

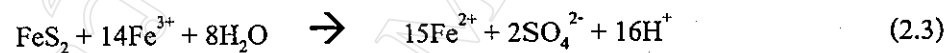
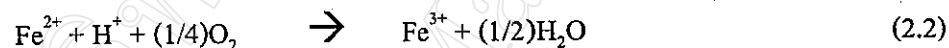
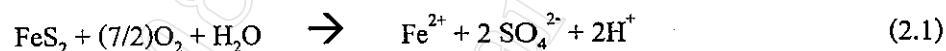
บทที่ 2

ทฤษฎี และ สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง

2.1 การกำจัดซัลเฟตในน้ำ

2.1.1 การเกิดซัลเฟตในน้ำระบายจากเหมือง

น้ำระบายจากเหมืองที่มีฤทธิ์เป็นกรด (Acid Mine Drainage : AMD) เป็นปัญหาหลักอย่างหนึ่งที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งน้ำระบายจากเหมืองที่มีฤทธิ์เป็นกรด (AMD) จะมาจากอุตสาหกรรมในการทำเหมืองลิกไนต์และเหมืองแร่ น้ำระบายจากเหมืองที่มีฤทธิ์เป็นกรด จะเกิดขึ้นจากแร่ที่มีซัลไฟด์ เช่น แร่ไพไรต์ (Pyrite) เกิดกระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation) ทางเคมีและชีวภาพ คุณลักษณะของน้ำจะมีพีเอช (pH) ต่ำ และมีความเข้มข้นของซัลเฟตและโลหะหนักอยู่สูง แร่ไพไรต์ เมื่อได้รับออกซิเจน (Oxidation) อย่างเพียงพอก็จะทำปฏิกิริยาเกิดเป็นกรด(H^+) ซัลเฟต (SO_4^{2-}) ได้ดังสมการ 2.1 -2.3 (Christensen. Et al., 1996)



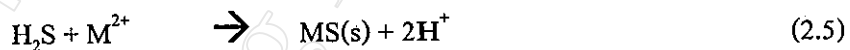
2.1.2 กระบวนการย่อยสลายซัลเฟต

ในการลดสารปนเปื้อนในน้ำระบายจากเหมืองลิกไนต์ จะอาศัยจุลินทรีย์ในกลุ่มที่ไม่ใช้ออกซิเจนที่อาศัยอยู่ในน้ำ จุลินทรีย์กลุ่มนี้จะย่อยสลายซัลเฟตในสภาพที่ขาดออกซิเจน ในกระบวนการดังกล่าวนี้จะเกิดการย่อยสลายซัลเฟต (Dissimilatory sulfate reduction, DRS) โดยแบคทีเรียย่อยสลายซัลเฟต (Sulfate-reducing bacteria, SRB)

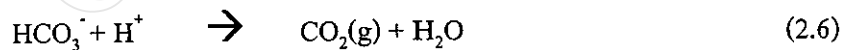
กระบวนการย่อยสลายซัลเฟตเกิดขึ้นโดยแบคทีเรียที่ไม่ใช้ออกซิเจนในการหายใจ ซึ่งสภาพที่ขาดออกซิเจนนั้นสารประกอบอินทรีย์ที่เน่าเปื่อยง่าย จะใช้ซัลเฟตเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ซึ่ง 1 โมลของซัลเฟตจะถูกรีดิวซ์ไปเป็นไฮโดรเจนซัลไฟด์(H_2S) โดยที่ทุกๆ 2 โมลของคาร์บอนไดออกไซด์จะปฏิกิริยาดังสมการที่ 2.4 (Hedin. Et al., 1989)



โดยที่ CH_2O เป็นโมเลกุลของสารประกอบอินทรีย์อย่างง่าย ๆ เช่นอะซิติก ไฮโดรเจนซัลไฟด์จะถูกปล่อยไปเป็นก๊าซ หรืออาจจะแตกประจุเป็น HS^- และ S^{2-} หรือตกตะกอนเป็นโพลีซัลไฟด์ (Polysulfide) ในถังปฏิกิริยาที่มีไฮโดรเจนซัลไฟด์อิสระ ที่เกิดจากกระบวนการย่อยสลายซัลเฟตของแบคทีเรีย ถ้ามีปริมาณสูงถึง 40-150 มก./ล จะก่อให้เกิดการยับยั้งออกซิเดชันของอะซิเตท (Acetate oxidation) โดยแบคทีเรียได้ (Chirstensen., 1996) และมีรายงานว่าแบคทีเรียย่อยสลายซัลเฟต และจุลินทรีย์อื่นๆจะอ่อนแอมากเนื่องจากความเป็นพิษของไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ระดับ 40 – 50 มก./ล จะมีผลกระทบต่ออัตราการใช้อะซิเตทของแบคทีเรียย่อยสลายซัลเฟตสูง ในถังปฏิกิริยาระดับห้องปฏิบัติการที่สร้างขึ้นเพื่อกำจัดกรดซัลฟูริก กลไกที่สำคัญในการลดระดับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ก่อให้เกิดความเป็นพิษในระบบลงได้คือ 1. การเพิ่มระดับพีเอชให้สูงขึ้น 2. เติมโลหะหนักเข้าไปในระบบเพื่อเปลี่ยนให้อยู่ในรูปตะกอนของโลหะซัลไฟด์ 3. ลดปริมาณซัลเฟตที่เข้าในระบบซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนที่ลดลงด้วย (Stucki et.al., 1993) ซึ่งถ้าในถังปฏิกิริยามีสารละลายโลหะหนักที่ปนเปื้อนมากับน้ำ ความเป็นพิษของไฮโดรเจนซัลไฟด์จะลดลง เนื่องจากไฮโดรเจนซัลไฟด์อิสระที่เกิดขึ้นจะไปทำปฏิกิริยากับสารละลายโลหะหนักดังสมการที่ 2.5



โดยที่ M เป็นโลหะ เช่น แคดเมียม เหล็ก นิกเกิล สังกะสี ไบคาร์บอเนตไดออกไซด์จะไปทำปฏิกิริยากับประจุบวกที่เกิดขึ้นกลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และน้ำ (H_2O) และกำจัดความเป็นกรดจากสารละลายให้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ดังสมการที่ 2.6 (Dvorak et al., 1992)



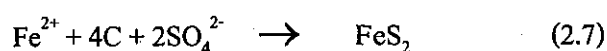
H_2S และ HCO_3^- ที่เกิดขึ้นในการย่อยสลายซัลเฟต จะเข้าสู่ภาวะสมดุลเป็นสารละลายผสมของ H_2S , HS^- , S^{2-} , CO_2 , HCO_3^- และ CO_3^{2-} ถ้าในการย่อยสลายซัลเฟตเกิดขึ้นอย่างเพียงพอ สารละลายผสมนี้จะเป็นตัวคุมพีเอชของสารละลายให้คงที่ โดยทั่วไปจะอยู่ในช่วง 6-7 แต่อาจจะแตกต่างกันออกไปก็ได้ขึ้นอยู่กับปริมาณจำเพาะแต่ละชนิดของผลผลิตสารอินทรีย์ที่เกิดขึ้น การย่อย

สลายซัลเฟตจะถูกยับยั้งโดยค่าพีเอชที่ต่ำ โดยส่วนใหญ่แล้วแบคทีเรียย่อยสลายซัลเฟตที่ชื่อว่า *Desulfovibrio* จะไม่ทำงานเมื่อค่าพีเอชต่ำกว่า 5 ค่าพีเอชที่ต่ำนี้จะเกิดขึ้นในบึงธรรมชาติได้น้อย เพราะว่ามีน้ำที่ไหลเข้านั้นยังไม่เป็นกรด และเนื่องจากการเกิดความเป็นด่างของคาร์บอเนตโดยกระบวนการย่อยสลายซัลเฟต (DSR) ซึ่งจะทำให้ในช่องว่างเมื่อดินมีระดับพีเอชเป็น 6-8 (Postgate., 1984) นอกจากนี้การทำงานของแบคทีเรียย่อยสลายซัลเฟต จะลดลงที่อุณหภูมิต่ำซึ่งเหมือนกับจุลินทรีย์ทั่วไป โดยมีรายงานว่าอัตราของการย่อยสลายซัลเฟตมีค่าต่ำมาก ซึ่งวัดจากอัตราการใช้อาหารในปอดคตะกอน และในบึงธรรมชาติในฤดูหนาว สันนิษฐานได้ว่าเกิดจากอุณหภูมิต่ำ (Howarth. Et al., 1984) น้ำระบายจากเหมืองถ่านหินที่มีปริมาณสารละลายโลหะหนักปนเปื้อนมากับน้ำน้อยมาก เมื่อไหลเข้าไปยังระบบบึงประดิษฐ์และซึมผ่านสารอินทรีย์ที่อยู่ใต้ระดับน้ำ จะเกิดกระบวนการย่อยสลายซัลเฟตของแบคทีเรีย และก่อให้เกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์อิสระในปริมาณที่สูง

2.1.3 การกักกร่อนของเหล็กภายใต้สภาวะขาดออกซิเจน

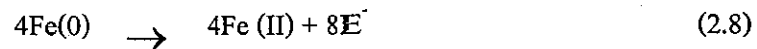
วิธีการหนึ่งที่จะลดความเป็นพิษของไฮโดรเจนซัลไฟด์อิสระให้น้อยลง ทำได้โดยการเติมโลหะหนัก เช่น จีเลเยอเหล็ก (Fe^0) เข้าไปในระบบ ซึ่งจีเลเยอเหล็กที่เติมเข้าไปในนั้นจะถูกกักกร่อนในสภาวะที่ขาดออกซิเจน โดยแบคทีเรียย่อยสลายซัลเฟต ให้เปลี่ยนไปเป็นเหล็กเฟอร์รัส (Fe^{2+}) ได้ จากทฤษฎีการลดการเกิดขั้วของขั้วลบ (Cathodic depolarization theory) (von Wolzogen-kuhrard van der Vlugt , 1934) ดังรูปที่ 2.1 (Widdel, 1988) ปฏิริยาออกซิเดชันของโลหะจะถูกเร่งปฏิกิริยา Catalyzed โดยการทำงานของแบคทีเรียย่อยสลายซัลเฟต โดยที่ขั้วบวก (Anode) โลหะจะถูกทำให้เกิดเป็นขั้ว และสูญเสียอิเล็กตรอนเป็นเหล็กเฟอร์รัส อิเล็กตรอนที่สูญเสียที่ขั้วบวกจะรีดิวซ์ (reduce) ไฮโดรเจนไอออน (H^+) จากน้ำให้กลายเป็นโมเลกุลของไฮโดรเจน (H_2) ที่ขั้วลบโมเลกุลของไฮโดรเจนจะถูกกำจัดจากพื้นผิวของโลหะโดยแบคทีเรียย่อยสลายซัลเฟต โดยปฏิกิริยาการลดการเกิดขั้วของขั้วลบ ต่อมาไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่มีอยู่ในน้ำจะไปรวมตัวกับเหล็กเฟอร์รัส เกิดเป็นตะกอน FeS และเปลี่ยนรูปไปเป็น FeS_2 ได้ในระบบ

