu_m$

เมื่อหาค่า  $\mu_m$  และ  $K$  ได้แล้วก็สามารถที่จะทำนาย  $s$  ได้โดย

$$\frac{s}{s_0} = \frac{K}{\frac{\theta}{\theta_m} - 1 + K} \dots\dots\dots (๑๙)$$

จากสมการที่ ๑๙ นี้ แสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นของสารอาหารที่ออกจากระบบ (Effluent substrate concentration) จะขึ้นกับความเข้มข้นของสารอาหารที่เข้าสู่ระบบ (Influent substrate concentration)

ถ้าให้  $B$  คือจำนวนลิตรของมีเทนที่เกิดขึ้นในที่อุณหภูมิและความดันมาตรฐานต่อกรัมของของแข็งระเหยที่ใส่เข้าไป ( $LCH_4$  at STP produced / G VS added) ในถังหมัก และ  $B_0$  คือจำนวนลิตรของมีเทนที่อุณหภูมิและความดันมาตรฐานต่อกรัมของของแข็งระเหยที่ระยะเวลาไม่จำกัด (Infinite retention time)

ของแข็งระเหยที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีววิทยา (Biodegradable Volatile Solid) ในถังหมักจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ  $B_0 - B$  โดยที่  $B_0$  จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณของแข็งระเหยที่ย่อยสลายได้ทางชีววิทยาที่ใส่เข้าสู่ระบบ (Biodegradable Volatile Solid Loading) จากสมการที่ ๒๐

$$\frac{B_0 - B}{B_0} = \frac{K}{\theta/\theta_m - 1 + K} \dots\dots\dots (๒๐)$$

จากสมการที่ ๒๐ เมื่อจัดเขารูปใหม่จะได้เป็น

$$B = B_0 \left[ 1 - \frac{K}{\theta/\theta_m - 1 + K} \right] \dots\dots\dots (๒๑)$$

เมื่อ  $\theta \rightarrow \infty$  แสดงว่า  $\frac{\theta}{\theta_m} \gg (1-K)$

นั่นคือ  $\frac{\theta}{\theta_m} - (1+K) \approx \frac{\theta}{\theta_m}$

เพราะฉะนั้น  $\frac{B}{B_0} = 1 - \frac{K\theta_m}{\theta}$

$$B = B_0 - \frac{B_0 K \theta_m}{\theta} \dots\dots\dots (๒๒)$$

จากสมการที่ ๒๐ สามารถจัดใหม่ได้ดังนี้

$$\theta = \theta_m + \theta_m K \left[ B / (B_o - B) \right] \dots\dots\dots (๒๓)$$

เพราะว่า B คือปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อกรัมของแข็งระเหยที่ใส่เข้าสู่ระบบที่ระยะเวลาในการหมักต่าง ๆ ดังนั้น อัตราการเกิดก๊าซมีเทน (Volumetric methane production rate) จะเป็น B เท่าของอัตราการไหล

$$\gamma_v = \frac{BS_{T_o}}{\theta} = \frac{B_o S_{T_o}}{\theta} \left[ 1 - \frac{K}{\theta/\theta_m - 1 + K} \right] \dots\dots (๒๔)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย