บทที่ 3

ทฤษฎีและความเป็นมา

หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย

3.1 ประวัติความเป็นมาและลักษณะของถังหมักแบบต่าง ๆ

การพัฒนาและปรับปรุงกรรมวิธีแอนแอโรบิก ที่ทำมาในอดีต เช่น ปี *1894 DONALD CAMERON* ออกแบบเซฟติกแทงค์ให้กับเมือง *Exeter* ปรากฏผลสามารถกำจัด *solid* ถึง *80%* และผลิตก๊าซเชื้อเพลิงได้มากพอ ซึ่งใช้ทำความสว่างให้กับตำบลรอบ ๆ โรงงาน. ปี *1904 TRAVIS hydraulic tank* ถูกสร้างขึ้นโดยประสงค์ให้เป็นถังหมักตกตะกอน *(sedimentation digestion tank)*. ปี *1907 Dr.IMHOFF* ได้พัฒนาและออกแบบ *Imhoff Tank*. จนกระทั่งถึงปี *1920* ถังหมักแยกกากตะกอนก้าวหน้าเรื่อยมา ฝาปิดถังที่ลอยตัวได้ที่เรียกว่า *DOWN'S floating cover for tank* ถูกประดิษฐ์ขึ้นทำให้ลดอันตรายที่เกิดจากการระเบิด อันเนื่องมาจากอากาศผสมก๊าซมีเทน ความก้าวหน้าของถังหมักแยกกากตะกอน เป็นที่มาของถังหมักคอนเวนชั่นแนลในปัจจุบัน และเนื่องจากความต้องการการกำจัดเพิ่มขึ้นตลอดมา รวมกับเทคโนโลยีพัฒนามามากหลังปี *1950* ถังอัตราสูง *(high-rate unit)* และวิธีการแอนแอโรบิคคอนแทคท์จึงถูกพัฒนาขึ้น ความแตกต่างของกรรมวิธีแอนแอโรบิกแบบต่าง ๆ แสดงในตารางที่ *1* และถังหมักที่สำคัญมีลักษณะดังนี้

ก. ถังอิมฮอฟฟ์ *(Imhoff Tank)*

เป็นถังที่ออกแบบให้มีทวิประสงค์คือ เป็นทั้งถังหมักและถังตกตะกอน ตะกอนที่ตกในถังตกตะกอนจะไหลเข้าไปสู่ *anaerobic chamber*. โดยที่ใน *anaerobic chamber* ไม่มีการกวนผสม, ดังนั้นจึงมีคุณลักษณะคล้าย "วิธีการย่อยแบบคอนเวนชั่นแนล" ดูรูปที่ *1*.

ข. วิธีการย่อยแบบคอนเวนชั่นแนล *(Conventional Anaerobic Digestion Process)*.

น้ำเสียที่อยู่ภายในถังคอนเวนชั่นแนลจะแบ่งตัวมันออกเป็น *4* ชั้น ก. ชั้น *scum - layer* เป็นชั้นที่ตะกอนจับกันลอยตัวอยู่ส่วนบนสุด เป็นชั้นฝ้าเรียกว่า เป็นโซนประถมภูมิแห่งการ-

ย่อยสลาย *(primary decomposition)* ก๊าซที่ออกจากชั้นนี้ส่วนมากหลุดลอย. ข. ชั้น *suppernatant* เป็นชั้นของตะกอนถัดลงมาจากชั้น *scum layer* เรียกได้ว่า เป็นทุติยภูมิของการย่อยสลาย *(secondary decomposition)*. ค. ชั้น *active layer* เป็นชั้นถัดลงมาจากชั้น *suppernatant* ซึ่งมีสารละลาย และสารแขวนลอยมากกว่าชั้นอื่น. ง. ชั้น *stabilized solids* เป็นชั้นที่อยู่ส่วนล่างสุดถัดลงมาจากชั้น *active layer* ภายในชั้นนี้ เป็นตะกอนที่ย่อยสลายจนหมดสิ้นแล้ว. (ดูรูปที่ 2) ถังคอนเวนชั่นแนลทำงานได้ดี เมื่อระยะเวลาเก็บกักตะกอน *HRT* ยาว *50-60* วันหรือมากกว่า และ *Organic Loading* ต่ำ ๆ เพราะถ้าหาก *Organic Loading* เพิ่มจะทำให้การสร้างฝ้าสกัมเพิ่มก่อเกิดเป็นปัญหา ซึ่งมีผลก่อกวนชั้น *suppernatant* ในการควบคุมอุณหภูมิ ชีวสมดุลย์ *(biological balance)* และการสัมผัสอาหาร *(food contact)*. เนื่องจากภายในถังแบ่งออกเป็นชั้น ๆ ตามที่กล่าวมาจึงไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้เท่ากันทุกส่วนได้ เป็นผลให้จุลินทรีย์ทำงานต่างกัน. ส่วนที่มีภาวะสมดุลย์ระหว่างแบคทีเรียที่ทำให้เกิดมีเทนกับ *saprorophytic acid former* จึงมีอยู่น้อย การแบ่งออกเป็นโซน ๆ ทำให้การสัมผัสระหว่างอาหารกับจุลินทรีย์ถูกจำกัด ซึ่งนับว่าเป็นข้อด้อยของ "วิธีการย่อยแบบคอนเวนชั่นแนล"

ค. <u>ถังย่อยแบบอัตราสูง *(High - rate Digestion units)*</u>

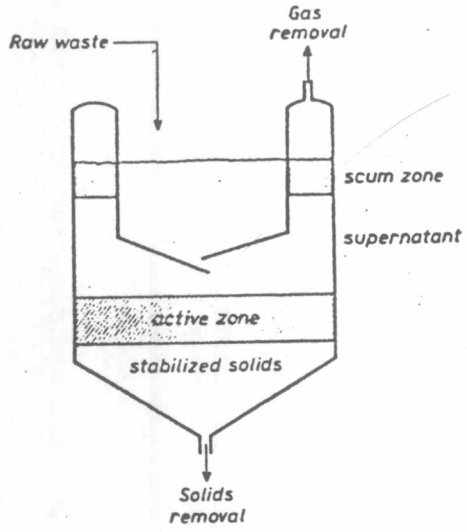
ถังหมักอัตราสูงเกิดจากการแก้ปัญหาเกี่ยวกับการควบคุมอุณหภูมิ ชีวสมดุลย์ และการสัมผัสอาหาร โดยการกวนผสมให้ทั่ว *Complete mixing*. (รูปที่ 3) ทำให้โซนปฏิกริยาเพิ่มจากส่วนหนึ่งของถังเป็นทั้งถัง. การกวนผสมทำได้โดยการใช้ก๊าซหรือใช้เครื่องกวน.

ง. <u>วิธีการแอนแอโรบิกคอนแทคท์ *(Anaerobic Contact Processes)*</u>.

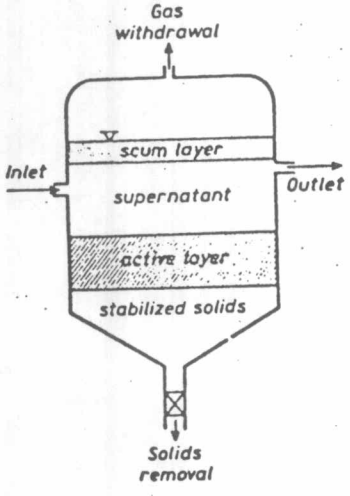
วิธีการแอนแอโรบิกคอนแทคท์ถูกพัฒนาจากระบบถังหมักอัตราสูง ประกอบด้วยถังกวนผสม *(completely mixed digester)*, ถังตกตะกอน *(settler)*. งานนี้ถูกบุกเบิกโดย *FULLER (1953), STEFFEN (1955), SCHROEPFER et al (1955)*. ในระบบนี้ถังหมักอัตราสูงถูกปรับปรุงให้มีการวกกลับ *(recycling)* ของตะกอนสลัดที่ออกจากถังปฏิกรณ์กลับเข้าถังปฏิกรณ์. เป็นการให้ปริมาณจุลชีพในถังปฏิกรณ์สูง ทำให้สามารถย่อยได้โดยใช้เวลา *24* ชั่วโมง

ตารางที่ 1 ลักษณะดีเด่นในการออกแบบและควบคุมการทำงานเปรียบเทียบระหว่างถังหมักแบบต่าง ๆ

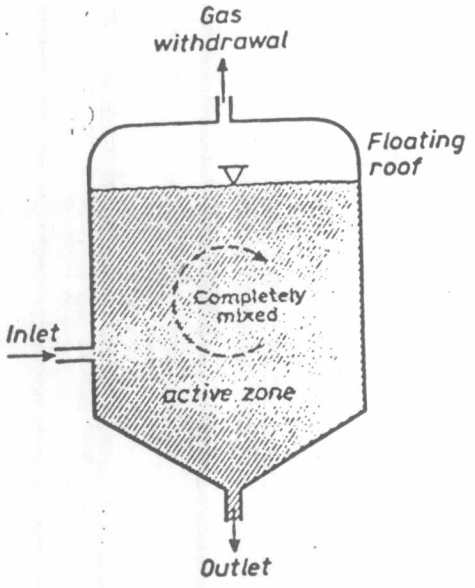
สภาพ	คอนเวนชั่นแนล (Conventional)	ถังหมักอัตราสูง (High - Rate)	แอนแอโรบิกคอนแทคท์ (Anaerobic contact)
ต้องการความร้อนหรือไม่ (Heated or Unheated)	ร้อน, ไม่ร้อน	ร้อน	ร้อน
เวลาในการกักน้ำทิ้ง (Detention time)	๔๐ วัน	๑๐ - ๑๕ วัน	๑๒ - ๒๔ ชั่วโมง
Loading (lb. VSS/ft.^{3} day)	0.03 - 0.05	0.10 - 0.20	0.10 - 0.20
การไหลเข้าและการไหลออก (Feeding & withdrawal)	ไหลหยุดไหลหยุด	ไหลไม่หยุดหรือไหลหยุดไหลหยุด	ไหลไม่หยุด
กวนผสม (Mixing)	ไม่ต้อง	ต้อง	ต้อง
ไหลเข้าอย่างสม่ำเสมอตลอด (Feed equalization)	ไม่ต้อง	ไม่ต้อง	ต้อง
การวกกลับของตะกอนที่ออก (Effluent sludge recycle)	ไม่ต้อง	ไม่ต้อง	ต้อง
การขจัดก๊าซ (Degasification)	ไม่ต้อง	ไม่ต้อง	ต้อง



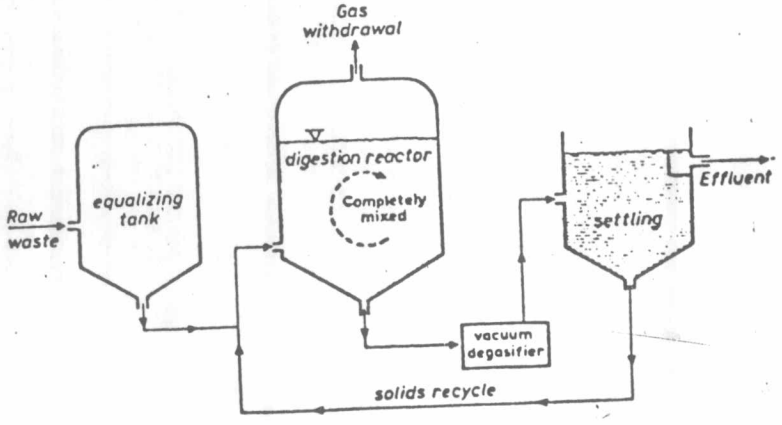
รูปที่ 1 ถังอิมฮอฟฟ์ *Imhoff tank, Dual purpose sedimentation and anaerobic digestion system.)*