ในการเพิ่มสารละลายเหล็ก และแหล่งคาร์บอนให้แก่ระบบเพื่อทำปฏิกิริยากับซัลเฟตในน้ำ อาจประมาณได้จากสมการที่ 2.7 (Hendin, 1989)



การกักกร่อนในสภาวะที่ขาดออกซิเจนของเหล็กนี้ได้สรุปเป็นสมการที่ 2.8 ถึง 2.10 ได้ดังนี้ (Ford and Mitcell, 1990)

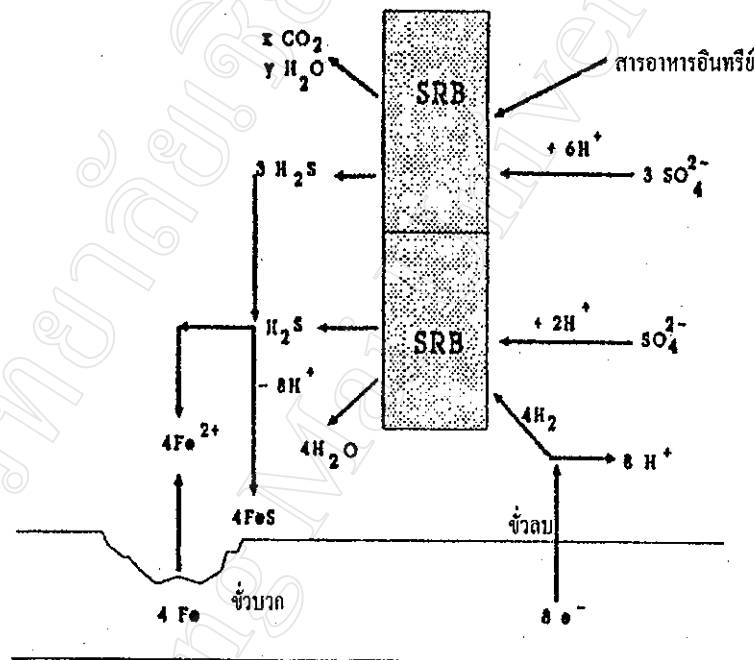
ปฏิกิริยาที่ขั้วบวก



การแตกตัวของน้ำ



ปฏิกิริยาการลดการเกิดขั้วของขั้วลบ

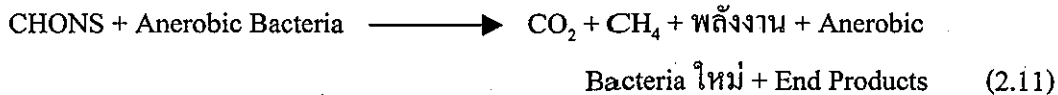


รูปที่ 2.1 ปฏิกิริยาของการกัดกร่อนโดยทฤษฎีการลดการเกิดขั้วของขั้วลบ ของ van Wolzogen-Kuhr and van der Vlugt ที่เสนอโดย Widdel. (1988)

ที่มา : Bitton. , 1994

2.2 สภาพทางชีววิทยาของการย่อยสลายในสภาวะไร้ออกซิเจนอิสระ

ในการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนอิสระนั้นไม่ต้องเติมออกซิเจนแก่น้ำเสีย ปฏิกิริยาจะเป็นดังสมการ (2.11) (Simpson, 1959)



การย่อยสลายมี 3 ขั้นตอนคือ

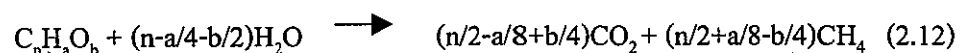
ก. ขั้นแรก สารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อน (Complex Organic Compound) ซึ่งมีโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น โปรตีน ไขมัน และคาร์โบไฮเดรต จะถูกย่อยสลายไปเป็นสารประกอบอินทรีย์อย่างง่ายที่มีขนาดโมเลกุลเล็กลงสามารถละลายน้ำได้ เช่น กรดอะมิโน กรดไขมันและน้ำตาล โดยอาศัยปฏิกิริยา “ไฮโดรไลซิส” (Hydrolysis) ซึ่งแบคทีเรียจะปล่อยเอนไซม์ออกมาสู่ภายนอกเพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในขั้นตอนนี้ยังไม่มีการกำจัดสารอินทรีย์

ข. ขั้นที่สอง กลุ่มแบคทีเรียพวกที่สร้างกรด (Acid Former) จะเปลี่ยนสารอินทรีย์ไปเป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Acid), แอลกอฮอล์ และแอลดีไฮด์ ปฏิกิริยานี้เรียกว่า “การเกิดกรด” (Production of Volatile Acid) ซึ่งจะทำให้พีเอช (pH) ต่ำลง

ค. ขั้นที่สาม กลุ่มแบคทีเรียพวกที่สร้างมีเทน (Methane Former) จะเปลี่ยนกรดอินทรีย์ระเหยง่ายและแอลกอฮอล์ไปเป็นก๊าซมีเทน (CH_4), คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และผลผลิตสุดท้าย (End Products) อื่นๆเรียกปฏิกิริยานี้ว่า “การเกิดก๊าซมีเทน” (Methane Fermentation) ในขั้นตอนนี้แบคทีเรียจะเปลี่ยนกรดอะมิโนให้เป็นแอมโมเนีย ซึ่งจะทำให้กรดอินทรีย์ที่เหลืออยู่เป็นกลาง ทำให้พีเอชสูงขึ้น เหมาะกับการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มนี้ได้

แบคทีเรียชนิดที่ทำให้เกิดก๊าซมีเทนจะย่อยกรดอินทรีย์ระเหยง่ายอย่างรวดเร็ว และสามารถย่อยพวกกรดไขมันซึ่งไม่ถูกย่อยในขั้นตอนแรก อย่างไรก็ตามการย่อยกรดไขมันต้องรอเวลาจนกว่าจะมีแบคทีเรียที่แข็งแรงเกิดขึ้น กรดไขมันจะถูกย่อยไปเป็นกรดอะซิติก และจากกรดอะซิติกก็ถูกย่อยไปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทน รูปที่ 2.2 แสดงขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน

ในขณะที่มีการย่อยสลายสารอินทรีย์ไปจนถึงขั้นสุดท้ายคือ ได้ก๊าซมีเทนนั้น สารอินทรีย์บางส่วนซึ่งเป็นส่วนน้อยจะถูกนำไปใช้ในการสร้างเซลล์ใหม่ของแบคทีเรียดังรูปที่ 2.3 และปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการเคมี (2.12) (Buswell และ Mueller, 1952)



ซึ่ง McCarty (1964) ประมาณว่า 1 ก.ก. COD ที่ถูกย่อยสลายจะได้ก๊าซมีเทน 0.348 ลบ.ม. ที่อุณหภูมิและความดันมาตรฐาน

2.2.1 ชนิดของจุลินทรีย์ในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน

จุลินทรีย์ส่วนใหญ่ในระบบบำบัดน้ำทิ้งทางชีววิทยาแบบไม่ใช้ออกซิเจน มักจะเป็นพวกแบคทีเรียชนิดที่ไม่ใช้ออกซิเจนอิสระ และอาจพบโปรโตซัวและเชื้อราในรูปของสปอร์บ้าง (McKinney, 1962) แบคทีเรียที่ไม่ใช้ออกซิเจนมี 2 พวก คือ

- ก. Facultative Anaerobic Bacteria สามารถทนต่อสภาพที่มีก๊าซออกซิเจนได้
- ข. Obligate Anerobic Bacteria พวกนี้ไม่สามารถทนต่อสภาวะที่มีก๊าซออกซิเจนได้

ชนิดของแบคทีเรียแบบไม่ใช้ออกซิเจนเมื่อแบ่งตามปฏิกิริยา จะแบ่งออกเป็น 3 ชนิดคือ

ก. แบคทีเรียชนิดผลิตกรด (Acid Former Bacteria) เป็นแบคทีเรียพวกฟอสเฟอแบคทีเรีย (Facultative actria) และพวกไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งระยะเริ่มแรกของการย่อยอาจมีออกซิเจนอยู่บ้าง แบคทีเรียกลุ่มนี้ช่วยย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งไปเป็นกรดอินทรีย์ได้ แบคทีเรียกลุ่มนี้ได้แก่ Pseudomonas, Flavobacteria, Aerobactor และ Escherichia

ข. แบคทีเรียที่ทำให้เกิดก๊าซมีเทน (Methane Former Bacteria) เป็นแบคทีเรียชนิดที่ไม่ใช้ออกซิเจนอย่างแท้จริง คือไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ถ้ามีก๊าซออกซิเจน แบคทีเรียกลุ่มนี้จะย่อยพวกกรดอินทรีย์ไปเป็น ก๊าซมีเทน และ คาร์บอนไดออกไซด์ แบคทีเรียกลุ่มนี้ได้แก่ Methanobacterium, Methanosarcina, Methanococcus และ Methanobacillus ซึ่งทั้ง 4 จินสอยู่ในตระกูล Methanobacteriaceae ซึ่งเป็นชนิดแกรมลบ แบคทีเรียกลุ่มนี้เจริญเติบโตช้าโดยทั่วไปแล้ว ต้องการเวลาอยู่ในระบบบำบัดหรือระยะเวลาการสะสมของตะกอนจุลินทรีย์ (SRT) นานกว่า 4 วัน

ทั้งแบคทีเรียชนิดผลิตกรดและแบคทีเรียที่ทำให้เกิดก๊าซมีเทน จะต้องพึ่งพาอาศัยกัน (Symbiosis) โดยแบคทีเรียที่ทำให้เกิดก๊าซมีเทนจะต้องใช้อาหารที่สร้างโดยแบคทีเรียชนิดผลิตกรด (Barker, 1956) และ (Smith และ Hungate, 1958)

ค. แบคทีเรียพวกรีดิวซ์ซัลเฟต (Desulfovibrio Bacteria) จะมีแบคทีเรียชนิดนี้ในระบบมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณของซัลเฟต ในน้ำทิ้งที่เข้าสู่ระบบบำบัด โดยจะรีดิวซ์ซัลเฟตให้เป็นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S)

ขั้นตอน

1. การย่อยสลาย
(Hydrolysis)

2. การเกิดกรด
(Production of Volatile Acid)

3. การเกิดก๊าซมีเทน
(Methane Fermentation)

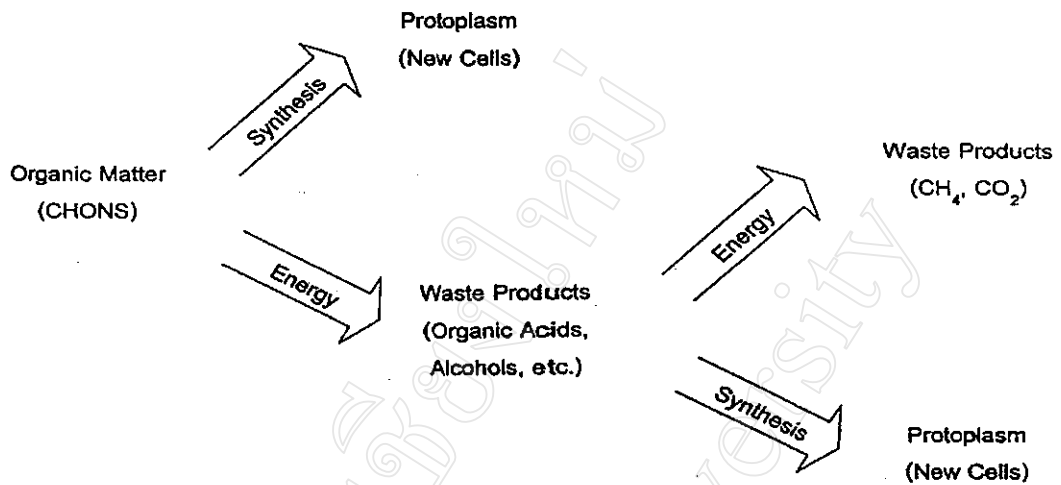
สารอินทรีย์ (Organic Matters)
(โปรตีน, ไขมัน, คาร์โบไฮเดรต)

สารอินทรีย์ขนาดเล็ก
(Complex Organics)
(กรดอะมิโน, กรดไขมัน, น้ำตาล)

กรดอินทรีย์ (Organic Acids)
(กรดไพรูวอิก, กรดบิวทีริก)

CH_4 , CO_2

รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน
ที่มา : Lawrence และ McCarty, (1969)

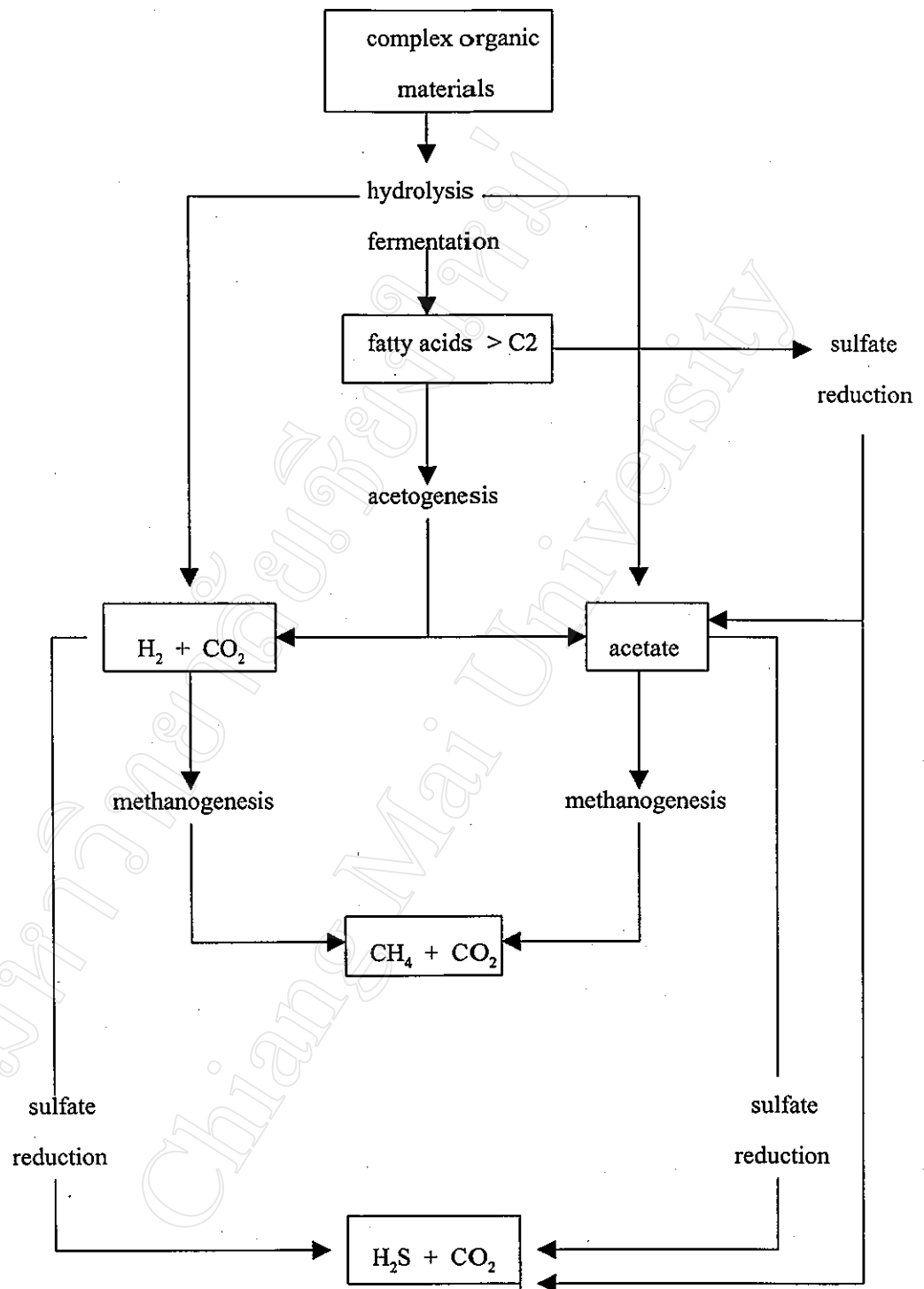


รูปที่ 2.3 การย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างๆภายใต้สภาวะที่ไม่มีออกซิเจนอิสระ
ที่มา : Simpson, (1959)

2.2.2 ผลกระทบการย่อยสลายซัลเฟต ต่อ การเกิดก๊าซมีเทน

ในระบบถังหมักที่มีความเข้มข้นของซัลเฟตอยู่สูงจะมีการย่อยสลายซัลเฟตและเกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ จะเคลื่อนย้ายไปยังระบบก๊าซชีวภาพ (Biogas) เกิดปัญหาเรื่องกลิ่นและจะยังยั้งการทำงานของแบคทีเรียที่ทำให้เกิดก๊าซมีเทน การย่อยสลายซัลเฟตและการเกิดก๊าซมีเทนจะมีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน โดยทั้งสองอย่างนี้จะเกิดขึ้นภายใต้สภาวะที่ไร้ออกซิเจน ซึ่งมีช่วงของ pH และอุณหภูมิในการทำงานที่เหมือนกัน การย่อยสลายซัลเฟตสามารถที่จะออกซิไดซ์ (Oxidize) ก๊าซไฮโดรเจนและอะซิเตทเหมือนการเกิดก๊าซมีเทน ดังนั้นจะมีการแข่งขันในการใช้สารอาหารระหว่างแบคทีเรียย่อยสลายซัลเฟตและแบคทีเรียที่ทำให้เกิดก๊าซมีเทนดังรูป 2.4 (Bitton.G, 1994)

การเกิดก๊าซมีเทนจะหยุดเมื่อมีตัวรับอิเล็กตรอน เช่น ซัลเฟตและไนเตรท โดยเฉพาะซัลเฟตจะก่อปัญหามากในความเข้มข้นสูงระดับหนึ่ง ซัลเฟตจะถูกรีดิวซ์ไปเป็นซัลไฟด์ โดยแบคทีเรียและจะเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ตามมา ความเข้มข้นของซัลเฟต > 500 มก./ล. สามารถลดการเกิดมีเทนและก่อให้เกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพถึง 4% ไฮโดรเจนซัลไฟด์จะรวมตัวกับโลหะหนักเกิดเป็นสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำ ทรายใดที่ไฮโดรเจนซัลไฟด์และโลหะหนักมีอยู่ในปริมาณที่สมดุลกันก็จะไม่เกิดปัญหา แต่จะเป็นผลดีด้วยซ้ำ อย่างไรก็ตามปัญหาที่พบคือไฮโดรเจนจะถูกใช้โดยการรีดิวซ์ซัลเฟต และจะไม่เหลือพอสำหรับการสร้างมีเทน และไฮโดรเจนซัลไฟด์ยังเป็นสารพิษต่อแบคทีเรียพวกเมทาโนเจนเมื่อความเข้มข้น > 200 มก./ล.



