บทที่ 2

ตรวจเอกสาร

2.1 น้ำเสียจากแหล่งชุมชน

น้ำเสียชุมชน (domestic wastewater) คือน้ำเสียที่เกิดจากการทำกิจกรรมต่างๆที่เกิดขึ้นในชุมชน เช่น น้ำเสียที่เกิดจากการประกอบอาหาร ชำระล้างสิ่งสกปรกในครัวเรือนและน้ำเสียอาคารประเภทต่างๆ (วีรานุช หลาง, 2551) น้ำเสียจากแหล่งชุมชนจึงประกอบด้วยส่วนผสมของสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ ของแข็งและสารลอยน้ำต่างๆ น้ำเสียชุมชนแต่ละแหล่งจะมีค่าความสกปรกที่แตกต่างกัน ซึ่งจะเปลี่ยนไปตามสภาพท้องถิ่น ตารางที่ 2.1 และ 2.2 แสดงให้เห็นถึงค่าเฉลี่ยของลักษะน้ำเสียชุมชนในประเทศไทยและในกรุงเทพมหานคร

ตารางที่ 2.1 ค่าเฉลี่ยของลักษณะน้ำเสียชุมชนในประเทศไทย

	ความเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร)				
ชุมชน	**BOD**	**COD**	**SS**	**TKN**	**TP**
อาคารชุดพักอาศัย					
-น้ำส้วม	110	220	-	40.8	1.3
-น้ำเสียอื่น	151	285	-	21	2.1
โรงแรมชั้นหนึ่ง	190	311	84	23	1.8
หอพัก					
-น้ำส้วม	123	1,290	666	32.9	6.8
-น้ำเสีย	75	135	29	19.2	3.9
โรงพยาบาล	170	282	69	27.6	2.9
ภัตตาคาร	919	1.785	401	55.1	3.2
ตลาด	1,123	2,242	551	53.9	4.0
ศูนย์การค้า	81	224	61	66.8	10.1

(ที่มา: ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2530)

ตารางที่ 2.2 ค่าเฉลี่ยของลักษณะน้ำเสียจากบ้านเรือนในกรุงเทพมหานคร

ความเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร)

แหล่งกำเนิด	BOD	COD	SS	TKN	TP
น้ำส้วม	695	1,350	480	295	24
น้ำอาบ	170	285	57	13.5	3.3
น้ำจากการซักล้าง	92	250	51	12	17.2
ครัว					
-มีตะแกรง	500	925	200	18	12.7
-ไม่มีตะแกรง	1,600	2,550	1,080	100	87.2

(ที่มา: ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2530)

2.1.1 องค์ประกอบของน้ำเสียชุมชน

น้ำเสียชุมชนจะมีลักษณะไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับว่าน้ำเสียที่เกิดขึ้นเป็นน้ำเสียที่เกิดขึ้นสดจากอาคารบ้านเรือน เป็นน้ำที่ผ่านบ่อเกรอะมาแล้ว หรือเป็นน้ำที่มีน้ำใต้ดินและน้ำฝนเข้ามาปะปนมากน้อยต่างกัน ซึ่งองค์ประกอบของน้ำเสียชุมชนมีดังนี้ (วีรานุช หลาง, 2551)

- สารอินทรีย์ ได้แก่ โปรตีน ไขมัน และคาร์โบไฮเดรต เช่น เศษข้าว ก๋วยเตี๋ยว น้ำแกง พืชผัก และชิ้นเนื้อ เป็นต้น ซึ่งสามารถถูกย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์
- สารอนินทรีย์ ได้แก่ แร่ธาตุต่างๆ
- โลหะหนักและสารพิษ อาจอยู่ในรูปของสารอินทรีย์และสามารถสะสมอยู่ในวงจรอาหาร เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต เช่น ปรอท โครเมียมและทองแดง ซึ่งอาจมีมลพิษนี้มาจากอุตสาหกรรมในครัวเรือนบางประเภท เช่น ร้านซุบโลหะ อู่ซ่อมรถ และน้ำเสียจากโรงพยาบาล เป็นต้น
- ของแข็งและสารลอยน้ำ เป็นสิ่งกีดขวางการกระจายของออกซิเจนลงสู่น้ำ และเมื่อจมตัวสู่ก้นลำน้ำ ทำให้เกิดแหล่งน้ำตื้นเขิน มีความขุ่นสูง และส่งผลกระทบต่อการดำรงชีพของสัตว์น้ำ

น้ำเสียชุมชนที่ถูกใช้แล้วจากแหล่งชุมชนจะมีองค์ประกอบของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ในน้ำเสียชุมชนที่ต่างกัน โดยจะแบ่งตามระดับความเข้มข้นของสารปนเปื้อนที่อยู่ในน้ำเสียชุมชนนั้น โดยจะแบ่งเป็นระดับต่ำ กลาง และสูง แสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ในน้ำเสียจากชุมชนที่ยังไม่ผ่านการบำบัด

สารปนเปื้อน	ความเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร)		
	ต่ำ	กลาง	สูง
1. ของแข็งทั้งหมด (total solids)	350	720	1200
ของแข็งละลายน้ำ (dissolved solids)	250	500	850
ของแข็งแขวนลอย (suspended solids)	100	220	350
2. ปริมาณตะกอนหนัก (settleable solids)	5	10	20
3. ค่าบีโอดี (biochemical oxygen demand; BOD)	110	220	400
4. ค่าซีโอดี (chemical oxygen demand; COD)	250	500	1000
5. ไนโตรเจนทั้งหมด (total as N)	20	40	85
อินทรีย์ไนโตรเจน (Organic)	8	15	35
แอมโมเนีย (free ammonia)	12	25	50
ไนไตรท์ (nitrites)	0	0	0
ไนเตรท (nitrate)	0	0	0
6. ฟอสฟอรัสทั้งหมด (total as P)	4	8	15
สารอินทรีย์ (organic)	1	3	5
สารอนินทรีย์ (inorganic)	3	5	10
7. ไขมัน (grease)	50	100	150
8. Total Coliform*	10^6-10^7	10^7-10^8	10^7-10^9

*หน่วยของ total coliform MPN/100 ml

(ที่มา: วีรานุช หลาง, 2551)

ฟอสฟอรัสในน้ำเสียชุมชน ส่วนหนึ่งมาจากการซักล้าง ซึ่งมาจากผงซักฟอกในครัวเรือน สารซักฟอกที่เป็นที่นิยมใช้แพร่หลายคือ สารลดแรงตึงผิว สารลดความกระด้างของน้ำ สารรักษาระดับความเป็นด่าง สารป้องกันสิ่งสกปรกไม่ให้กลับมาติดอีก และสารเพิ่มความสดใสของเนื้อผ้า (ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และเฉลิมราช วันทวิน, 2539) ฟอสฟอรัสที่มีอยู่ในผงซักฟอก เป็นสารลดความกระด้างของน้ำอยู่ในรูปของ sodium tripolyphosphate (STPP) สารประกอบชนิดนี้จะก่อให้เกิดปัญหายูโทรฟิเคชันในแหล่งน้ำชุมชนได้

2.2 สารประกอบฟอสฟอรัส

ฟอสฟอรัสเป็นธาตุที่จำเป็นในการเจริญเติบโตของพืชและสัตว์ ซึ่งอาจจะอยู่ในรูปฟอสเฟตที่ละลายน้ำหรือในรูปของซากพืชซากสัตว์ในน้ำธรรมชาติและน้ำโสโครก โดยฟอสเฟตรูปต่างๆนี้นอกจากจะเกิดจากหินฟอสเฟตตามธรรมชาติแล้วยังเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ที่มีการใช้สารประกอบฟอสฟอรัส (กรรณิการ์ สิริสิงห์, 2522)

2.2.1 รูปสารประกอบของฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำธรรมชาติและน้ำเสียชุมชน

อาจแบ่งรูปฟอสฟอรัสในน้ำได้ดังนี้ (กรรณิการ์ สิริสิงห์, 2522)

1. ออโธฟอสเฟต ที่พบคือ

   Trisodium phosphate (Na_3PO_4)

   Disodium phosphate (Na_2HPO_4)

   Monosodium phosphate (NaH_2PO_4)

   Diammonium phosphate $(NH_4)_2HPO_4$

2. โพลีฟอสเฟต ที่พบคือ

   Sodium hexametaphosphate $Na_3(PO_4)_6$

   Sodiumtripoly phosphate ($Na_5P_3O_{10}$)

   Tetrasodium pyrophosphate ($Na_4P_2O_7$)

สารพวกนี้เป็น dehydrated phosphate ดังนั้นจะถูกไฮโดรไลส์ในน้ำกลับไปเป็น orthophosphate ตามเดิม อัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และค่าความเป็นกรด-ด่าง

3. อินทรีย์ฟอสฟอรัส ที่พบคือ

   Nucleic acid

   Phospholipids

   Sugar phosphate

2.2.2 แหล่งระบายสารประกอบฟอสฟอรัส

2.2.2.1 น้ำเสียอุตสาหกรรม ซึ่งมาจากการใช้สารฟอสฟอรัสในอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมเกี่ยวกับอาหารเครื่องดื่ม อุตสาหกรรมอาหารสัตว์ และอุตสาหกรรมผลิตผงซักฟอก

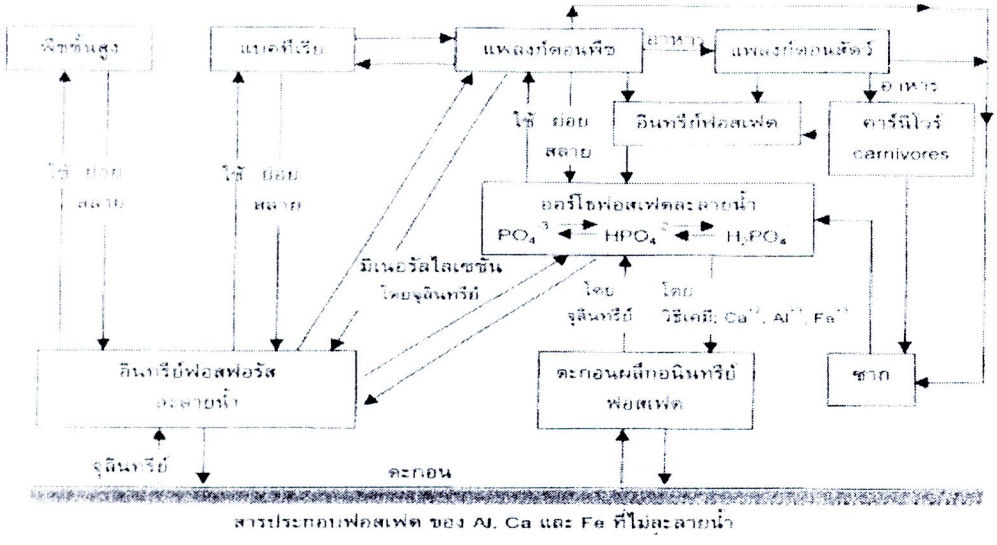
2.2.2.2 สารประกอบฟอสฟอรัสจากปศุสัตว์ ซึ่งมาจากการขับถ่ายในรูปฟอสฟอรัสของสัตว์ต่างๆ เช่น กระบือ วัว หมู ไก่ เป็นต้น

2.2.2.3 สารประกอบฟอสฟอรัสจากกสิกรรม จากการใช้ปุ๋ยในการเกษตรแล้วถูกน้ำชะล้าง

2.2.2.4 น้ำเสียชุมชน สารประกอบฟอสฟอรัสในน้ำเสียชุมชนนั้นมาจากอาหารที่บริโภคและผงซักฟอกที่ใช้ในการซักล้างหรือทำความสะอาดโดยอยู่ในรูปของ Sodium tripolyphosphate (STPP) สารประกอบนี้เองที่ทำให้เกิดปัญหามลพิษต่อแหล่งน้ำ