รูปที่ 2 วิธีการย่อยแบบธรรมดา *(Conventional anaerobic digestion system.)*



รูปที่ 3 ถังอัตราสูง *(High-rate anaerobic digestion systems.)*



รูปที่ 4 วิธีการแอนแอโรบิกคอนแทคท์ *(Anaerobic contact process.)*

หรือน้อยกว่า ปกติอัตราการวกกลับคือ *1:3* โดยปริมาตรของน้ำเสียที่เข้าระบบ น้ำเสียก่อนเข้าระบบนี้บางทีจำเป็นต้องมีถังเฉลี่ยก่อนเข้าถังปฏิกรณ์ เพื่อขจัดสภาพไม่พึงประสงค์ทางนิเวศน์วิทยาแก่ชีวประชากร และยังจำเป็นต้องมีหน่วยขจัดก๊าซ *(degasify)* ทำการขจัดก๊าซ น้ำที่ออกจากถังปฏิกรณ์จึงตกตะกอนได้ดี. (รูปที่ *4*)

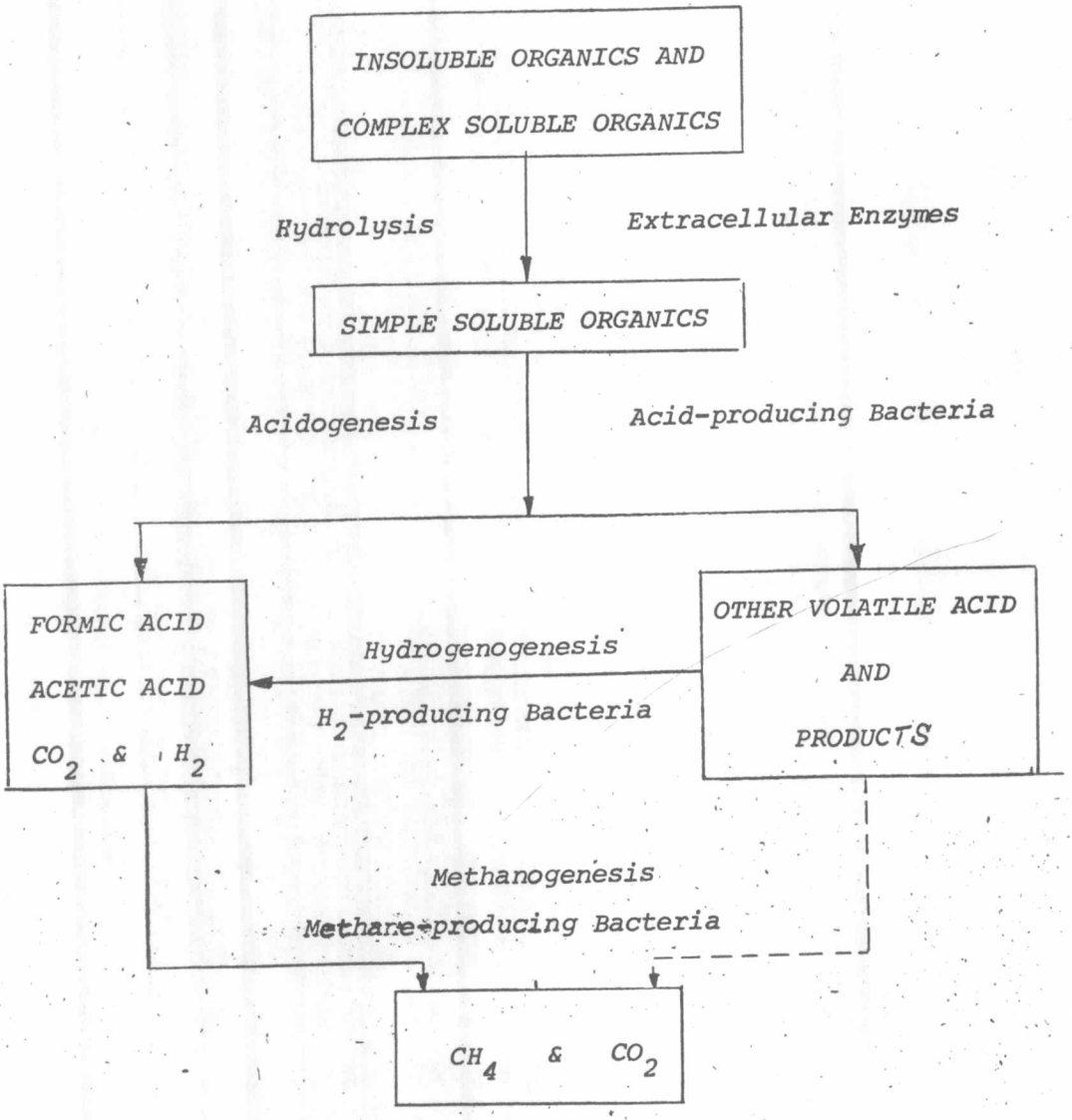
McCARTY, (1968) กล่าวว่าการหมักสำหรับน้ำทิ้งเจือจางแล้ว เวลากักตะกอนจุลินทรีย์มากสามารถลดเวลาในการกักน้ำทิ้งลงเรียกว่า "วิธีการแอนแอโรบิกคอนแทคท์".

GATES et al. (1967) ยอมรับวิธีการแอนแอโรบิกคอนแทคท์แล้วอธิบายว่าหมายถึง

- ความข้นที่เข้าระบบมี *BOD* น้อยกว่า *4,000* มก./ลบ.ดม.
- มีการวกกลับตะกอน
- เวลาในการกักน้ำทิ้งต่ำกว่า *4* วัน
- ลักษณะสำคัญที่ต่างจากถังแบบอัตราสูงและถังคอนเวนชั่นแนล คือ มีการวกกลับตะกอน

3.2 <u>ชีวเคมีและจุลชีววิทยาของ "วิธีการแอนแอโรบิกคอนแทคท์"</u>

การย่อยสลายโดยไม่ใช้อ๊อกซิเจน *(anaerobic digestion)* ของสารอินทรีย์ในน้ำเสีย เกิดจากแบคทีเรียหลายพวก แบคทีเรียที่ทำให้เกิดกรด *(acid formers)* และแบคทีเรียที่ทำให้เกิดก๊าซมีเทน *(methane formers)* ดังแสดงในรูปที่ *5*. สารอินทรีย์ที่ไม่ละลายน้ำและสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำ แต่มีโครงสร้างซับซ้อนจะถูกสลายให้เป็นโมเลกุลขนาดเล็ก โดยเอ็นไซม์ของแบคทีเรีย *(extracellular enzymes)* โมเลกุลขนาดเล็กนี้สามารถผ่านชั้นเนื้อเยื่อชั้นนอกของจุลินทรีย์ ปฏิกริยาลดขนาดโมเลกุล และเปลี่ยนเป็นสารละลายเรียกว่า *hydrolysis* โมเลกุลที่เล็กลงอันเนื่องจากผลของการ *hydrolysis*นี้จะถูกใช้เป็นแหล่งพลังงานและแหล่งคาร์บอนสำหรับแบคทีเรีย. การอ๊อกซิไดซ์ในช่วงนี้จะได้กรดโวลาไทล์ต่าง ๆ เช่น กรดอะซิติก *(acetic)* กรดโปรไพโอนิก *(propionic)* กรดบิวไทริก *(butyric)* กรดวาเลริก *(valeric)* และกรดคาโปรอิก *(kaproic)* ซึ่งกระบวนการนี้เรียกว่า *Acidogenesis* และแบคทีเรียที่เกี่ยวข้องเรียกว่า "แบคทีเรียที่ทำให้เกิดกรด" การรีดิวซ์ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมของถังปฏิกรณ์และธรรมชาติของน้ำเสีย แบคทีเรียที่ทำให้เกิดกรดบางส่วนสามารถทำให้เกิด ก๊าซไฮโดรเจน บางส่วนสามารถย่อยกรดโวลาไทล์ที่มีขนาดโตกว่ากรดอะซิติก และบางส่วนสามารถย่อยสารประ-



Bacterial cell are formed by all groups of bacteria

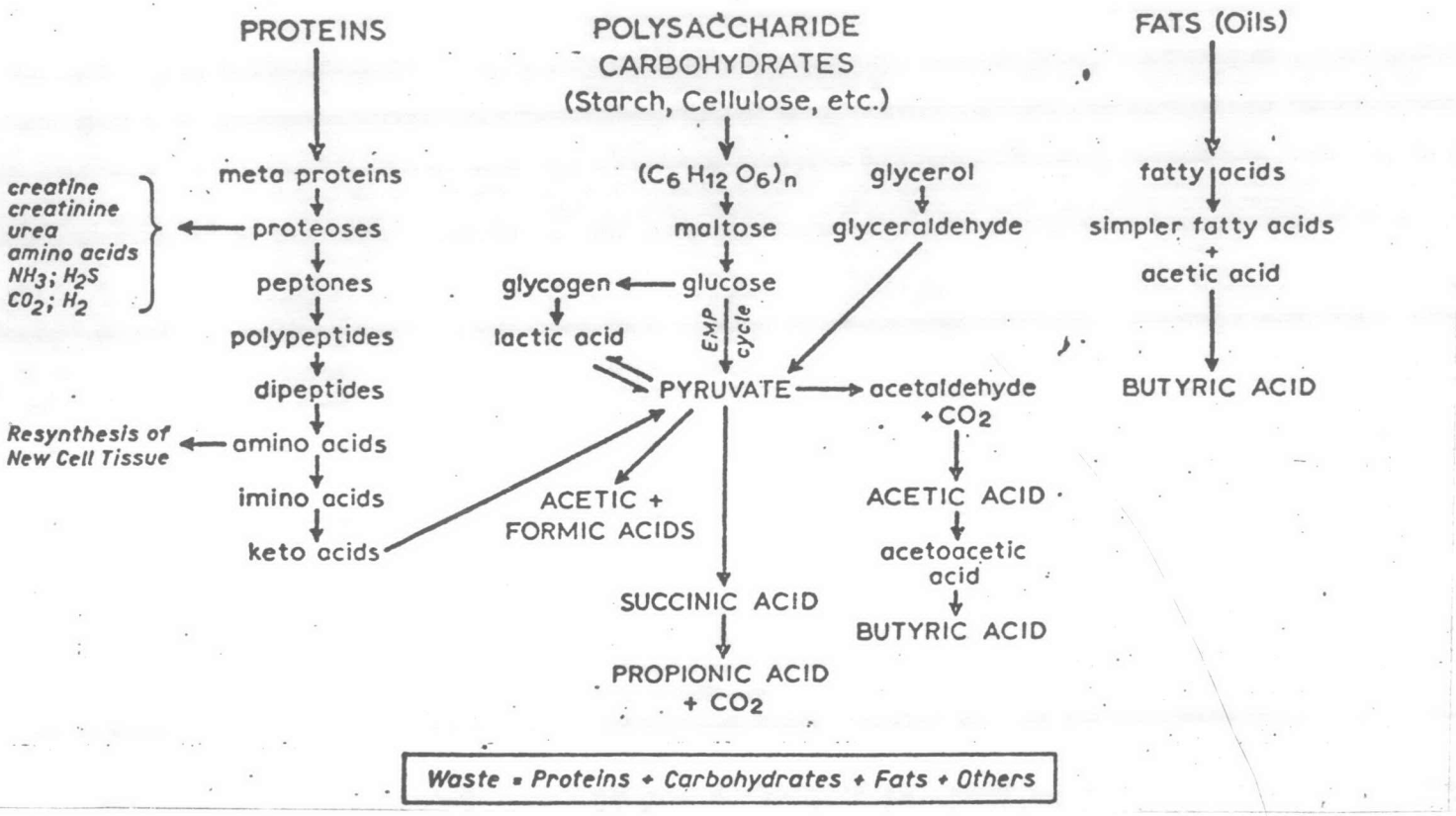
รูปที่ 5 Multi-step Nature of Anaerobic Operation. (GRADY)

กอบอินทรีย์ต่อไปจนได้กรดอะซิติก, CO_2 และ H_2O. แบคทีเรียพวกนี้เรียกว่า "แบคทีเรียที่ทำให้เกิดก๊าซไฮโดรเจน" และกระบวนการนี้เรียกว่า *Hydrogenogenesis* นอกจากนี้ยังมีแบคทีเรียที่ทำให้เกิดกรดอีก บางส่วนที่ไม่ได้เป็น "แบคทีเรียที่ทำให้เกิดก๊าซไฮโดรเจน" แบคทีเรียทั้งหมดนี้สามารถเรียกรวม ๆ กันได้ว่า *Non-methanogenic bacteria* ผลผลิตของแบคทีเรียดังกล่าวมี กรดฟอร์มิก, กรดอะซิติก,CO_2 และ H_2 ผลผลิตนี้แบคทีเรียที่ทำให้เกิดก๊าซมีเทน จะนำเอาไปใช้ในการผลิตก๊าซมีเทนต่อไป. "แบคทีเรียที่ทำให้เกิดก๊าซมีเทน" บางส่วนอาจผลิตก๊าซมีเทนโดยตรงจากกรดโวลาไทล์ และอินทรียสารได้เลย แสดงที่เส้นไข่ปลาของรูปที่ 5. *McCARTY (1964)* กล่าวว่า *COD* จำนวน *64* กรัมของน้ำเสียที่ถูกกำจัดจะให้ก๊าซมีเทน *16* กรัม และที่อุณหภูมิ, ความดันมาตรฐาน *COD 1* ปอนด์ ให้ก๊าซมีเทน *5.62* ลบ.ฟุต (*0.34* ลบ.ม/กก.)

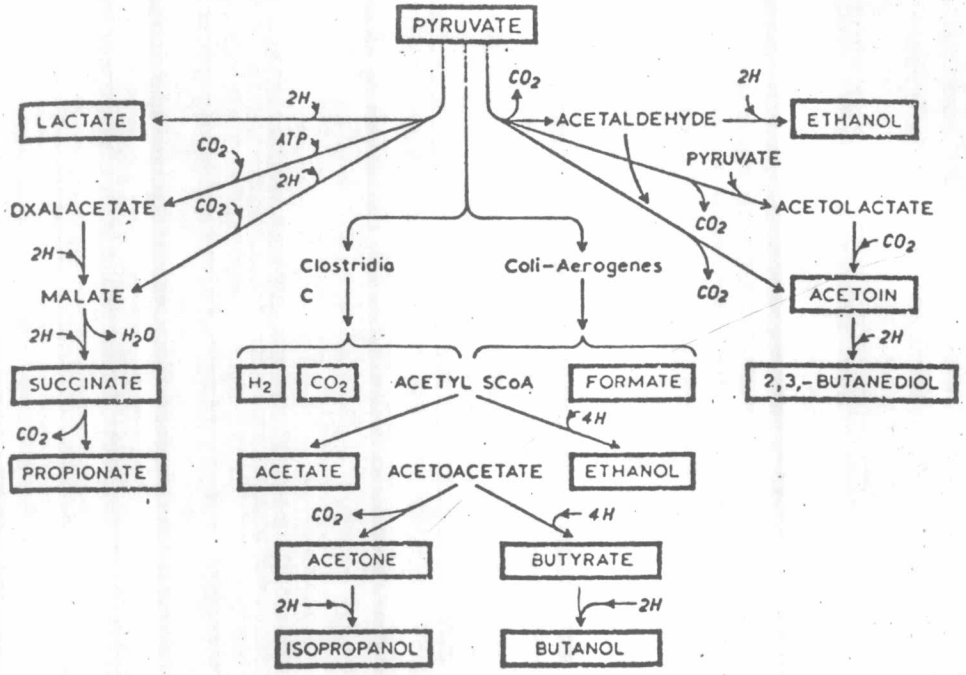
"แบคทีเรียที่ทำให้เกิดมีเทน" มีทั้งแบคทีเรียชนิดแอนแอโรบิก และแบคทีเรียชนิด *Facultative Bacteria* แม้ว่าแบคทีเรียอย่างหลังมีน้อย (โดยอัตราส่วน) เมื่อเทียบกับชนิดแรก, แต่ก็มีความสำคัญมากโดยเฉพาะเมื่อเกิด *shock load* ทั้งยังมีความสำคัญมากต่อ *hydrolysis* และ *fermentation* รูปที่ *6* และรูปที่ *7* แสดงให้เห็นว่า กรดไพรูวิคเป็นทางผ่านให้กับการย่อยสลายสารหลายชนิด. แต่ยังมีการย่อยกรดอะมิโนและไขมันโดยไม่ต้องผ่านเป็นกรดไพรูวิคได้ โดยทั่วไปผลผลิตของ "แบคทีเรียที่ไม่ทำให้เกิดก๊าซมีเทน" จะออกมาเป็นกรดโวลาไทล์ที่มีโมเลกุลขนาดสั้น เช่น กรดอะซิติก, กรดโปรไพโอนิก, กรดบิวไทริค. จุลินทรีย์ต่างๆ ในระบบมีอัตราส่วนเปรียบเทียบต่อกันต่าง ๆ กันไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม เช่น *pH*,อุณหภูมิ อื่น ๆ และขึ้นกับอัตราการเจริญจำเพาะซึ่งขึ้นกับชนิดของจุลินทรีย์ "แบคทีเรียที่ทำให้เกิดก๊าซไฮโดรเจน" จะผลิต H_2 หรือใช้อินทรีย์สารผลิตอีเลคตรอนระหว่างการออกซิไดซ์. อีเลคตรอนนี้อาจเปลี่ยนเป็นไอออนของไฮโดรเจน และแปรรูปเป็นโมเลกุลของไฮโดรเจน. "แบคทีเรียที่ทำให้เกิดก๊าซมีเทน" บางชนิดใช้ H_2 ในการเจริญเติบโตผลิตก๊าซมีเทน, บางชนิดก็สามารถผลิตก๊าซมีเทนโดยตรงจากกรด

3.2.1 <u>การผลิตกรดอินทรีย์และแอลกอฮอลล์</u>

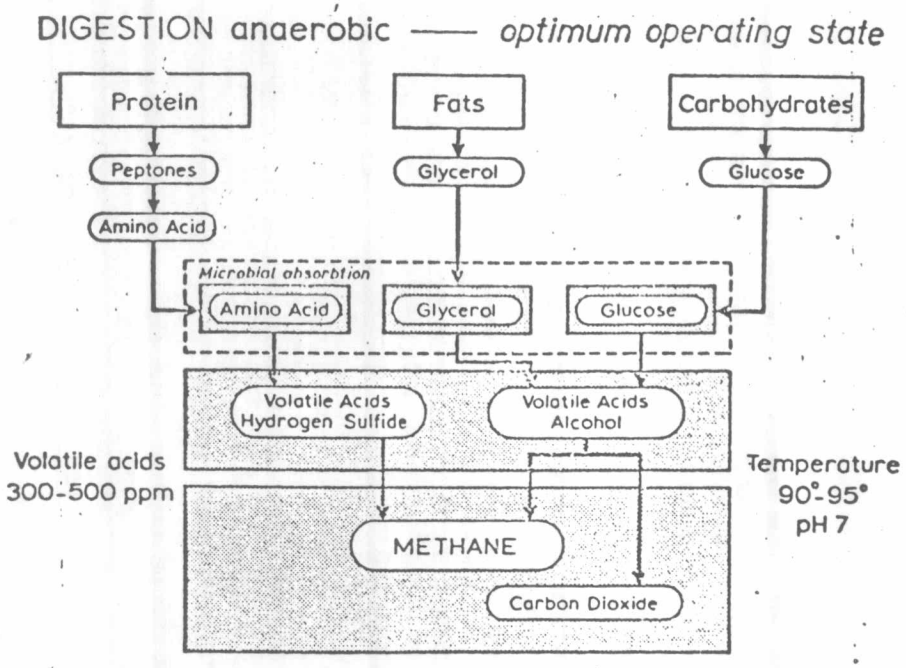
การผลิตกรดอินทรีย์และแอลกอฮอลล์เป็นขั้นแรกของระบบแอนแอโรบิก. ขั้นนี้ยังไม่มีการผลิตมีเทน *(non-methanogenic phase,; TOERIEN,1967)*. น้ำเสียอินทรีย์มักจะ



รูปที่ 6 *Biosynthesis of pyruvate and other intermedicates under anaerobic condition by microbes.*



รูปที่ 7 *Bioconversion of pyruvate to other organic intermediates*

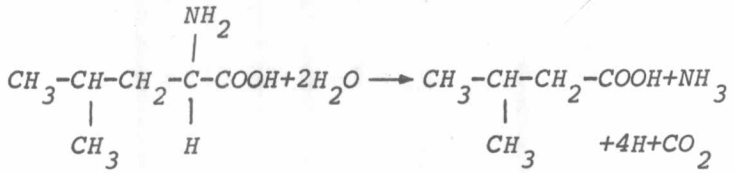


รูปที่ 8 การแปรสภาพทางชีวะแบบไม่ใช้ออกซิเจนของโปรตีน ไขมัน และคาร์บอไฮเดรท เป็นมีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์

ประกอบด้วยโปรตีนไขมัน และคาร์โบไฮเดรท ชนิดโพลี่แซคคาไรด์ (*polysaccharide carbohydrate*). ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลมาก, จึงถูกย่อยโดยเอ็นไซม์ของแบคทีเรีย จนโมเลกุลเล็กลง

โปรตีนจะถูกเปลี่ยนเป็นกรดอะมิโน *(amino acid)*, กรดอิมิโน *(imino acid)*, กรดคิโต *(keto acid)*. คาร์โบไฮเดรทชนิดโพลี่แซคคาไรด์จะถูกเปลี่ยนเป็นกลูโคส *(glucose)*. ไขมันจะถูกเปลี่ยนเป็นกลีเซอรอล *(glycerol)*, และกรดไขมัน *(fatty acid)*. นอกจากนี้ยังได้กรดอินทรีย์อื่น ๆ และกรดไพรูวิค *(pyruvic acid)*, กรดไพรูวิคนี้ *intermediate product*ที่ได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลชีพ โมเลกุลที่เล็กลงเหล่านี้จะถูกย่อยต่อไปเป็นกรดอินทรีย์โวลาไทล์ *(volatile organic acid)* และแอลกอฮอลล์ *(alcohol)*. (ดูรูปที่ 5. รูปที่ 6. และรูปที่ 8 .)

แอลกอฮอลล์ (ในรูปต่าง ๆ เช่น *ethanol, acetymethyl carbonol,butanol, 2,3-butanediol, & isopropanol)* และกรดอินทรีย์ (ในรูปต่าง ๆ เช่น *lactate, oxalcetate, saccinate, acetolactate, butyrate & formate)* ส่วนมากจะถูกสังเคราะห์โดยแบคทีเรียจำพวกโคไลแอโรเจนนิส *(coli-aerogenes)* และคลอสไทร์เดีย *(clostridia)* และแบคทีเรียอื่น ๆ (ดูตารางที่ 2. และที่ 7) นอกจากนี้ยังมีกรดอะมิโนอีกมากกว่า 25 ชนิด สามารถถูกสังเคราะห์เป็นกรดโวลาไทล์ได้เลย โดยไม่ต้องผ่านการเป็นกรดไพรูวิค. พวกลูซิน *(luecine)* กับวาลีน *(valine)* จะถูกอ๊อกซิไดซ์เป็นกรดไอโซวาเลอริค *(isovaleric acid)* และกรดไอโซบิวไทริค *(isobutyric acid)*. ไกลซีน *(glycine)*, โปลีน *(poline)* และกรดอะมิโนอื่นทำหน้าที่ในการผลิตไฮโดรเจน. กรดไอโซวาเลอริคสามารถพบได้ในถังหมักตะกอนน้ำเสียแหล่งชุมชน



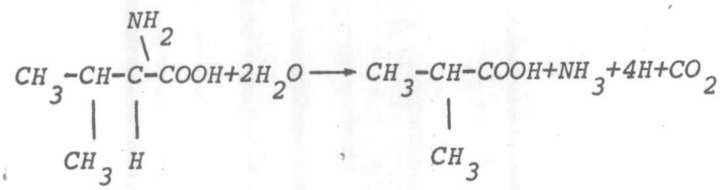
$$CH_3\text{-}\underset{\displaystyle CH_3}{\underset{|}{CH}}\text{-}CH_2\text{-}\underset{\displaystyle H}{\underset{|}{\overset{\displaystyle NH_2}{\overset{|}{C}}}}\text{-}COOH + 2H_2O \longrightarrow CH_3\text{-}\underset{\displaystyle CH_3}{\underset{|}{CH}}\text{-}CH_2\text{-}COOH + NH_3 + 4H + CO_2 \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (1)$$

Leucine *Isovaleric Acid*

005304

ตารางที่ 2 จุลชีพผู้ผลิตกรดอินทรีย์ *ORGANIC ACID PRODUCING MICROBES*

Microbe	pH	Temp. (°C)	Products		References
Bacillus cereus	5.2	25-35	acetic	lactic	Toecrien, 1967
Bacillus knelfelkampi	5.2-8.0	25-35	acetic	lactic	Burbank et al., 1966
Bacillus megaterium	5.2-7.5	28-35	acetic	lactic	Toecrien, 1967
Bacteriodes succinogenes	5.2-7.5	25-35	acetic	succinic	---
Clostridium carnofoetidum	5-8.5	25-37			Burbank et al., 1956
Clostridium cellobioparus	5-8.5	36-38	formic, acetic, lactic, ethanol, CO_2		---
Clostridium dissolvens	5-8.5	35-51	formic, acetic, lactic		---
Clostridium thermocellulaseum	5-8.5	55-65	formic, acetic lactic, succinic		---
Pseudomonas formicans	---	33-42	formic, acetic, lactic, succinic, ethanol		Wood, 1961
Ruminocossus flavefaciens	---	33-38	formic, acetic, succinic		---



$$CH_3-CH(CH_3)-C(NH_2)H-COOH + 2H_2O \longrightarrow CH_3-CH(CH_3)-COOH + NH_3 + 4H + CO_2 \quad \text{.....(2)}$$

Valine *Isobutyric Acid*

กรดไขมันบางชนิด เช่นกรดสเตียริค *(stearic acid)* จะถูกอ๊อกซิไดส์ ด้วยกรรมวิธีเบต้าอ๊อกซิเดชั่น *(beta-oxidation)* ได้กรดอะซิติก.

$$CH_3(CH_2)_{16}COOH + 16\ H_2O \xrightarrow{\text{beta-oxidation}} 9\ CH_3COOH + 32\ H \quad \text{.....(3)}$$

ในน้ำเสียชุมชนประกอบด้วยไขมันประมาณ 45 มก/ลบ.ดม. จึงมักจะมีกรดพาลมิติก *(palmitic acid)* และกรดโอลิอิค *(oleic acid)* ถูกย่อยโดย *beta-oxidation* เป็นกรดอะซิติก, คาร์บอนไดอ๊อกไซด์ และมีเทน *(JERIS & McCARTY, 1962)*. กรดโวลาไทล์บางครั้งเกิดจากปฏิกริยาของคาร์บอนไดอ๊อกไซด์กับไฮโดรเจน โดยแบคทีเรีย *Clostridium aceticum* ดังสมการที่ 4.

$$2CO_2 + 4H_2 \longrightarrow CH_3COOH + 2H_2O \quad \text{.....(4)}$$

แบคทีเรียที่ทำให้เกิดกรดจะสามารถดำรงชีวิตได้ในสภาวะแวดล้อม ที่เหมาะสมเฉพาะต่าง ๆ กัน การเกิดกรดโวลาไทล์จึงขึ้นอยู่กับสภาพ *pH* อุณหภูมิ และสารบางอย่างซึ่งสรุปในตารางที่ 2 และ 3

ชนิดของแบคทีเรียแปรเปลี่ยนไปตามการเปลี่ยนแปลงของน้ำเสีย เช่น น้ำเสียจากพวกเซลลูโลลิค *(Cellulosic wastes)* น้ำเสียจำพวกแป้ง *(Starch wastes)* น้ำเสียชนิดมีโปรตีนมาก *(High protein wastes)* น้ำมันพืช *(Vegetable oils)* จะมีแบคทีเรียต่าง-ชนิดต่างกัน *(TOERIEN, 1967)* พวกเชื้อรา *(Filamentous fungi)* จะพบน้อยมากแม้มันจะมีส่วนผสมในการผลิตกรดอินทรีย์และแอลกอฮอลล์.

3.2.2 <u>การเกิดก๊าซมีเทน</u> *(Methane Production)*

ขั้นที่ 2 เรียก *Methanogenic Phase (TOERIEN, 1969)* ในขั้นนี้กลุ่มของ

ตารางที่ 3 การย่อยสลายกลูโคส (ANDREW & PEARSON, 1965)

Products	มิลลิโมล / 100 มิลลิโมลของกลูโคสที่ย่อยสลาย			
	Esherichia-coli		Clostridium perfringens	
	pH 6.2	pH 7.8	Iron sufficient	Iron deficient
2-3 Butanediol	0.3	0.26	-	-
Acetoin	0.07	0.26	-	-
Glyceral	1.42	0.32	-	-
Ethanol	49.8	50.5	26	10
Formic acid	2.43	86.0	-	-
Acetic acid	36.5	38.7	60	15
Butyric acid	-	-	34	9
Lactic acid	79.5	70.0	33	180
Succinic acid	10.7	14.8	-	-
Carbondioxide	88.0	1.75	176	24
Hydrogen	75.0	0.26	214	21

แบคทีเรียจะย่อยกรดอินทรีย์และแอลกอฮอลล์ต่อให้เป็นก๊าซมีเทน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และเกิดเซลใหม่ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมทางนิเวศน์ อาหาร และสภาพไร้อ๊อกซิเจนอิสระ เป็นผลทำให้สารอินทรีย์ต่าง ๆ ในน้ำทิ้งลดลง *(SPEECE & McCARTY, 1965)* ชนิดของแบคทีเรียที่ผลิตก๊าซมีเทนเหล่านี้ ได้แสดงไว้ในตารางที่ *4* ปฏิกริยาทางเคมีของแบคทีเรียบางส่วน ได้สรุปไว้ในตารางที่ *5*

ตารางที่ *4 METHANE BACTERIA*[a], *(BARKER & BURBANK, 1966)*

THE METHANE BACTERIA[a],

ORGANISMS	pH	Temp.	ACIDS METABOLIZED
Methanobacterium omelianskii	6.5-8	37-40°C	CO_2, H_2, ethanol, primary and secondary alcohol
Methanobacterium propionicum			Propionate
Methanobacterium formicum			H_2, CO_2, formate
Methanobacterium suboxydans			Butyrate, valerate, caproate
Methanobacterium sohngenii			Acetate, butyrate
Methanobacterium ruminantium			
Methanobacterium soehngenii			Acetate, formate
Methanococcus vannielli	7.4-9		Formate
Methanococcus mazei		30-37°C	Acetate, butyrate
Methanosarcina methanica		35-37°C	Acetate, butyrate
Methanosarcina barkerii	7.0	30°C	CO_2, H_2, acetate, methanol

[a] In general, the methane bacteria will tolerate a pH range of 6.5-7.4.

ตารางที่ 5 แสดงปฏิกิริยาของการเกิดก๊าซมีเทน

METHANE FERMENTATION REACTIONS

ORGANISMS	REACTIONS
Methanobacterium soehngenii Methanococcus mazei Methanosarcina methanica Methanosarcina barkeri	$CH_3COOH \longrightarrow CH_4 + CO_2$
Methanobacterium propionicum Methanococcus mazei Methanosarcina methanica Methanobacterium suboxydans	$4CH_3CH_2COOH + 2H_2O \rightarrow 7CH_4 + 5CO_2$ $2CH_3(CH_2)_2COOH + 2H_2O \rightarrow 5CH_4 + 3CO_2$ [a] $2CH_3(CH_2)_2COOH + 2H_2O + CO_2 \rightarrow CH_4 + 4CH_3COOH$
Methanobacterium omelianskii	$2CH_3CH_2OH \rightarrow 3CH_4 + CO_2$ $2CH_3CH_2OH + CO_2 \rightarrow CH_4 + 2CH_3COOH$
Methanobacterium suboxydans	$CH_3COCH_3 + H_2O \longrightarrow 2CH_4 + CO_2$
	Organic acid reaction (β-oxidation) $CH_3(CH_2)_{16}COOH + 16H_2O \longrightarrow 9CH_3COOH + 3\ 16H_2$ Methane synthesis $4CO_2 + 16H_2 \longrightarrow 4CH_4 + 8H_2O$ $9CH_3COOH \longrightarrow 9CH_4 + 9CO_2$
	$CH_3(CH_2)_{16}COOH + 8H_2O \longrightarrow 13CH_4 + 5CO_2$

[a] Organism not identified.

ตารางที่ 6 GAS COMPOSITION FROM ANAEROBIC DIGESTER *(LANGFORD, 1957)*

Gas composition	%
CO_2	25 - 35
H_2	1.0 - 5
CH_4	50 - 68
N_2	2.0 - 7
O_2	0.0 - 0.1

แบคทีเรียที่ผลิต CH_4 บางชนิดใช้พลังงานจากการอ๊อกซิเดชั่นของ H_2 แบบโมเลกุล และได้คาร์บอนจาก CO_2 ดังสมการที่ 5.

คาร์บอนไดอ๊อกไซด์และไฮโดรเจน.

$$CO_2 + 4H_2 \longrightarrow CH_4 + 2H_2O \quad \text{.....(5)}$$

แบคทีเรียจำนวนไม่น้อย สามารถใช้กรดฟอร์มิค *(4HCOOH)* เป็นอาหารผลิตก๊าซ CH_4, CO_2และน้ำดังแสดงในสมการ 6.

กรดฟอร์มิค.

$$4HCOOH \longrightarrow CH_4 + 2H_2O + 2H_2O + 3CO_2 \quad \text{...(6)}$$

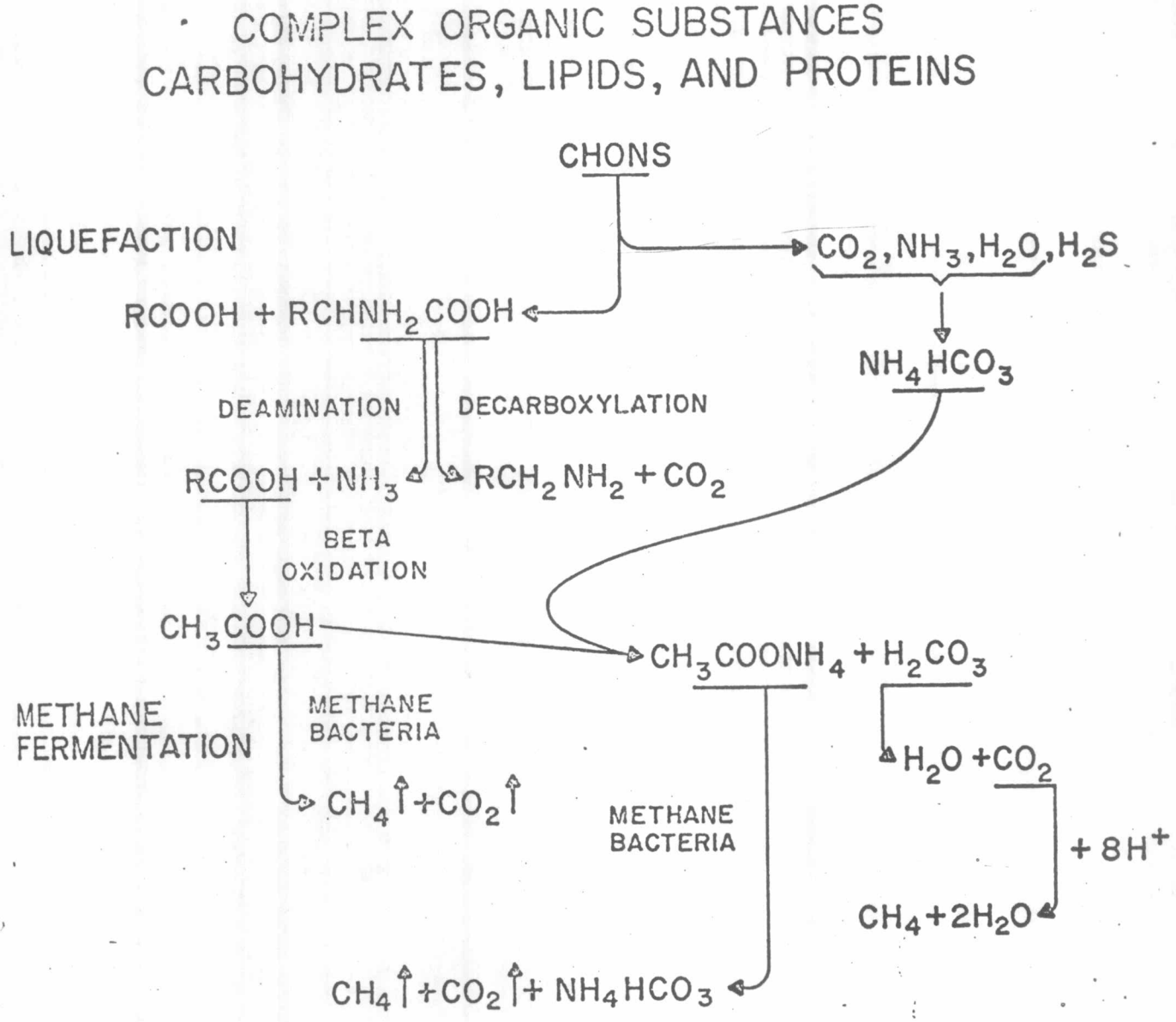
ตามที่รู้กันมานานแล้วว่าอาซีเตตเป็น *precresor* ที่สำคัญของ *methane*ในระบบแอนแอโรบิก แต่กลุ่มแบคทีเรียที่ใช้มันนั้นยังไม่รู้กันแน่ชัด แม้ว่า "แบคทีเรียที่ผลิตก๊าซมีเทนจากการอ๊อกซิไดซ์ไฮโดรเจน" ไม่สามารถใช้กรดอะซิติคเป็นแหล่งพลังงาน แต่จากการสังเกตุพบว่าอาซีเตตถูกใช้เป็นตัวรับอีเลคตรอน ดังสมการที่ 7. *(ZEIKUS et al, 1975)*

$$CH_3COOH + 4H_2 \longrightarrow 2CH_4 + 2H_2O \quad \text{.....(7)}$$

จากการทำเครื่องหมายโดยใช้สารกัมมันตภาพรังสี ในการทดลองให้เซลเจริญเติบโตด้วย *benzoate*พบว่าแม้ส่วนหนึ่งของ CH_4 จะเกิดการอ๊อกซิเดชั่นของ H_2 แต่ส่วนใหญ่ของ CH_4จะเกิดการตัดตัว *(cleavage)* ของอาซีเตต *(Ferry & Wolfe, 1976)*

$$CH_3COOH \longrightarrow CH_4 + CO_2 \quad \text{.....(8)}$$

อย่างไรก็ดีตามหลักของเทอรโมไดนามิกส์ การเจริญเติบโตของแบคทีเรียจากการตัดตัวของอาซีเตต เป็นไปได้ยากเพราะว่า พลังงานอิสระ *(free energy)* ที่เกิดขึ้นจะมีค่าน้อยมาก ที่ใช้ในการทำ *ATP* เกิดขึ้น



ANAEROBIC DEGRADATION
OF
COMPLEX ORGANIC SUBSTANCES
(AFTER MALINA, 1967)

รูปที่ 9

กรดอินทรีย์โวลาไทล์ หากมีปริมาณมากกว่า *3000 mg/l* จะมีพิษร้าย ต่อการทำงาน-ของแบคทีเรียที่ทำให้เกิดก๊าซมีเทน *(McCARTY & McKINNEY, 1961)*. เหมือนมีปริมาณของไอออนของโซเดียม *(sodium ion)* มาก ๆ สัดส่วนของก๊าซที่เกิดขึ้นโดยทั่วไป จะมีมีเทนเกิน *60%* ส่วนที่เหลือเป็นก๊าซอื่น ๆ เช่น H_2, CO_2 & N_2 *(LANGFORD, 1957)* (ตารางที่ *6*)

การเจริญเติบโต *(Growth yields)* ของแบคทีเรียที่ทำให้เกิดมีเทนเมื่อใช้มีทานอล กรดฟอร์มิค กรดอะซิติก และกรดโปรพีโอนิค ได้แสดงไว้ในตารางที่ *7*. กรดฟอร์มิคให้อัตราใช้สูงสุด และเมททานอลให้การเจริญเติบโตสูงสุด สำหรับกรดโปรปีโอนิค *(Propionic acid)* และกรดบิวไทริค *(Butyric acid)* ต้องถูกเปลี่ยนเป็นกรดอะซิติคเสียก่อน จึงสามารถถูกย่อยสลายเป็นก๊าซมีเทน และคาร์บอนไดอ๊อกไซด์ได้

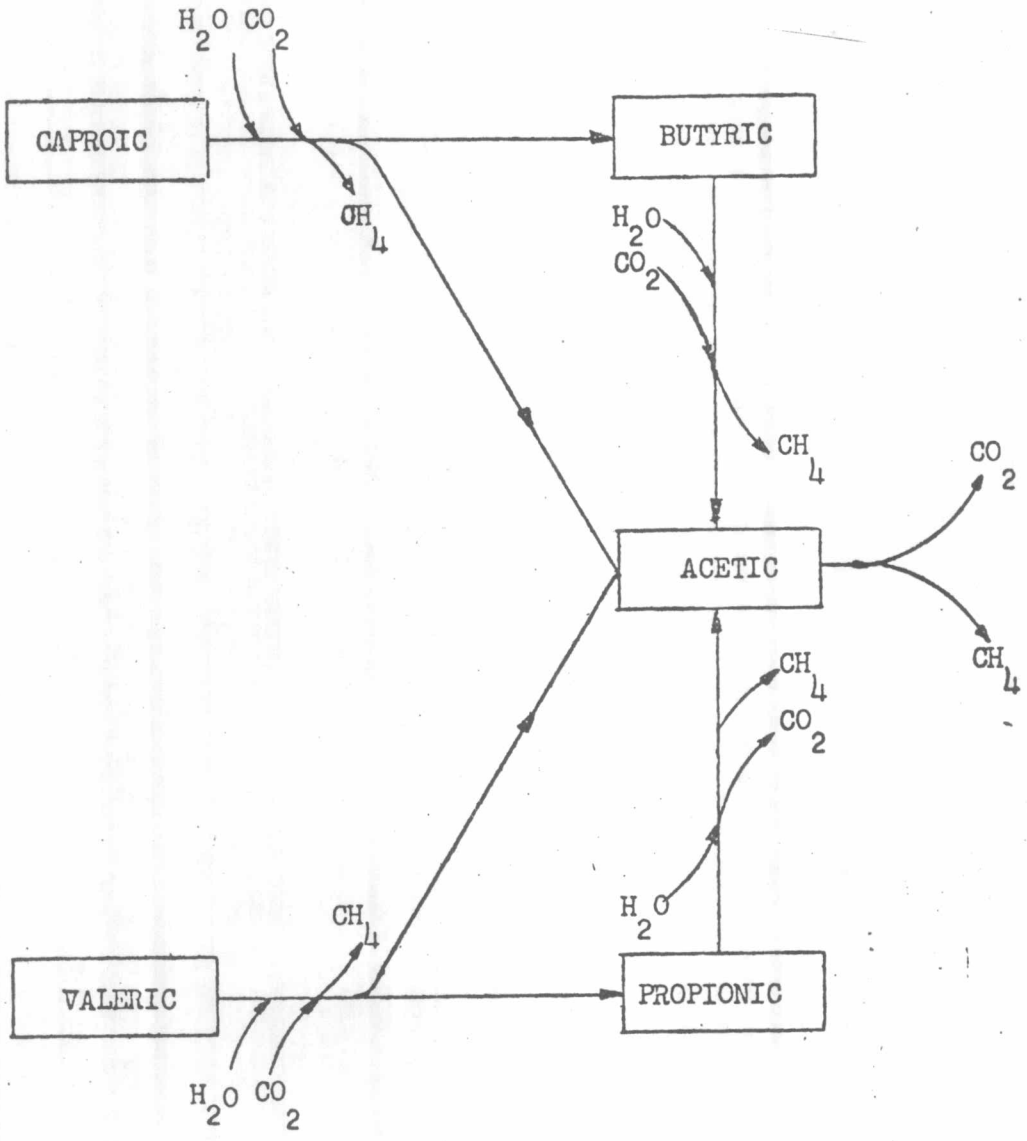
แบคทีเรียที่ผลิตก๊าซมีเทน จะย่อยสลายกรดอินทรีย์ที่มีโมเลกุลใหญ่เป็นโมเลกุลเล็ก และก๊าซมีเทน *(ANDREW & PEARSON, 1956)* ดังรูปที่ *12*. ชนิดของกรดอินทรีย์และจำนวนแบคทีเรียผู้ผลิตก๊าซมีเทน จึงต้องมีสัดส่วนที่เหมาะสมกัน จึงทำให้ประสิทธิภาพของการกำจัดได้ผลดี เช่นจำนวนแบคทีเรียผู้ผลิตก๊าซมีเทนน้อย ย่อยสลายกรดอะซิติคไม่ทัน ประสิทธิภาพก็ลดลง ปริมาณของก๊าซมีเทนร้อยละ *70* ที่ผลิตออกมาเกิดจากการย่อยสลายของกรดอะซิติก

โดยที่ปัจจุบันการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับการผลิตก๊าซมีเทน ยังไม่มากพอที่จะให้เข้าใจได้ลึกซึ้ง แต่ก็พอสรุปได้ว่ากรดอะซิติกมีบทบาทสำคัญต่อการเกิดก๊าซมีเทน ในการทำงานของระบบแอนแอโรบิก.

ตารางที่ *7*

METHANE FERMENTATION OF DIFFERENT SUBSTRATES *(McCARTY, 1966)*

Substrate	Max. rate of substrate use (g/day/g bacteria)	Growth yield (g/bacteria/g substrate)
Methanol	3.1	0.16
Formic acid	22.0	0.022
Acetic acid	2.1	0.073
Propionic acid	3.7	0.045



รูปที่ 10 การย่อยสลายกรดอินทรีย์ที่มีโมเลกุลใหญ่ *(Long chain fatty acids)* ให้เป็นกรดอินทรีย์ที่มีโมเลกุลเล็กโดยแบคทีเรียที่ทำให้เกิดก๊าซมีเทน *(ANDREW & PEARSON, 1965)*

3.3 การทำงานของระบบแอนแอโรบิค *(Performance of Anaerobic Operations.*

ถังหมักแอนแอโรบิก และแอนแอโรบิกคอนแทคท์เป็น *CSTR (continuous stirred tank reactors)* ทั้งไม่มีการวกกลับและมีการวกกลับของกากตะกอนจุลชีพ ในระบบนี้ตัวแปรที่สำคัญก็คือ *MCRT (mean cells residence time)* หรือเวลาเฉลี่ยที่เซลอยู่ในถังปฏิกรณ์ การทำงานของงระบบแอนแอโรบิคแบบนี้ จะดีแค่ไหนขึ้นอยู่กับค่า *MCRT* โดยทั่วไป *MCRT* ที่เหมาะสมประมาณ *10* วัน *LAWRENCE (1971)* แนะนำให้ใช้ Y_g *(true growth yield) 0.044* มก. เซล/มก *COD* และค่า *b (decay rate) 0.02*วัน$^{-1}$ สำหรับน้ำเสียชุมชน

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเจริญเติบโตของจุลชีพ ถูกเสนอขึ้นเป็นครั้งแรกโดย *MONOD (1950)* และ *NOVICK & SZILABD (1950)* มีการพัฒนาไปประยุกต์ใช้มากมาย เช่น *bacterial mutation (MOSER, 1958), rumen metabolism (QUINN, 1962), Lactic acid (LEUDEKING & PIRET, 1959), anaerobic stabilization of waste (ANDREWS & PEARSON, 1965)* เป็นต้น. *LAWRENCE & McCARTY (1970)* ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้ใช้ได้ทั้งการกำจัดแบบแอโรบิก และแอนแอโรบิก สมการในการหาค่า *Kinetic parameter* สรุปอยู่ในตารางที่ *8*.

การคำนวณก๊าซมีเทนที่เกิด

หากประสิทธิภาพการทำงานของแอนแอโรบิกเต็มที่แล้ว พลังงานทั้งหมดจะถูกเปลี่ยนเป็นของเหลว และในที่สุดจะเป็นก๊าซมีเทน มีเทนจำนวน *1* โมล ต้องการอ๊อกซิเจน *2* โมล ในการ *oxidize* เป็น CO_2 และ H_2O นั้นคือมีเทน *16* กรัม ที่ถูกผลิตออกมาได้จากการกำจัด*COD* = *64*กรัม *(McCARTY, 1964)*. และที่อุณหภูมิความดันมาตรฐานแล้ว หมายถึงว่ามีเทน *5.62* ลบ. ฟ. มาจาก *COD* ถูกกำจัด *1* ปอนด์ (*0.34* ม^3/กก.) การคำนวณปริมาตรของก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นสามารถหาได้โดยสมการ *(9) (McCARTY & EDDY, 1972)*

$$C = 5.62(eS - 1.42\ Px) \qquad \text{.....(9)}$$

ตารางที่ 8 แสดงสมการที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในการหา *Kinetic Parameter* *(GRADY & ROPER, 1974)*

NO	EQUATION
1.	*Mean Cell Resident Time (MCRT) or Solid Retention Time,* θ_c $$\theta_c = \frac{V.Xv}{F_w . X_{vr}}$$
2.	*Minimum Mean Cell Resident Time,* $\theta_{c\ min}$ $$\theta_{c\ min} = \frac{K_s + S_o}{S_o(\mu_m - b - \gamma) - K_s(\gamma + b)}$$
3.	*Effluent soluble substrate Concentration, S* $$S = \frac{K_s \left(\frac{1}{\theta_c} + b + \gamma \right)}{\mu_m - \left(\frac{1}{\theta_c} + b + \gamma \right)}$$
4.	*Viable Microorganism concentration in reactor,* X_v $$X_v = \frac{Y_g (S_o - S)}{\tau \left(\frac{1}{\theta_c} + b + \gamma \right)}$$
5.	*Non-viable microorganism concentration in reactor,* X_d $$X_d = \frac{\gamma X_v}{\frac{1}{\theta_c} + b}$$
6.	*Total microorganism concentration in reactor, X* $$X = \left[\frac{\theta_c}{\tau} \right] \frac{Y_g (S_o - S)}{1 + b\ \theta_c}$$

ตารางที่ 8 (ต่อ) แสดงสมการที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ ในการหา *Kinetic Parameter*

(GRADY & ROPER, 1974)

NO	EQUATION
7.	*Viability, v* $V = \frac{1 + b\theta_c}{1 + b\theta_c + \gamma\theta_c}$
8.	*Excess Microorganism Production Rate* $P_x = \frac{F\ Y_g\ (S_o - S)}{1 + b\ \theta_c}$
9.	*The Unit Rate of Substrate Removal* $U = \frac{F\ (S_o - S)}{X.V}$
10.	*The Specific Substrate Removal Rate* $q = \frac{F(S_o - S)}{X_v.\ V}$
11.	*The Methane Gas Production* $C = \frac{0.35}{1000}\left[\frac{F(S_o - S)(1 + b\theta_c - \beta\ Y_g)}{1 + b\theta_c}\right]$

Note :

สัญลักษณ์ต่าง ๆ ดูจากนิยามหน้า ถ

โดยที่

C = ปริมาตรก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้น ฟุต^3/วัน

e = ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนสารอินทรีย์ ให้เป็นมีเทน (มีค่าระหว่าง 0.60 ถึง 0.95)

S_o = BOD_L ที่เข้าระบบ, ปอนด์/วัน

$P_x = \frac{dx}{dt}$ = อัตราการเจริญเติบโตทั้งหมดของจุลชีพ, $P_x = \frac{Y_g \cdot S_o}{1 + b(\theta)}$

ปริมาตรก๊าซมีเทน (ทางทฤษฎี) ที่เกิดจากการกำจัดน้ำเสีย 1 ปอนด์, BOD

ในการคำนวณหาค่าประสิทธิภาพฯ, ต้องมีการแปลงหน่วยเพราะวัดค่า S_o เป็น กก/วัน และค่า P_x เป็น กก/วัน สมการที่ใช้ในการคำนวณที่ดัดแปลงจากสมการที่ 9 ได้เป็นสมการที่ 10 คือ

$$e = \frac{C/2.205 + 5.62(1.42)\ P_x}{5.62\ S_o} \qquad \text{.....(10)}$$

3.4 <u>อิทธิพลที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบกำจัด</u>

3.4.1 <u>อิทธิพลของเวลาเก็บกักตะกอน MCRT</u>

การเวียนตะกอนกลับทำให้เพิ่มเวลาที่เซลอยู่ในถังทำปฏิกริยา ในขณะเดียวกันปริมาณแบคทีเรียก็จะเพิ่มขึ้น ทำให้ระบบสามารถยืดหยัดต่ออุณหภูมิและ load ที่แปรเปลี่ยนได้สูงขึ้น (DAGUE et al, 1970). McCARTY (1968), LAWRENCE & McCARTY (1970) ได้ชี้ให้เห็นว่า "เวลาเก็บกักตะกอน"หรือเวลาที่จุลินทรีย์อยู่ในระบบนี้ เป็นตัวบ่งวัด (parameter) ที่ดีที่สุดในการควบคุมการทำงานของระบบกำจัดแบบแอนแอโรบิค. การเจริญเติบโตที่ช้าทดแทนได้โดยการเพิ่มปริมาณของแบคทีเรียผู้ผลิตก๊าซมีเทนให้หนาแน่นขึ้น. การลดเวลาเก็บกักน้ำ (HRT) เป็นการลดเวลาในการย่อย. การเก็บกักตะกอนช่วยให้การย่อยสลายได้ดี จึงทดแทนเวลาที่ถูกลดลง (HINDIN & DUNSTAN, 1960) เวลาเก็บกักตะกอนนี้ (MCRT) จะต้องมากกว่าเวลาในการเกิดใหม่ของแบคทีเรียผู้ผลิตมีเทน. การกำจัดแบคทีเรียจะล้มเหลวหมดสิ้น หาก SRT ต่ำกว่า 3-4 วัน (DAGUE, 1968). รายงานของ DAGUE et al, (1970) กล่าวว่าที่อุณหภูมิ 37° เซลเซียสนั้น เวลาสำหรับการเกิดของแบคทีเรียผู้ผลิตมีเทน อยู่ระหว่าง 2-11 วัน หากอุณหภูมิต่ำแล้ว

SRT ต้องเพิ่มเพื่อทดแทนจุลินทรีย์ที่เจริญช้า และในน้ำเสียจากแหล่งชุมชน (BOD_5= 749 mg/l) แล้วค่า SRT_{min} ที่ 35° เซลเซียส คือ 3 วัน

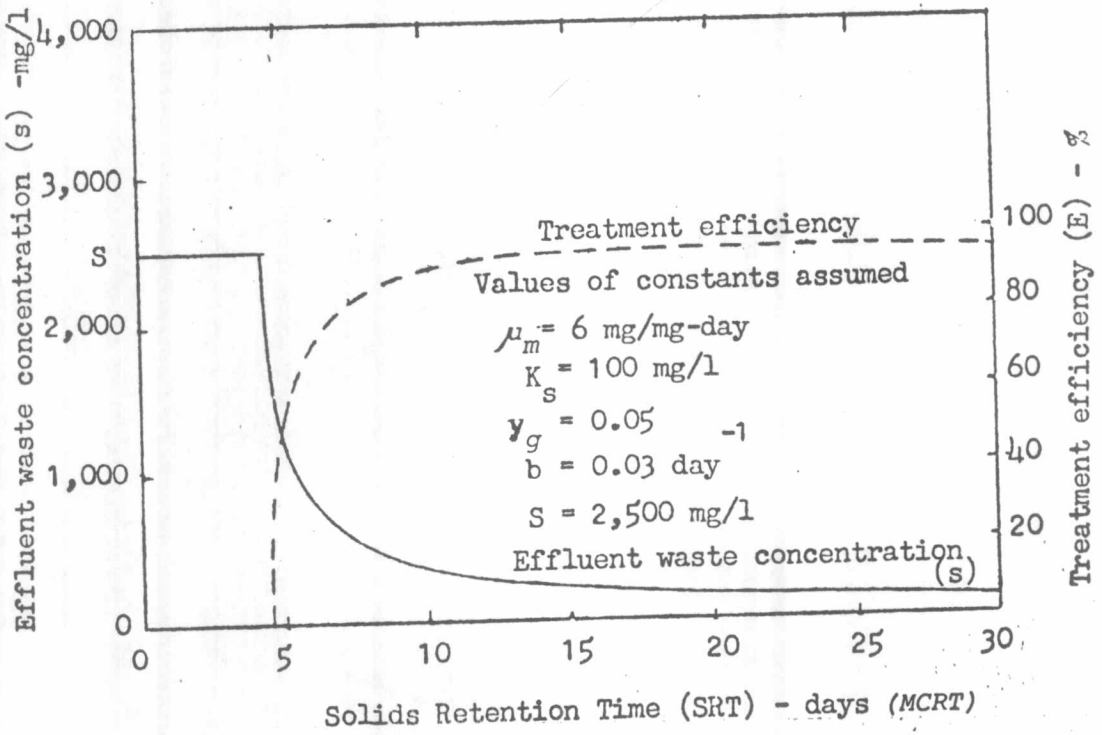
ตารางที่ 9 แสดงระยะเวลาขยายพันธุ์ (Generation time or Growth) ของแบคทีเรียชนิดต่าง ๆ โดยทั่วไป และตารางที่10 แสดงค่าแนะนำ SRT ที่ควรใช้. รูปที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ของ SRT กับประสิทธิภาพกำจัด

ตารางที่ 9 Growth Rate of Methane Organisms

Substrate	Temp °C	Residence time days	Reference
Methanol	35	2	Speece และ McCarty (1964)
Formate	35	3	"
Acetate	35	5	"
Propionate	35	7.5	"

ตารางที่ 10 ค่า SRT ที่ควรใช้ในการออกแบบ

อุณหภูมิ, °C	ค่าต่ำสุด, วัน	ค่าที่ควรใช้
18	11	28
24	8	20
30	6	14
35	4	10
40	4	10



รูปที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะ เวลาการกักตะกอนจุลินทรีย์ *(SRT)* กับความ เข้มข้นของน้ำทิ้ง *(Effluent Concentration)* และประสิทธิภาพของการกำจัดน้ำทิ้งด้วยระบบกำจัดน้ำทิ้งแบบวิธีทางชีววิทยาแบบไม่ใช้อ๊อกซิเจนอิสระ *(Lawrence et.al., 1969)*

3.4.2 อิทธิพลของเวลาเก็บกักน้ำเสีย *HRT (Hydaulic Retention Time)*

จากการทดลองของ *DAGUE el al. (1966 & 1970)* พบว่าระบบกำจัดมีประสิทธิภาพการกำจัดน้ำเสีย *87%* เมื่อ *HRT* เท่ากับ *8* วัน และ *85%* เมื่อ *HRT* เท่ากับ *2* วัน เขาพบว่าในกรณีที่การจับตัวและตกตะกอนของตะกอน อยู่ในสภาพดีแล้ว การเปลี่ยน *HRT* จาก *8* วันเป็น *2* วัน จะไม่มีผลทำให้ประสิทธิภาพการขจัดสารอินทรีย์เปลี่ยนแปลงมากนัก *(PFEFFER et, al 1967)* พบว่าเมื่อ *HRT* น้อยกว่า *10* วัน การย่อยสลายตะกอนจะอิสระไม่ขึ้นต่อ *HRT*. การเพิ่มหรือลดความเข้มข้นของน้ำเสีย ที่เข้าระบบกำจัดเมื่อ *HRT* ต่ำกว่า *10* วัน ไม่ได้ต้องการผลประสิทธิภาพการกำจัด แต่มีวัตถุประสงค์อื่นเช่น ปรับ *pH (DAGUE el,al., 1968)* พบว่าถังย่อยกากตะกอนสามารถทำงานได้ผลจน *HRT* ต่ำมากได้หากสามารถขยาย *SRT* ออกไป

3.4.3 อิทธิพลของ *pH*

SAWYER el, al. (1954) และ *CASSEL.E.A & SAWYER (1959)* ได้แนะนำว่าการทำงานของถังหมักควรควบคุม *pH* ให้อยู่ระหว่าง *6.8-7.2*. *IMHOFF et,al. (1956)* กล่าวว่า สำหรับ *mesophilic temperature (35°C)* นั้น *pH* ขณะทำงานคือ *6.6-7.6* ถ้า *pH*สูงหรือต่ำกว่านี้ ประสิทธิภาพของระบบกำจัดจะลดลง หาก *pH* ต่ำกว่า *6.2* ประสิทธิภาพจะลดลงอย่างรวดเร็ว เพราะสภาวะที่เป็นกรดนั้นจะเป็นอันตรายต่อพวกมีเทนแบคทีเรีย. ในการควบคุม *pH* สามารถทำได้โดยใช้ *NaOH* เติมเข้าไป *(SCHROEPFER)*. การควบคุม *pH* ที่ดี *McCARTY & McKINNEY*แนะว่าควรใช้แคลเซี่ยมไลม์หรือแมกนีเซียมไลม์ *(Ca or Mg lime)* เพราะถ้าเป็น *Na, P, NH_3 -lime* จะทำให้เกิดเกลือที่พิษต่อมีเทนแบคทีเรีย แต่ *Ca* จะไม่ละลายเมื่อความเป็นด่าง *(alkalinity)* อยู่ระหว่าง = *500-1,000* มก./ลบ.ดม.

3.4.4 อิทธิพลของความเป็นด่าง *(Alkalinity)*

PEARSON, (1960) กล่าวว่า การล้มเหลวของการหมัก มิได้ขึ้นอยู่กับกรดโวลาไทด์โดด ๆ แต่ขึ้นอยู่กับว่าอัตราส่วนของกรดโวลาไทด์ต่อความเป็นด่างที่มากกว่า *0.3* หรือ *0.4* ธรรมดาแล้วต้องรักษาความเป็นด่างให้สูงกว่าความเป็นกรดโวลาไทด์ โดยทั่วไปน้ำเสียต่าง ๆ ก็มีความเป็นด่างอยู่แล้ว โดยเฉพาะหากกรดโวลาไทด์ต่ำ ความเป็นด่างไบคาร์บอเนตจะเกือบเท่า

ความเป็นด่าง ทั้งหมด หากกรดโวลาไทล์เพิ่มก็จะถูกทำให้เป็นกลาง โดยความเป็นด่างไบคาร์บอเนต เรียกว่า *"volatile acid alkalinity"* ซึ่งมีความสัมพันธ์กันดังสมการ *(11)*

$$BA = TA - (0.85)(0.833)\,TVA \quad \text{.....(11)}$$

BA = Bicarbonate alkalinity (mg/l as $CaCO_3$)

TA = Total alkalinity (mg/l as $CaCO_3$)

0.85 = 85% of volatile acid alkalinity measure by titration to pH 4

$$0.833 = \frac{\text{น้ำหนักสมมูลย์ของ } CaCO_3}{\text{น้ำหนักสมมูลย์ของ } CH_3COOH}$$

TVA = Total volatile acid (mg/l as acitic acid, CH_3COOH)

สภาพความเป็นด่างในระบบหมัก ได้จากเกลือแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตที่เกิดจากการทำปฏิกริยาระหว่างแอมโมเนีย ที่เกิดจากการย่อยสลายโปรตีน กับคาร์บอนไดอ๊อกไซด์

$$CO_2 + NH_3 \longrightarrow NH_4HCO_3 \quad \text{.....(12)}$$

หรือ $$CO_2 + H_2O \longrightarrow H^+ + HCO_3^- \quad \text{.....(13)}$$

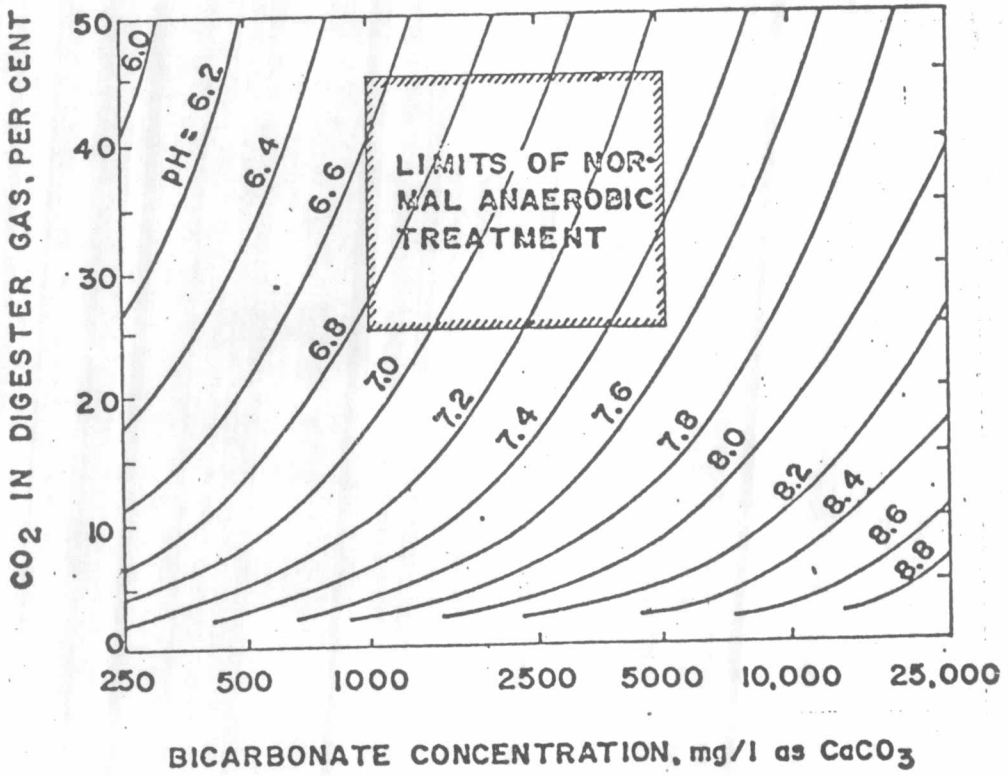
สภาพนี้ทำให้เกิดระบบต้านการเปลี่ยนแปลง *pH (buffering system)* *(LAWRENCE, 1970)* แต่ถ้าหากมีแอมโมเนียอิสระที่แตกตัวจากแอมโมเนียม (ที่ *pH* มากกว่า 7) เข้มข้นมากกว่า *150* มก./ลบ.ดม. จะเป็นพิษต่อระบบ *KUGELMAN and CHIN, 1971)*

เมื่อระบบกำจัดอยู่ในสภาวะสมดุลย์แล้ว กรดที่เกิดขึ้นจะถูกใช้โดยมีเทนแบคทีเรีย ทำให้ *pH* ของน้ำเสียอยู่ในระดับเหมาะสม

3.4.5 <u>อิทธิพลของกรดโวลาไทล์</u> *(Volatile Acid)*

กรดมีผลต่อการเปลี่ยนแปลง *pH* จึงทำให้ยากที่จะสำรวจผลของกรดโวลาไทล์ ที่มีต่อจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์แอนแอโรบิก ในกรณีที่ *pH* เป็นกลางแล้วกรดอะซิติคและกรดบูไทริคไม่แสดงพิษเด่นชัดต่อ "แบคทีเรียที่ทำให้เกิดมีเทน" ขณะความเข้มข้นต่ำกว่า *10,000* มก./ลบ.ดม.

(HOBSON & SHAW, 1976) เช่นเดียวกันสำหรับถังหมักกากตะกอนน้ำทิ้งชุมชน ผลของกรดอะซิติคไม่แสดงพิษเมื่อ *pH* เป็นกลาง *(McCARTY & McKINNEY, 1961)*. สำหรับกรดโปรไพโอนิคดูเหมือนจะมีส่วนเป็นพิษต่อ "แบคทีเรียที่ทำให้เกิดมีเทน" เมื่อความเข้มข้น *1,000* มก/ลบ.ดม. และ *pH* เป็นกลาง *(HOBSON & SHAW, 1976)*. นอกจากนี้ กรดโปรไพโอนิคยังต้านแบคทีเรียชนิดทำให้เกิดกรดในถังหมักกากตะกอนน้ำทิ้งชุมชน *(KUGELMAN & CHIN, 1971)*. *ANDREW (1967)* แนะว่ากรดโปรไพโอนิคในรูป *unionized* เป็นส่วนหนึ่งที่มีผลร้ายแรง เหมือนหนึ่งการลด-*pH* ส่วนกรดอะซิติกและกรดบูไทริคยังสรุปไม่ได้ ในกรณี *pH* เป็นกลางแล้วกรดโวลาไทล์มีผลต่อการทำงานของถังปฏิกรณ์แอนแอโรบิคไม่มากเลย



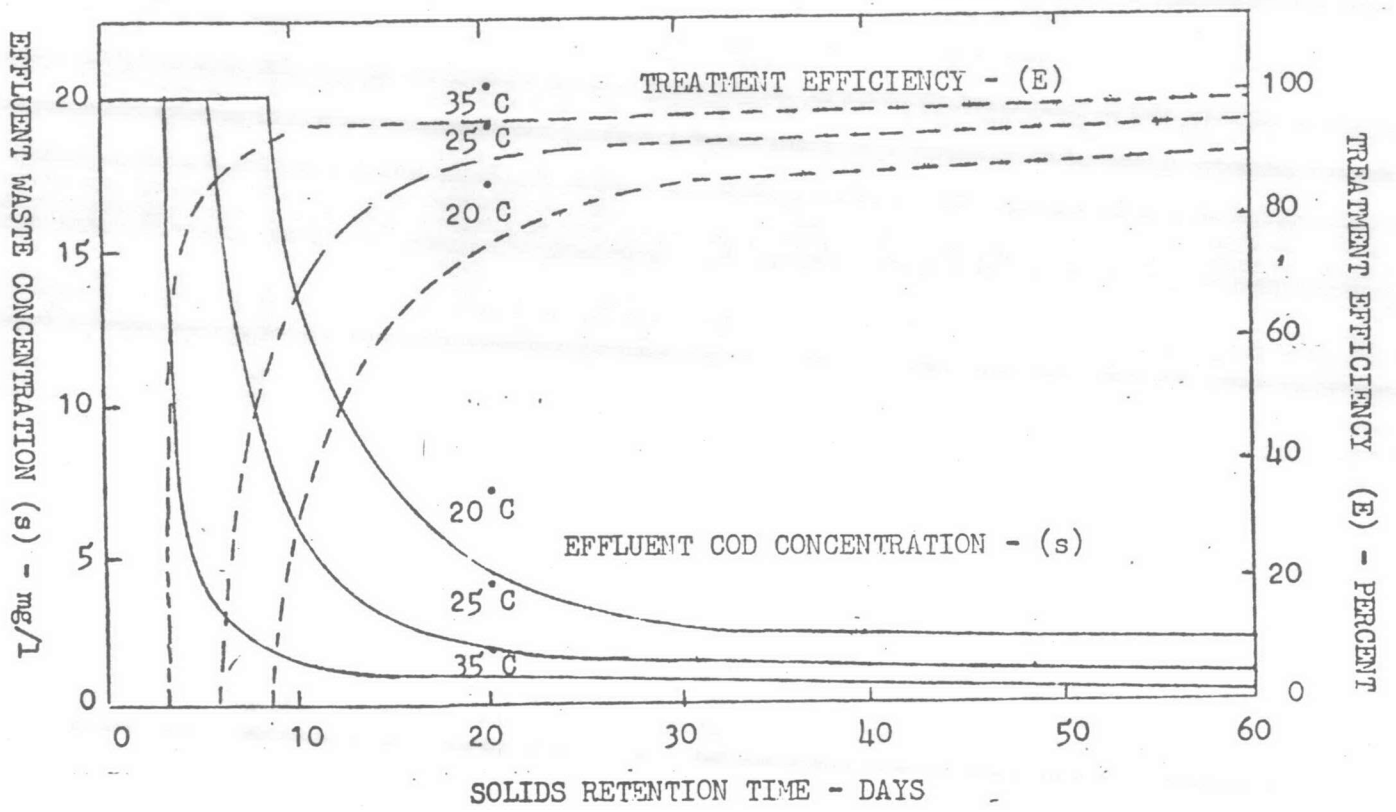
รูปที่ *12* แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง *pH* ความเข้มข้นของไบคาร์บอเนต และความเข้มข้นของคาร์บอนไดอ๊อกไซด์ ที่อุณหภูมิ *35°* เซลเซียส *(McCARTY, 1964)*

3.4.6 อิทธิพลจากอุณหภูมิ *(Temperature)*

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมีผลให้ *specific growth rate* ของจุลินทรีย์เปลี่ยนแปลง ตารางที่ *11* แสดงให้เห็นว่า μ_m ของกรดอะซิติกลดลงในขณะที่ K_S เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง *LAWRENCE (1971)* ประเมิน SRT_{min} สำหรับการย่อยตะกอนน้ำเสียชุมชนว่า เท่ากับ *4* วัน เมื่ออุณหภูมิ *35°C* และ *10* วัน เมื่ออุณหภูมิ *20°C* (รูปที่ *13*) โดยปกติแล้วถังหมักที่อุณหภูมิ *mesophilic* ถูกออกแบบให้ทำงานที่อุณหภูมิ *30°* ถึง *35°C*. ในประเทศหนาววิศวกรผู้ออกแบบต้องตัดสินใจว่าจะออกแบบให้ใช้กับอุณหภูมิต่ำ โดยเพิ่ม θ_c หรือจะออกแบบตัวให้ความร้อน *(heater)*

ตารางที่ *11 Average Values of Kinetic Parameters from Growth of Anaerobic Enrichment Cultures on Various Volatile Acids (LAWRENCE & McCARTY, 1969).*

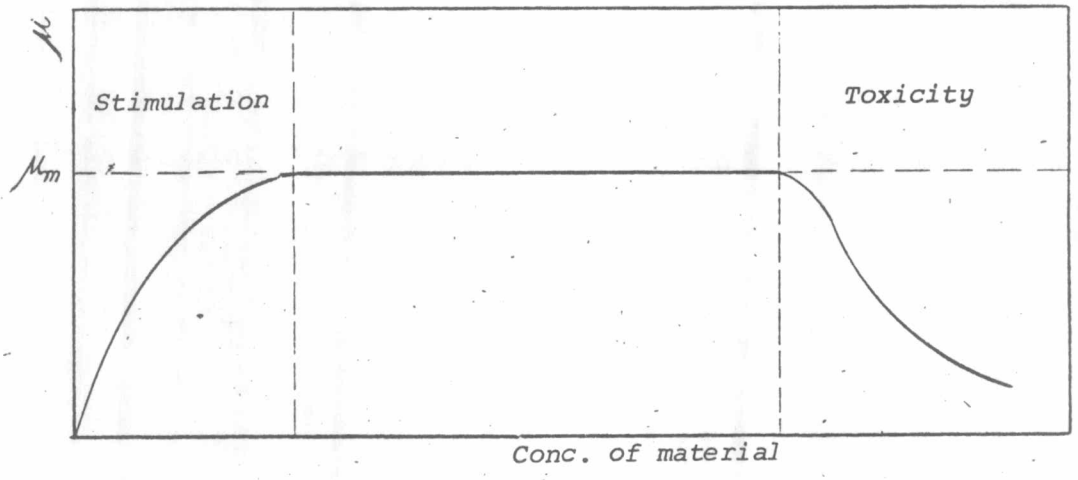
	35°C		30°C		25°C	
Volatile acid	μ_m day^{-1}	K_S mg/lCOD	μ_m day^{-1}	K_S mg/lCOD	μ_m day^{-1}	K_S mg/lCOD
acetic	0.360	165	0.264	356	0.240	930
propionic	0.312	60	--	--	0.284	1145
butyric	0.386	13	--	--	--	--



รูปที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับระยะ เวลาการ เก็บกักตะกอนจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสาร อินทรีย์ และประสิทธิภาพการกำจัดน้ำโสโครกด้วยวิธีทางชีววิทยาแบบไม่ใช่อ๊อกซิเจน *(LAWRENCE et.al., 1969)*

3.4.7 สิ่งที่เป็นพิษ *(Toxicity)*

ความเข้มข้นของสิ่งที่เป็นพิษ มีผลต่ออัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ดังแสดงไว้ในรูปที่ *14* สารที่เป็นพิษที่สำคัญเช่น แอมโมเนีย *Cation* ของโลหะเบา ซัลไฟด์ โลหะหนัก เป็นต้น แอมโมเนียอิสระที่มีความเข้มข้นเกิน *150* มก./ลบ.ดม จะมีพิษร้ายต่อระบบ หรือหากเป็นไอออนของแอมโมเนียเกิน *3,000* มก./ลบ.ดม. ก็จะมีพิษร้ายต่อระบบ ส่วนพิษที่เกิดจาก *Cation* ของโลหะเบาเช่น พวกโซเดียม โปแตสเซี่ยม คัลเซี่ยม และแมกเนเซี่ยม แสดงไว้ในตารางที่ *11*. *McCARTY,(1964)* พบว่าแบคทีเรียซึ่งไม่ใช้อ๊อกซิเจน สามารถทนต่อสภาพของน้ำที่มีซัลไฟด์ละลายอยู่ *50-100* มก./ลบ.ดม.ได้ และถ้าหากมีการทำ *acclimatized* ก่อน แบคทีเรียดังกล่าวก็จะสามารถทนความเข้มข้นได้ถึง *200* มก./ลบ.ดม. แต่ *(LAWRENCE,1964)* กล่าวว่า หากความเข้มข้นเกิน *200* มก./ลบ.ดม. จะมีผลต้านการเติบโตและการขยายพันธุ์ของแบคทีเรียอย่างมาก อันอาจทำให้ระบบหมดประสิทธิภาพลง สำหรับโลหะหนักมีพิษต่อแบคทีเรียแอนแอโรบิค ทั้งเมื่อความเข้มข้นต่ำมาก ๆ และความเข้มข้นสูง ดูตารางที่ *13*. *(MOSEY & HUGHES, 1975)* โลหะหนักที่ละลายจะถูกทำให้ตกตะกอนโดยซัลไฟด์ ทำให้ลดความเข้มข้นลงได้ *(LAWRENCE & McCARTY, 1965)*.



รูปที่ *14* *General Nature of Stimulation and Toxicity.*

I 17778438

ตารางที่ 12 Stimulatory and Ingibitory Concentration of Light Metal-Cation (McCARTY, 1964)

Concentration in mg/l			
Cation	Stimulatory	Moderately Inhibitory	Strongly Inhibitory
Sodium	100-200	3500-5500	8000
Potassium	200-400	2500-4500	12000
Calcium	100-200	2500-4500	8000
Magnesium	75-150	1000-1500	3000

ตารางที่ 13 Concentration of Soluble Heavy Metals Exhibiting- - 50% Inhibition of Anaerobic Digesters (Mosey & Hughes, 1975)

Cation	Approximate Concentration in mg/l
Fe^{++}	1-10
Zn^{++}	10^{-4}
Cd^{++}	10^{-7}
Cu^{+}	10^{-12}
Cu^{++}	10^{-16}