

## 4.2 การย่อยสลายสารอินทรีย์

นภาวรณ(2535) กล่าวถึง การย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ แบ่งออกได้เป็น 2 วิธี ดังนี้

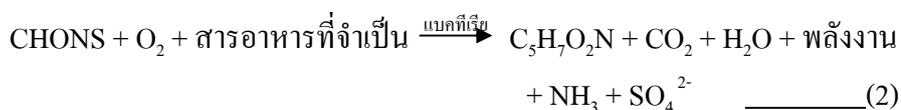
4.2.1 การย่อยสลายแบบต้องการออกซิเจน (aerobic decomposition) ลักษณะของการย่อยสลายสรุปได้ดังนี้

1) จุลินทรีย์จะปรับตัวให้เข้ากับสารอินทรีย์ โดยจุลินทรีย์ที่จะ predominate จะเปลี่ยนไปเรื่อยๆ ขึ้นอยู่กับชนิดของสารอินทรีย์ที่มีอยู่มาก

2) อัตราการย่อยสลายของสารอินทรีย์ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของธาตุอาหาร อย่างอื่นที่มีอยู่ด้วย เช่น สัดส่วนของคาร์บอน (C) ต่อ ไนโตรเจน (N) ต่อ ฟอสฟอรัส (P) ในเซลล์แบคทีเรียมีค่าประมาณ 100 : 10 : 1

3) การย่อยสลายสารอินทรีย์จะดำเนินต่อไปเรื่อยๆ จนกว่าธาตุอาหารที่จำเป็นเริ่มขาดแคลน เช่น ธาตุไนโตรเจน การย่อยสลายจะหยุดเมื่อจุลินทรีย์ใช้คาร์บอน จนอัตราส่วน C:N มีค่าใกล้เคียง 10

ปฏิกิริยาชีวเคมีในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียโดยจุลินทรีย์แบบใช้ออกซิเจนจะได้ผลของปฏิกิริยา คือ สารอินทรีย์จะมีขนาดที่เล็กลงแต่ได้จำนวนจุลินทรีย์ที่เพิ่มขึ้น และได้แกสคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) น้ำ (H<sub>2</sub>O) และธาตุอาหาร เช่น ไนเตรทและฟอสเฟตรวมทั้งได้พลังงานเพิ่มดังสมการที่ (1) หรือสมการที่ (2)



#### 4.2.2 การย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic decomposition)

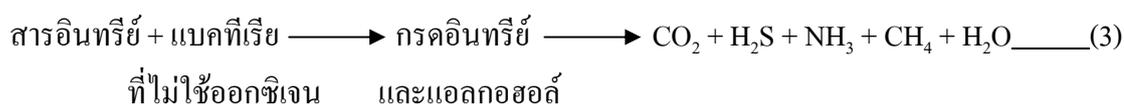
การเกิด aerobic decomposition จะเป็นไประยะหนึ่งซึ่งจะทำให้ปริมาณออกซิเจนลดน้อยลงและถ้าสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายง่ายยังคงมีสูง ปริมาณออกซิเจนจะลดลงจนหมด ทำให้กลายเป็น anaerobic decomposition ซึ่งทำให้แบคทีเรียกลุ่ม anaerobes สามารถใช้คาร์โบไฮเดรตในน้ำเสียเป็นแหล่งพลังงานและแหล่งคาร์บอน ส่วนโปรตีนนั้นแบคทีเรียนำไปใช้ในการเพิ่มจำนวน และใช้  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Mn}^{4+}$ ,  $\text{NO}_3^-$  และ  $\text{SO}_4^{2-}$  เป็นต้น เป็นตัวรับอิเล็กตรอนในปฏิกิริยาการย่อยสลายแทนออกซิเจนในสภาพ anaerobic (ทัศนีย์, 2543) อย่างไรก็ตามพลังงานที่ได้ในสภาพ anaerobic จะน้อยกว่าทำให้ปริมาณเซลล์แบคทีเรียน้อยกว่า และอัตราการย่อยสลายนั้นจะช้าและไม่สมบูรณ์ ซึ่งในการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน สามารถแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน (มงคล, 2531) ดังนี้

1) การย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลใหญ่ โดยสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลใหญ่ที่ไม่สามารถละลายน้ำได้นั้น แบคทีเรียจะไม่สามารถใช้ได้ทันที จึงเกิดขบวนการไฮโดรไลซิส (hydrolysis) โดยแบคทีเรียจะปล่อยเอนไซม์ชนิดหนึ่งที่เรียกว่า extracellular enzyme ออกมาเพื่อทำให้โมเลกุลใหญ่ของสารอินทรีย์แตกตัวเป็นโมเลกุลเล็กๆ ซึ่งสามารถละลายน้ำได้ และแบคทีเรียจะนำผ่านผนังเซลล์เข้าไปเพื่อย่อยสลายได้

2) การสร้างกรดอินทรีย์ ในขั้นนี้แบคทีเรียประเภทสร้างกรดอินทรีย์ (acid former) จะย่อยสลายสารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปสารละลายให้อยู่ในรูปของกรดอินทรีย์ประเภทระเหยง่าย (volatile acid) ซึ่งส่วนใหญ่จะประกอบด้วยกรดอะซิติก (acetic acid) กรดโพรไพโอนิก (propionic acid) และกรดบิวทิริก (butyric acid) แกสคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) แกสไฮโดรเจน ( $\text{H}_2$ ) แกสไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $\text{H}_2\text{S}$ ) และแกสมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) ปริมาณเล็กน้อยอีกด้วย กรดอินทรีย์และแกสไฮโดรเจนซัลไฟด์จะเป็นปัญหาทำให้เกิดกลิ่นและมีผลทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำลดลง

3) การสร้างมีเทน ขั้นตอนนี้แบคทีเรียประเภทสร้างมีเทน (methane former) จะย่อยสลายกรดอินทรีย์ให้อยู่ในรูปของแกสมีเทนและแกสคาร์บอนไดออกไซด์ การย่อยสลายสารอินทรีย์ของแบคทีเรียทั้งสองประเภทดังกล่าวจะทำให้เกิดการเพิ่มจำนวนของเซลล์แบคทีเรียเหล่านั้นจากการสร้างเซลล์ใหม่ด้วย

การย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนจะได้กรดอินทรีย์ (organic acid) และ แอลกอฮอล์ (alcohol) ซึ่งกรดอินทรีย์ ได้แก่ กรดแลคติก กรดอะซิติก แกสคาร์บอน ไดออกไซด์ และน้ำ เป็นต้น ดังแสดงในสมการที่ (3)



การย่อยสลายสารอินทรีย์ทั้งสองลักษณะจะขึ้นอยู่กับปัจจัยในการควบคุมการสลายตัวของสารอินทรีย์ ทั้งปัจจัยภายในคือ องค์ประกอบทางเคมีของสารอินทรีย์ และปัจจัยภายนอก ได้แก่ สภาพแวดล้อม ซึ่งสมศักดิ์ (2528) ได้อธิบายว่า อุณหภูมิ ความชื้น และค่าความเป็นกรด-ด่าง มีผลต่อการทำงานของจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ โดยที่อุณหภูมิต่ำการทำงานของจุลินทรีย์จะช้า (ศุภมาส, 2529) อุณหภูมิสูงจุลินทรีย์จะย่อยสลายสารอินทรีย์ได้เร็วกว่า ซึ่งอุณหภูมิที่จุลินทรีย์จะทำงานได้ดีคือ 30-40 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด-ด่าง ควรอยู่ในช่วงเป็นกรดอ่อนหรือเป็นกลาง (ไพบูลย์, 2528) ส่วนในดินที่มีความชื้นสูงจะทำให้เกิดการสลายตัวของสารอินทรีย์ได้ดีและควรอยู่ในสภาพมีแกสออกซิเจนเพียงพอ แต่ถ้ามีความชื้นสูงเกินไปจะทำให้แกสออกซิเจนละลายอยู่ต่ำ การสลายตัวของสารอินทรีย์จึงไม่ดี ค่าความชื้นของดิน (W.H.C.: water holding capacity) ที่เหมาะสมสำหรับการย่อยสลายสารอินทรีย์คือ 60-80 สำหรับปัจจัยภายในพบว่า สารอินทรีย์ที่มีอัตราส่วนของคาร์บอนกับไนโตรเจนสูง หรือสารอินทรีย์นั้นมีไนโตรเจนอยู่ต่ำ จะเกิดการสลายตัวค่อนข้างช้า ซึ่ง Hammer (1986) ได้กล่าวว่า สารอินทรีย์ในน้ำเสียร้อยละ 60-80 จะถูกย่อยสลายได้ง่ายโดยจุลินทรีย์ แต่สารประกอบอินทรีย์จำพวกเซลลูโลส ผงซักฟอกชนิด ABS และสารกำจัดศัตรูพืชซึ่งมีประมาณร้อยละ 20-40 ในน้ำทิ้งจะถูกย่อยสลายได้ยาก นอกจากนี้ คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา (2544) ได้สรุปว่าจุลินทรีย์ในดินจะย่อยสลายน้ำตาล แป้ง และ simple protein ในอัตราเร็ว และจะย่อยสลาย hemicellulose ในอัตราที่ปานกลาง ส่วน cellulose lignin fat และ wax จะถูกย่อยสลายในอัตราที่ช้า

##### 5. ผลกระทบของน้ำเสียชุมชนต่อสิ่งแวดล้อม

เกษม (2541) ได้สรุปผลกระทบจากความเสื่อมโทรมของคุณภาพน้ำไว้ดังนี้

5.1 การประมง น้ำเสียชุมชนทำให้สัตว์น้ำต่างๆ เช่น ปลา กุ้ง หอย ตายหรือค่อยๆ ลดลง เพราะขาดแก๊สออกซิเจนหรือการลดน้อยถอยลงของออกซิเจน เพราะถูกจุลินทรีย์นำไปใช้ในการหายใจย่อยสลายสารอินทรีย์ให้เป็นสารอนินทรีย์ ส่งผลทำให้ขาดออกซิเจนและไม่สามารถดำรงชีวิตและแพร่พันธุ์ได้ตามธรรมชาติ ส่วนน้ำเสียที่เกิดจากสารเป็นพิษ เช่น สารกำจัดแมลงศัตรูพืช และวัชพืช พบในบริเวณสวนผักและสวนผลไม้ อาจทำให้ปลาตายได้ทันที แต่ก็อาจทำลายสัตว์น้ำเล็กๆ และพืชที่เป็นอาหารของปลาและตัวอ่อนทำให้ปลาขาดอาหาร ในที่สุดปลาก็จะลดจำนวนลงก่อให้เกิดผลเสียหายต่อการประมงยิ่งขึ้น ปริมาณแก๊สออกซิเจนที่ละลายในน้ำถ้าหากลดลงมากๆ ในทันทีก็อาจทำให้ปลาตายได้ นอกจากนี้ น้ำเสียยังทำลายแหล่งเพาะวางไข่ของปลา เนื่องจากการตกตะกอนของสารแขวนลอยในน้ำเสียปกคลุมพื้นที่การวางไข่ของปลา ซึ่งเป็นการหยุดยั้งการแพร่พันธุ์ของสัตว์น้ำได้โดยทางอ้อม น้ำเสียที่ทำให้สภาพตามธรรมชาติของแหล่งน้ำเปลี่ยนแปลงไป เช่น ความร้อนจากน้ำทิ้งใช้ระบบหล่อเย็น (cooling water) จากโรงงานอุตสาหกรรมทำให้อุณหภูมิปกติของแหล่งน้ำเพิ่มขึ้นจนปลาไม่อาจอยู่ได้และไม่อาจแพร่พันธุ์ตามธรรมชาติ น้ำมันที่ทิ้งลงสู่แหล่งน้ำโดยการรั่วไหลจากเรือจะไปปกคลุมผิวน้ำ เพราะปกติน้ำมันจะไม่รวมตัวกับน้ำและมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ ทำให้การเติมออกซิเจนจากอากาศบนผิวน้ำตามธรรมชาติเป็นไปได้ยาก ซึ่งเป็นการขัดขวางการเพิ่มปริมาณออกซิเจนละลายตามธรรมชาติ

5.2 การสาธารณสุข น้ำเสียเป็นอันตรายต่อสุขภาพอนามัยของประชาชน เพราะมักก่อให้เกิดโรคระบาด เช่น อหิวาตกโรค ไข้ไทฟอยด์ โรคบิด เป็นต้น นอกจากนี้ยังทำให้เกิดโรคซึ่งไม่ใช่โรคที่เกิดจากเชื้อโรคเป็นตัวนำ ส่วนใหญ่เป็นน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีมลสารที่เป็นพิษเจือปน สารเป็นพิษเหล่านี้ทำให้เกิดโรคทำลายสุขภาพอนามัยของประชาชนทั้งโดยตรงและโดยอ้อม เช่น โรคมีนามาตะ เกิดจากคนรับประทานปลาที่มีสารปรอทสูง เป็นต้น

5.3 การผลิตน้ำเพื่อการอุปโภคบริโภค น้ำเสียกระทบต่อการผลิตน้ำดื่มเพราะแหล่งสำหรับผลิตประปาส่วนใหญ่ ได้แก่ แม่น้ำ ลำคลอง เมื่อแหล่งน้ำเกิดเน่าเสีย คุณภาพน้ำลดลงค่าใช้จ่ายในขบวนการผลิตเพื่อให้ได้น้ำที่มีคุณภาพเข้าเกณฑ์มาตรฐานน้ำดื่มก็ต้องเพิ่มขึ้น เมื่อแหล่งน้ำเสียเพิ่มขึ้น การเลือกแหล่งน้ำเพื่อการประปาก็ยิ่งยากขึ้นและสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายมากขึ้น

5.4 การเกษตรกรรม น้ำเสียที่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อการเกษตรที่เกี่ยวกับการผลิตพืช ส่วนใหญ่เป็นน้ำเสียที่มีความเค็มและมีโซเดียมสูง มีความเป็นกรด-ด่างสูง มีปริมาณเกลืออนินทรีย์สูงหรือสารเป็นพิษปะปนอยู่ แต่ถ้าวางการเกษตรที่เกี่ยวกับการเลี้ยงสัตว์มักเกี่ยวข้องกับการปนเปื้อน

ของสิ่งขับถ่ายของสัตว์ทั้งอุจจาระและปัสสาวะซึ่งมีโอกาสปนเปื้อนแหล่งน้ำในประเทศเรามากที่สุด เพราะการเลี้ยงสัตว์แบบธุรกิจมักเลี้ยงใกล้แม่น้ำเนื่องมาจากต้องใช้น้ำมาก

5.5 ความสวยงามและการพักผ่อนหย่อนใจ แม่น้ำลำธาร แหล่งน้ำอื่นๆ ที่สะอาด เป็นความสวยงามตามธรรมชาติ ผู้คนใช้เป็นสถานที่พักผ่อนหย่อนใจ ในการว่ายน้ำ ตกปลา เล่นเรือ และอื่นๆ ถ้าหากแหล่งน้ำเหล่านี้เกิดการเน่าเสียหรือปล่อยให้มีขยะลอยอยู่ เช่น กulong โฟม ขยะพลาสติก เป็นต้น ก็ไม่เหมาะสมต่อการใช้เป็นสถานที่พักผ่อนหย่อนใจ และยังเป็นอันตรายต่อสภาพจิตและสุขภาพของประชาชนที่อาศัยอยู่บริเวณแหล่งน้ำเน่าเสียอีกด้วย

### ลักษณะและคุณสมบัติบางประการของน้ำเสียชุมชนเทศบาลเมืองเพชรบุรี

ปริมาณน้ำเสียของแต่ละชุมชนมีความสำคัญต่อการออกแบบระบบระบายน้ำและระบบบำบัดอย่างยิ่ง โดยปกติปริมาณน้ำเสียในแต่ละชุมชนนั้นขึ้นอยู่กับจำนวนประชากร และกิจกรรมการประกอบอาชีพของประชากรในชุมชน (ไชยยุทธ, 2536) ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วประมาณร้อยละ 70 ถึง 90 ของน้ำประปาที่ใช้จะกลายเป็นน้ำเสียระบายลงสู่ท่อระบายน้ำทิ้ง ส่วนที่หายไป ได้แก่ น้ำที่ใช้ในการรดน้ำต้นไม้ การล้างถนน การล้างรถ เป็นต้น

บุปผา และคณะ (2537) ได้กล่าวถึงน้ำเสียชุมชนเทศบาลเมืองเพชรบุรีไว้ว่า ลักษณะทั่วไปของเทศบาลเมืองเพชรบุรี ประกอบด้วยสองตำบล คือ ตำบลท่าลาด และตำบลคลองกระแซง มีประชากรอาศัยอยู่หนาแน่นกว่า 8,000 หลังคาเรือน มีประชากรอยู่ประมาณ 40,000 คน มีปริมาณน้ำเสียประมาณ 3,000 – 3,500 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน น้ำเสียส่วนใหญ่มาจากอาคารบ้านเรือน โรงเรียน ร้านค้าส่วนราชการ และที่สำคัญที่สุด คือ ตลาด และโรงฆ่าสัตว์ รวมทั้งโรงงานขนมหวาน ซึ่งส่วนใหญ่จะทิ้งน้ำที่ชำระสิ่งปฏิกูลต่างๆ ลงในท่อเทศบาล ปริมาณน้ำเสียชุมชนเทศบาลเมืองเพชรบุรีเฉลี่ยต่อวัน และค่าความสกปรกในรูป BOD<sub>5</sub> ดังรายละเอียดในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปริมาณน้ำเสียและค่าความสกปรกในรูป BOD<sub>5</sub> เฉลี่ยต่อวันของเทศบาลเพชรบุรี

ปี	ปริมาณน้ำเสียเฉลี่ยต่อวัน (ลูกบาศก์เมตร)	ค่าความสกปรกในรูป BOD <sub>5</sub> (มิลลิกรัมต่อลิตร)
2540	3833.20	-
2541	3204.30	44.40
2542	3158.60	51.90
2543	3598.60	61.90
2544	3060.30	68.90

ที่มา: มูลนิธิชัยพัฒนา (2547)

### การบำบัดน้ำเสียโดยใช้ระบบดินน้ำข้างสลับแห้งร่วมกับพืช

หลักการบำบัดน้ำเสียชุมชน โดยใช้ระบบน้ำข้างสลับแห้งจะมีความสัมพันธ์ระหว่างดิน น้ำ และพืช ได้ประยุกต์หลักของระบบนิเวศดินนามาใช้ในการบำบัดน้ำเสีย โดยมีกลไกการบำบัดดังนี้

#### 1. กลไกการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบดินน้ำข้างสลับแห้งร่วมกับพืช

หลักการบำบัดน้ำเสียโดยใช้ระบบน้ำข้างสลับแห้งจะมีความสัมพันธ์ระหว่างดิน น้ำ และพืช โดยการปล่อยให้ดินน้ำข้างสลับแห้งอยู่ระยะเวลาหนึ่งแล้วระบายน้ำออกให้แห้ง (flooding and drying) เป็นรอบๆ ไป การบำบัดน้ำเสียระบบนี้เป็นการนำหลักของระบบนิเวศดินนามาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและชีววิทยาที่เกิดขึ้นสองแบบในแต่ละรอบของการทดลองบำบัดน้ำเสีย กล่าวคือสภาพที่มีแกสออกซิเจน (aerobic หรือ oxidative) เมื่อก่อนมีการขังน้ำ และเมื่อมีการระบายน้ำออกแล้วปล่อยให้ดินแห้ง และสภาพที่ไร้แกสออกซิเจน (anaerobic หรือ reductive) เมื่อมีการปล่อยน้ำเข้าแปลงแล้วขังน้ำไว้ก็จะเกิดสภาพไร้แกสออกซิเจนทำให้เกิดการสะสมธาตุอาหารพืชในรูปที่พืชใช้ประโยชน์ได้ และถ้าหากปล่อยให้อยู่ในสภาพที่ขังน้ำที่นานขึ้นก็จะทำให้เกิดความเป็นพิษต่อพืชได้ (ไพบูลย์, 2528) การขังน้ำทำให้เกิดสภาพไร้แกสออกซิเจน เพราะทันทีที่ดินมีน้ำข้างจะเกิดการลดน้อยถอยลงของแกสออกซิเจนในดินจนปราศจากแกสออกซิเจนในที่สุด เพราะน้ำที่ขังอยู่ในบริเวณหน้าดินจะป้องกันแกสออกซิเจนจากบรรยากาศไม่ให้

ซึมผ่านลงไปในดินได้ ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการแพร่กระจายของโมเลกุลแก๊สออกซิเจนผ่านน้ำนิ่งช้ากว่าในอากาศมากกว่า 10,000 เท่า จากนั้นแก๊สออกซิเจนที่ถูกกักไว้ตามช่องว่างดินที่ถูกน้ำท่วมขังจะถูกจุลินทรีย์ที่ใช้แก๊สออกซิเจน (aerobic microorganism) และจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ได้ทั้งในสภาพที่มีแก๊สออกซิเจนและไร้ออกซิเจน (facultative microorganism) นำมาใช้เพื่อการหายใจหมดไปอย่างรวดเร็วและยังคงมีกิจกรรมต่อไป (Ponnamperuma, 1972; ไพบูลย์, 2528 และทัศนีย์, 2543) โดยใช้สารประกอบต่างๆ ในดินซึ่งมีระดับเลขออกซิเดชันสูงเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ซึ่งได้มาจากอินทรีย์วัตถุในดินรวมทั้งเศษพืชในดินเป็นตัวให้อิเล็กตรอนก่อให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันต่างๆ (Ponnamperuma, 1976) สารประกอบที่มีความสามารถในการเป็นตัวรับอิเล็กตรอนในดิน ได้แก่ ไนเตรท ( $\text{NO}_3^-$ ), แมงกานีสออกไซด์ ( $\text{MnO}_2$ ), เฟอริกไฮดรอกไซด์ ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ), ซัลเฟต ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) และกรดไพรูวิก (pyruvic acid) ซึ่งได้มาจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ต่างๆ ตามลำดับทางเทอร์โมไดนามิกส์ ดังแสดงในตารางที่ 2 โดยที่เคมีพลศาสตร์ของการเกิดรีดักชัน และชนิด ตลอดจนปริมาณของสารที่ได้จากการเกิดรีดักชันขึ้นอยู่กับปัจจัย 5 ประการ คือ (1) ธรรมชาติและปริมาณของอินทรีย์วัตถุหรือตัวให้อิเล็กตรอน (2) อุณหภูมิ (3) ความเป็นกรด-ด่าง (4) ปริมาณและตัวรับอิเล็กตรอน และ (5) ช่วงเวลาที่ขังน้ำ

ตารางที่ 2 ลำดับของปฏิกิริยารีดักชันที่เกิดในดินน้ำขัง

system	$E^0_7$ (V)
$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- = 2\text{H}_2\text{O}$	0.814
$2\text{NO}_3^- + 12\text{H}^+ + 10\text{e}^- = \text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$	0.741
$\text{MnO}_2 + 4\text{H}^+ + 2\text{e}^- = 6\text{H}_2\text{O}$	0.401
$\text{CH}_3\text{COCOOH} + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{H}_3\text{CHOHCOOH}$	-0.158
$\text{Fe}(\text{OH})_3 + 3\text{H}^+ + \text{e}^- = \text{Fe}^{2+} + 3\text{H}_2\text{O}$	-0.185
$\text{SO}_4^{2-} + 10\text{H}^+ + 8\text{e}^- = \text{H}_2\text{S} + 4\text{H}_2\text{O}$	-0.214
$\text{CO}_2 + 8\text{H}^+ + 6\text{e}^- = \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$	-0.244
$\text{N}_2 + 8\text{H}^+ + 6\text{e}^- = 2\text{NH}_4^+$	-0.278
$\text{NADP}^+ + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{NADPH}$	-0.317
$\text{NAD}^+ + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{NADH}$	-0.329
$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{H}_2$	-0.413
$\text{Ferredoxin (Ox)} + \text{e}^- = \text{Ferredoxin (Red)}$	-0.431

ที่มา: Ponnamperuma (1976)

## 2. การประยุกต์การเปลี่ยนแปลงของดินนํ้าขังสลับแห้งเพื่อใช้ในการบำบัดนํ้าเสีย

การบำบัดนํ้าเสียชุมชนซึ่งมีสารอินทรีย์เป็นมลสารหลัก คือ มีค่า BOD สูง โดยการนำทฤษฎีของการเปลี่ยนแปลงในดินนํ้าขังเมื่อร่วมกับพืชที่ทนนํ้าขังได้นั้นมีความเป็นไปได้สูง เพราะในดินนํ้ามี aerobe อยู่แล้ว โดยเฉพาะ facultative anaerobes นั้นควรจะได้รับการนำมาเอาไปใช้ เมื่อนํ้าเสียชุมชนมีสารอินทรีย์ซึ่งเป็นอาหารของจุลินทรีย์ทุกชนิดนั้นถูกปล่อยลงไปให้ท่วมขังดิน โดยเฉพาะดินนํ้าซึ่งควรจะมีความอินทรีย์ในรูป amorphous ของธาตุต่างๆ อยู่มาก โดยเฉพาะ Active Fe ซึ่งสกัดได้ด้วยนํ้ายา ammonium oxalate (Prabuddham, 1975) นอกจากนี้ดินนํ้ายังมีธาตุอาหารพืชทุกชนิดปนอยู่ด้วยมาก เพราะธาตุอาหารพืชส่วนใหญ่มีความสัมพันธ์ทางบวกกับอนุภาคดินเหนียว (ไพบูลย์, 2528) และมี Fe-P ซึ่งเป็น สารอินทรีย์ฟอสเฟตหลัก Fe-P นี้ จะเป็นประโยชน์ต่อพืชและจุลินทรีย์ได้เป็นอย่างดีเมื่อดินนํ้ามีนํ้าขัง เพราะ Fe-P ก็เป็นตัวรับอิเล็กตรอนได้ง่าย (Phongphan, 1977) ดินนํ้าที่เป็นกรดเมื่อมีนํ้าขังแล้วระยะหนึ่งจะมี pH สูงขึ้น และมีความเป็น buffer ด้วย เนื่องจากมี clay อยู่มาก แต่ถ้าหากขังนํ้าไว้นานขึ้นกิจกรรมของจุลินทรีย์โดยรวมอาจน้อยลงได้เพราะ facultative anaerobes กิจกรรมส่วนใหญ่จึงคงตกอยู่กับ obligate anaerobes ดังนั้นถ้าหากขังนํ้าไว้ระยะหนึ่ง เพื่อให้ facultative anaerobes ใช้สารอินทรีย์ในนํ้าเสียนั้นเป็นทั้งอาหารและเป็นตัวให้อิเล็กตรอน หรือเป็นแหล่งของพลังงาน แล้วใช้เหล็ก  $Fe(OH)_3$  และหรือ  $NO_3^-$  และ  $MnO_2$  เป็นตัวรับอิเล็กตรอนในขบวนการหายใจแบบไร้ออกซิเจนให้กลายเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หายใจ และกลายเป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์ภายในเซลล์ของแบคทีเรีย ค่า BOD ของนํ้าที่บำบัดแล้วจึงลดลง แล้วจึงระบายนํ้าที่ผ่านการบำบัดแล้วออกไปให้แห้งจนดินแตกกระแหว่งลึก 2-3 วัน เพื่อให้สารประกอบ Fe(II) ถูกเปลี่ยนกลับไปเป็น Fe(III) ก็ควรจะทำให้ facultative anaerobes นั้นทำงานได้ตลอดไป เนื่องจากสารอินทรีย์ถ้ามาจากเศษอาหารนั้นจะมีธาตุที่สำคัญอยู่ 6 ธาตุ คือ C H O N P และ S ดังนั้น นอกจาก facultative anaerobes จะช่วยกำจัด organic C H O แล้วยังจะทำหน้าที่เปลี่ยน organic N P S ในนํ้าเสียนั้นและในดินด้วยให้กลายเป็น  $NH_4-N$  และ  $H_2PO_4-P$  ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อพืช แต่ organic S จะถูกเปลี่ยนเป็น  $H_2S$  ซึ่งเป็นพิษต่อพืช แต่แก๊สนี้ก็จะไม่คงอยู่นาน เพราะจะทำปฏิกิริยากับ  $Fe^{++}$  กลายเป็น  $FeS$  ตกตะกอนไปหมด นอกจากนั้นดินเหนียวที่มีอยู่ในดินยังจะช่วยดูดซับไอออนต่างๆ ทั้ง cations และ anions ได้ด้วย เนื่องจากอนุภาคดินเหนียวนี้จะดูดซับ humus ด้วยและ humus นี้จะสามารถดูดซับ anions ได้ด้วย ประจุบวกที่เกิดจาก protonation (ไพบูลย์, 2538) และ โดยเฉพาะโลหะหนักที่ถูกดินดูดซับไว้นั้น อาจทำให้ประสิทธิภาพของการบำบัดลดลงได้ ดังนั้นจึงควรจะต้องปลูกพืชที่ทนนํ้าท่วมได้เอาไปดูดซับไอออนต่างๆ รวมทั้งโลหะหนักที่อยู่ในรูป metal chelate ให้หายไปจากระบบดินด้วย ถ้าหาก

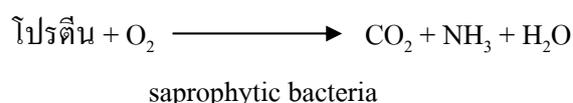
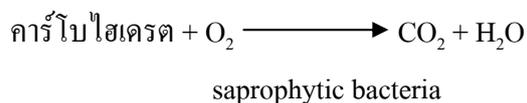
เก็บเกี่ยวพืชที่ปลูกเมื่อถึงเวลาที่เหมาะสมออกไปก็เท่ากับเป็นการนำเอาผลสารอื่นๆ ที่มีใช้ organic C ออกไปจากระบบดินด้วย แต่การปล่อยให้ น้ำเสียท่วมขังลงไปดินนา หรือป่าชายเลนเสื่อมโทรมที่มีปริมาณ Clay สูงมากโดยตรงนั้นคงจะเสียเวลามาก เพื่อระบายน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วออกให้หมด และเพื่อให้ น้ำเสียใหม่ลงไปบำบัดอีก ประกอบกับดินเหล่านี้ที่อยู่ในที่ลุ่มจึงเป็นการยากที่จะระบายน้ำที่บำบัดแล้วออกจากดิน การใช้ดินนาและดินป่าชายเลนบำบัดน้ำเสียโดยตรงจึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้บำบัดน้ำเสีย เพราะทุกๆ วันจะต้องมีน้ำเสียถูกปล่อยออกมามาก ดังนั้นดินที่ควรจะเหมาะต่อการนำมาใช้บำบัดจึงควรจะเป็นดิน loam เพราะมีช่องว่างขนาดใหญ่มากพอที่จะให้น้ำเสียซึมลงไปดินจนน้ำท่วมขังได้ในเวลาไม่นานเกินไป และยังมี clay ซึ่งมีคุณสมบัติดังกล่าวแล้วในปริมาณที่พอสมควร

### 3. ดัชนีที่ควรจะใช้ชี้วัดประสิทธิภาพของการบำบัด

#### 3.1 บีโอดี (Biochemical Oxygen Demand, BOD)

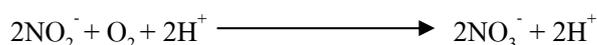
กรรณิการ์ (2544) ได้อธิบายความหมายของคำว่า Biochemical Oxygen Demand (BOD) ไว้ว่าเป็นปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ต้องการใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ชนิดที่ย่อยสลายได้ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจน การย่อยสลายนี้อยู่ในรูปของกระบวนการออกซิเดชันซึ่งจะได้พลังงานที่จุลินทรีย์นำไปใช้ในการเจริญเติบโตและแบ่งตัวต่อไป ผลิตภัณฑ์สุดท้ายของการออกซิเดชันอาจเป็น คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ หรือแอมโมเนีย ขึ้นอยู่กับชนิดของสารอาหาร การออกซิเดชันของจุลินทรีย์แบ่งออกเป็น 2 ระยะ ดังนี้

ระยะที่ 1 เป็นการออกซิเดชันของสารประกอบคาร์บอน ดังสมการ



ปริมาณออกซิเจนในตัวอย่างที่ลดลงเนื่องจากจุลินทรีย์ใช้ไปในกระบวนการออกซิเดชัน คือ ค่า BOD

ระยะที่ 2 เป็นการออกซิเดชันของแอมโมเนีย ไปเป็นไนไตรท์ และไนเตรท ดังสมการ



ปฏิกิริยานี้เกิดโดย nitrifying bacteria ซึ่งมีอยู่น้อยในน้ำเสีย และที่อุณหภูมิ 20 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ใช้ในการหาค่า BOD แบบที่เรียเหล่านี้จะมีการแบ่งตัวน้อยมาก ดังนั้น ปริมาณออกซิเจนที่แบคทีเรียพวกนี้ใช้ในช่วงระยะเวลา 5 วัน ซึ่งเป็นเวลาที่ใช้ในการหาค่า BOD จึงน้อยมาก หลังจากเวลาผ่านไป 10 วัน แบคทีเรียเหล่านี้จะมีจำนวนมากพอที่จะใช้ออกซิเจนในการออกซิไดส์สารแอมโมเนียในน้ำเสีย

การหาค่า BOD เป็นวิธีการวิเคราะห์ทางชีวภาพ (bioassay procedure) เกี่ยวข้องกับการวัดปริมาณออกซิเจนซึ่งจุลินทรีย์ใช้ย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียภายใต้สภาวะที่เหมือนเกิดในธรรมชาติที่สุด การที่จะให้การทดสอบเป็นปริมาณวิเคราะห์ ต้องป้องกันไม่ให้ตัวอย่างสัมผัสกับอากาศเพื่อไม่ให้เกิดการเติมออกซิเจนหรือสูญเสียออกซิเจนที่ละลายในน้ำ เนื่องจากการละลายของออกซิเจนในน้ำมีขีดจำกัด คือ ประมาณ 9 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ 20 °C ดังนั้นน้ำเสียที่สกปรกมากจะต้องถูกนำมาเจือจางจนถึงระดับที่แน่ใจว่าจะมีออกซิเจนในน้ำเหลืออยู่ตลอดช่วงเวลาของการทดลองและเนื่องจากวิธีการหาเป็นวิธีการทางชีวภาพซึ่งเกี่ยวข้องกับสิ่งมีชีวิต สิ่งที่สำคัญที่สุดคือ สภาวะแวดล้อมที่ใช้จะต้องเหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของจุลินทรีย์เพื่อที่จะทำหน้าที่ได้ สภาวะที่กล่าวนี้คือ ไม่มีสารพิษ มีสารอาหารที่จำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และธาตุจำเป็นบางตัว ซึ่งต้องการในปริมาณน้อย การย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะตามธรรมชาติจะเกิดขึ้นโดยกลุ่มของจุลินทรีย์หลากหลายชนิดซึ่งจะทำให้เกิดการออกซิเดชันอย่างสมบูรณ์นั่นคือ ได้เป็น CO<sub>2</sub> และ H<sub>2</sub>O

วิธีที่ใช้หา BOD จัดเป็นวิธี wet oxidation มีแบคทีเรียทำหน้าที่ออกซิไดซ์สารอินทรีย์ไปเป็น  $\text{CO}_2$  และ  $\text{H}_2\text{O}$  ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณออกซิเจนที่ต้องการเพื่อเปลี่ยนสารอินทรีย์ที่มีอยู่ไปเป็น  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  และ  $\text{NH}_3$  อาจแสดงได้ดังสมการ



จากความสัมพันธ์ดังกล่าว จึงสามารถรายงานผลการปฏิกิริยาของสารอินทรีย์ให้อยู่ในรูปของปริมาณออกซิเจนที่ใช้ในระหว่างการเกิดออกซิเดชัน หรือ ค่า BOD นั้นเอง เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกี่ยวข้องในการหาค่า BOD เป็นผลของกิจกรรมทางชีวภาพของแบคทีเรีย ดังนั้นอัตราของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นขึ้นอยู่กับจำนวนแบคทีเรีย อุณหภูมิ และเวลา ในการเกิดปฏิกิริยาโดยทางทฤษฎีใช้เวลานานเพื่อให้ถึงจุดที่สมบูรณ์แต่ในทางปฏิบัติให้ถือว่าในเวลา 21 วันการย่อยสลายจะเกิดอย่างสมบูรณ์ อย่างไรก็ตามเวลา 21 วัน นับว่านานเกินไปที่จะรอผลการทดลอง ดังนั้นในการหาค่า BOD มาตรฐานจะใช้การบ่มที่อุณหภูมิ 20 °C เป็นเวลา 5 วัน สาเหตุที่ใช้อุณหภูมิและเวลาดังกล่าวก็เพราะเป็นอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิของแหล่งน้ำทั่วไป และ nitrifying bacteria เจริญเติบโตได้ช้าที่อุณหภูมินี้ ส่วนการเลือกใช้เวลาการบ่ม 5 วัน เพราะถ้าเวลาน้อยกว่านี้ปริมาณออกซิเจนที่ถูกใช้ไปจะน้อยมากทำให้เกิดความผิดพลาดได้ และเพื่อหลีกเลี่ยงการใช้ของออกซิเจนของ nitrifying bacteria ประการสุดท้ายถ้าเวลาการบ่มนานเกินไปอาจไม่ทันกับการที่จะปล่อยน้ำเสียต่างๆ ลงแม่น้ำลำคลอง ค่า BOD ที่ใช้เวลาในการบ่ม 5 วัน ใช้สัญลักษณ์แทนด้วย  $\text{BOD}_5$

สำหรับการหาค่า BOD มีพื้นฐานมาจากค่าออกซิเจนละลายน้ำ (dissolved oxygen, DO) โดยค่า BOD จะเป็นผลต่างของค่า DO ในวันเริ่มต้น ซึ่งเรียกกันว่า day zero ( $\text{DO}_0$ ) กับค่า DO ของตัวอย่างเดียวกันนั้นภายหลังจากการบ่ม (incubate) ที่อุณหภูมิ 20 °C ถ้าทำการบ่มไว้เป็นเวลา 5 วัน ก็คือ  $\text{DO}_5$  มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร (mg/l) ดังนั้น  $\text{BOD}_5 = \text{DO}_0 - \text{DO}_5$

การหาค่า BOD ของน้ำนั้นแบ่ง ออกเป็น 2 วิธี ขึ้นอยู่กับความสกปรกของตัวอย่างน้ำ

### วิธีที่ 1 Direct method

ใช้กับน้ำตัวอย่างที่มีความสกปรกน้อย คือ มีค่า  $BOD_5$  ไม่เกิน 7 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนใหญ่เป็นน้ำจากแม่น้ำวิธีนี้ไม่จำเป็นต้องเจือจางตัวอย่างน้ำเพียงแต่ต้องเติมอากาศเพื่อให้ระดับ DO ในตอนเริ่มต้นใกล้สภาวะอิ่มตัว โดยจะคำนวณค่า  $BOD_5$  จากสมการ  $BOD_5 = DO_0 - DO_5$

### วิธีที่ 2 Dilution method

ใช้กับตัวอย่างน้ำที่มีความสกปรกมาก เช่น น้ำเสียจากบ้านเรือน ที่อยู่อาศัย โรงงานอุตสาหกรรม น้ำเสียเหล่านี้มีค่า  $BOD_5$  เกิน 7 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยค่าเฉลี่ยของ  $BOD_5$  ในน้ำเสียชุมชนของประเทศไทย ประมาณ 132 – 140 มิลลิกรัมต่อลิตร (เสริมพลและไชยยุทธ์, 2524) ดังนั้นถ้าไม่ทำให้เจือจางลงปริมาณออกซิเจนในตัวอย่างจะไม่พอที่จะใช้ย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำ นั่นคือ วัดค่า  $DO_5$  ไม่ได้ เนื่องจากเป็นศูนย์ ดังนั้น จึงต้องทำให้ตัวอย่างน้ำเจือจางก่อน ซึ่งวิธีนี้เป็นการหาค่า BOD โดยอาศัยหลักที่ว่า อัตราการย่อยสลายของสารอินทรีย์เป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณของสารอินทรีย์ที่ยังไม่ถูกออกซิไดส์ หรือที่เหลือ ณ เวลานั้นๆ ดังนั้น อัตราของการใช้ออกซิเจนในตัวอย่างที่เจือจางแล้ว ก็จะเป็นอัตราส่วนโดยตรงกับเปอร์เซ็นต์ของตัวอย่างในการเจือจาง เช่น ในการเจือจาง 10% จะใช้ออกซิเจนในอัตราส่วน 1/10 ของตัวอย่างที่ไม่ได้เจือจาง โดยการเจือจางมี 2 วิธี คือ

วิธีที่ 1 percent mixture โดยนำตัวอย่างมาทำการเจือจางตามค่าเปอร์เซ็นต์ที่เลือกก่อนแล้วจึงทดลองวัด BOD ให้เต็ม

วิธีที่ 2 direct pipetting โดยปิเปตตัวอย่างที่ทราบปริมาตรแน่นอนลงในขวด BOD โดยตรง แล้วจึงเติมน้ำที่ใช้ในการเจือจางลงจนเต็มขวด

ส่วนใหญ่นิยมใช้วิธีที่ 1 เพราะให้ผลการวิเคราะห์ที่แม่นยำกว่า ในการหาค่า BOD ของตัวอย่างถ้าทราบค่าโดยประมาณก่อนจะทำให้สะดวกในการทำการเจือจางมาก อาจประมาณค่า BOD ได้จากค่า COD (chemical oxygen demand) ปกติแล้ว BOD จะมีค่าประมาณ 60% ของค่า COD

ขวดที่ใช้ในการบ่ม (incubation bottle) ควรเป็นขวดแก้วซึ่งมีจุกปิดเฉพาะเพื่อป้องกันไม่ให้อากาศเข้าไปได้ ขวดที่ใช้จะต้องสะอาดไม่มีสารอินทรีย์อยู่ ควรล้างด้วย chromic acid หรือ ผงซักฟอก ถ้าใช้อย่างหลังควรล้างด้วยน้ำร้อนอีกครั้งเพื่อกำจัด nitrifying bacteria ซึ่งอาจติดอยู่ที่ ด้านในของขวดแล้วล้างด้วยน้ำกลั่นจนสะอาด

ในการคำนวณหาค่า BOD (calculation of BOD) จากวิธีการเจือจางทำได้โดยใช้สมการต่อไปนี้

สำหรับวิธี percent mixture

$$BOD_5 \text{ (mg/l)} = (DO_0 - DO_5) \times (100 / \% \text{ mixture})$$

เมื่อ  $DO_0 = DO$  ของตัวอย่างที่ทำ การเจือจางแล้ว และหาค่า  $DO$  ทันที  $DO_5 = DO$  ของตัวอย่างที่ทำ การเจือจางแล้วบ่มไว้เป็นเวลา 5 วัน เช่น ถ้าใช้ 5% mixture ค่า  $DO_0 = 8.0 \text{ mg/l}$   $DO_5 = 3.5 \text{ mg/l}$

$$\begin{aligned} \text{ค่า } BOD_5 &= (8.0 - 3.5) \times (100/5) \\ &= 4.5 \times 20 \\ &= 90 \text{ mg/l} \end{aligned}$$

สำหรับวิธี direct pipetting

$$BOD_5 \text{ (mg/l)} = (DO_0 - DO_5) \times (\text{volume of bottle} / \text{ml sample})$$

เช่น ถ้าใช้ปริมาตรตัวอย่าง 2.0 ml ค่า  $DO_0 = 8.0 \text{ mg/l}$   $DO_5 = 3.5 \text{ mg/l}$

$$\begin{aligned} \text{ค่า } BOD_5 &= (8.0 - 3.5) \times (300 / 2.0) \\ &= 4.5 \times 150 \\ &= 675 \text{ mg/l} \end{aligned}$$

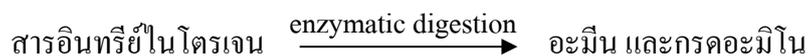
### 3.2 ไนโตรเจน

ไนโตรเจนเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิต ไนโตรเจนในน้ำส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของสารอนินทรีย์ ทั้งโปรตีนและสารคล้ายโปรตีน ซึ่งบางส่วนจะถูกผู้ย่อยสลายเปลี่ยนให้เป็นสารอนินทรีย์ไนโตรเจนที่สำคัญ คือ แอมโมเนียม สารอนินทรีย์ไนโตรเจนในระบบนิเวศเริ่มต้นมาจากดิน (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2544) ซึ่งเป็นแหล่งธาตุอาหารหลักของพืช เพราะรากพืชจะดูดไนโตรเจนไปใช้ได้ก็ต่อเมื่ออยู่ในรูปของอนินทรีย์ไนโตรเจน ได้แก่ แอมโมเนียม ( $\text{NH}_4^+$ ) และไนเตรท ( $\text{NO}_3^-$ ) สำหรับแหล่งที่มาของไนโตรเจนในน้ำตามธรรมชาตินั้น ประมาณ (2531) ได้สรุปแหล่งที่มาของไนโตรเจนดังนี้ คือ (1) การได้มาของไนโตรเจนในบรรยากาศเกิดขึ้นเนื่องจากฟ้าผ่าทำให้ได้ไนเตรทเกิดขึ้น (2) การตรึงไนโตรเจนในดินของจุลินทรีย์ (3) น้ำใต้ดินและน้ำพุ และนอกจากการได้มาของไนโตรเจนในแหล่งธรรมชาติแล้ว ไนโตรเจนยังได้มาจากกิจกรรมของมนุษย์ คือ มาจากแหล่งชุมชน Symons (1970) กล่าวว่า ไนโตรเจนในน้ำเสียชุมชนในเขตเมืองมาจากสิ่งปฏิกูลของคน น้ำฝน และของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม สำหรับในเขตชนบทมาจากทุ่งนา ฟาร์มเลี้ยงสัตว์ น้ำฝน การนำปุ๋ยของซากพืช อินทรีย์สารในดินและการใช้ปุ๋ยของเกษตรกร

การเปลี่ยนแปลงรูปของสารประกอบไนโตรเจนนั้นมีส่วนเกี่ยวข้องกับพืชและสัตว์น้ำ โดยอนินทรีย์ไนโตรเจนที่ถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำมากเกินไป จะทำให้เกิดปัญหาการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วของพืชน้ำและสาหร่ายที่เรียกว่า ยูโทรฟิเคชัน (eutrophication) ปัญหานี้จะเกิดขึ้นได้ถ้ามีความเข้มข้นของสาร อนินทรีย์ฟอสฟอรัสและสารอนินทรีย์ไนโตรเจนเกิน 0.01 และ 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (Metcalf and Eddy, 1991) ผลของยูโทรฟิเคชันจะทำให้น้ำมีความขุ่น เกิดกลิ่นเหม็น และทำให้แก๊สออกซิเจน ละลายน้ำลดลง ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ การเปลี่ยนแปลงรูปของสารประกอบไนโตรเจนจากแหล่งต่างๆ ที่เข้ามาในระบบนิเวศจะมีกระบวนการเปลี่ยนแปลงจากสารอินทรีย์ไปเป็นสารอนินทรีย์ และจากสารประกอบอนินทรีย์ไปเป็นสารอนินทรีย์ กระบวนการเหล่านี้เกิดขึ้นส่วนใหญ่เป็นกระบวนการทางชีววิทยา (biological process) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ต้องมีเอนไซม์หรือจุลินทรีย์เข้ามาเกี่ยวข้องจึงจะเกิดขึ้นได้ คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา (2544) ได้สรุปการแปรสภาพของไนโตรเจนไว้ดังนี้

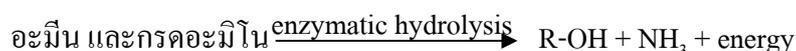
3.2.1 อะมิไนเซชัน (aminization) เป็นกระบวนการย่อยสลายสารประกอบโปรตีน โดยจุลินทรีย์พวกที่สร้างอาหารเองไม่ได้ (heterotroph) กระบวนการย่อยสลายนี้เป็นแบบ enzymatic

digestion ซึ่งจะเปลี่ยนสภาพของโปรตีนให้เป็นสารประกอบในโตรเจน พวก amino compound ต่างๆ เช่น proteose และ peptone จนในที่สุดก็จะเปลี่ยนต่อไปอีกเป็นพวกอะมีน (amine) และ กรดอะมิโน (amino acid) ต่างๆ กระบวนการอะมีนในเซชันนี้สามารถเขียนได้ดังสมการ



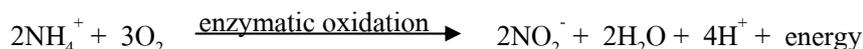
จุลินทรีย์ได้พลังงานจากกระบวนการย่อยสลายโปรตีน ส่วนสารประกอบอะมีน และกรดอะมิโนที่เกิดขึ้นนั้น บางส่วนจะถูกนำมาสร้างเซลล์ของพืชและจุลินทรีย์และบางส่วนจะถูกแปรสภาพต่อไปอีกกลายเป็นสารประกอบในโตรเจนในรูปอื่น โดยกระบวนการที่เรียกว่า ammonification

3.2.2 แอมโมนิฟิเคชัน (ammonification) เป็นกระบวนการเปลี่ยนสารประกอบพวก อะมีนและกรดอะมิโนให้เป็นแอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ) แอลกอฮอล์ ( $\text{R-OH}$ ) และพลังงาน (energy) โดย จุลินทรีย์พวก heterotroph ดังสมการ

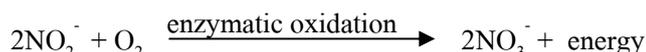


แอมโมเนียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการนี้จะทำปฏิกิริยากับน้ำกลายเป็น แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์แล้วแตกตัวเป็นแอมโมเนียมไอออนและไฮดรอกซิลไอออน ไฮดรอกซิล ไอออนทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนไอออนซึ่งมาจากกรดอินทรีย์ต่างๆ ที่ได้จากการย่อยสลาย คาร์โบไฮเดรตกลายเป็นน้ำ ส่วนแอมโมเนียมไอออนนั้นก็จะถูกเปลี่ยนแปลงต่อไปอีกและมีทาง เปลี่ยนแปลงได้ 4 ทางคือ (1) จุลินทรีย์นำไปใช้ (2) พืชนำไปใช้ โดยเฉพาะพืชที่ยังอ่อนๆ อยู่ เช่น ต้นกล้าของข้าว จะเจริญเติบโตได้ดีเมื่อได้รับไนโตรเจนในรูปแอมโมเนียม (3) ถูกตรึงอยู่ระหว่าง ผลึกของอนุภาคแร่ดินเหนียว (4) ถูกออกซิไดซ์เป็นไนไตรท์ ( $\text{NO}_2^-$ ) และไนเตรท ( $\text{NO}_3^-$ ) โดย กระบวนการไนตริฟิเคชัน (nitrification)

3.2.3 ไนตริฟิเคชัน (nitrification) เป็นกระบวนการ enzymatic oxidation ซึ่งเกิดขึ้น โดย nitrifying bacteria ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่ต้องการแกสออกซิเจน กระบวนการนี้ประกอบด้วย ปฏิกิริยาออกซิเดชันสองขั้น กล่าวคือ  $\text{NH}_4^+$  จะถูกออกซิไดส์ให้เป็นไนไตรท์ก่อนโดยแบคทีเรีย พวก *Nitrosomonas* และ *Nitrosococcus* ดังสมการ



ต่อมาไนโตรที่ที่เกิดขึ้นจะถูกออกซิไดส์อีกครั้งหนึ่งให้เป็นไนเตรท โดยแบคทีเรียพวก *Nitrobacter* ดังสมการ



ไนโตรที่ที่เกิดขึ้นขั้นแรกจะถูกเปลี่ยนไปเป็นไนเตรทซึ่งจะเป็นผลดีต่อพืช เพราะถ้ามีไนโตรที่สะสมอยู่มากจะเกิดความเป็นพิษต่อพืช ส่วนไนเตรทที่เกิดขึ้นจากกระบวนการนี้จะเปลี่ยนแปลงต่อไปได้ดังนี้ คือ (1) จุลินทรีย์นำไปใช้สร้างโปรตีนหรือสารคล้ายโปรตีน (2) พืชชั้นสูงนำไปใช้สร้างโปรตีนหรือสารคล้ายโปรตีน (3) สูญหายไปโดยกระบวนการชะล้างภายในดินลงไปลึกกว่า root zone เนื่องจากไนเตรทละลายน้ำได้ง่าย (4) สูญหายไปในรูปแบบของแก๊สไนโตรเจน (denitrification) เพราะจุลินทรีย์พวกไม่ต้องการใช้แก๊สออกซิเจนนำไปใช้ในขบวนการหายใจแบบ anaerobic respiration สำหรับขบวนการเปลี่ยนรูปอินทรีย์ไนโตรเจนเป็นอนินทรีย์ไนโตรเจนในน้ำในเขตร้อนชื้นนั้น กระบวนการที่เกิดขึ้นน่าจะหยุดอยู่ที่กระบวนการแอมโมเนียเฟิเคชั่น เพราะโอกาสที่แก๊สออกซิเจนจะแทรกซึมลงไปใต้น้ำนั้นน้อยมากและจุลินทรีย์พวกที่ต้องการใช้แก๊สออกซิเจนจะหายใจเพื่อให้ได้พลังงานสำหรับทำกิจกรรมต่างๆ จนแก๊สออกซิเจนต่างๆ นั้นหมดไป

### 3.3 ฟอสฟอรัส

ฟอสฟอรัสเป็นธาตุอโลหะ (non metallic) แต่ในธรรมชาติจะอยู่ในรูปของสารประกอบทั้งในรูปสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ส่วนใหญ่จะพบในรูปสารอินทรีย์ สามารถพบได้ทั้งในรูปของอนุภาคและในรูปของสารละลาย ฟอสฟอรัสในน้ำเสียปกติจะถูกเปลี่ยนรูประหว่างสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์โดยกระบวนการย่อยสลาย (decomposition) และกระบวนการสังเคราะห์แสง (photosynthesis) เสมอ (Mcneely *et al.*, 1979) ฟอสฟอรัสในน้ำธรรมชาติและในน้ำเสียพบได้ทั้งในรูปสารประกอบอินทรีย์และสารประกอบอนินทรีย์ฟอสเฟต ได้แก่ สารประกอบอโรฟอสเฟต เช่น  $\text{PO}_4^{3-}$   $\text{HPO}_4^{2-}$  และ  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  โดยแพลงก์ตอนพืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการเจริญเติบโตแม้ว่าจะมีปริมาณเพียงเล็กน้อยแต่ถ้าขาดแคลนจะทำให้จำกัดการเจริญเติบโตของแพลงค์ตอนพืชทำให้มีผลไปถึงสิ่งมีชีวิตต่างๆ ในน้ำทั้งขนาดเล็กจนถึงใหญ่ ส่วนสารประกอบฟอสฟอรัสอีกอย่างหนึ่งคือ โพลีฟอสเฟต พบในน้ำทิ้งจากบ้านเรือนที่อยู่อาศัยเนื่องจากเป็นส่วน

ประกอบของผงซักฟอก โดยร้อยละ 60 ของปริมาณฟอสเฟตที่อยู่ในน้ำทิ้งชุมชนมาจากผงซักฟอก (Hammer, 1977) สารประกอบโพลีฟอสเฟตสามารถเปลี่ยนเป็นอโรฟอสเฟตได้โดยขบวนการไฮโดรไลซิสเมื่ออยู่ในน้ำ นอกจากนี้ ประมาณ (2531) ได้กล่าวว่าฟอสเฟตในน้ำสามารถรวมตัวกับไอออนอื่นๆ ได้ ได้แก่ เหล็ก (Fe) แคลเซียม (Ca) และแมกนีเซียม (Mg) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเป็นกรด-ด่างของน้ำเป็นตัวกำหนดสมบัติของสารประกอบฟอสเฟต เช่น ถ้าน้ำเป็นกลางหรือเป็นด่างเล็กน้อยจะพบแคลเซียม และแมกนีเซียมฟอสเฟตละลายอยู่มาก แต่ถ้าน้ำเป็นกรดเล็กน้อยจะพบว่าเพอริกฟอสเฟตละลายอยู่มาก

ฟอสเฟต เป็นธาตุอาหารที่สำคัญของพืชระดับมหัพภาค ซึ่งดินส่วนใหญ่มักมีไม่เพียงพอสำหรับพืชเกษตร ซึ่งจำเป็นต้องมีการใส่เพิ่มเติมเช่นเดียวกับธาตุไนโตรเจนและโพแทสเซียม ในแหล่งน้ำธรรมชาติในเขตเมืองมักจะมีฟอสฟอรัสอยู่เป็นจำนวนมากเพราะเกิดจากการปนเปื้อนของผงซักฟอกในน้ำทิ้งจากอาคารบ้านเรือน (ยงยุทธ และสุรเดช, 2521) การมีอนุภาคฟอสเฟตในแหล่งน้ำของประเทศในเขตอบอุ่นตอนต้นฤดูใบไม้ผลินั้นส่งเสริมให้เกิดการเน่าเสียของน้ำเพราะเมื่อพบฟอสเฟตสูงก็มักจะพบไนเตรทสูงตามไปด้วย เนื่องจากต่างก็มาจากปุ๋ยด้วยกันทั้งคู่ธาตุอาหารพืชทั้งสองนี้จะส่งเสริมการเจริญเติบโตของแพลงค์ตอนพืชและสาหร่ายในน้ำให้เจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว (bloomng) เพราะปราศจากผู้บริโภค (herbivores) เนื่องจากอุณหภูมิตอนต้นฤดูใบไม้ผลิ เมื่ออากาศอบอุ่นขึ้นและสาหร่ายเริ่มตายลงเป็นอาหารชั้นดีของผู้ย่อยสลายในน้ำและใช้แกสออกซิเจนในน้ำมาใช้ในการหายใจจนแกสออกซิเจนหมดไปอย่างรวดเร็วทำให้แหล่งน้ำในสภาวะดังกล่าวอยู่ในสภาพไร้ออกซิเจน (anaerobic process) ผู้บริโภคทั้งหลายก็จะไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้และแหล่งน้ำจะเกิดการเน่าเหม็นในที่สุด การมีฟอสเฟตที่มาจากผงซักฟอกอย่างเดียวนั้นไม่มีไนเตรทก็สามารถทำให้น้ำเน่าเสียได้เพราะฟอสเฟตจะส่งเสริมการตรึงแกสไนโตรเจนของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (blue green algae) ซึ่งเป็นแบคทีเรียประเภทที่มีสีเขียวสามารถตรึงไนโตรเจนได้แล้วยังสามารถทำการสังเคราะห์แสงได้อีกด้วย แบคทีเรียพวกนี้นอกจากจะไม่เป็นอาหารชั้นดีของสัตว์หากแต่จะยังเป็นพิษอีกด้วย (Southwick, 1976) แต่เมื่อสาหร่ายพวกนี้ตายลงจะเป็นอาหารชั้นดีของผู้ย่อยสลายทำให้มีการใช้แกสออกซิเจนในน้ำหมดไปอย่างรวดเร็ว

#### 4. ลักษณะบางประการของพืชที่ใช้ร่วมกับการบำบัดน้ำเสียในสภาพดินน้ำขังสลับแห้ง

##### 4.1 การใช้พืชร่วมกับการบำบัดน้ำเสียในสภาพดินน้ำขังสลับแห้ง

ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียชุมชนโดยใช้พืชที่ทนน้ำท่วมขังได้นั้นจะช่วยในการบำบัดน้ำเสียชุมชนโดยการดูดใช้ธาตุอาหารพืชที่อยู่ในรูปของอามอนิเอียม ไนโตรเจนในรูปอามอนิเอียมและ/หรือ ไนโตรเจน และอามอนิเอียมอื่นๆ ที่ปนเปื้อนมากับน้ำเสียที่มีค่าการนำไฟฟ้าไม่สูงถึงระดับที่ขัดขวางกระบวนการดูดน้ำของพืชโดยกระบวนการออสโมซิส โดยผ่านระบบรากไปอยู่ในส่วนต่างๆของต้นพืช ซึ่งเมื่อเก็บเกี่ยวพืชที่ปลูกไว้ออกไปทำประโยชน์ก็จะเป็นการขนย้ายมลสารที่ผ่านการบำบัดแล้วออกไปจากระบบดินด้วย

นอกจากนี้ยังมีความเป็นไปได้ว่าพืชที่ทนน้ำท่วมได้ อาจมีกลไกพิเศษที่สามารถพาแก๊สออกซิเจนจากส่วนเหนือดินลงมาเลี้ยงรากได้ และส่วนของรากพืชอาจปลดปล่อยแก๊สออกซิเจนออกมาที่ผิวรากทำให้มีจุลินทรีย์พวก aerobes มาใช้แก๊สออกซิเจนเพื่อการหายใจและใช้คาร์โบไฮเดรตซึ่งมีอยู่ในน้ำเสียซึ่งจะต้องไหลมากับน้ำมายังรากพืชได้ตลอดเวลาเมื่อมีแสงแดด เพราะพืชจะต้องใช้น้ำอยู่ตลอดเวลาเพื่อระบายความร้อนออกจากผิวใบโดยกระบวนการคายน้ำของพืช (transpiration) และจะต้องใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อขบวนการสังเคราะห์แสง (photosynthesis) ด้วย ดังนั้นสารอินทรีย์พวกคาร์โบไฮเดรตก็จะถูกใช้เป็นตัวให้อิเล็กตรอนกลายเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนสารประกอบโปรตีนก็จะถูกจุลินทรีย์พวก aerobes เอาไปใช้สร้างเซลล์และอาจปลดปล่อยแอมโมเนียมาให้พืชใช้ประโยชน์ได้ด้วย สารอินทรีย์ในน้ำเสียจึงลดลง แต่อย่างไรก็ตามการนำพืชมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียชุมชนนั้นก็ยังมีข้อจำกัดคือ จะต้องมีการคัดเลือกชนิดพืชที่เหมาะสม

##### 4.2 คุณสมบัติของพืชที่นำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสีย

การนำพืชมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียชุมชนนั้นก็มีข้อจำกัดคือ จะต้องมีการคัดเลือกชนิดพืชที่เหมาะสมซึ่ง พัฒน์ (2536) ได้กล่าวถึงข้อพิจารณาในการใช้พืชปรับปรุงคุณภาพน้ำและประภากรณ์ (2543) ซึ่งทำการศึกษารูปของแอมโมเนียในดินจากระบบบำบัดน้ำเสียโดยวิธีพืชกรองน้ำเสียของระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนเทศบาลเมืองเพชรบุรี ได้กล่าวถึงคุณสมบัติของพืชที่จะนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียโดยสรุปดังนี้

4.2.1 เป็นพืชที่สามารถปรับตัวและเจริญเติบโตได้ดีในท้องถิ่นนั้นๆ นอกจากนี้  
ต้องสามารถปรับตัวได้ดีในสภาพภูมิอากาศที่เปลี่ยนแปลงไป

4.2.2 มีอัตราการสังเคราะห์แสงสูง

4.2.3 มีความสามารถในการส่งผ่านออกซิเจนได้สูง โดยนำออกซิเจนจาก  
บรรยากาศส่งผ่านลงมาตามใบ ลำต้น และราก

4.2.4 สามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มข้นของสารมลพิษได้  
ค่อนข้างกว้าง

4.2.5 มีความสามารถในการดูดซึมและเก็บสะสมสารต่างๆ ได้

4.2.6 มีความคงทนต่อโรค และแมลงต่างๆ ได้ดี

4.2.7 สามารถนำออกจากระบบได้ง่าย เนื่องจากพืชจะลดปริมาณสารที่มีอยู่ในน้ำ  
เสียให้ได้ผลดีที่สุดนั้นพืชต้องมีการนำออกบ้าง เพื่อมิให้พืชอยู่หนาแน่นจนเกินไปจนระบบขาด  
ประสิทธิภาพ

4.2.8 สามารถเก็บเกี่ยวได้เร็วและกลับเจริญเติบโตได้ดี

#### 4.3 ความสำคัญของน้ำที่มีต่อพืช

น้ำนับว่าเป็นสิ่งสำคัญอย่างหนึ่งสำหรับการปลูกพืช เพื่อให้พืชมีการ  
เจริญเติบโตและให้ผลผลิตได้ตามที่ต้องการ ทั้งนี้เพราะน้ำมีความสำคัญต่อผู้ผลิต)พืชทุกชนิด (ถึง 5  
ประการคือ

4.3.1 น้ำเป็นวัตถุดิบ )ธาตุอาหารพืช 2 ชนิด คือ ไฮโดรเจนและออกซิเจน (ที่  
สำคัญในการสังเคราะห์แสง )photosynthesis (โดยจะทำปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดย

มีคลอโรฟิลล์เป็นตัวรับและถ่ายทอดพลังงานจากแสงอาทิตย์ทำให้เกิดการสังเคราะห์น้ำตาลกลูโคสขึ้นที่ใบพืชหรือส่วนที่มีสีเขียวอื่นๆ

4.3.2 น้ำเป็นตัวระบายความร้อนออกจากผิวใบโดยขยายการคายน้ำ (transpiration) ในเวลากลางวันเมื่อแสงแดดกระทบผิวใบพืช พลังงานแสงอาทิตย์ส่วนหนึ่งจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนหากพลังงานความร้อนนี้มีได้ถูกระบายออกไปก็จะทำให้เซลล์ของใบตายได้ พืชสามารถจัดปัญหานี้ได้โดยการถ่ายทอดพลังงานความร้อนให้กับน้ำ ซึ่งถูกดูดขึ้นมาจากดินแล้วถูกลำเลียงมาที่ใบ พลังงานความร้อนนั้นก็จะถูกเอามาใช้เปลี่ยนสถานะจากน้ำเหลวให้เป็นไอน้ำแล้วระบายออกจากผิวใบทางปากใบจึงทำให้ผิวใบมีอุณหภูมิที่ระดับปกติได้

4.3.3 น้ำซึ่งอยู่ในดินจะเป็นตัวทำลายทำให้เกลือต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเกลือพลาสมาอาหารพืชละลายและแตกตัวเป็นไอออนและถูกดูดซึมเข้าไปในรากพืชได้

4.3.4 น้ำและสารละลายเมื่อซึมเข้าไปในรากพืชได้แล้วก็จะทำหน้าที่ลำเลียงไอออนต่างๆ ผ่านท่อลำเลียงน้ำ (Xylem) ไปยังใบพืชแล้วลำเลียงสารอินทรีย์ซึ่งถูกสังเคราะห์แล้วที่ใบไปยังส่วนต่างๆ ของพืชเพื่อการสร้างเซลล์ใหม่ต่อไป

4.3.5 น้ำเป็นองค์ประกอบหลักของเซลล์ที่จะทำให้เกิดขยายการเมตาบอลิซึมต่างๆภายในเซลล์ได้จากที่กล่าวถึงความสำคัญของน้ำที่มีต่อพืช จะพบว่าน้ำมีประโยชน์ช่วยให้พืชเจริญเติบโตจนได้ผลผลิตและคุณภาพของพืชแต่ละชนิด ซึ่งนับว่ามีความสำคัญต่อพืชมาก

## 5. พืชที่ใช้ในการทดลอง

การศึกษาการบำบัดน้ำเสียชุมชนเทศบาลเมืองเพชรบุรี จังหวัดเพชรบุรี ด้วยพุทธรักษา 3 พันธุ์ ในสภาพน้ำขังสลับแห้งของดินร่วมกับพืช พืชที่ใช้ทดลอง คือ พุทธรักษา เนื่องจาก สุกัญญา (2548) ได้ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียชุมชนของพุทธรักษา ธรรมรักษา และจิงแดง พบว่า พุทธรักษาสามารถทนการขังน้ำและเจริญเติบโตได้ดี ในขณะที่ธรรมรักษาและจิงแดงไม่สามารถทนการขังน้ำได้และตายในที่สุด การทดลองนี้ใช้พุทธรักษา 3 พันธุ์ที่มีลักษณะสัณฐาน (morphology) แตกต่างกันทางด้านความสูง และสีของใบ เพื่อศึกษากลไกการบำบัดน้ำเสียในแนวอนภายใต้สมมติฐานว่า พุทธรักษาพันธุ์ที่มีลำต้นสูงมากกว่าน่าจะมีระบบรากที่แข็งแรงกว่า

ทำให้มีจุลินทรีย์อาศัยอยู่ที่รากของต้นมีปริมาณมากกว่าส่งผลให้เกิดการบำบัดสารอินทรีย์ร่วมกับกลไกการบำบัดในแนวตั้งคั้งที่ได้กล่าวมาแล้ว ได้มากกว่าพุทธรักษาที่มีลำต้นเดี่ยวกว่า พุทธรักษาที่ใช้ในการทดลองทั้ง 3 พันธุ์ ได้แก่

- 5.1 Canna Russian Red มีลำต้นสูงมาก ใบสีม่วง ดอกสีแดง
- 5.2 Canna Rigoletto มีลำต้นสูงปานกลาง ใบสีเขียว ดอกสีเหลือง
- 5.3 Canna Rosever หรือ Canna Rosey Leaf มีลำต้นเดี่ยว ใบสีเขียวเข้ม ดอกสีชมพู

การปลูกพุทธรักษาพร้อมกับระบบบำบัดน้ำเสียนี้ จึงน่าจะเป็นประโยชน์ในการนำไปปรับแต่งภูมิทัศน์ให้สวยงาม เนื่องจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนนี้ควรที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในส่วนสาธารณะหรือสถานที่ราชการของชุมชน โดยสร้างระบบแบ่งเป็น 7 ยูนิต เพื่อรองรับน้ำเสียครบหนึ่งสัปดาห์พอดี สอดคล้องกับการขังน้ำ 5 วัน สลับปล่อยแห้ง 2 วัน จึงใคร่ขอเสนอลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของพุทธรักษาที่ใช้ในการทดลองดังนี้

พุทธรักษา หรือ *Canna* spp. มีชื่อสามัญว่า Indian shoot จัดอยู่ใน Family Canaceae เป็นพันธุ์ไม้ดอกที่อยู่ในพวกมีน้ำมาก (herbaceous) และมีอายุยืน (perennial) มีถิ่นกำเนิดในอเมริกาใต้และ West Indies ลำต้นคล้ายกล้วย ไม่มีการแตกกิ่งก้าน ดอกใหญ่ กลีบบาง บางชนิดไม่มีสีสันใช้เป็นไม้ประดับ ลำต้นอยู่ในดินมีลักษณะเป็นเหง้า (Rhizome) มีกาบใบห่อเป็นดินขึ้นเหนือพื้นดิน เมื่อออกดอกแล้วต้นจะตายหมดสภาพไป ช่อดอกออกทางส่วนยอดของลำต้น มีดอกหลายสีทั้งดอกที่มีสีเดียวกันล้วนๆ ทั้งดอก และดอกที่มีหลายสีอยู่ในดอกเดียวกัน เจริญเติบโตได้ดีในที่กลางแจ้ง ชอบความชื้นสูงในประเทศไทยนิยมปลูกตามริมน้ำ พุทธรักษาบางชนิดสามารถขึ้นแช่อยู่ในน้ำได้ดี และมีดอกตลอดปี (ปีภูธนะ, 2529)

สำหรับพุทธรักษาทั่วไปที่มีดอกสวยงามนั้น อาจแบ่งลักษณะดอกออกได้เป็น 2 ประเภทด้วยกัน คือ ลักษณะดอกคล้ายกล้วยไม้ (Orchid-flowered) และลักษณะดอกคล้ายดอกช่อนกลั่น (Gladiolus-flowered) ซึ่งพวก ลักษณะดอก Gladiolus-flowered เป็นพันธุ์ที่นิยมกันมากที่สุด เพราะมีดอกใหญ่ รูปสวย สีสวย และมีลักษณะเป็นพันธุ์ต้นแคระ (dwarf habit)

การขยายพันธุ์ พุทธรักษาอาจใช้เมล็ดขยายพันธุ์ได้ แต่โดยทั่วไปแล้วใช้ปลูกด้วยเมล็ดเพื่อขยายพันธุ์ลูกผสมที่ผสมพันธุ์ขึ้นใหม่ๆ เท่านั้น ในการขยายพันธุ์เพื่อเพิ่มปริมาณจริงๆ แล้วใช้

วิธีแบ่งแยกกอหรือแยกหน่อมากกว่า การขยายพันธุ์โดยการแยกหน่อนั้นง่าย เพียงแต่ขุดและตัดเหง้าให้ติดหน่อที่มี ลำต้นเหนือพื้นดินติดมาด้วยอย่างน้อยหนึ่งต้น เมื่อตัดหน่อมาแล้วบางชนิดอาจนำลงไปปลูกในดินหรือในกระถางได้ทันที แต่บางชนิดอาจต้องนำมาชำในกระบะทรายในที่ร่มให้ตั้งตัวได้เสียพักหนึ่งก่อน จึงนำไปปลูกในที่ที่ต้องการกลางแจ้ง พุทธรักษาทั่วๆ ไปที่ปลูกในประเทศไทยนั้นชอบน้ำมาก ขึ้นได้ดีในที่ที่มีน้ำ ที่ลุ่มดินเหนียวทั่วไป การขยายพันธุ์จึงง่ายมาก บางชนิดขุดไปที่กองไวกี้แตกหน่อและไม่ยอมตายง่ายๆ อีกด้วย แต่พุทธรักษาบางชนิดที่ปลูกเป็นลูกผสม หรือพันธุ์แท้ชนิดต้นแคระเดี่ยวนั้น เจริญเติบโตไม่ดีนักในที่ที่พุทธรักษาทั่วไปปลูกอยู่ จึงต้องดูแลเอาใจใส่เป็นพิเศษ พุทธรักษาพวกลูกผสม หรือพันธุ์แท้ชนิดต้นแคระเดี่ยวนั้น ชอบดินร่วนทราย มีการระบายน้ำดี กลางแจ้ง ไม่ชอบดินเหนียวที่มีน้ำขังอยู่ตลอดเวลา

ประโยชน์ทางการค้า ในทางไม้ดอกนั้น พุทธรักษาไม่นิยมเป็นไม้ตัดดอก เพราะดอกไม้ทนเหี่ยว และร่วงโรยได้ง่าย กลีบดอกบาง จึงนิยมปลูกเป็นไม้ดอกประดับสวนและสถานที่เท่านั้น พุทธรักษาบางชนิดมีเหง้า หรือหัวที่ใช้รับประทานได้ เช่น *Canna edulis* ซึ่งใช้หัวทำแป้งสำหรับทำอาหารเลี้ยงทารก ในประเทศไทยมีการใช้หัวหรือเหง้าพุทธรักษาเป็นอาหารเลี้ยงสัตว์

### ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ธนิศร์ (2548) ทำการศึกษาเรื่อง “การศึกษาแบคทีเรียรอบรากพุทธรักษา ธรรมรักษา และ จิงแดง ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียชุมชนเทศบาลเมืองเพชรบุรี จังหวัดเพชรบุรี” ผลการศึกษาพบว่า พุทธรักษาและธรรมรักษาสามารถเจริญเติบโตได้ดีในการปลูกแบบการขังน้ำ 5 วัน สลับปล่อยแห้ง 2 วัน ส่วนจิงแดงไม่สามารถทนได้และตายในที่สุด จำนวนแบคทีเรียในดินรอบรากพืชพบว่าในพุทธรักษามีจำนวนเพิ่มขึ้นตามอายุของพืชจนสูงสุดเมื่อระยะดอกบานและลดลงเมื่อเข้าสู่ระยะต้นแก่ ส่วนธรรมรักษาพบว่าแบคทีเรียในดินรอบรากพืชมีจำนวนลดลงตามอายุพืช และสำหรับการศึกษาปริมาณเชื้อแบคทีเรียในดินรอบรากที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียชุมชนพบว่าแบคทีเรียรอบรากพืชทั้งสองชนิดไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย

สิทธิชัย (2538) ทำการศึกษา “การใช้ดินตะกอนภาคพื้นสมุทรในสภาพน้ำขังสลับแห้ง ร่วมกับพืชเป็นต้นแบบในการบำบัดน้ำเสียชุมชน” จากการศึกษาพบว่า เนื้อดินที่เหมาะสมทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียดีที่สุด คือ ดินนาที่มีการผสมทรายร้อยละ 25 หรืออัตราส่วนดิน: ทราย เท่ากับ 3:1 การศึกษาความสามารถในการบำบัดน้ำเสีย พบว่า ในการขังน้ำที่ระดับสูงสุด 15

เซนติเมตร ที่ระยะเวลาขังน้ำ 7 วันสลับปล่อยแห้ง 3 วัน ระบบก็ยังคงมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียชุมชนที่มี BOD สูงมากได้ดี ส่วนพืชทดลองคือ กกกลม หญ้าคาร์รา และธูปฤาษี พบว่ากกกลมมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียมากที่สุด จากการศึกษาดังกล่าวสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นต้นแบบในการบำบัดน้ำเสียชุมชนที่มีมลสารหลักคือ BOD ได้

สุกัญญา (2548) ทำการศึกษาเรื่อง “การศึกษาคุณสมบัติบางประการของน้ำเสียชุมชนเทศบาลเมืองเพชรบุรีและประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียชุมชนของพุทธรักษา ธรรมรักษาและจิงแดงในสภาพน้ำขังสลับแห้งของดินร่วมกับพีช” จากการศึกษาพบว่า พุทธรักษาและธรรมรักษาสามารถเจริญเติบโตได้ดีในการปลูกแบบการขังน้ำ 5 วันสลับปล่อยแห้ง 2 วัน ส่วนจิงแดงไม่สามารถทนได้และตายในที่สุด ประสิทธิภาพการบำบัด BOD และ COD ส่วนใหญ่เกิดจากแบคทีเรีย facultative anaerobes และพบผลงานการบำบัดของ aerobes เล็กน้อยในแปลงพุทธรักษา และพบว่าระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนในสภาพน้ำขังสลับแห้งของดินร่วมกับพีชนี้จะมีประสิทธิภาพดี ระบบต้องมี clay ไม่น้อยกว่า 21%

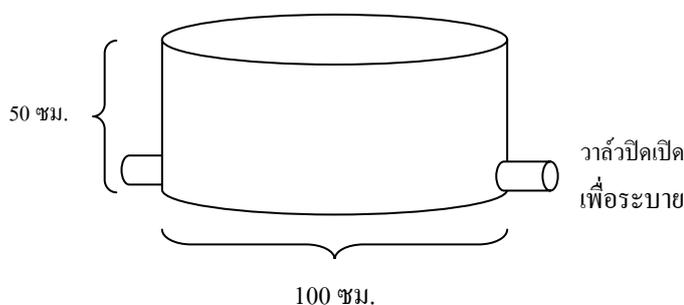
อาภรณ์ (2539) ทำการศึกษาเรื่อง “การบำบัดบีโอดี และซีโอดีในน้ำเสียชุมชนเมืองเพชรบุรีโดยใช้ดินในสภาพน้ำขังสลับแห้งร่วมกับพีช” จากการศึกษาพบว่า ค่า BOD ของน้ำเสียจากเทศบาลเมืองเพชรบุรีจะมีค่าแปรปรวนมาก เพราะเพชรบุรีเป็นจังหวัดที่มีชื่อเสียงในด้านอุตสาหกรรมทำขนมหวานทำให้การเพิ่มและลดของค่า BOD ได้รับอิทธิพลจากเทศกาลวันหยุดและวันสำคัญต่างๆ ในการบำบัด BOD และ COD โดยใช้ดินในสภาพน้ำขังสลับแห้งร่วมกับพีชเมื่อขังน้ำระยะเวลา 5 วันสลับปล่อยแห้ง 2 วัน พบว่ามีประสิทธิภาพไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญกับการขังน้ำ 7 วันสลับปล่อยแห้ง 3 วัน ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการจัดการน้ำเสียได้สะดวกยิ่งขึ้น

## อุปกรณ์และวิธีการ

### อุปกรณ์

#### 1. อุปกรณ์สำหรับแปลงทดลอง

1.1 บ่อซีเมนต์ทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 เซนติเมตร สูง 50 เซนติเมตร จำนวน 24 บ่อ กั้นบ่อฉาบปิดด้วยแผ่นซีเมนต์และเจาะรูด้านข้างบ่อส่วนล่างสุดต่อท่อ PVC ขนาด 1 นิ้วแล้วต่อวาล์วปิดเปิดเพื่อระบายน้ำบริเวณขอบล่างของบ่อซีเมนต์ (ภาพที่ 1)



ภาพที่ 1 บ่อซีเมนต์

1.2 ดินที่ใช้ปลูกเป็นดินนา ซึ่งเป็นดินเหนียว (clay) ชุดสมุทรปราการ จากตำบลแหลมผักเบี้ย อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี นำมาผสมทรายหยาบเพื่อเพิ่มช่องว่างขนาดใหญ่ในดิน (macropores) อัตราส่วนดิน : ทราย; 3 : 1

1.3 พืชทดลอง ใช้พุทธรักษาจำนวน 3 พันธุ์ ได้แก่ พุทธรักษาต้นสูงใบม่วงดอกแดง (Canna Russian Red) พุทธรักษาต้นสูงใบเขียวดอกเหลือง (Canna Rigoletto) และพุทธรักษาต้นเตี้ยใบเขียวดอกชมพู (Canna Rosever หรือ Canna Rosey Leaf)

1.4 น้ำที่ใช้ในการทดลอง คือ น้ำเสียชุมชนจากเทศบาลเมืองเพชรบุรีที่สูบมาเก็บไว้ในพื้นที่โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมผักเบี้ยฯ (คลองลอย) และใช้น้ำชลประทานเป็นตัวเปรียบเทียบ

1.5 อุปกรณ์ดูแลรักษาแปลงทดลอง เช่น กรรไกรตัดหญ้าและสายยาง เป็นต้น

## 2. อุปกรณ์ภาคสนาม

2.1 อุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับเก็บตัวอย่างน้ำ เช่น ขวดพลาสติกโพลีเอทิลีนขนาด 1 ลิตร ถังแช่น้ำแข็ง ปีกเกอร์ ฯลฯ

2.2 เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง พร้อม Combine electrode

## 3. อุปกรณ์และสารเคมีต่างๆ ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

3.1 เครื่องมือสำหรับวิเคราะห์ BOD

3.1.1 ขวดบีโอดี ขนาด 250-300 มิลลิลิตร

3.1.2 ตู้ควบคุมอุณหภูมิ

3.1.3 อุปกรณ์เครื่องแก้วต่างๆ เช่น กระจบอขวดวง บิวเรต ขวดรูปกรวย เป็นต้น

3.1.4 เครื่องจ่ายลม

3.1.5 Heat mantle พร้อม refluxset

3.2 สารเคมีสำหรับวิเคราะห์ BOD

3.2.1 น้ำกลั่น

3.2.2 สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์

3.2.3 สารละลายแมงกานีสซัลเฟต

3.2.4 สารละลายแคลเซียมคลอไรด์

- 3.2.5 สารละลายเพอริกคลอไรด์
  - 3.2.6 สารละลายอัลคาไลไรด์-ไอโอไดด์-เอไซด์ (Alkali-Iodide-Azide reagent)
  - 3.2.7 กรดซัลฟูริกเข้มข้น (36N)
  - 3.2.8 น้ำแป้ง
  - 3.2.9 สารละลายโซเดียมโซอซัลเฟต 0.1 นอร์มัล
  - 3.2.10 สารละลายมาตรฐานโซเดียมโซอซัลเฟต 0.025 นอร์มัล
  - 3.2.11 สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต 0.025 นอร์มัล
  - 3.2.12 สารละลายโซเดียมซัลไฟด์ 0.025 นอร์มัล
- 3.3 เครื่องมือสำหรับวิเคราะห์รูปของไนโตรเจน และฟอสฟอรัสในน้ำ และพืช
- 3.3.1 Micro- Kjeldahl digestion
  - 3.3.2 Visible spectrophotometer
  - 3.3.3 เครื่องเขย่าในแนวนอน
  - 3.3.4 เครื่องแก้วต่างๆ ที่จำเป็น
- 3.4 สารเคมีที่ใช้ย่อยและสกัดไนโตรเจน และฟอสฟอรัส
- 3.4.1 Digestion mixture ( $H_2SO_4$ -Se- $Na_2SO_4$  ratio) สำหรับย่อยตัวอย่างน้ำ และพืช

3.4.2 6N NaOH เพื่อปรับ pH สารละลายที่ข่อยแล้วให้เป็น 5-6

3.4.3 Phenol-nitroprusside reagent เตรียมโดยใช้ sodium nitroprusside 0.34 กรัม และ sodium salicylate 8.5 กรัม ละลายในน้ำแล้วปรับปริมาตรให้ได้ 100 มิลลิลิตร ใส่ขวดสีชาแล้วเก็บในตู้เย็น

3.4.4 Buffered hypochlorite reagent เตรียมโดยใช้ sodium hydroxide (NaOH) 4 กรัม sodium hypochlorite (NaOCl) solution 2 มิลลิลิตร และ sodium acetate (NaOAc) 10 กรัม ละลายในน้ำแล้วปรับปริมาตรให้ได้ 100 มิลลิลิตร และปรับให้มี pH ระหว่าง 11.4-12

3.4.5 Ethylene diamine tetraacetic acid (EDTA) reagent ละลาย EDTA disodium 6 กรัม ในน้ำแล้วปรับให้มีปริมาตร 100 มิลลิลิตร

3.4.6 Standard ammonium 100 ppm N เตรียมโดยใช้สาร ammonium molybdate 0.147 กรัม ละลายในน้ำ 100 มิลลิลิตร

3.4.7 Standard ammonium 2.5 ppm N เตรียมโดยใช้สารละลาย Standard ammonium 100 ppm จำนวน 2.5 มิลลิลิตร ละลายในน้ำปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร

3.4.8 สารละลายกรดซัลฟูริก (Sulfuric Acid) 5 นอร์มัล

3.4.9 สารละลายโพแทสเซียม-แอนติโมนิล-ทาเทรท (Potassium Antimonyl Tartrate Solution)

3.4.10 สารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต (Ammonium Molybdate Solution)

3.4.11 สารละลายกรดแอสคอร์บิก (Ascorbic Acid) 0.1 โมลาร์

3.4.12 สารเคมีรวม (Combine Reagent)

3.4.13 สารละลายสต็อกฟอสเฟต (Stock Phosphate Solution)

3.4.14 สารละลายมาตรฐานฟอสเฟต (Standard Phosphate Solution)

3.5 สารเคมีที่ใช้วัดปริมาณ  $\text{NH}_4\text{-N}$  โดยวิธีการเทียบสี

3.5.1 Phenol-nitroprusside reagent เตรียมโดยใช้ sodium nitroprusside 0.34 กรัม และ sodium salicylate 8.5 กรัม ละลายในน้ำแล้วปรับปริมาตรให้ได้ 100 มิลลิลิตร ใส่ขวดสีชาแล้วเก็บในตู้เย็น

3.5.2 Buffered hypochlorite reagent เตรียมโดยใช้ sodium hydroxide (NaOH) 4 กรัม sodium hypochlorite (NaOCl) solution 2 มิลลิลิตร และ sodium acetate (NaOAc) 10 กรัม ละลายในน้ำแล้วปรับปริมาตรให้ได้ 100 มิลลิลิตร และปรับให้มี pH ระหว่าง 11.4-12

3.5.3 Ethylene diamine tetraacetic acid (EDTA) reagent ละลาย EDTA disodium 6 กรัม ในน้ำแล้วปรับให้มีปริมาตร 100 มิลลิลิตร

3.5.4 Standard Ammonium 100 ppm N เตรียมโดยใช้สาร ammonium molybdate 0.147 กรัม ละลายในน้ำ 100 มิลลิลิตร

3.5.5 Standard Ammonium 2.5 ppm N เตรียมโดยใช้สารละลาย Standard Ammonium 100 ppm จำนวน 2.5 มิลลิลิตร ละลายในน้ำปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร

3.6 สารเคมีที่ใช้วัดปริมาณฟอสฟอรัส โดยวิธีการเทียบสี

3.6.1 สารละลายกรดซัลฟูริก (Sulfuric Acid) 5 นอร์มัล

3.6.2 สารละลายโพแทสเซียม-แอนติโมนิล-ทาทเรท (Potassium Antimonyl Tartrate Solution)

3.6.3 สารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต (Ammonium Molybdate Solution)