รูปที่ 2.4 การแข่งขันการใช้สารอาหารระหว่างแบคทีเรียย่อยสลายซัลเฟตและแบคทีเรียที่ทำให้เกิดก๊าซมีเทน

ที่มา : Bitton, G. (1994)

การลดความรุนแรงอาจทำได้โดยการเติมเกลือของเหล็ก เพื่อตกตะกอนไฮโดรเจนซัลไฟด์ในรูปของเฟอร์ริกซัลไฟด์ เกลือของเหล็กที่เติมอาจเป็นเฟอร์ริกคลอไรด์ หรือเฟอร์ริกออกไซด์ แต่ต้องไม่ใช่เฟอร์ริกซัลเฟต พวกไนเตรททำให้เกิดปัญหาได้เช่นกัน เนื่องจากการเกิดดีไนตริฟิเคชันภายในถังหมัก ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของ redox potential และลดการสร้างก๊าซ แบคทีเรียพวกเมทาโนเจนเป็นแอนแอโรบิกอย่างแท้จริง และสามารถถูกยับยั้งที่ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำต่ำเพียง 0.01 มก./ล. สภาพที่เหมาะสมจะต้องมี redox potential อยู่ในช่วง -200 มิลลิโวลต์ ถึง -420 มิลลิโวลต์

2.3 เครื่องกรองไร้อากาศที่มีน้ำไหลแนวอนใต้ผิวดิน

ระบบน้ำไหลแนวอนใต้ผิวดินที่มีรูปร่างของระบบคล้ายกับประดิษฐ์แบบมีการไหลของน้ำใต้ผิวดิน Subsurface flow (SSF) และมีสภาพแวดล้อมของระบบคล้ายกับเครื่องไร้อากาศนี้ จะมีตัวกลางที่บรรจุภายในระบบ ซึ่งจะทำหน้าที่ในการกักเซลล์มิให้หลุดออกไปจากระบบ และยังเป็นที่ยึดเกาะของแบคทีเรีย ซึ่งเป็นผลให้ปริมาณเซลล์ภายในเครื่องกรองอยู่ในระบบได้นาน (ระยะเวลาการสะสมของตะกอนจุลินทรีย์สูง) สิ่งเหล่านี้มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำเสีย ปัจจุบันตัวกลางที่นำมาอาจได้มาจากธรรมชาติเช่น หิน กรวด หรืออาจทำขึ้นจากวัสดุสังเคราะห์เช่น พลาสติก การที่จะเลือกชนิดของตัวกลางย่อมต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพการกำจัดน้ำเสีย และความประหยัดด้านค่าใช้จ่ายของระบบ งานวิจัยหลายชิ้นได้ค้นคว้าศึกษาคุณลักษณะของตัวกลางซึ่งพอที่จะสรุปได้ว่า ตัวกลางที่มีประสิทธิภาพดีจะต้องมีพื้นที่ผิวมากและมีค่าความพรุนสูงก็เพื่อจะลดปัญหาการอุดตัน ปัญหาการเกิดการไหลลัดวงจร (Short Circuit) และปัญหาด้านไฮดรอลิก (Hydraulic) จากผลของการใช้ตัวกลางชนิดเดียวกันแต่มีขนาดต่างกัน เช่น การใช้หินขนาด 1 นิ้ว - 1.25 นิ้ว กับหินขนาด 1.75 นิ้ว - 2.5 นิ้ว กำจัดน้ำเสียชนิดเดียวกัน และตัวกลางทั้งสองมีความพรุนประมาณ 43 % - 46 % จะพบว่าตัวกลางที่มีขนาดเล็กกว่าจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำเสียได้สูงกว่า จากการศึกษาและากรค้นคว้าเกี่ยวกับคุณสมบัติของตัวกลาง บุญส่ง ไชเกษ (1991) ได้แนะนำขนาดของหิน กรวด ควอตไซต์ (Quartzite) ที่จะนำมาเป็นตัวกลางของถังกรองชนิดนี้ควรมีขนาด 25 มม. - 33 มม. ซึ่งจะให้ค่าความพรุน 42 % - 47% และมีพื้นที่ผิวต่อปริมาตร 140 m^2/m^3 และถ้าใช้ตัวกลางพวก Activated Carbon ขนาด 0.85 มม. - 2 มม. จะให้ค่าความพรุนเท่ากันแต่พื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงถึง 3,700 m^2/m^3

2.3.1 ข้อดีของระบบเครื่องกรองไร้อากาศ (Malina และ Pohland, 1992)

- ก. เหมาะสมกับประเทศในเขตร้อนเช่นประเทศไทย เพราะไม่ต้องใช้พลังงานเพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับระบบเหมือนประเทศในเขตหนาว
- ข. ระบบไม่ต้องการออกซิเจนอิสระจึงประหยัดพลังงานในส่วนที่จะต้องใช้ เพื่อเติมออกซิเจนลงไป และมีแรงดันสูญเสียภายในเครื่องกรองน้อย
- ค. มีความต้องการอาหารเสริมน้อยกว่า ระบบบำบัดสารอินทรีย์แบบใช้ออกซิเจนอิสระ
- ง. มีระยะเวลาการสะสมของตะกอนจุลินทรีย์สูง ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์สูงตามไปด้วย
- จ. ไม่ต้องหมุนเวียนตะกอนกลับ (Sludge Recycle) สู่ออก เพราะตัวกลางภายในเครื่องกรองจะดักตะกอนไว้ภายในระบบอยู่แล้ว
- ช. ระบบสามารถรับ Shock Load โดยใช้เวลาในการปรับตัวเพียงเล็กน้อยลดปัญหาการกำจัดกากตะกอนเนื่องจากสารอินทรีย์ที่ถูกย่อยสลายจะถูกเปลี่ยนเป็นมวลจุลินทรีย์ประมาณ 10 % – 20% ในขณะที่ระบบใช้ออกซิเจนอิสระสามารถเปลี่ยนสารอินทรีย์เป็นมวลได้ถึง 50 %
- ซ. ระบบสามารถทำงานได้ดีหลังจากที่หยุดทำงานไป 15 วัน โดยไม่ต้องเริ่มต้นเลี้ยงแบคทีเรียใหม่

2.3.2 ข้อจำกัดของเครื่องกรองไร้อากาศ (Malina และ Pohland, 1992)

- ก. เหมาะกับน้ำเสียที่มีตะกอนแขวนลอยน้อย
- ข. ใช้เวลาในการเริ่มต้นเลี้ยงแบคทีเรีย (Start up) นาน เพราะมีการเจริญเติบโตช้า
- ค. ระบบจะมีประสิทธิภาพลดลงมากถ้ามีการเปลี่ยนแปลงไปจาก อุณหภูมิและสภาพแวดล้อมที่เหมาะสม
- ง. น้ำทิ้งจะมีกลิ่นเหม็นและมีสีดำอันเนื่องมาจากก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งเป็นก๊าซที่มีกลิ่นเมื่อทำปฏิกิริยากับสารประกอบโลหะต่างๆในน้ำทิ้งจะทำให้เกิดสารประกอบสีดำ

2.3.3 สภาพแวดล้อมที่เหมาะสมสำหรับเครื่องกรองไร้อากาศ

ประสิทธิภาพของเครื่องกรองไร้อากาศจะมีมากน้อยเพียงไร ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมต่างๆภายในเครื่องกรองนั้น เนื่องจากแบคทีเรียที่ทำให้เกิดก๊าซมีเทนซึ่งเป็นตัวการที่สำคัญที่สุดสำหรับการทำงานของระบบบำบัดน้ำทิ้งด้วยวิธีชีววิทยาแบบไม่ใช้ออกซิเจนนั้นมีความรู้สึกลัว

ต่อสภาพแวดล้อมมาก ดังนั้นการควบคุมสภาพแวดล้อมให้เหมาะสมจึงเป็นสิ่งที่ดี จำเป็นเพื่อให้ระบบทำงานอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด สภาพแวดล้อมที่ควรคำนึงถึง ได้แก่

ก. อุณหภูมิ

ปฏิกิริยาชีวเคมีแบบไม่ใช้ออกซิเจนจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุดในช่วงอุณหภูมิ 2 ช่วง คือ ช่วง Mesophilic มีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 30°C - 38°C เรียกแบคทีเรียที่ทำงานในช่วงอุณหภูมินี้ว่า "Mesophilic Bacteria" (Eckenfelder และ Conner, 1961) ซึ่งช่วงนี้จะทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้เร็วกว่าช่วง Mesophilic ประมาณ 25 % - 50 % (Malina และ Pohland, 1992) ในต่างประเทศที่อยู่ในเขตหนาวจำเป็นต้องเพิ่มอุณหภูมิให้กับน้ำทิ้ง แต่สำหรับประเทศไทยนั้นระบบบำบัดจะทำงานอยู่ในช่วง Mesophilic ได้เองโดยไม่ต้องให้ความร้อนช่วย และเนื่องจากค่าใช้จ่ายในการทำความร้อนสูงมากจึงไม่นิยมออกแบบระบบบำบัดให้อยู่ในช่วง Thermophilic

เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นระยะเวลาการกักตะกอนจะน้อยลงโดยที่ประสิทธิภาพการบำบัด COD ยังคงเดิม หรือถ้าอุณหภูมิลดลงระยะเวลาการกักตะกอนจะต้องเพิ่มขึ้นเพื่อให้มีประสิทธิภาพคงเดิม ดังนั้นระบบเครื่องกรองไร้อากาศจะสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพแม้ที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากมีระยะเวลาการกักตะกอนยาวนานถึง 665 วัน (Young และ McCarty, 1969)

ข. สภาพไร้ออกซิเจน

น้ำทิ้งในถังปฏิกิริยาต้องไม่มีออกซิเจนอยู่เลย เนื่องจากออกซิเจนเป็นอันตรายต่อแบคทีเรียย่อยสลายซัลเฟต

ค. อาหารเสริมสร้างหรือสารอาหารที่จำเป็น

ในเซลล์แบคทีเรียทุกชนิดจะประกอบไปด้วยธาตุที่สำคัญ คือ คาร์บอน ไนโตรเจน, ฟอสฟอรัส, ออกซิเจน และซัลเฟอร์ Speece และ McCarty, (1962) พบว่าแบคทีเรียที่ไม่ใช้ออกซิเจนอิสระต้องการธาตุไนโตรเจนเมื่อเทียบกับน้ำหนักเซลล์เท่ากับ 9.4 (Cell Weight/N เท่ากับ 9.4)

Sanders และ Bloodgood, (1965) พบว่าแบคทีเรียที่ไม่ใช้ออกซิเจนอิสระจะสร้างเซลล์เพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมากได้ เมื่อมีอัตราส่วนของธาตุไนโตรเจนต่อคาร์บอนในสารอาหารประมาณ 0.0620 และต้องการธาตุฟอสฟอรัสเท่ากับ 1 ใน 7 ของปริมาณธาตุไนโตรเจนที่ประกอบในเซลล์

ดังนั้น น้ำทิ้งควรมีอาหารเสริมสร้างพอเพียงแก่การเจริญเติบโตของแบคทีเรีย โดยทั่วไปต้องการธาตุไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในอัตราส่วน 11 ต่อ 2 ดังนั้นถ้าปริมาณแบคทีเรียที่เกิดขึ้นมีประมาณ 0.1 กก.ต่อ 1 กก. BOD ที่ถูกย่อยสลาย อัตราส่วน BOD: N: P จะเท่ากับ 100 : 1.1 : 0.2 ซึ่งต่ำกว่าอัตราส่วนที่ใช้ในการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจนอิสระซึ่งมีค่าเท่ากับ 100 : 5 : 1

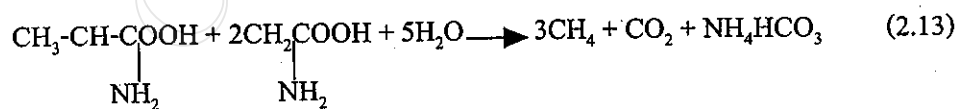
จ. พีเอช (pH)

นับว่ามีความสำคัญสำหรับการทำงานของเครื่องกรองไร้อากาศเพราะแบคทีเรียที่ทำให้เกิดก๊าซมีเทนและแบคทีเรียย่อยสลายซัลเฟต มีความรู้สึกละไหวต่อการเปลี่ยนแปลงพีเอชมาก ซึ่งทั้งระบบแบบ Single Phase และ Two Phase นั้นมีช่วงพีเอชที่เหมาะสมสำหรับแบคทีเรียที่ทำให้เกิดกรดอยู่ระหว่าง 5.0 – 6.5 และแบคทีเรียย่อยสลายซัลเฟตควรมีพีเอชอยู่ระหว่าง 6 – 7 ถ้าพีเอชต่ำกว่า 5 แบคทีเรียย่อยสลายซัลเฟตที่ชื่อว่า Desulfuribio จะหยุดการทำงาน (Postgate, 1984)

จ. สภาพความเป็นกรดและสภาพความเป็นด่าง (Acidity and Alkalinity)

การควบคุมพีเอชในระบบหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนอิสระทำได้โดยควบคุมปริมาณของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายและสภาพความเป็นด่าง (Alkalinity) ปกติปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายควรมีค่าประมาณ 50 มก./ล. – 500 มก./ล. ในรูปของ CH_3COOH หากมีปริมาณของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายมากกว่า 2,000 มก./ล. ในรูปของ CH_3COOH แล้วจะทำให้ประสิทธิภาพของระบบบำบัดลดลง และถ้าระบบมีปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย 8,000 มก./ล. – 10,000 มก./ล. ในรูปของ CH_3COOH จะเป็นพิษต่อระบบดังกล่าวโดยตรง

โดยทั่วไปแล้วระบบหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนควรมีสภาพความเป็นด่างประมาณ 1,500 มก./ล. – 2,000 มก./ล. ในรูปของ CaCO_3 สภาพความเป็นด่างภายในเครื่องกรองไร้อากาศอาจมาจากเกลือของแอมโมเนียม เช่น แอมโมเนียมไบคาร์บอเนต (NH_4HCO_3) และแอมโมเนียมอะซิเตต ($\text{CH}_3\text{COONH}_4$) ซึ่งจะเกิดขึ้นได้เอง ดังสมการที่ 2.13 (Pohland, 1964)



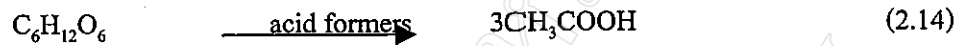
Alanine Glycine

Bicarbonate

Alkalinity

ซึ่ง Alanine และ Glycine จะมีอยู่ในน้ำทิ้งที่มีโปรตีนผสมอยู่

ถ้ากระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนเป็นไปอย่างสมดุลแล้ว แอมโมเนียมไบคาร์บอเนตจะเป็นตัวควบคุมการเปลี่ยนแปลงของพีเอช คือเป็นตัวบัฟเฟอร์ (Buffer) ซึ่งจะลดสภาพความเป็นกรดลงเนื่องจากกรดอินทรีย์ระเหยง่าย ดังสมการที่ 2.14 - 2.16



จากสมการถ้าน้ำที่มีปริมาณของไนโตรเจนอย่างเพียงพอและมีการย่อยสลายสารอินทรีย์อย่างสมบูรณ์แล้วจะได้แอมโมเนียมไบคาร์บอเนต ซึ่งจะเป็นบัฟเฟอร์ที่ทำปฏิกิริยากับกรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่เกิดจากแบคทีเรียที่ทำให้เกิดกรด และจะได้แอมโมเนียมอะซิเตต ซึ่งแอมโมเนียมอะซิเตตนี้จะถูกย่อยสลายโดยแบคทีเรียที่ทำให้เกิดก๊าซมีเทนให้กลายเป็นก๊าซมีเทนต่อไปและจะได้แอมโมเนียมไบคาร์บอเนตกลับคืนมา แต่ถ้าปริมาณของไบคาร์บอเนตบัฟเฟอร์ไม่เพียงพอที่จะทำปฏิกิริยากับกรดอินทรีย์ระเหยง่ายแล้วจะทำให้กรดอินทรีย์ระเหยง่ายมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ทำให้พีเอชต่ำลงจนกระทั่งแบคทีเรียที่ทำให้เกิดก๊าซมีเทนไม่สามารถย่อยสลายแอมโมเนียมอะซิเตตได้

2.3.4 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบระบบน้ำไหลใต้ผิวดิน

โดยทั่วไปแล้วระบบที่มีการไหลของน้ำใต้ผิวดินจะประกอบไปด้วยร่องยาวหรือบ่อที่ปูพื้นข้างล่างด้วยวัสดุที่น้ำไม่สามารถผ่านได้ เพื่อป้องกันการรั่วซึม และภายในจะบรรจุตัวกลางซึ่งเป็นที่ยึดเกาะของแบคทีเรีย ตัวกลางที่ใช้จะมี หิน หรือหินบด (ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 ซม. -15 ซม.) กรวด และดินประเภทต่างๆ ซึ่งภายในบ่ออาจจะบรรจุตัวกลางชนิดเดียวหรือบรรจุตัวกลางหลายชนิดรวมกัน น้ำเสียจะไหลผ่านตัวกลางและถูกกักจัดในระหว่างที่สัมผัสกับพื้นผิวของตัวกลาง ในพื้นผิวดังกล่าวจะมีสถานะที่อึดอัดตลอดเวลาซึ่งจะเกิดสภาพขาดออกซิเจน

ก. การพิจารณาทางชลศาสตร์

ในสภาพที่ตื้นและเต็มไปด้วยสถานะอึดอัดของน้ำในร่อง ซึ่งไม่มีการรั่วซึมข้างล่าง อัตราการเปลี่ยนแปลงของไฮดรอลิกต่อหนึ่งหน่วยความยาว (Hydraulic gradient) จะถูกสมมุติให้เป็นความลาดชันของพื้นบ่อ ซึ่งสามารถหาอัตราการไหลได้ตามสมการที่ 2.17 (Reed, et al., 1988)

$$Q = K_s \times A \times S \quad (2.17)$$

โดย Q = อัตราการไหล

K_s = สภาพทางชลศาสตร์ ของพื้นที่ 1 หน่วยของตัวกลาง

A = พื้นที่หน้าตัด

S = อัตราการเปลี่ยนแปลงของไฮดรอลิกต่อหนึ่งหน่วยความยาว
 $= \Delta h / \Delta L$

และสามารถหาพื้นที่หน้าตัดที่สภาวะอิ่มตัวของน้ำจากสมการที่ 2.18 (Reed. et al., 1988) ได้เป็น

$$a_c = \frac{Q}{K_s \times S} \quad (2.18)$$

$$S = 8.6 / K_s \quad (2.19)$$

โดย a_c = พื้นที่หน้าตัดของบ่อเว็ทแลนด์ ที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของน้ำ $d \times W$ (ม.²)

d = ความลึกของน้ำในบ่อ (ม.)

S = อัตราการเปลี่ยนแปลงของไฮดรอลิกต่อหนึ่งหน่วยความยาว

W = ความกว้างของบ่อ (ม.)

K_s = สภาพทางชลศาสตร์ของตัวกลาง (อาจดูได้จากตารางที่ 2.1)

และเมื่อต้องการคำนวณหาเวลากักเก็บและพื้นที่ผิวของบึงประดิษฐ์แบบระบบน้ำไหลใต้ผิวดิน สามารถคำนวณได้จากสมการ 2.20 และ 2.21

$$t = \frac{L \times W \times y \times n}{Q} \quad (2.20)$$

$$A_s = L \times W \quad (2.21)$$

- เมื่อ L = ความยาวของบ่อ, ม.
 W = ความกว้างของบ่อ, ม.
 A_s = พื้นที่ผิวของบ่อ, ม.²
 Q = อัตราไหลเฉลี่ยของระบบ, ม.³/วัน
 Y = ความลึกของน้ำในบ่อ, ม.
 n = ค่าความพรุนของตัวกลางในบ่อมีค่าอยู่ระหว่าง 0.25-0.45 ขึ้นอยู่กับขนาดของกรวด อาจดูได้จากตาราง 2.1

อัตราการไหลของน้ำอาจใช้วิธีในการควบคุมการไหล ให้ส่วนกันบ่อมีความลาดของบ่อประมาณ 1% เพื่อให้ น้ำไหลลง โดยไม่มีการกักขังเกิดขึ้น ส่วนกันบ่อบริเวณปลายท้ายน้ำของบ่อจะมีท่อค้ำเจาะรูรอบท่อ เพื่อรับน้ำที่ออกจากระบบน้ำไหลใต้ผิวดินในแนวนอน ในการหลีกเลี่ยงที่จะรบกวนโครงสร้างของตัวกลาง และเพื่อให้แน่ใจได้ว่ามีเวลาในการสัมผัสที่เพียงพอสำหรับการกำจัด ค่าความเร็วของการไหลของน้ำผ่านระบบไม่ควรเกิน 8.6 ม./วัน (Reed. et al., 1988)

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างคุณสมบัติของตัวกลางในระบบน้ำไหลใต้ผิวดิน (SSF)

ชนิดของตัวกลาง	ขนาดสัมฤทธิ์ มม.	ความพรุน	สภาพทางชลศาสตร์(K_s) ม ³ /(ม ² × วัน)	K_{20}
ทรายละเอียด	1	0.42	420	1.84
ทรายหยาบ	2	0.39	480	1.35
กรวดหยาบ	3	0.35	500	0.86

ที่มา : Metcalf and Eddy. , 1991

ข. การบรรทุกสารอินทรีย์

การบรรทุกสารอินทรีย์ไม่ได้เป็นตัวแปรที่กำหนดค่าวิกฤตในการออกแบบน้ำไหลใต้ผิวดิน โดยคำแนะนำที่ใช้ในการออกแบบระบบที่มีการไหลของน้ำใต้ผิวดิน (SSF) ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่าแนะนำที่ใช้ในการออกแบบระบบที่มีการไหลของน้ำใต้ผิวดิน (SSF)

พารามิเตอร์ที่ใช้ออกแบบ	หน่วย	ระบบ SSF
เวลากักเก็บ (HRT)	วัน	4-15
ระดับน้ำ	เมตร	0.3-0.8
อัตราการบรรทุกอินทรีย์ (บีโอดี)	กก./(เฮกแตร์×วัน)	<68
อัตราการระเหย	ม. ³ /(ม. ² ×วัน)	0.014-0.047
พื้นที่ผิวจำเพาะ	เฮกแตร์/(10 ³ ×ม. ³ ×วัน)	2.14-7.16

ที่มา : Metcalf and Eddy. , 1991

ค. โครงร่างของระบบ

โดยส่วนใหญ่โครงร่างของระบบที่มีการไหลของน้ำใต้ผิวดิน (SSF) มีลักษณะและรายละเอียดต่างๆ ไม่เป็นที่แน่นอนเท่าไรนัก เช่น ความลึกของน้ำและตัวกลาง ชนิดของตัวกลาง ความลาดชันและวิธีการของการกำจัดในชั้นดิน แต่ก่อนระบบที่มีการไหลของน้ำใต้ผิวดินส่วนใหญ่มีอัตราส่วนของ ความยาวต่อความกว้าง เป็น 10:1 หรือมากกว่า และจะมีความลึกของตัวกลางประมาณ 0.3 ถึง 0.76 เมตร และใช้ทราย กรวด หิน เป็นตัวกลาง พื้นที่ส่วนล่างมีความลาดชัน 0 ถึง 1% ระดับน้ำควรจะต่ำกว่าพื้นผิวบนของตัวกลาง และสามารถควบคุมระดับน้ำได้ที่ทางออก (Reed. and Bown., 1992)

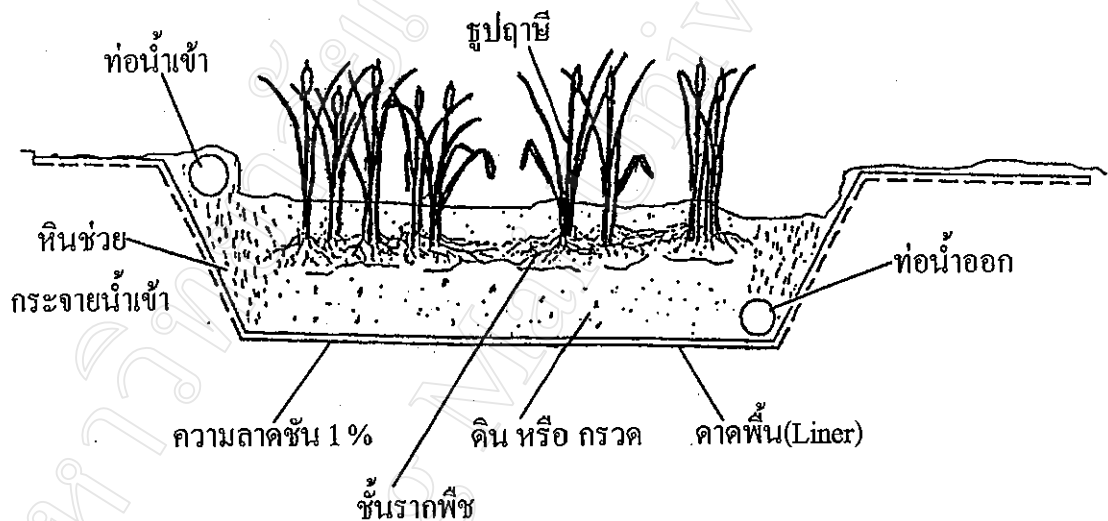
ง. การกำจัดขั้นต้น

น้ำเสียที่เข้าระบบบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลของน้ำใต้ผิวดินอย่างน้อยที่สุด ควรผ่านการกำจัดขั้นต้นมาก่อนแล้ว ซึ่งอาจจะผ่าน บ่อเกรอะ (Septic tanks) ถึงตกตะกอน (Imhoff tanks) การกำจัดขั้นต้นแบบธรรมดา (Conventional primary treatment) ถึงปฏิกิริยาไม่ใช้อากาศขั้นต้น (Preliminary anaerobic reactor) ซึ่งจะมีประโยชน์ในการลดสารอินทรีย์และจำนวนของแข็งของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมได้

2.4 ระบบบึงประดิษฐ์

บึงประดิษฐ์ (Wetlands) หมายถึงพื้นที่ซึ่งดินมีน้ำขังอึดตัวไม่ลึกนัก และมีพืชน้ำออกงาม ระบบนิเวศวิทยาเป็นไปแบบธรรมชาติ พื้นที่มีความสามารถในการบำบัดน้ำเสีย โดยอาศัยพืช น้ำทั้งที่จมอยู่และลอยตัว จุลินทรีย์และดิน เป็นตัวบำบัด

ลักษณะของบึงประดิษฐ์น้ำไหลใต้ผิวดิน (Subsurface Flow System, SSF) หรือ (Vegetated Submerged Beds, VSB) Mattaraj. (1995) แสดงดังรูปที่ 2.5 โดยบึงจะบรรจุชั้นตัวกลาง เพื่อให้รากพืชยึดเกาะตัวกลาง ได้แก่ หินบดกรวดผสมดินชนิดต่างๆ ความหนาชั้นตัวกลาง ประมาณ 60-70 ซม. ด้านล่างคาคด้วยดินเหนียวอัดหรือวัสดุกันซึมเพื่อรักษาระดับน้ำในบึงซึ่งจะต่ำกว่าผิวดินเล็กน้อย น้ำเสียจะถูกบำบัดเมื่อไหลผ่านตัวกลางและรากของพืช น้ำชั้นตัวกลางนี้จะมีสภาวะไร้อากาศ ออกซิเจนจากรากพืชจะช่วยดำรงชีวิตของจุลินทรีย์ชนิดใช้อากาศที่อาศัยอยู่ตามรากพืช



รูปที่ 2.5 ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดิน

ที่มา : Mattaraj , 1995

จากการศึกษาโดยมากชี้ให้เห็นว่าระบบบึงประดิษฐ์ สามารถกำจัดปริมาณสารอินทรีย์ (BOD) ของแข็งแขวนลอย (SS) สารอาหาร โลหะหนัก เชื้อโรค จากน้ำเสียชนิดต่างๆ ได้ กลไกพื้นฐานในการกำจัดได้แก่ การตกตะกอน การทำงานของจุลินทรีย์ การดูดซึม การย่อยสลายทางเคมี การดูดซับของดิน (Roger. et al., 1985) ได้มีรายงานการกำจัด บีโอดี ของแข็ง ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โลหะหนัก และเชื้อโรคดังต่อไปนี้ (อุคร จารุรัตน์, 2537)

2.4.1 การกำจัดบีโอดี

สารอินทรีย์ที่ตกตะกอนได้จะจมตัวอยู่ก้นบึง ย่อยสลายแล้วซึมลงดิน ส่วนสารละลายอินทรีย์จะถูกกำจัด โดยจุลินทรีย์ทั้งที่เกาะติดอยู่กับพืชน้ำและที่แขวนลอยอยู่ ออกซิเจนส่วนใหญ่จะได้มาจากการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายที่มีอยู่น้อย เนื่องจากการเติบโตของสาหร่ายถูกจำกัดจากการบดบังแสงแดดของพืชเหนือน้ำ ในระบบบึงกลางแจ้งออกซิเจนจากบรรยากาศจะถูกพืชน้ำดูดซับ และแพร่ออกในชั้นรากพืช ซึ่งจะมีชั้นรากหนาประมาณ 30 ซม. แต่รากพืชจำพวก กก แผลกจะหยั่งลึกลงถึง 70 ซม.การกำจัดบีโอดีมีประสิทธิภาพสูง (60% - 96%) ถ้าปริมาณภาระสารอินทรีย์สูง และใช้อัตราภาระทางชลศาสตร์ ซึ่งต่ำกว่า 7 ซม./วัน จะได้ประสิทธิภาพสูงสุด (มากกว่า 80%)

