บทที่ 2

การตรวจสอบเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 น้ำเสียชุมชน

2.1.1 ความหมายและลักษณะของน้ำเสียชุมชน

น้ำเสียชุมชน (municipal wastewater) หมายถึง น้ำเสียที่เกิดจากการประกอบอาหารและชำระล้างสิ่งสกปรกในครัวเรือนและอาคารประเภทต่างๆ รวมถึงน้ำเสียจากกิจกรรมที่เป็นอาชีพ ได้แก่ น้ำเสียจากโรงแรม โรงพยาบาล ร้านอาหาร เป็นต้น (ควบคุมมลพิษ, กรม, 2546)

ลักษณะทั่วไปของน้ำเสียชุมชน พบว่ามีค่าความเป็นกรด – ด่างประมาณ 7 และมีองค์ประกอบที่สำคัญ คือ (1) สารอินทรีย์ ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน ซึ่งมาจากเศษข้าว พืชผัก ชิ้นเนื้อ เป็นต้น ซึ่งสามารถย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจน ทำให้ระดับออกซิเจนละลาย (dissolved oxygen)ในน้ำลดลง เกิดสภาพเน่าเหม็น (2) ธาตุอาหาร ได้แก่ ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส ที่ได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์ และ (3) สารอนินทรีย์ ได้แก่ แร่ธาตุต่างๆ เช่น คลอไรด์และซัลเฟอร์ นอกจากนี้ยังพบโลหะหนัก และสารพิษ เช่น ปรอท โครเมียม และทองแดง ซึ่งปกติจะอยู่ในน้ำเสียอุตสาหกรรม และสารเคมีที่ใช้ในการปราบศัตรูพืช สำหรับในเขตชุมชนอาจมีสารมลพิษเหล่านี้มาจากอุตสาหกรรมในครัวเรือนบางประเภท เช่น ร้านซุบโลหะ อู่ซ่อมรถ และน้ำเสียจากโรงพยาบาล เป็นต้น (ควบคุมมลพิษ, กรม, 2546) รวมทั้งยังพบจุลินทรีย์ ได้แก่ แบคทีเรีย โปรโตซัว และไวรัส (อภิชัย เชียร์ศิริกุล, 2533)

ลักษณะของน้ำเสียชุมชนจะแตกต่างกันไปตามลักษณะของชุมชน โดยมีปัจจัยต่างๆ ได้แก่ (1) มาตรฐานการครองชีพ กล่าวคือ ประชาชนที่มีรายได้สูงมักจะใช้และก่อให้เกิดน้ำทิ้งมากกว่าผู้มีรายได้ต่ำ เนื่องมาจากมีกิจกรรมและอุปกรณ์อำนวยความสะดวกมากกว่า (2) สภาวะทางเศรษฐกิจ คนในเขตชุมชนเมืองหรือชุมชนหนาแน่น จะมีอัตราการปล่อยน้ำเสียมากกว่าเขตชุมชนชนบท (3) ระบบการระบายน้ำ และ (4) ฤดูกาล เป็นต้น (อภิชัย เชียร์ศิริกุล, 2533)

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.1 ลักษณะของน้ำเสียชุมชน

พารามิเตอร์	หน่วย	ความเข้มข้น		
		น้อย	ปานกลาง	มาก
1.ของแข็งทั้งหมด (total solids)	mg/l	350	720	1200
ของแข็งละลายน้ำ (dissolved solids)	mg/l	250	500	850
ของแข็งแขวนลอย (suspended solids)	mg/l	100	220	350
2.ปริมาณตะกอนหนัก (settleable solids)	mg/l	5	10	20
3.ค่าบีโอดี (biochemical oxygen demand; BOD)	mg/l	110	220	400
4.ค่าซีโอดี (chemical oxygen demand; COD)	mg/l	250	500	1000
5.ไนโตรเจนทั้งหมด (total as N)	mg/l	20	40	85
อินทรีย์ไนโตรเจน (organic)	mg/l	8	15	35
แอมโมเนีย (free ammonia)	mg/l	12	25	50
ไนไตรท์ (nitrites)	mg/l	0	0	0
ไนเตรท (nitrate)	mg/l	0	0	0
6.ฟอสฟอรัสทั้งหมด (total as P)	mg/l	4	8	15
อินทรีย์ฟอสฟอรัส (organic)	mg/l	1	3	5
อนินทรีย์ฟอสฟอรัส (inorganic)	mg/l	3	5	10
7. คลอไรด์ (chloride)	mg/l	30	50	100
8.ซัลเฟต (sulfate)	mg/l	20	30	50
9.สภาพด่าง (alkalinity as $CaCO_3$)	mg/l	50	100	200
10.ไขมัน (grease)	mg/l	50	100	150
11.โคลิฟอร์มทั้งหมด (total coliform)	MPN/100ml	10^6-10^7	10^7-10^8	10^7-10^9

ที่มา: Metcalf และ Eddy (1991) อ้างถึงใน ควบคุมมลพิษ, กรม (2546)

2.1.2 ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำเสียชุมชน

ธาตุอาหารในน้ำเสียชุมชนส่วนใหญ่พบอยู่ในรูปของสารประกอบไนโตรเจน (nitrogen compounds) และสารประกอบฟอสฟอรัส (phosphorus compounds)

2.1.2.1 ไนโตรเจน

สารประกอบไนโตรเจนในน้ำเสีย แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ สารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน (organic nitrogen) เช่น โปรตีน กรดอะมิโน กรดนิวคลีอิค สารดังกล่าวเป็นส่วนประกอบของพืชและสัตว์ ในอุจจาระและมูลสัตว์ เป็นต้น ส่วนอีกประเภทหนึ่ง คือ สารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจน (inorganic nitrogen) เช่น แอมโมเนีย (ammonia) ไนไตรท์ (nitrite) และไนเตรท (nitrate) สารเหล่านี้อาจอยู่ในรูปปุ๋ย หรือเกลือในปัสสาวะ

ไนโตรเจนในน้ำเสียชุมชนอาจก่อให้เกิดผลเสียต่อสภาพแวดล้อมหลายประการ ได้แก่

1) ปัญหายูโทรฟิเคชั่น (eutrophication) สารประกอบไนโตรเจน โดยเฉพาะในรูปไนเตรท และแอมโมเนียมไอออน เมื่อระบายสู่แหล่งน้ำนิ่ง เช่น หนอง บึง ทะเลสาบ จะทำให้พืชน้ำจำพวกสาหร่ายเติบโตอย่างรวดเร็ว และมากเกินไป (algal bloom) จนในที่สุดเมื่อสาหร่ายตายลงจะเกิดการย่อยสลายจนออกซิเจนในแหล่งน้ำถูกใช้หมดไป ทำให้เกิดปัญหาน้ำเน่าเสีย และมีกลิ่นเหม็น ไม่สามารถใช้ประโยชน์จากแหล่งน้ำได้อย่างเหมาะสม (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544)

2) การลดลงของปริมาณออกซิเจนละลาย (dissolved oxygen) เนื่องจากกระบวนการไนตริฟิเคชั่น โดยการเปลี่ยนรูปแอมโมเนียเป็นไนไตรท์ และ ไนเตรท ดังสมการ

$$2\,NH_4^+ + 3\,O_2 \longrightarrow 4\,NH_3^+ + H_2O + 2\,NO_2^-$$

$$NH_4^+ + 2\,O_2 \longrightarrow 2\,H^+ + H_2O + NO_3^-$$

3) อันตรายต่อสุขภาพและอนามัยของเด็กและทารก โดยน้ำที่มีปริมาณไนเตรทไนไตรท์สูงเกินไป อาจทำให้เกิดโรค methemoglobinemia หรือ blue babies กับทารก โดยไนไตรท์จะทำปฏิกิริยากับฮีโมโกลบินในเลือดเกิด methemoglobin ซึ่งไม่สามารถรับส่งออกซิเจนได้ ทำให้เด็กมีอาการหายใจไม่ออก และตัวเขียว (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544)

4) อันตรายต่อสัตว์น้ำ โดยไนโตรเจนในรูปแอมโมเนียอิสระ เมื่อระดับความเป็นกรด-ด่าง สูงกว่า 7 จะแสดงความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำ โดยระดับแอมโมเนียที่เป็นพิษต่อสัตว์น้ำ คือ 0.01-2.00 mg/l (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2542)

2.1.2.2 ฟอสฟอรัส

ฟอสฟอรัสในน้ำเสียชุมชนส่วนใหญ่มีแหล่งกำเนิดมาจากของเสียจากมนุษย์และสัตว์ เช่น ในน้ำทิ้งจากห้องน้ำ จากผงซักฟอกที่มีฟอสเฟตเป็นองค์ประกอบหลัก และนอกจากนี้ยังพบในรูปของเศษอาหาร (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2543) ฟอสฟอรัสในน้ำเสียนั้น ส่วนใหญ่เป็นฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปฟอสเฟต (phosphate) รวมถึง orthophosphate และ condensed phosphate ทั้งละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ ทั้งในรูปสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ (อภิชัย เชียร์สกุล, 2533)

ฟอสฟอรัสเป็นธาตุอาหารที่สำคัญมากธาตุหนึ่ง และเป็นปัจจัยจำกัดที่ควบคุมผลผลิตทางชีวภาพในแหล่งน้ำ จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืชและสาหร่าย ดังนั้นในบริเวณที่มีน้ำนิ่ง หากมีการระบายน้ำเสียที่มีสารประกอบฟอสฟอรัสปะปนอยู่ลงในแหล่งน้ำ อาจเป็นสาเหตุให้เกิดปัญหายูโทรฟิเคชั่น เนื่องจากสาหร่ายใช้ฟอสฟอรัสเป็นธาตุอาหารหลักเช่นเดียวกับไนโตรเจน (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544)

2.2 พื้นที่ชุ่มน้ำ (wetlands)

2.2.1 ความหมายและความสำคัญ

พื้นที่ชุ่มน้ำ (wetlands) หมายถึง บริเวณพื้นที่ที่ถูกน้ำท่วมขัง หรืออิ่มตัวด้วยน้ำผิวดินหรือน้ำใต้ดิน ที่มีจำนวนครั้งของการท่วมขัง และช่วงเวลาในการท่วมขังนานเพียงพอที่จะทำให้การแพร่กระจายของพืชพรรณปรับตัวให้สามารถเจริญเติบโตเป็นปกติได้ในสภาวะที่ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (Cowardin และคณะ 1979 อ้างถึงใน ยุพเยาว์ โตคีรี, 2544) พื้นที่ชุ่มน้ำมักตั้งอยู่ระหว่างแผ่นดิน และแหล่งน้ำ หน้าที่สำคัญของพื้นที่ชุ่มน้ำ คือ (1) เป็นแหล่งกักเก็บและส่งผ่านน้ำจากบนบกลงสู่แหล่งน้ำ นอกจากนี้ยังเป็นแหล่งกักเก็บน้ำไว้สำหรับฤดูที่ขาดแคลน (2) พื้นที่ชุ่มน้ำป่าชายเลนช่วยลดการกัดกร่อนของพื้นที่ชายฝั่งทะเล จากกระแสลมและคลื่นจากทะเล (3) เป็นที่อยู่อาศัยและดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตต่างๆ ที่อาศัยอยู่บริเวณในพื้นที่ชุ่มน้ำ (4) เป็นแหล่งท่องเที่ยวและนันทนาการ และ (5) ช่วยบำบัดสารพิษต่างๆ เพราะพื้นที่ชุ่มน้ำเป็นที่กักเก็บ และเปลี่ยนรูปธาตุอาหารรวมทั้งบำบัดสารปนเปื้อนต่างๆ (Novotny และ Olem, 1994)

2.2.2 ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม (constructed wetland system)

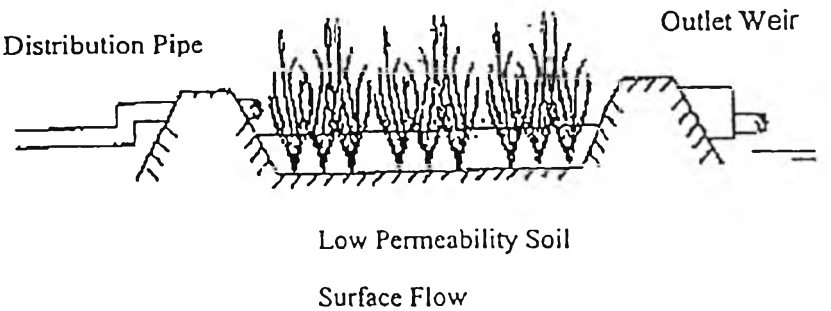
ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม (constructed wetland system) เป็นระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้น โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อบำบัดน้ำเสียโดยการเลียนแบบกลไกการบำบัดของเสียตามธรรมชาติ คือ อาศัย ดิน น้ำ พืช และ จุลินทรีย์ในการบำบัดน้ำเสีย (Moshiri, 1993)

พื้นที่ชุ่มน้ำเทียมเริ่มเป็นที่แพร่หลายในการใช้บำบัดน้ำเสีย ตั้งแต่ทศวรรษ 1970 (IWA, 2000 อ้างถึงใน Lin และคณะ, 2005) โดยใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากเหมืองแร่ เกษตรกรรม อุตสาหกรรม และชุมชน (US. EPA., 2000 อ้างถึงใน Lin et al., 2005) เนื่องจากมีการออกแบบก่อสร้างที่ไม่ซับซ้อน การดูแลระบบไม่ต้องอาศัยเทคโนโลยีมากนัก มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่ำ ระบบมีความยืดหยุ่นสูง สามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงของอัตราภาระบรรทุกต่างๆได้ (Clough และคณะ, 1983; Aya และ Akca, 2001 อ้างถึงใน Klomjek และ Nitisoravut, 2005; IWA, 2000 อ้างถึงใน Lin. และคณะ, 2005)

โดยทั่วไปจะแบ่งพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมออกเป็น 2 ประเภท คือ

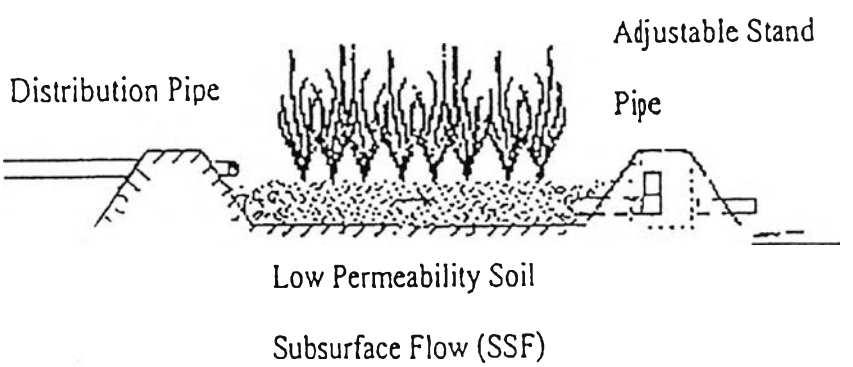
1) ระบบน้ำไหลเหนือผิวดิน (free water surface system, FWS) เป็นระบบที่มีลักษณะและบทบาทในการบำบัดน้ำเสียใกล้เคียงกับพื้นที่ชุ่มน้ำธรรมชาติ (US. EPA., 1987) ตัวกลางและพืชมีหลายประเภท ซึ่งการนำมาใช้ขึ้นอยู่กับสภาพของพื้นที่ และองค์ประกอบของน้ำเสีย เป็นต้น การปล่อยน้ำเสียควรปล่อยไหลลงบ่อแบบช้าๆ และควรมีการปรับพื้นให้น้ำเสียไหลตามแนวนอนขนานกับตัวกลาง สำหรับตัวกลางที่ปลูกพืชที่มีลักษณะโผล่พ้นน้ำ (emergent plant) และรากพืชที่ยึดเกาะดินจะช่วยในการกรองและตกตะกอนสารแขวนลอย และอินทรียสารที่ตกตะกอนได้ รวมทั้งส่งผ่านออกซิเจนจากยอดมาสู่รากทำให้เกิดบริเวณที่เรียกว่า rhizosphere ทำให้จุลินทรีย์มีแหล่งออกซิเจนในการทำปฏิกิริยาในการย่อยสลายอินทรียสาร และสารประกอบอื่นๆให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น (Moshiri, 1993)

2) ระบบน้ำไหลใต้ผิวดิน (subsurface flow system, SFS) ระบบนี้จะบรรจุชั้นตัวกลางเพื่อให้รากพืชยึดเกาะตัวกลางที่ใช้ ได้แก่ หิน กรวด ดิน และทราย ด้านล่างปูด้วยแผ่นโพลีเอธิลินเพื่อป้องกันไม่ให้น้ำซึมสู่น้ำใต้ดิน ก้นบ่อที่มีความลาดชันประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ เพื่อไม่ให้เกิดการขังของน้ำ ระบบนี้อาศัยการเติมอากาศของพืชเป็นหลัก น้ำเสียจะถูกบำบัดเมื่อไหลผ่านตัวกลางและรากพืช ชั้นตัวกลางจะมีสภาวะไร้ออกซิเจน (anaerobic) แต่จุลินทรีย์จะใช้ออกซิเจนจากรากพืชในการดำรงชีวิต (เกรียงศักดิ์ อุดมศิลป์โรจน์, 2542)



รูปที่ 2.1 ระบบน้ำไหลเหนือผิวดิน (free water surface system , FWS)

ที่มา: Kadlec และ Knight (1996)



รูปที่ 2.2 ระบบน้ำไหลใต้ผิวดิน (subsurface flow system, SFS)

ที่มา: Kadlec และ Knight (1996)

2.3 ป่าชายเลน

2.3.1 ความหมายและความสำคัญ

ป่าชายเลน หมายถึง กลุ่มของสังคมพืชซึ่งขึ้นอยู่ในดินเลนริมทะเล และตามปากแม่น้ำ ซึ่งน้ำเค็มท่วมถึงเป็นครั้งคราว หรือเป็นประจำทุกวัน ป่าชายเลนเป็นป่าไม่ผลัดใบ และพันธุ์ไม้ชายเลนจัดอยู่ในจำพวกทนแล้ง เพราะไม่สามารถใช้ประโยชน์จากน้ำเค็มได้ (เทียมใจ คมกฤส, 2536)

ป่าชายเลนเป็นแหล่งผลิตอาหารและพลังงานที่สำคัญยิ่งสำหรับมนุษย์ และยังเป็นแหล่งอาหารที่สำคัญของสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในน้ำ โดยอินทรียวัตถุที่ย่อยสลายจากซากพืช เช่น ใบไม้ที่ร่วงหล่น จะเป็นอาหารของ กุ้ง หอย ปู ปลา นอกจากนี้สารอินทรีย์ที่ละลายน้ำก็เป็นอาหารของจุลินทรีย์ตลอดจนแพลงก์ตอนพืชต่อไป (เทียมใจ คมกฤส, 2536)

ป่าชายเลนมีความสำคัญและเป็นประโยชน์ต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์หลายรูปแบบ เช่น ประโยชน์ทางด้านป่าไม้ มีการนำไม้จากป่าชายเลน มาทำไม้ค้ำยัน ฟืน และถ่าน ซึ่งถ่านจากไม้โกงกาง เป็นถ่านคุณภาพดี ให้ความร้อนสูง มีปริมาณขี้เถ้าต่ำ เปลือกไม้ชายเลนบางชนิด เช่น โกงกาง พังกาหัวสุม และโปรง เป็นแหล่งของแทนนิน ซึ่งนำมาใช้ในอุตสาหกรรมสี การย้อมอวน และการฟอกหนัง สำหรับทางด้านการประมง ป่าชายเลนนอกจากเป็นแหล่งอาหารของสัตว์น้ำ ยังเป็นแหล่งอนุบาลสัตว์น้ำในระยะตัวอ่อน และยังมีบทบาทในการป้องกันการกัดเซาะชายฝั่ง จากกระแสลมและคลื่นจากทะเล (สนิท อักษรแก้ว, 2542)

นอกจากนี้ป่าชายเลนยังรักษาสมดุลของระบบนิเวศ โดยทำหน้าที่เป็นแหล่งสะสม (accumulation) และเปลี่ยนรูป (transformation) ธาตุอาหารและสารเคมีที่ปนเปื้อน ซึ่งมีผลต่อคุณภาพน้ำ และผลผลิตของระบบนิเวศ (Reddy และ Patrick, 1993 อ้างถึงใน เจนจิรา แก้วรัตน์, 2541) ดังนั้นจึงมีการใช้ป่าชายเลนในการบำบัดน้ำเสียชุมชน (Tam และ Wong, 1995; Boonsong และคณะ, 2002) เนื่องจากน้ำเสียชุมชนมีธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช

2.3.2 พันธุ์ไม้ชายเลน

Santisuk (1993) อ้างถึงใน สนิท อักษรแก้ว (2542) รายงานว่า พันธุ์ไม้เด่นและเป็นชนิดที่สำคัญในป่าชายเลนของประเทศไทย ส่วนมากอยู่ในวงศ์ Rhizophoraceae โดยเฉพาะในสกุลไม้โกงกาง (*Rhizophora*) สกุลไม้โปรง (*Ceriops*) และสกุลไม้ถั่ว (*Bruguiera*) วงศ์ Sonneratiaceae ได้แก่ ไม้ในสกุลไม้ลำพูและลำแพน (*Sonneratia*) วงศ์ Verbenaceae ได้แก่ ไม้ในสกุลแสม (*Avicennia*) หลายชนิด และวงศ์ Meliaceae ได้แก่ พันธุ์ไม้ในสกุลไม้ตะบูนและตะบัน (*Xylocarpus*)

เนื่องจากป่าชายเลนเป็นสังคมพืชที่ขึ้นอยู่บริเวณริมชายฝั่งทะเลที่มีกระแสน้ำขึ้นลงอยู่เสมอ น้ำมีความเค็มสูง และบางครั้งในบางพื้นที่ยังมีลมพัดแรงและแสงแดดจัด ดังนั้นพันธุ์ไม้จึงต้องมีการปรับตัว (adaptation) เพื่อการเจริญเติบโตและการอยู่รอดในสภาพแวดล้อมดังกล่าว เช่น มีต่อมขับเกลือตามบริเวณใบ เพื่อควบคุมระดับความเข้มข้นของเกลือในใบ มีใบเป็นมันวาวเพื่อลดการคายน้ำ รวมทั้งมีระบบรากหายใจที่แตกต่างกัน เช่น ไม้แสมและลำพู จะเป็นแบบ pneumatophores ไม้พังกาและโปรง จะมีลักษณะคล้ายเข่า (knee roots) ไม้โกงกางจะเป็นแบบรากค้ำจุน (stilt roots) ไม้ตะบูนจะเป็นแบบพูพอน (buttress roots) เป็นต้น (สนิท อักษรแก้ว, 2542)

พันธุ์ไม้ในป่าชายเลนจะขึ้นเป็นแนวเขตที่ค่อนข้างแน่นอน คือจากบริเวณชายฝั่งจนลึกไปในป่าด้านใน เนื่องจากปัจจัยทางกายภาพและทางเคมีของดิน ความเค็มของน้ำในดิน กระแสน้ำและการระบายน้ำ ความเปียกชื้นของดิน ตลอดจนความถี่ของน้ำทะเลที่ท่วมถึง (Chapman, 1975 อ้างถึงใน สนิท อักษรแก้ว, 2542)

Watson (1928) อ้างถึงใน สนิท อักษรแก้ว (2542) ได้แบ่งเขตพันธุ์ไม้ป่าชายเลน โดยใช้ความถี่ของน้ำทะเลท่วมถึงเป็นเกณฑ์ สามารถแบ่งได้เป็น 5 เขตพื้นที่ เริ่มจากบริเวณนอกสุดจากชายฝั่ง พื้นที่บริเวณนี้น้ำท่วมถึงทุกครั้ง จะไม่มีพันธุ์ไม้ชนิดใดขึ้นได้ ยกเว้นโกงกางใบใหญ่ (*Rhizophora mucronata*) ถัดเข้ามาเป็นเขตที่ 2 พื้นที่บริเวณนี้น้ำท่วมขณะที่มีน้ำขึ้นสูงปานกลาง พันธุ์ไม้ที่ขึ้นในบริเวณนี้ได้แก่ โกงกางใบใหญ่ แสมขาว (*Avicennia alba*) และแสมทะเล (*Avicennia marina*) เขตที่ 3 พื้นที่บริเวณนี้ถูกน้ำท่วมขังขณะที่น้ำขึ้นสูงตามปกติบริเวณนี้พันธุ์ไม้ป่าชายเลนเจริญเติบโตได้ดี โดยเฉพาะโกงกางจะขึ้นหนาแน่น นอกจากนี้มีถั่วดำ (*Bruguiera cylindrica*) และโปรงแดง (*Ceriops tagal*) เขตที่ 4 พื้นที่บริเวณนี้จะถูกน้ำท่วมถึงเมื่อน้ำขึ้นสูงสุดเท่านั้น บริเวณนี้จะมีสภาพแห้งเกินไปสำหรับโกงกางที่จะขึ้นได้ แต่จะเหมาะกับไม้พังกาหรือไม้ถั่ว (*Bruguiera*) และไม้ตะบูน (*Xylocarpus*) เขตสุดท้าย เป็นเขตที่อยู่ขอบด้านในสุดของป่าชายเลน พื้นที่บริเวณนี้จะถูกน้ำท่วมก็ต่อเมื่อน้ำขึ้นสูงสุดเป็นพิเศษเท่านั้น พันธุ์ไม้ที่ขึ้นในบริเวณนี้ ได้แก่ จาก (*Nypa fruticans*) และหงอนไก่ทะเล (*Heritiera littoralis*) เป็นต้น

2.3.2.1 โกงกางใบใหญ่ (*Rhizophora mucronata*)

โกงกางใบใหญ่เป็นพันธุ์ไม้ที่ขึ้นได้ดีในดินที่มีสภาพเป็นเลน บริเวณนอกสุดจากชายฝั่ง (Steenis, 1958 อ้างถึงใน สนิท อักษรแก้ว, 2542) เป็นไม้ยืนต้นขนาดกลางถึงขนาดใหญ่ สูง 30-40 เมตร มีรากค้ำจุน (prop root) จำนวนมากแตกออกจากส่วนลำต้น เหนือโคนต้นประมาณ 2-7 เมตร โดยรากจะแตกจากโคนต้นและโค้งจรดดินช่วยให้สามารถต้านลมพายุและคลื่นได้ เนื่องจากเป็นพันธุ์ไม้ที่มักพบบริเวณนอกสุด หรือริมฝั่งทะเล และแม่น้ำที่เป็นดินเลน (ธวัชชัย สันติสุข, 2538) โกงกางใบใหญ่เป็นพืชที่ต้องการความเค็มสูง (stenchaline) จึงสามารถขึ้นอยู่ในบริเวณที่มีความเค็มของน้ำในดินสูง และมีการเปลี่ยนแปลงความเค็มของน้ำใต้ดินเสมอไต้ Schimper (1903) อ้างถึงใน สนิท อักษรแก้ว (2542) รายงานว่า โกงกางใบใหญ่สามารถเจริญเติบโตได้ดีเมื่อความเค็มของน้ำในดิน 20 เปอร์เซ็นต์ โกงกางใบใหญ่สามารถขึ้นได้บริเวณนอกสุดจากชายฝั่ง พื้นที่บริเวณนี้น้ำท่วมถึงทุกครั้ง พื้นที่บริเวณที่น้ำท่วมขณะที่มีน้ำขึ้นสูงปานกลาง แต่จะเจริญเติบโตได้ดีและขึ้นหนาแน่นในบริเวณนี้ถูกน้ำท่วมขังขณะที่น้ำขึ้นสูงตามปกติ (Hensse, 1961 อ้างถึงใน สนิท อักษรแก้ว, 2542) ใบของโกงกางใบใหญ่มีลักษณะอวบน้ำและเป็นมัน ผลของโกงกางเป็นแบบ berry มีเมล็ดแบบ viviparous คือ ขณะที่ผลยังติดอยู่บนต้น ส่วน radicle ของเมล็ดจะงอกออกมาทางปลายผล ตามด้วยส่วนของ hypocotyl ซึ่งเจริญยาวออกมาเรื่อยๆ มีลักษณะปลายแหลมยาว เรียกว่า seedling (ชาวบ้านเรียกว่าฝัก) เมื่อ seedling แก่เต็มที่จะหล่นปักเลนหรือลอยไปตามกระแสน้ำ แล้วเจริญเป็นต้นใหม่ต่อไป (พูนศรี เมืองส่ง และ สนิท อักษรแก้ว, 2540)

2.3.2.2 แสมทะเล (*Avicennia marina*)

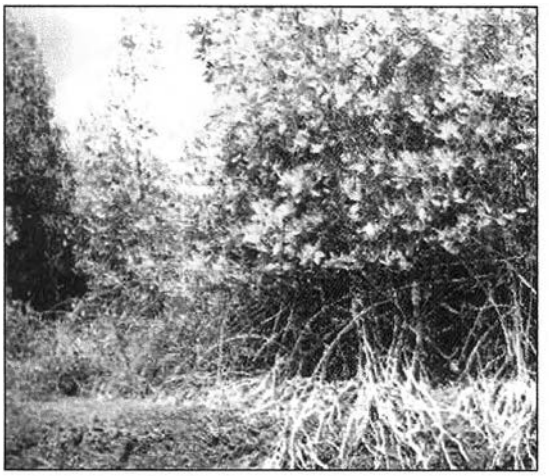
แสมทะเลในประเทศไทยพบกระจายทั่วไปในป่าชายเลน โดยเฉพาะพื้นที่ที่ติดกับชายฝั่งทะเล หรือบริเวณปากแม่น้ำ โดยแสมทะเลสามารถเจริญเติบโตได้ในดินทุกประเภท (Burnning, 1947 อ้างถึงใน กนกพร บุญส่ง, 2528) แต่สามารถเจริญเติบโตได้ดีในบริเวณที่เป็นดินเลนปนทราย (Gledhill, 1993 อ้างถึงใน สนิท อักษรแก้ว, 2542) เป็นไม้ยืนต้นขนาดเล็ก สูงประมาณ 5-8 เมตร มีลักษณะเป็นพุ่ม ส่วนใหญ่จะพบว่ามี 2 ลำต้น หรือมากกว่า มีรากหายใจยาวประมาณ 10-20 เซนติเมตร แสมทะเลจัดเป็นพืชที่มีระบบรากหายใจ (pneumatophore) ซึ่งเป็นรากที่เจริญมาจาก cable root หรือ horizontal root ทนทานต่อสภาพน้ำท่วมขังได้นาน รากหายใจจะตั้งชูขึ้นมาเหนือผิวดินในแนวตั้งฉากรอบๆลำต้น โดยมักมีความสูงจำกัดไม่เกิน 30 เซนติเมตร ซึ่งรากหายใจจำนวนมากของแสมทะเลจะช่วยในการตกตะกอน (เทียมใจ คมกฤส, 2536) แสมทะเลเป็นพืชที่มีการปรับตัวให้ทนต่อความเค็มได้ดี โดยที่สามารถเจริญเติบโตได้ในบริเวณที่มีน้ำใต้ดินเป็นน้ำจืดจนถึงในบริเวณที่น้ำใต้ดินมีความเค็มสูงถึง 30 เปอร์เซ็นต์ และเจริญเติบโตได้ดีในพื้นที่บริเวณนี้น้ำท่วมขณะที่มีน้ำขึ้นสูงปานกลาง (Champman และ Ronalson, 1958 อ้างถึงใน สนิท อักษรแก้ว)

2.3.2.3 พังกาหัวสุมดอกแดง (*Bruguiera gymnorrhiza*)

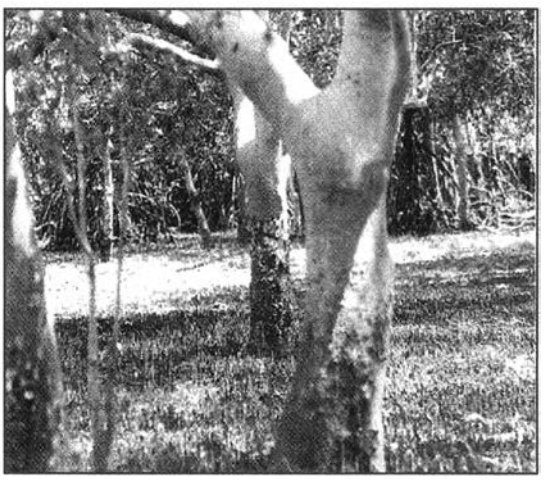
พังกาหัวสุมดอกแดงพบอยู่ทั่วไปในป่าชายเลนของประเทศไทย เจริญเติบโตได้ดีบนพื้นที่ที่เป็นดินเลนค่อนข้างแข็ง และมีน้ำท่วมถึงอยู่สม่ำเสมอ ส่วนใหญ่จะเป็นพื้นที่หลังกลุ่มไม้โกงกาง ขนาดต้นสูงประมาณ 25-35 เมตร มีรากค้ำจุน (prop root) แต่น้อยกว่าโกงกาง และแตกออกจากลำต้นในระดับที่ต่ำกว่าโกงกาง ตามโคนยังมีรากในลักษณะที่เป็นพูพอน (buttress root) เตี้ยๆ รอบๆบริเวณเปลือกที่พูพอนมักมีตุ่มขนาดใหญ่และหนาแน่น และมีรากที่โผล่ขึ้นมาจากผิวดินเป็นรากหายใจลักษณะคล้ายเข่า (knee root) (เทียมใจ คมกฤส, 2529) พังกาหัวสุมดอกแดงเป็นพืชที่สามารถเจริญเติบโตได้เมื่อความเค็มของน้ำในดินอยู่ในช่วง 10-25 เปอร์เซ็นต์ และเจริญเติบโตได้ดีในบริเวณที่น้ำท่วมถึงเมื่อน้ำขึ้นสูงสุดเท่านั้น เปลือกของพังกาหัวสุมดอกแดงจะแตกเป็นร่องลึกตามยาวลำต้น สีของลำต้นเป็นสีน้ำตาลเข้มหรือสีดำ ใบรี ปลายใบแหลมสั้น ฐานใบมน ใบมีสีเขียวเข้ม ก้านใบมี สีแดง ดอกมีสีน้ำตาลแดง เมื่อดอกบานจะมีลักษณะคล้ายสุ่ม (สนิท อักษรแก้ว และคณะ, 2539)

2.3.2.4 โปรงแดง (*Ceriops tagal*)

โปรงแดงในประเทศไทยพบกระจายอยู่ทั่วไป โดยมักขึ้นอยู่ในบริเวณป่าชายเลนตอนในที่มีน้ำทะเลท่วมถึงน้อย สามารถเจริญเติบโตได้ดีในบริเวณดินเลนที่ค่อนข้างแข็ง อาจขึ้นอยู่ปะปนกับถั่วดำ ฝาด หรือเป็นป่าโปรงแดงล้วน เป็นไม้ยืนต้นขนาดเล็กถึงขนาดกลาง มีความสูง 15-25 เมตร โคนต้นมีพูพอน (buttress root) เล็กน้อยรอบๆเปลือกบริเวณพูพอนมีตุ่มขนาดใหญ่ และมีรากโผล่พื้นดินเป็นรากหายใจในลักษณะคล้ายเข่า (knee root) โปรงแดงเป็นพืชที่สามารถเจริญเติบโตได้เมื่อความเค็มของน้ำในดินมากกว่า 30 เปอร์เซ็นต์ และเจริญเติบโตได้ดีในบริเวณที่น้ำท่วมขังขณะที่น้ำขึ้นสูงตามปกติ หรือบริเวณที่น้ำท่วมถึงเมื่อน้ำขึ้นสูงสุดเท่านั้น เรือนยอดของโปรงแดงมีใบหนาแน่นสีเข้ม ลำต้นตรงเปลือกขรุขระ สีเทาเข้ม ใบรูปไข่ สีเขียวอมเหลือง ดอกสีขาว เมื่อดอกเจริญเต็มที่จะเป็นผล จากนั้นส่วน radicle ของเมล็ดจะงอกออกมาทางปลายผลกลายเป็นฝัก (สนิท อักษรแก้ว และคณะ, 2539)



(ก) รากค้ำจุน (prop root)



(ข) รากหายใจ (pneumatophore)

(ค) รากหายใจลักษณะคล้ายเข่า (knee root)

(ง) รากระบบพูพอน (buttress root)

รูปที่ 2.3 การปรับตัวทางโครงสร้างของรากของพันธุ์ไม้ชายเลน
ที่มา: สนิท อักษรแก้ว (2542)

2.3.3 ดินในป่าชายเลน

ดินในป่าชายเลนเป็นดินที่เกิดจากการทับถมของตะกอนที่ไหลมากับน้ำจากแหล่งต่างๆและการตกตะกอนของสารแขวนลอยในมวลน้ำ ตลอดจนการสลายตัวของอินทรียสารตามช่วงระยะเวลาที่ทับถมต่างๆกัน (สนิท อักษรแก้ว, 2542)

ธาตุอาหารในดินป่าชายเลนสามารถแบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

1) ธาตุอาหารประเภทอนินทรียสาร โดยทั่วไปดินป่าชายเลนมักมีไนโตรเจนและฟอสฟอรัสปริมาณค่อนข้างต่ำจึงมักจำกัดการเจริญเติบโตของพืชป่าชายเลน แหล่งที่มาของธาตุอาหารประเภทอนินทรียสารที่สำคัญได้แก่ น้ำฝน น้ำที่ไหลผ่านแผ่นดิน ดินตะกอน จากน้ำทะเล และการย่อยสลายของอินทรียวัตถุในป่าชายเลน (สนิท อักษรแก้ว, 2542) การถ่ายเทแลกเปลี่ยนธาตุอาหารระหว่างป่าชายเลนและน้ำทะเลชายฝั่งเป็นไปตามวัฏจักรการขึ้นลงของน้ำทะเล โดยทั่วไปจะมีการขนถ่ายธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสจากป่าชายเลนสู่น้ำทะเลชายฝั่ง (กัลยา วัฒยากร และ สนิท อักษรแก้ว, 2538 อ้างถึงใน เจนจิรา แก้วรัตน์, 2541)

2) organic detritus เป็นธาตุอาหารที่อยู่ในรูปสารอินทรีย์มีต้นกำเนิดมาจากสิ่งมีชีวิตโดยผ่านขั้นตอนต่างๆ ในการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ สามารถแบ่งออกเป็น2 ประเภท คือ สารแขวนลอยที่มีขนาดประมาณ 1 ไมครอน และสารแขวนลอยที่มีขนาดมากกว่า 1 ไมครอน (particulate form) แหล่งของอินทรียสารในป่าชายเลนที่สำคัญแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ แหล่งที่มาจากป่าชายเลนเอง (autochthonous sources) ได้แก่ แพลงก์ตอนพืช ไดอะตอม แบคทีเรีย สาหร่ายที่เกาะตามป่าชายเลน และแหล่งที่มาจากภายนอกป่าชายเลน (allochthonous sources) ได้แก่ สารแขวนลอยในน้ำที่ไหลมากับแหล่งน้ำ ลำธาร ตะกอนดินจากการกัดเซาะชายฝั่ง ซากพืชและสัตว์ที่อยู่บนชายฝั่งหรือในทะเล (สนิท อักษรแก้ว, 2542)

ดินในป่าชายเลนของพื้นที่อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี ภายใต้สังคมพืช 7 ประเภท ได้แก่ สังคมไม้แสมขาว แสมดำ แสมทะเล โกงกางใบใหญ่ โกงกางใบเล็ก พังกาหัวสุม ดอกแดง และสังคมพืชรวม (แสมขาว แสมทะเล และโกงกางใบใหญ่) มีเนื้อดินเป็น clay และ clay loam มีปริมาณอินทรียวัตถุค่อนข้างสูงอยู่ในช่วง 2.8-6.6 เปอร์เซ็นต์ และมีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดและฟอสฟอรัสที่สามารถแลกเปลี่ยนได้ค่อนข้างต่ำ อยู่ในช่วง 1.30-2.05 และ 0.101–0.153 mg/g dry weighht ตามลำดับ (เฉลิมชัย โชติกมาศ, 2539) ดินในป่าชายเลนธรรมชาติ และป่าชายเลนปลูกใหม่ในโครงการวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ พบว่ามีปริมาณอินทรียวัตถุอยู่ในช่วง 6.67-6.81 เปอร์เซ็นต์ และ 2.34-2.53 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และมีไนโตรเจนทั้งหมด 3.31-3.34 และ 0.61-2.61 mg/ g dry weight ตามลำดับ (Boonsong และคณะ, 2002)

2.4 กลไกการบำบัดน้ำเสียของพื้นที่ชุ่มน้ำ

2.4.1 บทบาทของดิน พืช และจุลินทรีย์ในการบำบัดน้ำเสีย

1) บทบาทของดิน

ดินมีบทบาทเป็นที่อยู่อาศัยของจุลินทรีย์ และเป็นตัวกลางให้พืชเจริญเติบโต รวมทั้งช่วยในการบำบัดน้ำเสียโดยกระบวนการทางกายภาพ และทางเคมี (ธัญลักษณ์ แต่บรรพกุล, 2539) กระบวนการบำบัดน้ำเสียของดินที่สำคัญ ได้แก่ กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) การตกตะกอนทางเคมี (precipitation) การดูดซับ (adsorption) และการเกิดสารเชิงซ้อน (complexation) เช่น การดูดซับฟอสฟอรัสในดิน ซึ่งรวมถึงการเกิดพันธะทางเคมีของประจุลบของฟอสเฟตกับประจุบวกของอนุภาคดิน (Stumm และ Moogan, 1970 อ้างถึงใน Klomjek และ Nitisoravut, 2005) รวมทั้งการที่พื้นที่ชุ่มน้ำมีทั้งช่วงที่มีน้ำขังสลับกับไม่มีน้ำขัง จะทำให้เกิดเป็นช่วงที่มีออกซิเจน (aerobic) และช่วงที่ไร้ออกซิเจน (anaerobic) ทำให้เกิดกระบวนการไนตริฟิเคชั่น (nitrification) และดีไนตริฟิเคชั่น (denitrification) ซึ่งเป็นการบำบัดไนโตรเจน ความสามารถในการบำบัดของดินขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพ และทางเคมีของดิน เช่น เนื้อดิน ความพรุน ปริมาณสารอินทรีย์ ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก ค่ารีดอกซ์โพเทนเชียล เป็นต้น (Tam และ Wong, 1994) รวมทั้งระยะเวลาที่น้ำสัมผัสกับดิน ประเภทของดินที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดธาตุอาหาร คือ ดินร่วนเหนียวปนทราย (sandy clay loam) ดินร่วนเหนียว (clay loam) ดินร่วนเหนียวปนทรายแป้ง (silty clay loam) ดินเหนียวปนทราย (sandy clay) และดินเหนียวปนทรายแป้ง (silty clay) (Cooper, 1990 อ้างถึงใน เจนจิรา แก้วรัตน์, 2541)

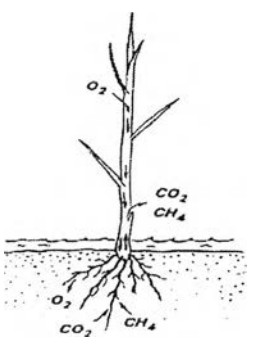
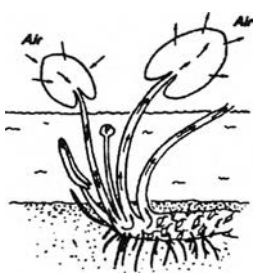
2) บทบาทของพืช

พืชที่คลุมอยู่บนพื้นที่ชุ่มน้ำจะทำหน้าที่เสมือน biofilm ที่อยู่ระหว่างบรรยากาศและดินหรือผิวหน้าน้ำ โดยพืชจะลดความเร็วของกระแสน้ำ ทำให้เกิดการตกตะกอนที่ดีขึ้น และลดอัตราการเสี่ยงต่อการพังทลายของหน้าดิน รวมทั้งลดความเข้มของแสงแดดที่ส่องลงสู่น้ำ จึงช่วยป้องกันการเจริญเติบโตที่มากเกินไปของสาหร่าย (Stawell, 1981 อ้างถึงใน ยุพเยาว์ โตคีรี, 2544)

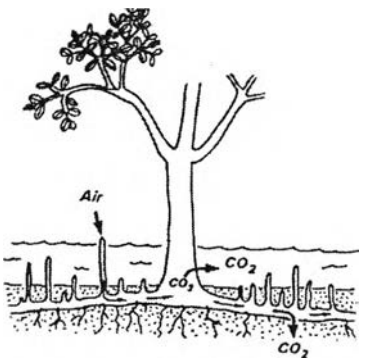
พืชยังช่วยในการบำบัดน้ำเสียโดยการดูดดึงธาตุอาหารจำนวนมาก ผ่านทางราก นอกจากนี้ลำต้นที่อยู่ในน้ำ และสัมผัสกับน้ำก็ดูดดึงธาตุอาหารได้เช่นเดียวกัน (Brix และ Schierup, 1989 อ้างถึงใน ศุวศา กานตวนิชกูร, 2544) โดยทั่วไปพืชจะใช้ธาตุอาหารไนโตรเจนในรูปของไนเตรท และแอมโมเนีย และใช้ฟอสฟอรัสในรูปของฟอสเฟต (Yang และคณะ, 2001; Gray และคณะ, 2000) นอกจากนี้รากของพืชยังทำหน้าที่เป็นที่ยึดเกาะของจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ในดิน ซึ่งทำหน้าที่ในการย่อยสลายสารต่างๆ (เจนจิรา แก้วรัตน์, 2541) ระบบรากของพืชยังทำหน้าที่ในการเคลื่อนย้ายก๊าซออกซิเจนจากยอดไปยังราก และจากรากไปยังยอด (รูปที่ 2.3) จึงเป็นการเพิ่มออกซิเจนให้กับดิน ซึ่งจะเป็นการช่วยเพิ่มการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบใช้ออกซิเจนและกระบวนการไนตริฟิเคชั่น (nitrification) นอกจากนี้ในระบบขนาดใหญ่พืชยังมีประโยชน์ในด้านเป็นที่อยู่อาศัยของสัตว์จำพวกนกและสัตว์เลื้อยคลาน รวมทั้งให้ความสวยงาม

การนำพืชมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียจะต้องคัดเลือกชนิดพืชให้เหมาะสม คือ ควรเป็นพืชที่สามารถปรับตัวได้ดีในท้องถิ่นนั้น มีความทนทานต่อโรคและแมลง และทนทานต่อสภาพภูมิอากาศที่เปลี่ยนแปลง มีอัตราการสังเคราะห์แสงสูง มีความสามารถในการส่งผ่านออกซิเจนสูง สามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มข้นของสารพิษในช่วงกว้าง มีความสามารถในการดูดดึงและสะสมสารต่างๆได้ดี เป็นต้น (พัฒนี จันทรโรทัย, 2536)

ตารางที่ 2.2 การเคลื่อนย้ายก๊าซของพืชในพื้นที่ชุ่มน้ำ

	1. การแพร่ (diffusion) การแพร่เป็นกระบวนทางกายภาพที่สำคัญในการเคลื่อนย้ายก๊าซออกซิเจนในพืชทุกชนิด โดยก๊าซออกซิเจนจะเคลื่อนย้ายจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ อัตราการแพร่ของขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุลของก๊าซ และอุณหภูมิ ออกซิเจนอิสระจะเคลื่อนที่เข้าสู่ช่องอากาศในพืชผ่านทางปากใบและเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างไปสู่บริเวณรากของพืช สำหรับพืชในพื้นที่ชุ่มน้ำมักจะพบว่าบริเวณส่วนบนของพืชที่สัมผัสอากาศมีความเข้มข้นของออกซิเจนสูงกว่าส่วนรากที่อยู่ใต้ดิน (Armstrong, 1978; Brix, 1993 อ้างถึงใน Cronk และ Fennessy, 2001)
	2. การระบายอากาศเพื่อรักษาระดับความดันอากาศภายในให้ปกติ (pressurized ventilation) การระบายอากาศเพื่อรักษาระดับความดันอากาศภายในให้ปกติ เป็นกระบวนการที่สำคัญในการเติมอากาศให้กับส่วนรากของพืช โดยอากาศจะเคลื่อนที่ผ่านทางปากใบของใบอ่อน ผ่านลำต้นลงสู่ราก และเคลื่อนที่จากรากสู่ลำต้นก่อนออกสู่บรรยากาศ กระบวนการนี้ควบคุมโดยความแตกต่างของอุณหภูมิและความดันไอของน้ำระหว่างภายในใบและบรรยากาศโดยรอบ กระบวนการนี้เกิดขึ้นโดยกระบวนการทางกายภาพที่สำคัญ 2 กระบวนการ ได้แก่ (1) การคายน้ำด้วยอิทธิพลของอุณหภูมิ (thermal transpiration) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อภายในใบอ่อนของพืชมีอุณหภูมิสูงกว่าสิ่งแวดล้อมภายนอก ก๊าซจะเคลื่อนที่เข้าสู่ช่องว่างภายในใบ และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นก๊าซจะขยายตัวทำให้ความดันในใบอ่อนเพิ่มสูงขึ้น (2) การรักษาระดับความดันอากาศให้ปกติเมื่อมีความชื้น (humid- induced pressurization) ความดันไอจะสูงในบริเวณที่มีอากาศร้อนละมีความชื้นสูง เช่นในใบอ่อน ดังนั้นการเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆของความดันในใบอ่อนทำให้เกิดการลำเลียงก๊าซจากใบอ่อนผ่านก้านใบลงไปสู่ราก และเคลื่อนที่จากรากผ่านก้านใบ ออกสู่บรรยากาศผ่านทางใบ (Decay, 1981 อ้างถึงใน Cronk และ Fennessy, 2001)

ตารางที่ 2.2 (ต่อ) การเคลื่อนย้ายก๊าซของพืชในพื้นที่ชุ่มน้ำ

	3. การแลกเปลี่ยนก๊าซใต้น้ำ (underwater gas exchange) การแลกเปลี่ยนก๊าซใต้น้ำ เป็นการแลกเปลี่ยนของก๊าซระหว่างส่วนของพืชที่อยู่ใต้น้ำและน้ำโดยรอบ ในพืชป่าชายเลน เช่น แสมทะเล รากหายใจของแสมทะเลจะจมอยู่ใต้น้ำเมื่อระดับน้ำทะเลขึ้นสูง ทำให้ความดันของออกซิเจนในรากบางส่วนลดลงเพราะถูกใช้ไปในกระบวนการหายใจ (respiration) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถูกสร้างขึ้นจากกระบวนการหายใจ แต่ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นไม่ได้เติมเต็มในช่องว่างของก๊าซออกซิเจนที่ลดลงไป ดังนั้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะเคลื่อนที่จากจากรากและละลายสู่น้ำ ดังนั้นก๊าซทั้งสองจึงลดลงในราก ทำให้ความดันของก๊าซลดลงในช่วงที่มีน้ำท่วมขัง เมื่อระดับน้ำลดลงอากาศจะเคลื่อนที่เข้าสู่รากหายใจที่สัมผัสอากาศ และลำเลียงสู่ระบบราก เพื่อปรับความสมดุลของความดันของก๊าซระหว่างบรรยากาศและรากของพืช (Tomlinson, 1986; Brix, 1993 อ้างถึงใน Cronk และ Fennessy, 2001)

3) บทบาทของจุลินทรีย์

พื้นที่ชุ่มน้ำเป็นบริเวณที่มีสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโต และเป็นที่อยู่อาศัยของจุลินทรีย์ โดยจุลินทรีย์ที่ยึดเกาะบนตัวกลางและจุลินทรีย์ที่ลอยอิสระจะช่วยบำบัดสารพิษในน้ำเสียโดยเกิดกระบวนทั้งในสภาวะที่ใช้ออกซิเจนและไม่ใช้ออกซิเจน โดยทำให้เกิดกระบวนการต่างๆ คือ กระบวนการดูดซึม (assimilation) การเปลี่ยนรูป (transformation) และการหมุนเวียนสาร (circulation) ในน้ำเสีย ซึ่งจุลินทรีย์สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ในน้ำเสียได้ (Kadlec และ Knight, 1996 อ้างถึงใน เจนจิรา แก้วรัตน์, 2541)

2.4.2 การบำบัดธาตุอาหารในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำ

การบำบัดธาตุอาหารในพื้นที่ชุ่มน้ำเกิดขึ้นได้ 3 รูปแบบ คือ (1) ธาตุอาหารจะเกิดการเปลี่ยนรูปไปอยู่ในสภาวะก๊าซและระเหยออกไปในบรรยากาศ (2) การระบายน้ำของพื้นที่ชุ่มน้ำ (3) การสะสมไว้ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำโดยการสะสมในดิน การตกตะกอน และการนำไปใช้ในการเจริญเติบโตของพืช (Bolton และ Greenway, 1999) โดยกระบวนการบำบัดสารอินทรีย์และธาตุอาหารในพื้นที่ชุ่มน้ำ มีดังนี้

1) สารอินทรีย์

สารอินทรีย์ที่เป็นสารละลายอยู่ในน้ำโดยทั่วไปจะวัดในรูปบีโอดี (biological oxygen deman; BOD) ซึ่งจะอยู่ในน้ำเสียในรูปของแป้ง น้ำตาล หรือ เซลลูโลส โมเลกุลเล็กๆจากซากพืช โดยส่วนใหญ่การบำบัดจะเกิดในชั้นน้ำ (water column) ใกล้กับบริเวณน้ำเข้าโดยที่ส่วนที่เป็นของแข็งจะจมตัวลงในรูปของอนุภาค ส่วนสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำจะถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ทั้งที่ใช้และไม่ใช้ออกซิเจน โดยจุลินทรีย์ต้องการแหล่งคาร์บอนและแร่ธาตุบางชนิดในการสร้างเซลล์ นอกจากนี้อาจเก็บสะสมไว้ในมวลชีวภาพของพืช (Kadlec, 1995) แต่ ศุวศา กานตวนิชกูร (2544) กล่าวว่า การดูดดึงสารอินทรีย์ของพืชถือว่าน้อยมากเมื่อเทียบกับกลไกการบำบัดอื่น

ประสิทธิภาพในการบำบัดค่าบีโอดีขึ้นกับชนิดและปริมาณของจุลินทรีย์ในระบบ ชนิดของพืช อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจน ค่าความเป็นกรด-ด่าง ธาตุอาหาร และดินที่ใช้ปลูก (Shalk, 1978 อ้างถึงใน ธัญลักษณ์ แต่บรรพกุล, 2539; Kadlec, 1995)

ศุวศา กานตวนิชกูร (2544) กล่าวว่า ในสภาพที่มีออกซิเจน จะมีอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์สูงกว่าในสภาพสลายที่ไม่มีออกซิเจน ซึ่งสอดคล้องกับที่ Lim และคณะ (2001) อ้างถึงใน Klomjek และ Nitisoravut (2005) ที่กล่าวว่า ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่ปลูกพืชจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดบีโอดีสูงกว่าระบบที่ไม่ปลูกพืช เนื่องจากในระบบที่ปลูกพืชจะช่วยเพิ่มออกซิเจนทำให้งจุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจนทำงานได้ดี

สำหรับสารประกอบอินทรีย์ที่อยู่ในรูปของแข็ง จะวัดในรูปของปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (total suspended solid; TSS) โดยพื้นที่ชุ่มน้ำนับเป็นแหล่งกักเก็บตะกอนที่มีประสิทธิภาพ วัฏจักรของของแข็งแขวนลอยในพื้นที่ชุ่มน้ำ คือ การตกตะกอนทับถม (deposition) และการฟุ้งกลับ (resuspension) (ซึ่งอาจเกิดจาก bioturbation และการปุดขึ้นของก๊าซออกซิเจนหรือมีเทน) กระบวนการสำคัญในการบำบัดสารแขวนลอยในพื้นที่ชุ่มน้ำ คือ การจมตัวอย่างช้าๆ (settling) ประสิทธิภาพในการบำบัดสารแขวนลอยขึ้นอยู่กับระยะเวลากักเก็บน้ำ แต่พืชและสัตว์ขนาดเล็กในระบบอาจทำให้ประสิทธิภาพในการต่ำลงเนื่องจากมวลชีวภาพที่แขวนลอยอยู่ (Kadlec และ Knight, 1996)

2) ไนโตรเจน

ไนโตรเจนจากน้ำเสียที่เข้าสู่พื้นที่ชุ่มน้ำมีทั้งที่เป็นสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ ไนโตรเจนซึ่งอาจอยู่ในรูปอนุภาค (particle) หรือรูปที่ละลายน้ำได้ (dissolved) โดยสัดส่วนขององค์ประกอบจะขึ้นกับแหล่งที่มาของน้ำเสียและการบำบัดเบื้องต้น

ในน้ำเสียชุมชนจะพบไนโตรเจน 4 รูป คือ (1) อินทรีย์ไนโตรเจน ซึ่งจะประกอบด้วยสารต่างๆ เช่น กรดอะมิโน ยูเรีย (2) ไนไตรท์ (NO_2-N) (3) ไนเตรท (NO_3-N) และ (4) แอมโมเนีย (NH_4-N) โดยทั่วไปจะพบไนโตรเจนในรูปแอมโมเนียมากที่สุด (Kadlec และ Knight, 1996 อ้างถึงใน Gray และคณะ, 2000)

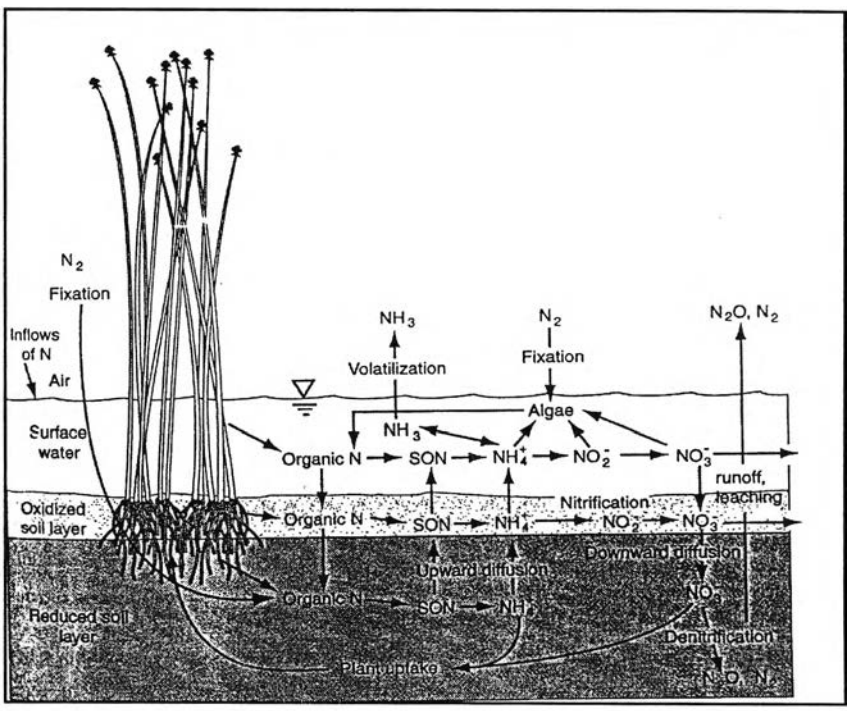
ไนโตรเจนในรูปของอนุภาคจะถูกบำบัดโดยการจมตัวลงอย่างช้าๆ และเกิดการทับถม ในขณะที่การบำบัดไนโตรเจนที่ละลายน้ำได้ จะเกี่ยวข้องกับกระบวนการธรณีชีวเคมี (biogeochemical) ในดินและน้ำ โดยในขั้นแรกอินทรีย์ไนโตรเจนจะถูกย่อยสลายโดยกระบวนการทางชีวภาพ เรียกว่ากระบวนการแอมโมนิฟิเคชั่น (ammonification) เปลี่ยนไปเป็นแอมโมเนีย แอมโมเนียจะถูกบำบัดโดยการระเหย (ammonia) กระบวนการไนตริฟิเคชั่น (nitrification) กระบวนการดีไนตรีฟิเคชั่น (denitrification) และการนำไปใช้โดยพืชและจุลินทรีย์ (plant and microbial uptake) (Brix, 1993 อ้างถึงใน Yang และคณะ, 2001)

กระบวนการไนตริฟิเคชั่นเป็นกระบวนการออกซิเดชั่นทางชีวภาพของแอมโมเนียไปเป็นไนเตรท โดยมีไนไตรท์เป็นสารระหว่างกลางปฏิกิริยา กระบวนการไนตริฟิเคชั่นจะเกิดในชั้นน้ำตรงบริเวณรอยต่อระหว่างดินและน้ำ (soil water interface) และในบริเวณรอบๆ รากพืช ซึ่งมีออกซิเจนเป็นฟิล์มบางๆ (Yang และคณะ, 2001; Brix, 1997 อ้างถึงใน Gray และคณะ, 2000) โดยอัตราการเกิดไนตริฟิเคชั่นขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของแอมโมเนีย ปริมาณออกซิเจน ความเป็นกรด-ด่าง และ อุณหภูมิ (Vymazal, 1995 อ้างถึงใน ศุวศา กานตวนิชกูร, 2544) กระบวนการไนตริฟิเคชั่นบางครั้งจะช้าลง และล้มเหลวอย่างสิ้นเชิง เนื่องจากอินทรีย์ไนโตรเจนความเข้มข้นสูงจากน้ำเสียถูกย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจนได้แอมโมเนียแล้วไม่ถูกออกซิไดซ์ในขั้นถัดไป เนื่องจากปริมาณออกซิเจนที่จำกัด ทำให้แอมโมเนียในพื้นที่ชุ่มน้ำสูงขึ้น (Reed และ Brown, 1995 อ้างถึงใน Gray และคณะ, 2000)

ไนไตรท์และไนเตรท จะแพร่จากบริเวณที่มีออกซิเจนสู่บริเวณที่ไม่มีออกซิเจนแล้วถูกรีดิวซ์เป็นไนตรัสออกไซด์ (N_2O) และก๊าซไนโตรเจน (N_2) สูญหายออกจากระบบโดยกระบวนการดีไนตริฟิเคชั่น อัตราการเกิดดีไนตริฟิเคชั่น (denitrification) ขึ้นอยู่กับปริมาณไนเตรท จุลินทรีย์ และอุณหภูมิ (Gray และคณะ, 2000; Kadlec, 1995)

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พืชในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำมีบทบาทในการบำบัดไนโตรเจน โดยการนำไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนีย ไนไตรท์ และ ไนเตรทไปใช้ โดยเปลี่ยนเป็นสารอินทรีย์ในเนื้อเยื่อ รวมทั้งการจัดเตรียมสภาพแวดล้อมของรากสำหรับการเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชั่นและ ดีไนตริฟิเคชั่น (Gray และคณะ, 2000) โดยส่วนใหญ่พืชจะได้รับไนโตรเจนจากน้ำในช่องว่างของเม็ดดิน การวัดมวลชีวภาพของพืช และไนโตรเจนในเนื้อเยื่อ สามารถเป็นดัชนีบ่งชี้ประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจนของพื้นที่ชุ่มน้ำ (Reddy และ D'Angelo, 1997)



รูปที่ 2.4 การบำบัดไนโตรเจนในพื้นที่ชุ่มน้ำ

ที่มา: Mitsch และ Gosselink (2000)

3) ฟอสฟอรัส

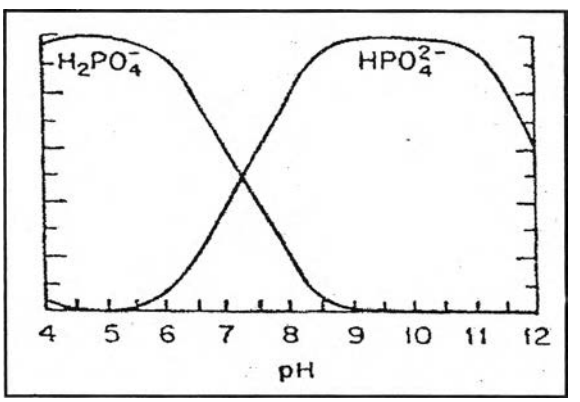
โดยทั่วไปฟอสฟอรัสในพื้นที่ชุ่มน้ำมักอยู่ในรูปสารละลาย แร่ฟอสฟอรัส และสารอินทรีย์ฟอสฟอรัสในรูปของแข็ง

ในสารละลายการแตกตัวของฟอสฟอรัสจะขึ้นอยู่กับ pH ดังนี้

$$H_3PO_4 \longleftrightarrow H_2PO_4^- + H^+$$

$$H_2PO_4^- \longleftrightarrow HPO_4^{2-} + H^+$$

$$HPO_4^{2-} \longleftrightarrow PO_4^{2} + H^+ \quad \text{(รูปที่ 2.5)}$$

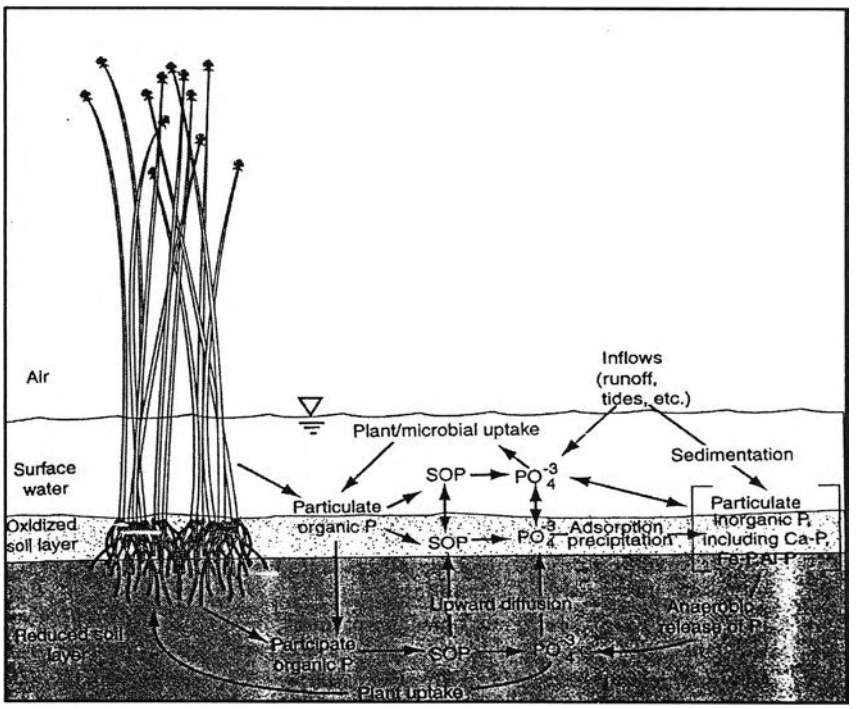


รูปที่ 2.5 การกระจายของอนินทรีย์ฟอสฟอรัสที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส
ที่มา: Freeze และ Cherry (1979) อ้างถึงใน ศุวศา กานตวนิชกูร (2544)