3.6.4 สารละลายกรดแอสคอร์บิก (Ascorbic Acid) 0.1 โมลาร์

3.6.5 สารเคมีรวม (Combine Reagent)

3.6.7 สารละลายสต็อกฟอสเฟต (Stock Phosphate Solution)

3.6.8 สารละลายมาตรฐานฟอสเฟต (Standard Phosphate Solution)

## วิธีการ

### 1. การวางแผนการทดลอง

ใช้แผนการทดลองแบบ Split Plot Design และจัดหน่วยทดลองแบบสุ่มในบล็อกสมบูรณ์ Randomized Complete Block Design มี 3 Blocks โดยมี

1.1 แหล่งที่มาของน้ำเป็น main plot 2 แหล่ง คือ

W1 = น้ำชลประทาน

W2 = น้ำเสียนชุมชน

1.2 พุทธรักษา 3 พันธุ์ และดินเปล่าเป็น sub plot ดังนี้

P1 = พุทธรักษาพันธุ์ต้นสูงใบม่วงดอกแดง (Canna Russian Red)

P2 = พุทธรักษาพันธุ์ต้นสูงใบเขียวดอกเหลือง (Canna Rigoletto)

P3 = พุทธรักษาพันธุ์ต้นเตี้ยใบเขียวดอกชมพู (Canna Rosever)

P4 = ดินเปล่า

ในการศึกษามีการทดลอง 3 ซ้ำ จำนวนหน่วยทดลองทั้งหมด 24 หน่วยทดลอง มีดำรับการทดลอง 8 ดำรับ ดังภาพที่ 2

	<u>BlockI</u>		<u>BlockII</u>		<u>BlockIII</u>
W1	P4	W2	P3	W1	P2
	P2		P4		P3
	P1		P1		P4
	P3		P2		P1
W2	P4	W1	P3	W2	P2
	P2		P4		P3
	P1		P1		P4
	P3		P2		P1

ภาพที่ 2 แผนผังหน่วยทดลอง

1.3 การให้น้ำ ชั่งน้ำปริมาตร 140 ลิตรต่อบ่อ ทำให้น้ำสูงเหนือพื้นดินประมาณ 10 เซนติเมตร ในทุกแปลงทดลอง แบบ flooding time 5/2 หมายถึง ระยะเวลาขังน้ำ 5 วัน สลับแห้ง 2 วัน

## 2. การเตรียมดินปลูกและการเตรียมพืช

### 2.1 การเตรียมดินปลูก

ดินที่ใช้ในการทดลองนำมาจากบริเวณตำบลแหลมผักเบี้ย อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี นำมาผึ่งให้แห้งย่อยดินให้มีขนาดเล็กลง แล้วนำมาผสมทรายละเอียดในอัตราส่วน 3:1 เพื่อให้ น้ำซึมลงไปดินได้รวดเร็วขึ้น ตามคำแนะนำของเจ้าหน้าที่โครงการแหลมผักเบี้ยฯ และเมื่อนำมาวิเคราะห์ลักษณะเนื้อดิน (soil texture) พบว่าเนื้อดินเป็นดินเหนียว (clay; C) นำดินดังกล่าวมาบรรจุในบ่อซีเมนต์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เมตร สูง 0.5 เมตร โดยใช้ดินหนัก 225 กิโลกรัมต่อบ่อ ซึ่งจะทำให้ดินสูงจากพื้นบ่อประมาณ 30 เซนติเมตร จำนวนทั้งหมด 24 บ่อ

## 2.2 การเตรียมพีช

จัดหาหน่อพันธุ์พุทธรักษาทั้ง 3 พันธุ์ พันธุ์ละ 50 หน่อ ตัดท่อนพันธุ์ให้มีความสูงประมาณ 30 เซนติเมตร นำไปเพาะชำลงในถุงดำที่อยู่ในบรรจุทราย และรดน้ำด้วยน้ำประปาเพื่อรอให้หน่อพันธุ์ใหม่แตก ใช้เวลาประมาณ 30 วัน จากนั้นจึงคัดเลือกหน่อพันธุ์ที่แตกใหม่ที่มีขนาดใกล้เคียงกันมากที่สุดปลูกลงในบ่อซีเมนต์ บ่อละ 2 ต้น มีระยะปลูกพีชห่าง 40 เซนติเมตร ซึ่งจะทำให้ได้พันธุ์พีชชนิดละ 12 ต้นสำหรับ 2 Main plot กับ 3 ซ้ำ

## 2.3 การอนุบาลพีช

เมื่อนำหน่อพันธุ์ที่แตกใหม่ลงปลูกลงในบ่อซีเมนต์ บ่อละ 2 ต้นแล้ว อนุบาลพีชเป็นเวลาสองสัปดาห์ก่อนทำการทดลองขังน้ำ ตลอดช่วงของการอนุบาลพีชนี้รดน้ำด้วยน้ำประปาเช้าและเย็น เพื่อให้พีชทดลองสามารถตั้งตัวได้ แล้วจึงเริ่มดำเนินการทดลองขังน้ำตามแผนการทดลองในสัปดาห์ที่สามต่อไป

## 2.4 น้ำที่ใช้ในการทดลอง

น้ำที่ใช้ในการทดลอง คือ น้ำเสียชุมชนและน้ำชลประทาน โดยน้ำเสียชุมชนมาจากเทศบาลเมืองเพชรบุรี ซึ่งมีระบบท่อต่อเชื่อมโยงกันแล้วส่งต่อจากสถานีสูบน้ำเสียมายังบ่อน้ำเสียรวม ณ บริเวณบ้านคลองยาง อำเภอเมือง จังหวัดเพชรบุรี แล้วจึงส่งผ่านท่อมายังพื้นที่โครงการศึกษาและวิจัยแหลมผักเบี้ยฯ ในคลองล่อยรับน้ำเสียบริเวณแปลงทดลอง ส่วนน้ำชลประทานนำมาจากคลองชลประทาน จังหวัดเพชรบุรี สูบมาเก็บไว้ในถังขนาด 1,000 ลิตร

## 2.5 วิธีการทดลอง

2.5.1 การศึกษาสมบัติของดิน สุ่มเก็บตัวอย่างดินก่อนปลูก 3 จุด แล้วนำมาผสมคลุกเคล้ากันรวมเป็น 1 ตัวอย่าง นำส่งวิเคราะห์หาอนุภาคปฐมภูมิของดิน เนื้อดิน ที่โครงการอนุรักษ์ดิน ปุ๋ย และพีช ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.5.2 การศึกษาการเจริญเติบโตของพืช โดยใช้ความสูง ความอวบของลำต้น ขนาดทรงพุ่ม น้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง มวลรวมของพืช และปริมาณน้ำในพืชเป็นดัชนี การวัดความสูงและความอวบของลำต้นจะวัดเริ่มต้นที่ระดับอ้างอิงทุกครั้ง โดยระดับอ้างอิงกำหนดขึ้นจากการจึงเส้นเอ็นผ่านศูนย์กลางบ่ออยู่ในแนวเดียวกับต้นพุทธรักษาที่ปลูกในแปลง เพื่อความสะดวกและแน่ใจว่าจุดเริ่มต้นในการวัดเป็นจุดเดิมทุกครั้ง รายละเอียดของวิธีการศึกษามีดังนี้

1) ความสูงของพืช ทำการวัดความสูงของพืชระดับอ้างอิงจนถึงส่วนที่ทำการรวบยอดสูงสุด โดยทำการเริ่มต้นวัดหลังจากอนุบาลพืชแล้วสองสัปดาห์หรือเมื่อเริ่มต้นการทดลองให้น้ำเสียชุมชนและน้ำชลประทานท่วมขังตามแผนการทดลองที่ได้กล่าวไว้แล้วจนถึงระยะดอกโรยและต้นพืชเริ่มแตกหน่อพันธุ์ขึ้นมาใหม่สิ้นสุดการทดลองรวมทั้งหมด 6 ครั้ง

2) ความอวบของลำต้น ทำการวัดความอวบของลำต้นพืช ตั้งแต่เริ่มต้นการทดลองจนสิ้นสุดการทดลองรวมทั้งหมด 6 ครั้ง

3) ขนาดทรงพุ่ม วัดขนาดทรงพุ่มของต้นพุทธรักษาโดยวัดจากเส้นผ่านศูนย์กลางของต้นพืชโดยมีลำต้นเป็นจุดศูนย์กลาง ทำการวัดสองเส้นโดยให้ทำมุมตัดกัน 90° จึงนำค่าที่วัดได้มาเฉลี่ยก็จะได้ค่าขนาดทรงพุ่มของต้นพืช

4) น้ำหนักของพืช เมื่อสิ้นสุดการทดลองวัดความสูงพืชตลอดระยะเวลา 11 สัปดาห์ (รวมทั้งหมด 6 ครั้ง) ถอนพืชออกจากแปลงนำมาล้างดินออกให้หมด ผึ่งให้แห้ง แล้วนำมาชั่งน้ำหนักบันทึกเป็นน้ำหนักสดทั้งต้นของพืช หลังจากนั้นตัดพืชส่วนเหนือดินและส่วนใต้ดินออกจากกัน นำส่วนใต้ดินมาชั่งน้ำหนักแล้วบันทึกน้ำหนักสดของส่วนใต้ดินของพืชแต่ละแปลง แล้วจึงนำน้ำหนักของส่วนใต้ดินมาลบออกจากน้ำหนักสดทั้งต้นก็จะได้น้ำหนักสดของส่วนเหนือดิน จากนั้นแยกตัวอย่างพืชส่วนเหนือดินและส่วนใต้ดินอย่างละประมาณหนึ่งกิโลกรัม ไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส หรือถ้าหากมีผลผลิตน้อยกว่าหรือมากกว่าหนึ่งกิโลกรัมเล็กน้อยก็นำไปอบทั้งหมด เมื่อได้น้ำหนักแห้งคงที่แล้วนำมาคำนวณหาปริมาณน้ำในพืชของแต่ละส่วนดังสมการ

$$\text{ปริมาณน้ำในพืช (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักสด} - \text{น้ำหนักแห้ง}}{\text{น้ำหนักแห้ง}} \times 100$$

## 2.6 การทดลองบำบัดน้ำเสีย

2.6.1 สูบน้ำเสียชุมชนและน้ำชลประทาน ลงในบ่อซีเมนต์ปริมาตร 140 ลิตรต่อบ่อ ชั่งน้ำไว้ในแปลงทดลองเป็นเวลา 5 วัน แล้วระบายน้ำออกจนแห้ง ตากแดดจนดินแตกกระแหงเป็นเวลา 2 วัน คิดเป็น 1 รอบ ก่อนการขังน้ำในรอบต่อไป

2.6.2 เก็บตัวอย่างน้ำเสียชุมชนและน้ำชลประทานที่เข้าสู่แปลงทดลองใส่ขวดพลาสติกขนาด 1 ลิตร ที่เขียนฉลากระบุรหัส และวันที่เก็บตัวอย่าง จำนวนอย่างละ 2 ขวด เก็บรักษาตัวอย่างน้ำเสียที่อุณหภูมิไม่เกิน  $4^{\circ}\text{C}$  เพื่อนำไปวิเคราะห์หาบีโอดี ค่าความเป็นกรด-ด่าง ในโตรเจน ทั้งหมด แอมโมเนียมไนโตรเจน และฟอสฟอรัสทั้งหมด

2.6.3 เมื่อขังน้ำครบ 5 วัน แล้วจึงเก็บตัวอย่างน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วหลังจากปล่อยให้ น้ำไหลล้างท่อทิ้งไปเป็นเวลา 3-5 นาที จากแปลงทดลองแต่ละแปลงใส่ขวดพลาสติกขนาด 1 ลิตร ที่เขียนฉลากระบุรหัส และวันที่เก็บตัวอย่าง จำนวน 2 ขวด เก็บรักษาตัวอย่างน้ำที่ได้ไว้ที่อุณหภูมิไม่เกิน  $4^{\circ}\text{C}$  เพื่อนำไปวิเคราะห์หาบีโอดี ค่าความเป็นกรด-ด่าง ในโตรเจนทั้งหมด แอมโมเนียมไนโตรเจน และฟอสฟอรัสทั้งหมด ตามวิธีที่กำหนดใน Standard Method for Wastewater โดย APHA, AWWA and WPCF (1995) ในห้องปฏิบัติการต่อไป ส่วนน้ำในแปลงที่เหลือก็ระบายออกทิ้งไป

2.6.4 วัดระดับน้ำเหนือดินโดยวัดระยะจากขอบบ่อถึงระดับน้ำและวัดระยะจากขอบบ่อถึงระดับดิน จำนวน 3 จุดในแต่ละบ่อทดลอง ก่อนเก็บตัวอย่างน้ำที่ผ่านการบำบัดทุกรอบที่ทำการเก็บตัวอย่างน้ำไปวิเคราะห์ เพื่อนำค่าที่ได้ไปเฉลี่ยคำนวณหาการยุบตัวของดินและปริมาณน้ำที่ระบายออกจากแปลง จากนั้นระบายน้ำออกจากแปลงให้หมดแล้วปล่อยให้แห้งไว้ให้แห้ง 2 วัน เพื่อให้ น้ำที่อยู่บนดินแห้งสนิทจนผิวดินแตกกระแหงและยอมให้อากาศแทรกซึมลงไปดินได้ รวมระยะเวลา 7 วัน และทำการเก็บตัวอย่างน้ำทุกสองสัปดาห์ รวมทั้งสิ้น 6 ครั้ง

## 2.7 การคาดคะเนประสิทธิภาพของการบำบัด

2.7.1 คาดคะเนประสิทธิภาพการบำบัดโดยคร่าวๆ (approximate efficiency, Ap. eff., %) โดยสมมติว่าน้ำที่ใส่เข้าไปและน้ำที่ระบายออกมีปริมาตรไม่แตกต่างกัน มาคูณกับความเข้มข้นของมลสารก่อนและหลังการบำบัด (มิลลิกรัมต่อลิตร) มีวิธีการคำนวณดังนี้

$$\text{ประสิทธิภาพ (\%)} = \frac{\text{ความเข้มข้นในน้ำเข้า} - \text{ความเข้มข้นในน้ำออก}}{\text{ความเข้มข้นในน้ำเข้า}} \times 100$$

2.7.2 คาดคะเนประสิทธิภาพการบำบัดที่แท้จริง โดยคำนวณมวลมลสารก่อนเข้าแปลง จากปริมาณน้ำที่เข้าแปลง (140 ลิตรต่อแปลง) คูณด้วยความเข้มข้นของมลสารที่เข้าแปลง (มิลลิกรัมต่อลิตร) และคำนวณมวลมลสารที่ออกจากแปลงจากปริมาณน้ำที่ต้องระบายออก ทั้งหมดในวันที่ 6 ซึ่งผ่านการบำบัดแล้วครบ 5 วัน คูณด้วยความเข้มข้นของมลสารที่ผ่านการบำบัด จากสมการดังนี้

$$\text{ประสิทธิภาพ (\%)} = \frac{\text{มวลมลสารที่เข้า} - \text{มวลมลสารที่ออก}}{\text{มวลมลสารที่เข้าแปลง}} \times 100$$