2.4.2 การกำจัดสารแขวนลอย

การกำจัดสารแขวนลอยในน้ำเสียเป็นไปในลักษณะเดียวกันกับการกำจัดบีโอดี ส่วนใหญ่จะจมตัวในช่วงต้น ๆ ของบึง

2.4.3 การกำจัดไนโตรเจน

มีรายงานที่ระบุว่ากำจัดไนโตรเจนอาจสูงถึง 79% ในอัตราภาระไนโตรเจน 44 กิโลกรัม. ต่อ เฮกแตร์ ต่อวัน แต่ในบางแห่งก็สามารถกำจัดได้เพียงประมาณ 10% การกำจัดไนโตรเจนเป็นไปตามกระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification) และดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) แอมโมเนียจะถูกเปลี่ยนไปเป็นไนเตรทโดยไนตริฟายอิง แบคทีเรีย (Nitrifying Bacteria) ในส่วนที่มีอากาศ แล้วไนเตรทก็จะถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซไนโตรเจน ในส่วนไร้อากาศโดยดีไนตริฟายอิง แบคทีเรีย (Denitrifying Bacteria)

2.4.4 การกำจัดฟอสฟอรัส

ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสมีตั้งแต่ 0% - 90% ส่วนใหญ่การกำจัดเกิดขึ้นที่ชั้นดิน ในส่วนพื้นบึงถ้าหากดินมีส่วนผสมของเหล็ก อลูมิเนียม และแคลเซียม ก็จะช่วยส่งเสริมการกำจัดให้ดีขึ้น ส่วนพืชน้ำจะดูดซับฟอสฟอรัสผ่านทางราก และนำไปใช้ในการสร้างเซลล์ เมื่อพืชตายและย่อยสลายจะคายฟอสฟอรัสบางส่วนออกมา ส่วนที่เหลือจะจมอยู่กับซากพืช

2.4.5 การกำจัดโลหะ

บึงประดิษฐ์บางแห่งใช้ในการกำจัดน้ำเสียจากเหมืองแร่ที่มีสารละลาย

กรดและโลหะ ส่วนใหญ่จะเป็นบึงประดิษฐ์แบบไหลพื้นผิว เพราะการไหลซึมผ่านชั้นตัวกลางจะเกิดการอุดตันได้ง่าย บึงประดิษฐ์แห่งหนึ่งที่กล่าวมาซึ่งมีเนื้อที่ 0.6 เฮกแตร์ สามารถลดสารละลายเหล็กจาก 80 มก./ลิตร. ลงเหลือน้อยกว่า 1 มก./ลิตร. สำหรับอัตราการไหล 110 ลิตร/นาที่ ผลการทดลองกำจัดโลหะยังไม่มีรายงานเด่นชัด แต่คาดว่าบึงประดิษฐ์จะสามารถ ลดนิเกิล ทองแดง ตะกั่ว เงิน ทอง และยูเรเนียมได้ ทั้งนี้ต้องใช้อัตราการไหลที่ค่อนข้างต่ำ

2.4.6 การกำจัดเชื้อโรค

การกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ในบึงประดิษฐ์คาดว่ามีประสิทธิภาพพอสมควร โดยไวรัสจะถูกดูดซับโดยดิน และซากสารอินทรีย์ ส่วนแบคทีเรียถูกกำจัดด้วยการจมตัว จากรังสีอุลตราไวโอเลต และปฏิกิริยาเคมีอื่น ๆ การวัดอัตราการกำจัดในรูปของโคลิฟอร์มกระทำได้ยาก เนื่องจากโคลิฟอร์มบางส่วนมาจากอุจจาระนกและสัตว์น้ำที่อาศัยในบึงด้วย

2.4.7 ดิน

สารอาหารที่ต้องการสำหรับการเจริญเติบโตของพืช ส่วนใหญ่จะได้รับมาจากดิน ยกเว้นคาร์บอน ดินในธรรมชาติที่รูปถ่ายอยู่จะมีลักษณะเป็นโคลน แต่ส่วนใหญ่แล้วพืชจะเจริญเติบโตในตัวกลางที่แตกต่างกัน ช่องว่างในดินหรือตัวกลางชนิดอื่น จะใช้เป็นช่องทางน้ำไหลแก่บึงประดิษฐ์ แบบน้ำไหลใต้ผิวดินที่มีการไหลลงสู่เบื้อง ซึ่งจะมีการกำจัดโดยจุลินทรีย์และที่เกาะติดอยู่บนชั้นรากพืชและดินที่อยู่บริเวณโดยรอบ ดินอาจจะถูกใช้ให้เป็นพื้นของตัวกลาง เมื่อต้องการที่จะกำจัดฟอสฟอรัส เนื่องจากการกำจัดฟอสฟอรัสส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่ชั้นดิน แต่อย่างไรก็ตามดินที่มีศักยภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสได้สูง จะต้องเป็นดินที่มีเนื้อดินละเอียด และน้ำสามารถซึมผ่านได้ต่ำถึงปานกลาง ซึ่งอาจจะเป็นตัวจำกัดความจุทางศาสตร์ของพื้นดินส่วนล่างในบึงประดิษฐ์ได้

2.4.8 จุลินทรีย์

ในระบบบึงประดิษฐ์ จะพบจุลินทรีย์หลายชนิดที่เป็นประโยชน์ เช่น แบคทีเรีย โปรโตซัว ฟังไจ จนถึงสัตว์พวกที่ไม่มีกระดูกสันหลัง และพวกที่มีกระดูกสันหลัง ในกรณีของพืช โพลีพ่น้ำในระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดิน จุลินทรีย์จะเจริญเติบโตได้ในพืชน้ำส่วนที่จมอยู่ใต้น้ำ (เช่น ส่วนรากและลำต้นที่จมอยู่ในน้ำ) ในตะกอนที่อยู่ชั้นล่างหรือบนผิวดิน

(Thayalakumaran., 1994)

2.5 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง

K. Kosinska , et al. (1999) ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงประสิทธิภาพในการลดค่าซีพีของแบคทีเรีย *Desulfovibrio Desulfuricans* ซึ่งเป็นแบคทีเรียย่อยสลายซัลเฟตชนิดหนึ่ง โดยการปรับอัตราส่วนความเข้มข้น COD/SO₄ การดำเนินการทดลองเริ่มจากเพาะเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งจะมีแบคทีเรียชนิด *Desulfovibrio Desulfuricans* ในขวดแก้วปริมาตร 2 ลิตรที่ปิดสนิทให้มีเชื้อจุลินทรีย์ในปริมาณ 0.5 ลิตร โดยใช้น้ำเสียจาก ฟาร์มสุกร ยีสต์ที่ทำขนมปัง และสีย้อมอินทรีย์ (Organic Dye) เป็นแหล่งคาร์บอน และใช้ FeSO₄·7H₂O ในการปรับอัตราส่วนความเข้มข้น COD/SO₄ ให้ได้ตามที่ต้องการ ผลการศึกษาพบว่า น้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ใช้เป็นแหล่งคาร์บอน ที่อัตราส่วนความเข้มข้น COD/SO₄ เท่ากับ 0.65 มีประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟต และซีไอดีมีค่าเท่ากับ 75 % และ 99.5 % ตามลำดับ ที่อัตราส่วนความเข้มข้น COD/SO₄ เท่ากับ 2.2 มีประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟต และซีไอดีมีค่าเท่ากับ 83.3 % และ 84.1 % ตามลำดับ เมื่อใช้น้ำเสียจากยีสต์ที่ทำขนมปัง ที่อัตราส่วนความเข้มข้น COD/SO₄ เท่ากับ 4.7 มีประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟต และซีไอดีมีค่าเท่ากับ 25.4 % และ 99.1 % ตามลำดับ ที่อัตราส่วนความเข้มข้น COD/SO₄ เท่ากับ 3.3 มีประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟต และซีไอดีมีค่าเท่ากับ 58.7 % และ 84.8% ตามลำดับ และเมื่อใช้น้ำเสียจากสีย้อมอินทรีย์ ที่อัตราส่วนความเข้มข้น COD/SO₄ เท่ากับ 4.7 มีประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟต และซีไอดีมีค่าเท่ากับ 25.4 % และ 99.1 % ตามลำดับ ที่อัตราส่วนความเข้มข้น COD/SO₄ เท่ากับ 3.3 มีประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟต และซีไอดีมีค่าเท่ากับ 58.7 % และ 84.8% ตามลำดับ

Young Chae S. et al. (1998) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับแหล่งคาร์บอนที่เหมาะสมกับการทำงานของแบคทีเรียย่อยสลายซัลเฟต และอัตราส่วนความเข้มข้น COD/SO₄ ที่มีผลต่อการทำงานของแบคทีเรียย่อยสลายซัลเฟต ซึ่งทำการศึกษาการกำจัดใช้น้ำเสียจากการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าโดยแบคทีเรียย่อยสลายซัลเฟต ด้วยวิธีการแบบ Batch ในขวดเซรัม (Serum Bottle) คุณสมบัติของน้ำเสียจากการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าประกอบไปด้วยความเข้มข้นเฉลี่ยของซัลเฟต ในโตรเจนทั้งหมดและฟอสฟอรัสทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 2,000 มก./ล. 400 มก./ล. และ 80 มก./ล. ตามลำดับ ซึ่งการศึกษาเกี่ยวกับแหล่งคาร์บอนที่เหมาะสมจะใช้ กลูโคส อะซิเตท และแลคเตท เป็นแหล่งคาร์บอน ส่วนการศึกษาเกี่ยวกับอัตราส่วนความเข้มข้น COD/SO₄ ที่ใช้จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.18 – 1.21 ผลการศึกษพบว่า การใช้แลคเตทเป็นแหล่งคาร์บอนจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟตสูงกว่าอะซิเตท และกลูโคส โดยจะมีค่าประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตที่ 11 วัน ประมาณ 70% 50% และ 42%