การบำบัดฟอสฟอรัสในพื้นที่ชุ่มน้ำเกี่ยวข้องกับกระบวนการทางชีวภาพ และทางกายภาพ/เคมี โดยกระบวนการทางชีวภาพ ได้แก่ การนำไปใช้โดยพืช จุลินทรีย์ และสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ และการเปลี่ยนรูปสารอนินทรีย์ให้เป็นสารอินทรีย์โดยการย่อยสลายซากพืช (mineralization of plant litter) (Reddy และคณะ, 1996) โดยฟอสฟอรัสในพื้นที่ชุ่มน้ำจะถูกบำบัดโดยกระบวนการทางกายภาพ/เคมีมากกว่า โดยกระบวนการที่สำคัญ ได้แก่ การตกตะกอน (sedimentation) และการทับถม (deposition) การดูดซึม (absorption) และการตกตะกอนทางเคมี (precipitation) และการแลกเปลี่ยนระหว่างดินและน้ำที่สัมผัสกับดิน (Klomjek และ Nitisoravut, 2005)

Yang และคณะ (2001) กล่าวว่าในดินที่มีแคลเซียมปริมาณมาก ซึ่งพบในพื้นที่ชุ่มน้ำที่มีสภาพเป็นด่าง (alkaline wetland) และดินที่มีอลูมิเนียมและเหล็กความเข้มข้นสูง (acid wetland) ซึ่งพบในพื้นที่ชุ่มน้ำที่มีสภาพเป็นกรด จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัสสูง โดยฟอสฟอรัสจะตกตะกอนเคมีกับธาตุดังกล่าว นอกจากนี้ความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสของพื้นที่ชุ่มน้ำยังขึ้นอยู่กับปริมาณของกับพื้นผิวของตำแหน่งที่สามารถเกิดการดูดซับและปริมาณของพื้นที่ผิวของอนุภาคดินหรือตัวกลางที่ใช้ (Gray และคณะ, 2000)

จากที่กล่าวมาข้างต้นว่าการบำบัดฟอสฟอรัสในพื้นที่ชุ่มน้ำส่วนใหญ่ เกิดจากกระบวนการทางกายภาพ/เคมี ยกเว้นในฤดูกาลเจริญเติบโตที่ฟอสฟอรัสส่วนใหญ่จะถูกบำบัดโดยการดูดดึงไปใช้โดยพืช โดยรากพืชเป็นส่วนสำคัญของพืชในการสะสมฟอสฟอรัส โดยการดูดดึงฟอสฟอรัสจากดิน โดยเฉพาะดินชั้นบน พืชได้รับฟอสฟอรัสจากกระบวนการดูดซึม (absorption) การรวมตัวทางเคมี (complexation) หรือการแพร่ผ่านน้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน (ศุวศา กานตวนิชกูร, 2544)



รูปที่ 2.6 การบำบัดฟอสฟอรัสในพื้นที่ชุ่มน้ำ

ที่มา: Mitsch และ Gosselink (2000)

2.5 พันธุ์ไม้ในป่าชายเลนกับการบำบัดน้ำเสีย

ป่าชายเลนสามารถบำบัดน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากดินป่าชายเลนมีความจุในการกักเก็บอินทรียวัตถุและธาตุอาหาร สมบัติในการกักเก็บธาตุอาหารและสารปนเปื้อนต่างๆในน้ำเสียขึ้นอยู่กับชนิดของดิน (Tam และ Wong, 1995) พันธุ์ไม้ในป่าชายเลนส่วนใหญ่มีผลผลิตและมวลชีวภาพสูงและมีระบบรากหายใจที่โผล่พ้นพื้นดินช่วยในการดักตะกอน และช่วยในการเคลื่อนย้ายออกซิเจนไปสู่ราก ทำให้เกิดบริเวณ ที่เรียกว่า rhizosphere ซึ่งเป็นบริเวณที่จุลินทรีย์สามารถเปลี่ยนรูปธาตุอาหารและสารประกอบอื่นๆได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นจึงมีการศึกษาการใช้พันธุ์ไม้ชายเลนในการบำบัดน้ำเสีย เช่น ปิยวรรณ สายมโนพันธ์ (2543) ศึกษาความสามารถของกล้าไม้โกงกางใบใหญ่ (*Rhizophora mucronata*) และแสมทะเล (*Avicennia marina*) ในการบำบัดน้ำเสียชุมชน พบว่าชุดการทดลองที่ปลูกโกงกางใบใหญ่และชุดการทดลองที่ปลูกแสมทะเลสามารถบำบัดบีโอดี (biochemical oxygen demand; BOD) ได้ 72% และ 66% ตามลำดับ บำบัดไนโตรเจนทั้งหมดได้ 72% และ 70% ตามลำดับ และบำบัดฟอสฟอรัสทั้งหมดได้ 63% เท่ากัน ประสิทธิภาพของระบบที่ปลูกพืชสูงกว่าระบบที่ไม่ปลูกพืชซึ่งบำบัดบีโอดี ไนโตรเจนทั้งหมด และฟอสฟอรัสทั้งหมดได้ 58%, 59% และ 59% ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีการศึกษาเกี่ยวกับผลของความเข้มข้นของน้ำเสียต่อประสิทธิภาพในการบำบัดของพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมที่ปลูกพันธุ์ไม้ชายเลน โดย เจนจิรา แก้วรัตน์ (2541) ได้ทำการศึกษาความสามารถของโกงกางใบเล็ก *(Rhizophora apiculata)* เพื่อการบำบัดน้ำทิ้งจากนากุ้ง พบว่าโกงกางใบเล็กมีประสิทธิภาพในการลดปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดและฟอสฟอรัสทั้งหมดในน้ำเสียได้ประมาณ 80% และเมื่อให้ Hoagland solution ซึ่งมีธาตุอาหารสูงขึ้น พบว่าโกงกางใบเล็กมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงขึ้นเป็น 90% และ ปวีณา วัฒนสุทธิพงศ์ (2547) ทำการศึกษาผลของน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์ต่อระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมที่ปลูกโกงกางใบใหญ่ โดยใช้น้ำเสียที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน 3 ระดับ คือ น้ำเสียชุมชนปกติ (NW) น้ำเสียชุมชนที่มีความเข้มข้นของทีเคเอ็นและฟอสฟอรัสทั้งหมดเป็น 5 และ 25 เท่าของน้ำเสียชุมชนปกติ (5NW และ 25NW) ทำการกักเก็บน้ำเสียเป็นระยะเวลา 7 วัน พบว่าชุดทดลองที่ได้รับน้ำเสีย 5NW สามารถบำบัดบีโอดีและทีเคเอ็นได้สูงที่สุด และเมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่าดินและกล้าไม้ในทุกชุดทดลองมีธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเพิ่มสูงขึ้น เช่นเดียวกันกับที่ Chu และคณะ (1998) ทำการศึกษาความสามารถในการบำบัดธาตุอาหารในพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมที่ปลูกรังกระแท้ (*Kandelia candel*) โดยทดลองใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน 3 ระดับ คือ น้ำเสียชุมชนปกติ (NW) น้ำเสียชุมชนที่มีความเข้มข้นของทีเคเอ็นและฟอสฟอรัสทั้งหมดเป็น 5 และ 25 เท่าของน้ำเสียชุมชนปกติ (5NW และ 25NW) พบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดอินทรีย์ไนโตรเจน แอมโมเนีย ไนเตรท และออร์โธฟอสเฟตของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมที่ได้รับน้ำเสีย NW และ 5 NW สูงถึง 98% ในขณะที่ระบบที่ได้รับน้ำเสีย 25 NW มีค่า 75% จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำป่าชายเลนมีความจุในการรับธาตุอาหารจากน้ำเสียได้สูง และมีการศึกษาประสิทธิภาพของพื้นที่

ชุ่มน้ำป่าชายเลนในการบำบัดน้ำเสียชุมชนในระบบขนาดใหญ่ (pilot scale) ซึ่งมีขนาด 100x150 ตารางเมตร โดยศึกษาในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม 2 ระบบ ระบบที่ 1 เป็นป่าชายเลนธรรมชาติที่มีแสมทะเล (*Avicennia marina*) เป็นพันธุ์ไม้เด่น และระบบที่ 2 เป็นป่าชายเลนปลูกใหม่ซึ่งปลูกแสมทะเล โกงกางใบเล็ก (*Rhizophora apiculata*) โปรงแดง (*Ceriops tagal*) และถั่วขาว (*Bruguiera cylindrica* เมื่อใช้ระยะเวลากักเก็บ 3 และ 7 วันตามลำดับ พบว่า เปอร์เซ็นต์การบำบัดไนโตรเจนทั้งหมด ไนเตรท ฟอสเฟต และฟอสฟอรัสทั้งหมดของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำทั้ง 2 ระบบไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และพบว่าเปอร์เซ็นต์การบำบัดฟอสเฟตและฟอสฟอรัสทั้งหมดเมื่อใช้ระยะเวลาการกักเก็บ 7 วันมีค่าสูงกว่าเมื่อใช้ระยะเวลากักเก็บ 3 วัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Boonsong และคณะ, 2002) Ye และคณะ (2003) ได้ทำการศึกษาอัตราการเจริญเติบโตด้านมวลชีวภาพของพันธุ์ไม้ชายเลน 2 ชนิด คือ พังกาหัวสุมดอกแดง (*Bruguiera gymnorrhiza*) และรังกระแท้ (*Kandelia candel*) เมื่อกักเก็บน้ำต่างกัน 3 รูปแบบ คือ (1) ระยะเวลากักเก็บน้ำ 12 สัปดาห์ (2) ระยะกักเก็บน้ำ 8 สัปดาห์ แล้วปล่อยให้แห้ง 4 สัปดาห์ และ (3) ระยะกักเก็บน้ำ 4 สัปดาห์ แล้วปล่อยให้แห้ง 8 สัปดาห์ พบว่าเมื่อระยะกักเก็บน้ำนานขึ้นจะทำให้การเจริญเติบโตด้านมวลชีวภาพของพังกาหัวสุมดอกแดงลดลง แต่อัตราการเจริญเติบโตของรังกระแท้สูงขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่ารังกระแท้สามารถทนทานต่อที่มีน้ำขังได้ดีกว่าพังกาหัวสุมดอกแดง