การหามวลมลสารที่ออกจากแปลงที่วัดโดยตรงนั้นทำได้ยากมากและไม่คุ้มกับองค์ความรู้ที่จะได้รับเพราะจะต้องสร้างบ่อเพื่อเก็บปริมาณน้ำที่ระบายออกในแต่ละบ่อเพื่อให้สามารถวัดปริมาณน้ำที่ต้องระบายออกทั้งหมดทั้ง 24 แปลง แล้วจึงเก็บตัวอย่างมาหาความเข้มข้นของมลสาร การวิจัยครั้งนี้จึงใช้วิธีคาดคะเนจากปริมาณของน้ำที่ยังเหลืออยู่ที่ผิวดินและปริมาณของน้ำในดินที่อยู่ในช่องว่างขนาดใหญ่ เพราะน้ำในช่องว่างขนาดใหญ่เท่านั้นที่จะถูกระบายออกจากดินได้ ส่วนความเข้มข้นของมลสารของน้ำส่วนเหนือดินและส่วนที่อยู่ใต้ดินที่ขังครบ 5 วันแล้วก็น่าจะไม่แตกต่างกัน มีรายละเอียดของวิธีการทดลองดังนี้

1) วัดระดับน้ำที่เหลืออยู่ในส่วนเหนือดินในแปลงย่อยแต่ละแปลงในวันที่ 6 ก่อนการระบายน้ำออกจากแปลง โดยที่ระดับ 1 เซนติเมตร สามารถบรรจุน้ำได้ 7.85 ลิตร

2) คำนวณหาร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำในดินทั้งหมด (water holding capacity: WHC) คือ ปริมาณน้ำในดินที่อยู่ทั้งในช่องว่างขนาดใหญ่ (macropores) และในช่องว่างขนาดเล็ก (micropores) และร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำเฉพาะที่อยู่ในช่องว่างขนาดเล็กจากปริมาณความชื้นสมมูลย์ (moisture equivalent: ME) โดยคำนวณจากสมการของไพบูลย์ (2528) ซึ่งนำเอาข้อมูลดิบที่เกี่ยวข้องของ Motomura *et al.* (1979) มาศึกษาแล้วรายงานไว้ว่า

$$\text{WHC} = 32.3 + 0.5198 \text{ clay (\%)} \quad (r = 0.833^{**}, n = 129) \quad \text{_____ (1)}$$

$$\text{ME} = 14.5 + 0.4589 \text{ clay (\%)} \quad (r = 0.869^{**}, n = 128) \quad \text{_____ (2)}$$

เมื่อนำร้อยละของดินเหนียวมาคำนวณกับสมการข้างต้นจะได้ร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำทั้งหมดและร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำในช่องว่างขนาดเล็ก มาหาผลต่างก็จะได้ร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำในช่องว่างขนาดใหญ่

3) การคาดคะเนความหนาแน่นรวมของดิน เพื่อให้ทราบร้อยละโดยปริมาตรของน้ำในช่องว่างขนาดใหญ่โดยนำเอาความหนาแน่นรวมของดินไปคูณกับร้อยละโดยน้ำหนักของผลต่างที่คำนวณจากร้อยละของปริมาณอนุภาคดินเหนียวเป็นน้ำในช่องว่างขนาดใหญ่ที่ได้กล่าวแล้ว โดยที่เริ่มต้นของการทดลองใส่ดิน 225 กิโลกรัม ทำให้ดินสูงจากก้นบ่อขึ้นมาประมาณ 30 เซนติเมตร เมื่อขังน้ำแล้วดินจะยุบตัวลงเพราะก้อนดินจะแตกออกจากกันทำการวัดระดับของดินที่ยุบตัวลงทุกสองสัปดาห์หลังจากระบายน้ำออกจนหมด รวมทั้งสิ้น 6 ครั้ง พบว่าค่าเฉลี่ยความหนาของชั้นดินผสมที่ยุบตัวลงที่แล้วเหนือชั้นทรายหยาบคือ 28 เซนติเมตร เมื่อเอาความสูงของการยุบตัวของดินมาคูณกับพื้นที่ของบ่อซีเมนต์ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เมตร หรือมีค่าเท่ากับ  $3.14 \times (50)^2 \times 28$  ก็จะได้ปริมาตรของดินในบ่อที่ยุบตัวจนระดับคงที่แล้วเท่ากับ 219,800 ลูกบาศก์เซนติเมตร หรือ 219.80 ลิตรต่อแปลง ดังนั้นความหนาแน่นรวมของดินจึงเท่ากับ 1.024 กิโลกรัมต่อลิตร ( $225/219.80$ ) เพื่อนำไปคำนวณกับ % clay ที่มีอยู่ในดิน 42 เปอร์เซ็นต์

4) นำข้อมูลจากข้อ 1) ถึง 3) มาคำนวณร่วมกัน จะได้น้ำที่จะต้องระบายออกในวันที่ 6 ดังนี้

สมการที่ (1) - (2);  $54.13 - 33.77$  เท่ากับ  $20.36\%$  โดยน้ำหนัก

$$\begin{aligned} \therefore \text{ร้อยละโดยปริมาตร} &= \text{ร้อยละโดยน้ำหนัก} \times \text{ความหนาแน่นรวม} \\ &= 20.36 \times 1.024 \\ &= 20.85 \end{aligned}$$

เพราะฉะนั้น ถ้าดิน 100 ลิตร จะมีน้ำที่ระบายออกได้ 20.85 ลิตร  
ถ้าดิน 219.8 ลิตร จะมีน้ำที่ระบายออกได้ 45.83 ลิตร

ดังนั้น ปริมาณน้ำในช่องว่างดินขนาดใหญ่ มีน้ำอยู่เท่ากับ 45.83 ลิตรต่อแปลง

5) นำปริมาณน้ำในช่องว่างขนาดใหญ่ที่คำนวณได้จากสมการข้างต้นรวมกับปริมาณน้ำที่เหลืออยู่ในวันที่ 6 ก็จะได้ปริมาณน้ำที่ระบายออกในแต่ละครั้ง

## 2.8 วิธีการวิเคราะห์ตัวอย่าง

ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำทั้งก่อนใส่ลงในหน่วยทดลองและภายหลังที่ระบายน้ำออก ดัชนีที่วิเคราะห์มีดังนี้ คือ บีโอดี ค่าความเป็นกรด-ด่าง ไนโตรเจนทั้งหมด แอมโมเนียในไนโตรเจน และฟอสฟอรัสทั้งหมด ตามวิธีการของ APHA AWWA and WPCF (1995) วิเคราะห์ตัวอย่างพืช ภายหลังทดลอง ได้แก่ ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส ตามวิธีของทัศนีย์ และจรงค์ (2542) สามารถสรุปวิธีการวิเคราะห์ดัชนีคุณภาพน้ำ และพืชไว้ในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 วิธีวิเคราะห์ดัชนีคุณภาพน้ำ ดิน และพืช

ดัชนี	วิธีวิเคราะห์
<b>น้ำ</b>	
1. บีโอดี	BOD incubation 20 °C 5 days
2. ความเป็นกรด-ด่าง	pH meter
3. ไนโตรเจนทั้งหมด	Kjeldahl method
4. แอมโมเนียมไนโตรเจน	Colorimetric
5. ฟอสฟอรัสทั้งหมด	Colorimetric
<b>พืช</b>	
1. ไนโตรเจน	Kjeldahl method
2. ฟอสฟอรัส	Molybdo-vanadate yellow color method

## 2.9 การนำเสนอข้อมูล

ในการนำเสนอข้อมูลดิบของการทดลอง คือ ดัชนีคุณภาพน้ำ ได้แก่ บีโอดี ค่าความเป็นกรด-ด่าง ไนโตรเจนทั้งหมด แอมโมเนียมไนโตรเจน และฟอสฟอรัสทั้งหมด การเจริญเติบโตของพืช ได้แก่ ความสูง ความอวบของลำต้น ขนาดทรงพุ่ม น้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง ปริมาณน้ำในพืช และมวลรวมของพืช นำเสนอไว้ในตารางผนวกก่อนจะทำการวิเคราะห์ทางสถิติตามแผนการทดลอง และนำเสนอค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน สัมประสิทธิ์ของความแปรปรวนของอิทธิพลของชนิดน้ำ และชนิดพืช ประสิทธิภาพของการบำบัดอย่างคร่าวๆ (approximate efficiency, Ap. eff., %) โดยสมมติว่าน้ำที่ใส่เข้าไปและน้ำที่ระบายออกมีปริมาตรไม่แตกต่างกัน และนำเสนอประสิทธิภาพการบำบัดที่แท้จริงของระบบ

เมื่อวิเคราะห์ทางสถิติตามแผนการทดลองแล้วจะนำเอาค่า F value ของอิทธิพลอิสระของแหล่งน้ำที่ใช้ในการทดลองชนิดพืช และอิทธิพลร่วมของปัจจัยทั้งสองนี้ รวมทั้งค่า MS error และ degree of freedom ของ main plot และ sub plot ซึ่งจะทำให้สามารถคำนวณหา standard error ซึ่งจำเป็นต่อการหาค่า LSR (Least Significant Range) ของ DMRT (Duncan New Multiple Range Test) และบ่งชี้ความแปรปรวนภายในของดัชนีแต่ละค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ analysis of variance

ตามแผนการทดลองแบบ Split Plot Design ซึ่งมีวิธีการคำนวณแสดงอย่างละเอียดของ Gomez and Gomez (1984) นอกจากนี้ในตารางรวมของแต่ละดัชนีจะนำเสนอตารางย่อยแสดงอิทธิพลอิสระของแหล่งน้ำที่ใช้ในการทดลองและชนิดพืชเอาไว้ด้วยกัน โดยจะใช้ตัวอักษร a b และ c แสดงความแตกต่างของค่าเฉลี่ยในแต่ละรอบที่มีการเก็บข้อมูล เมื่อใช้เกณฑ์ของ LSR ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % มาเป็นเกณฑ์วัดความแตกต่าง ถ้าพบว่ามีความแตกต่างถึงระดับนัยสำคัญ (\*) และนัยสำคัญยิ่ง (\*\*\*) หากเป็น ab แสดงว่าไม่มีความแตกต่างทางสถิติกับ a และ b แต่มีแนวโน้มที่จะน้อยกว่า a และมีแนวโน้มที่จะมากกว่า b ในแต่ละครั้งไว้ในตารางเดียวกัน และนอกจากนี้ยังจะศึกษาความเป็นไปได้ของความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างค่าเฉลี่ยของบีโอดี ค่าความเป็นกรด-ด่าง ในโตรเจน ทั้งหมด แอมโมเนียมในโตรเจน และฟอสฟอรัสทั้งหมด ทั้งก่อนและหลังการบำบัดกับช่วงเวลาที่ทำกรทดลอง นำค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เชิงเส้นตรงมาเสนอและหากค่าที่ได้ถึงระดับนัยสำคัญก็จะนำเสนอค่า intercept (a) และ slope (b) ตาม model ทางคณิตศาสตร์  $Y = a + bX$  ไว้ด้วย

## 2.10 ระยะเวลาที่ทำการศึกษาวิจัย

ทำการศึกษาวิจัยตั้งแต่เดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2548 ถึงเดือนกุมภาพันธ์ 2549 รวมระยะเวลาในการทดลองทั้งสิ้น 4 เดือน

## ผลและวิจารณ์

### 1. สมบัติของน้ำก่อนการบำบัดด้วยระบบดินน้ำข้างสลับแห้ง

#### 1.1 สมบัติของน้ำก่อนการทดลอง

ผลการวิเคราะห์สมบัติของน้ำเสียชุมชนเทศบาลเมืองเพชรบุรีและน้ำชลประทานเทศบาลเมืองเพชรบุรี ที่ทำการเก็บตัวอย่างน้ำทั้งสองสัปดาห์(ตั้งแต่รอบที่ 1 จนถึงรอบที่ 11) รวม สุ่มเก็บตัวอย่างน้ำก่อนการทดลอง 6 ครั้ง ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียชุมชนและน้ำชลประทาน ก่อนการบำบัดเสนอไว้ในตารางที่ 4 และตารางที่ 5 และได้แสดงพิสัย (range) โดยขีดเส้นใต้ทั้ง ค่าสูงสุดและต่ำสุดไว้ให้เห็นค่าจุดศูนย์กลาง (mid point) ซึ่งได้จากค่าเฉลี่ยของค่าต่ำสุดและสูงสุด ค่าเฉลี่ย (mean) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ( $\pm$ SD) และสัมประสิทธิ์ของความแปรปรวน (CV) ของแต่ละดัชนีไว้ด้วยสามารถอธิบายได้ดังนี้

##### 1.1.1 บีโอดี

บีโอดี คือ ปริมาณออกซิเจนที่แบคทีเรียใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ชนิดย่อยสลายได้ภายใต้สภาวะที่มีแกสออกซิเจน เป็นดัชนีที่สามารถใช้ในการแสดงให้เห็นว่าน้ำนั้นมีความเน่าเสียมากน้อยเพียงใด ถ้าแหล่งน้ำนั้นมีค่าบีโอดีสูงมากแสดงว่าในแหล่งน้ำนั้นมีสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายง่ายอยู่มากและจะเป็นอาหารชั้นดีของแบคทีเรีย ซึ่งก็จะต้องมีการหายใจโดยใช้แกสออกซิเจนในน้ำนั้นเป็นจำนวนมากทำให้เกิดการขาดออกซิเจนได้ (กรรณิการ์, 2544)

ค่าบีโอดีของน้ำเสียชุมชนเทศบาลเมืองเพชรบุรี พบว่ามีค่าผันแปรอยู่ในพิสัย 15.0-48.5 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าเฉลี่ย 31.2 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งใกล้เคียงกับค่าจุดศูนย์กลาง (mid point) 31.8 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้สันนิษฐานได้ว่าการกระจายของข้อมูลเป็นการกระจายปกติ (normal distribution) ซึ่งมีลักษณะแบบระฆังคว่ำ โดยมีการกระจายส่วนใหญ่อยู่ในพิสัย  $31.2 \pm 13.9$  มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนค่อนข้างมาก คือ ร้อยละ 44.5 เมื่อเปรียบเทียบกับค่าพิสัยของค่าบีโอดีจากการรวบรวมของ Metcalf and Eddy (1991) ที่ว่าความเข้มข้นของบีโอดีของน้ำเสียชุมชนระดับน้อย ปานกลาง และมากมีค่า 110 220 และ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ แล้วจะเห็นว่าพิสัยของค่าบีโอดีนี้ต่ำกว่าค่าเฉลี่ยของระดับน้อย (110) มาก แต่สาเหตุที่ทำให้บีโอดี