ตามลำดับ ประสิทธิภาพการกำจัดที่โอซี (TOC) ของแกลกเทท อะซิเตท และกลูโคสที่ใช้เป็นแหล่งคาร์บอน ในวันที่ 11 มีค่าประมาณ 85% , 90% และ 90% ตามลำดับ ในการลดความเข้มข้นซัลเฟตของน้ำเข้าระบบ 2,000 มก./ล. ให้น้ำออกจากระบบอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง ต้องใช้ความเข้มข้นซีโอดีประมาณ 2,200 มก./ล. ซึ่งจะได้อัตราส่วนความเข้มข้น COD/SO₄ ที่เหมาะสมในการลดซัลเฟตของน้ำชุมชนโดยทั่วไปที่มีค่าประมาณ 1.08 มก. COD/ มก.SO₄

Tyrell. et al. (1996) ได้ทำการศึกษาการใช้บึงประดิษฐ์ ในการกำจัดน้ำทิ้งจากเหมืองถ่านหินในสภาวะแวดล้อมที่มีฝนตกน้อยและอัตราการระเหยมาก โดยระบบจะประกอบด้วยบ่อ 6 บ่อ ยาว 125 ม. กว้าง 10 ม. แต่ละบ่อปลูกพืชต้นรูปหญ้าเหมือนกัน แต่จะใส่ตัวกลาง (Brow Clay ฟางกรวด) ในแต่ละบ่อแตกต่างกัน น้ำเข้าระบบจะมีพีเอช เฉลี่ยเท่ากับ 3.1 และระดับซัลเฟตเฉลี่ยเท่ากับ 3116 มก./ล. มีอัตราการไหล 0.4 ลิตร/นาที่ โดยมีระยะเวลาในการศึกษาประมาณ 14 เดือน ผลการศึกษาพบว่า มีการย่อยสลายซัลเฟตเกิดขึ้นในระบบ โดยสังเกตจากกลิ่นไฮโดรเจนซัลไฟด์และมีตะกอนสีดำของโลหะซัลไฟด์เกิดขึ้นในชั้นล่างกับชั้นดิน แต่ พีเอชเฉลี่ยของน้ำออกทุกบ่อยังคงมีค่าต่ำอยู่มาก (พีเอช<3.5) ซึ่งการทดลองนี้ยังไม่เพียงพอที่จะปรับปรุง พีเอชให้สูงขึ้น และลดความเข้มข้นของซัลเฟตให้น้อยลงได้ (ซึ่งไม่ได้ระบุค่าของตัวเลขความเข้มข้นของซัลเฟตของน้ำออกไว้ในเอกสาร) Tyrell, W.R. et al. (1996) จึงได้ทำการศึกษาการย่อยสลายซัลเฟตในน้ำทิ้งจากเหมืองถ่านหินชนิดเดียวกันนี้อีกครั้ง โดยระบบจะประกอบไปด้วยบึงประดิษฐ์จำลอง ที่สร้างจากท่อ PVC ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 ม. หนา 3-4 มม. สูง 0.7 ม. และส่วนล่างปูพื้นด้วยดินเหนียวเพื่อป้องกันการรั่วซึม จำนวน 7 บ่อโดยไม่มีการปลูกพืช แต่ละบ่อจะใส่ตัวกลางคือ ฟาง ฟางผสมปุ๋ยคอก ดิน(จะอยู่ข้างบนสุด) ตะกอนดำที่มีเชื้อแบคทีเรียที่เกิดขึ้นในบ่อบึงประดิษฐ์ทดลอง จากการทดลองครั้งแรก และระดับของน้ำที่แตกต่างกัน น้ำเข้าระบบจะมี พีเอช เฉลี่ยเท่ากับ 3.1 และระดับซัลเฟตเฉลี่ยเท่ากับ 3116 มก./ล. โดยให้มีอัตราการไหลที่มีผลกระทบต่อพื้นที่หน้าตัดที่จำกัด 0.78 ม² ของบึงประดิษฐ์ที่อยู่ภายใน (ซึ่งไม่ได้ระบุค่าของตัวเลขของอัตราการไหลไว้ในเอกสาร)ระยะเวลาในการศึกษาประมาณ 103 วัน ผลการศึกษาพบว่า น้ำที่ออกจากบ่อที่ใส่ฟางผสมปุ๋ยคอก และมีดินอยู่ข้างบน โดยมีระดับน้ำอยู่ผิวดินจะมี พีเอช เฉลี่ยสูงสุด (พีเอช ประมาณ 7.76) และมีความเข้มข้นของซัลเฟตน้อยที่สุด (น้อยกว่า 250 มก./ล.) ซึ่งอาจจะกล่าวได้ว่าการผสมของฟางและปุ๋ยคอกจะส่งเสริมแบคทีเรียย่อยสลายซัลเฟตได้ดี ระดับน้ำมีผลต่อความเข้มข้นของซัลเฟตที่ออกจากระบบ ซึ่งระดับน้ำที่อยู่สูงกว่าผิวดินจะมีความเข้มข้นของซัลเฟตที่ออกจากระบบมากที่สุด (เมื่อเปรียบเทียบกับจากบ่อที่ระดับน้ำต่ำกว่าผิวดิน , อยู่ระดับผิวดินและสูงกว่าผิวดิน โดยจะมีความเข้มข้นของซัลเฟตในน้ำออกเป็น 950 มก./ล. , 1,300 มก./ล. และ 1,800 มก./ล. ตามลำดับ) เนื่องจากการระเหยของ

น้ำและมีการแลกเปลี่ยนออกซิเจนที่ผิวน้ำทำให้มีสถานะที่มีอากาศเกิดขึ้น ซึ่งเป็นตัวยับยั้งการย่อยสลายซัลเฟตและส่งเสริมซัลไฟด์ ให้เกิดรีออกซิเดชัน (Re-oxidation) การใส่และไม่ใส่ ตะกอนดำที่มีเชื้อแบคทีเรียลงในท่อ พีวีซี ซึ่งมี ดิน ฟาง และระดับน้ำเท่ากัน มีผลทำให้ พีเอช และความเข้มข้นของซัลเฟตที่ออกจากระบบมีค่าแตกต่างกันน้อยมาก (โดยที่ พีเอช และความเข้มข้นของซัลเฟตของบ่อที่ใส่และไม่ใส่ตะกอนเป็น 7.25 มก./ล. , 7.06 มก./ล. และ 940 950 มก./ล. ตามลำดับ) ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าการใส่ฟางและดินนี้เพียงพอแก่ประชากรของแบคทีเรียย่อยสลายซัลเฟต หรือน้ำที่ขังฟางสามารถทำให้น้ำเป็นกลางได้อย่างรวดเร็วและเป็นตัวบัฟเฟอร์ (Buffer) กรดในน้ำ

Christensen. et al. (1996) ได้ทำการศึกษาการกำจัดน้ำจากเหมืองที่มีสภาพเป็นกรด ด้วยแบคทีเรียย่อยสลายซัลเฟตใช้ทรงกระบอกใส 8 อัน ที่ทำจากโพลีอะคราเลท (Polyacralate) มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 20 ซม. สูง 100 ซม. ภายในบรรจุทรายสูง 7 ซม.และหินบด 25 ซม. แต่ละทรงกระบอกจะใส่หางน้ำนมวัว ปุ๋ยขี้วัวและเชื้อแบคทีเรียที่เพาะเลี้ยงจากแลคโตส ที่แตกต่างกัน น้ำจากเหมืองที่ใส่ในทรงกระบอกจะมีพีเอชเฉลี่ยเท่ากับ 3.4 , ซัลเฟต 3306 มก./ล. และโลหะหนัก แคดเมียม, แมกนีเซียม, อะลูมิเนียม, เหล็ก, ทองแดง, สังกะสี, และแมงกานีส อยู่ในปริมาณ 488 มก./ล. , 366 มก./ล. , 27.5 มก./ล. , 241 มก./ล. , 11.2 มก./ล. , 39.1 มก./ล. และ 13.4 มก./ล. ตามลำดับ หลังจากใส่หางน้ำนมวัว ปุ๋ยขี้วัว และเชื้อแบคทีเรียที่เพาะเลี้ยงจากแลคโตส และน้ำจากเหมืองในทรงกระบอก (ใส่ครั้งเดียว) แล้วทุกๆทรงกระบอกจะปิดด้วย Gas-tight rubber o-ring แล้วนำไปเพาะเชื้อที่ 15 °C ในความมืดเป็นเวลา 203 วัน จากผลการศึกษาสรุปได้ว่าหางน้ำนมวัวเป็นตัวกระตุ้นในการย่อยสลายซัลเฟตของแบคทีเรีย เมื่อใส่เข้าไปในระบบโดยทรงกระบอกที่ใส่ 5.7% (Vol / Vol) ของหางน้ำนมวัวรวมกับ 4.5% ของเชื้อแบคทีเรียที่เพาะเลี้ยงจากแลคโตสจะมีค่าพีเอช และความเข้มข้นของซัลเฟตของน้ำที่ 203 วัน เป็น 6 และ 2413 มก./ล. ตามลำดับ ซึ่งจะมีปริมาณซัลเฟตที่ลดลงเป็น 27% โลหะหนักจะถูกกำจัดจากชั้นน้ำหลังจากมีกระบวนการย่อยสลายซัลเฟตเกิดขึ้นโดยที่จะมีความเข้มข้นของแคดเมียม อะลูมิเนียม เหล็ก ทองแดง สังกะสี ในน้ำที่ 203 วันเป็น 8.5, 0, 0, 0, 0 ในหน่วย mM ตามลำดับ แบคทีเรียส่วนใหญ่จะอยู่ในชั้นหินบด ซึ่งจะมีสถานะเจริญเติบโตที่เอื้ออำนวยประโยชน์มากกว่าชั้นน้ำ จำนวนสารประกอบอินทรีย์ที่เดิมเข้าไปควรจะสมดุลกับจำนวนโลหะและความเป็นกรด เพื่อให้แน่ใจว่าโลหะหนักจะถูกกำจัดได้เหมาะสม และหลีกเลี่ยงการมีสารประกอบอินทรีย์และสารอาหารปะปนมากับน้ำที่ออกจากระบบ