2.2.3 วัฏจักรของฟอสฟอรัส

ฟอสฟอรัสเป็นธาตุที่จำเป็นธาตุหนึ่ง เป็นองค์ประกอบของกรดนิวคลีอิกและเยื่อเมมเบรนของเซลล์ รวมทั้งกระบวนการเอทีพีในเซลล์ ดังนั้นฟอสฟอรัสจึงเป็นสิ่งสำคัญสำหรับวงจรชีวิตของสิ่งมีชีวิต (ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และคณะ, 2536) ฟอสฟอรัสจะมีการเปลี่ยนแปลงกลับไปมาระหว่างรูปอินทรีย์และรูปอนินทรีย์ ในสิ่งแวดล้อมอนินทรีย์ฟอสฟอรัสส่วนใหญ่อยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำ คือเป็นเกลือของอะลูมินัม แคลเซียม แมกนีเซียม และเหล็ก (Nester และคณะ 1983) โดยอัตราการละลายหรือไม่ละลายของฟอสฟอรัสในน้ำขึ้นอยู่กับพีเอชของน้ำ (ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และคณะ, 2536) มีจุลินทรีย์บางชนิดสามารถแปลงรูปอนินทรีย์ฟอสฟอรัสที่ไม่ละลายน้ำเป็น ออร์โธฟอสเฟตที่ละลายน้ำได้ ซึ่งกลุ่มจุลินทรีย์ เช่น แบคทีเรีย (*B. subtilis, Arthrobacter*) แอกทิโนมัยซีทิส เช่น Streptomyces และฟังใจ เช่น *Aspergillus, Penicillium* สามารถเปลี่ยนสารประกอบอินทรีย์ฟอสฟอรัสให้เป็นออร์โธฟอสเฟตที่ละลายน้ำได้เช่นกัน (Nester และคณะ 1983) ซึ่งฟอสฟอรัสในรูปละลายน้ำนี้จะถูกพืชนำไปใช้เป็นธาตุอาหารต่อไป และมีจุลินทรีย์อีกกลุ่มสามารถแปลงรูปอินทรีย์ฟอสเฟตที่ไม่ละลายน้ำให้กลายเป็นอนินทรีย์ฟอสเฟตที่ละลายน้ำ โดยการใช้เอนไซม์ฟอสฟาเทส (phosphatase) ทำให้อินทรีย์ฟอสเฟตถูกเปลี่ยนเป็นอนินทรีย์ฟอสเฟตที่ละลายน้ำได้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อไปได้ (Nester และคณะ 1983)



รูปที่ 2.1 วัฏจักรฟอสฟอรัสของน้ำในสิ่งแวดล้อม (ที่มา: ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และคณะ, 2536)

2.3 ความสำคัญของฟอสเฟต

2.3.1 การปรับปรุงคุณภาพน้ำใช้เป็นตัวควบคุมการกัดกร่อนในระบบประปา เป็นตัวควบคุมพีเอช ช่วยลดความเข้นข้นของไอออนโลหะ ช่วยลดความเป็นด่างและช่วยเร่งการเจริญเติบโตของไฟโตแพลงตอน

2.3.2 ในน้ำทิ้งและระบบบำบัดน้ำทิ้งชุมชน ฟอสฟอรัสมาจากการใช้ผงซักฟอกเป็นส่วนใหญ่และมีปริมาณมากในน้ำทิ้ง ฟอสฟอรัสจึงเป็นตัวควบคุมการทำงานของระบบบำบัดแบบชีววิทยาอีกตัวหนึ่ง

2.3.3 ในทางอุตสาหกรรมมีการใช้ฟอสเฟตเป็นสารในการผลิตผงซักฟอก คิดเป็นฟอสฟอรัสประมาณ 12-13% และในโรงงานที่ใช้ไอน้ำจากหม้อไอน้ำจะใส Complex phosphorus ลงไปเพื่อไม่ให้เกิดตะกรันในหม้อน้ำเพราะอาจทำให้หม้อน้ำระเบิด แต่สารเหล่านี้ถูกไฮโดรไลส์ได้ง่ายเมื่ออุณหภูมิสูง (ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และคณะ, 2536)

2.3.4 ฟอสเฟตที่พบในตะกอนและกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำทิ้งแอโรบิค และแอนแอโรบิค มักมีทั้งในรูปตะกอนอินทรีย์และอนินทรีย์ฟอสเฟต อัตราส่วนของฟอสเฟตในตะกอนและกากตะกอนสามารถนำมาผลิตเป็นปุ๋ยได้

2.4 มลภาวะจากสารประกอบฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำ

แม่น้ำลำคลองต่างๆ นอกจากจะประสบปัญหาจากสารพิษต่างๆแล้ว อาจมีปัญหาที่เกิดจากการเจริญเติบโตของพืชสีเขียว เนื่องจากพืชน้ำนี้ได้รับสารอาหารที่จำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตคือสารประกอบฟอสฟอรัสกับไนโตรเจน โดยพิจารณาเฉพาะฟอสฟอรัส การเจริญเติบโตของพืชน้ำสีเขียวถ้ามีปริมาณมากทำให้เกิดปัญหาน้ำมีสีเขียวขุ่นคล้ำ เรียกว่าการเกิดยูโทรฟิเคชั่น หรือที่พบคือการเจริญของผักตบชวาตามลำคลองและแม่น้ำกันอย่างหนาแน่น ยูโทรฟิเคชันหมายถึงสภาวะของแหล่งน้ำที่มีการเจริญเติบโตของสาหร่ายเซลล์เดียว เช่น สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน สาหร่ายสีเขียว ฯลฯ อย่างมากมาย จนทำให้น้ำมีสีเขียวขุ่นคล้ำส่งผลให้ลำน้ำตื้นเขิน และเกิดการขาดออกซิเจนในเวลาไม่มีแสงแดด (วาสนา พีธรรมนงค์สิน, 2539)

การเจริญเติบโตของสาหร่ายดังสมการ(ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และคณะ, 2536) ต่อไปนี้

$$100\ CO_2+90\ H_2O+16NO_3^-+PO_4^{3-} \longrightarrow \underset{\text{(สาหร่าย)}}{C_{106}H_{108}O_{43}N_{16}P}+154.5O_2 \quad \text{——(2.1)}$$

แสดงให้เห็นว่า ฟอสฟอรัส 1 กรัม จะทำให้เกิดสาหร่ายได้สูงถึง 74.9 กรัม ถ้าพืชเหล่านี้ตายลงจะถูกย่อยสลายโดยใช้ออกซิเจน 154.5 กรัมต่อฟอสฟอรัส 1 กรัม นอกจากนี้ยังมีรายงานว่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำมีค่าเกินกว่า 0.02 มิลลิกรัม/ลิตร ก็เพียงพอที่ทำให้เกิดปัญหายูโทฟี

เคชั่นได้ (ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และคณะ, 2536)ปัจจุบันพบว่าการเกิดยูโทรฟิเคชั่นไม่ใช่จะเกิดเฉพาะในทะเลสาบหรือหนองน้ำ แต่สามารถเกิดในแม่น้ำ ชายฝั่งทะเลและในทะเลได้ สาเหตุการเกิดยูโทรฟิเคชั่นเป็นเรื่องซับซ้อนไม่ใช่เกิดขึ้นจากปริมาณฟอสฟอรัสที่มากถึงระดับหนึ่งเท่านั้นแต่ยังประกอบด้วยปัจจัยอื่นๆ เช่น แสง ความร้อน ความเร็วหรืออัตราการไหลของน้ำ เวลาเก็บกักน้ำ ฯลฯ การที่เกิดสาหร่ายขึ้นในน้ำนอกจากทำให้น้ำขุ่นและดูสกปรกแล้วยังอาจเกิดสารพิษจากสาหร่ายซึ่งหากมีปริมาณมากอาจทำให้ปลาตายในแหล่งน้ำได้

2.5 การกำจัดฟอสฟอรัส

การกำจัดฟอสฟอรัสสามารถแบ่งออกเป็น 3 ทางคือ ทางกายภาพ ทางเคมี และทางชีวภาพ

2.5.1 การกำจัดฟอสฟอรัสทางกายภาพ

โดยวิธี adsorption process โดยใช้ adsorbent เป็นตัวดูดซับฟอสเฟตไว้ ตัวดูดซับเช่น activated alumnina (Urano และ Tachikawa, 1995)

2.5.2 การกำจัดฟอสฟอรัสทางเคมี

การกำจัดฟอสฟอรัสโดยวิธีทางเคมีโดยเติมสารเคมีซึ่งเป็นตัวก่อตะกอนลงไปในน้ำเสียทำให้ฟอสเฟตตกตะกอนแล้ว จึงแยกตะกอนฟอสเฟตออกจากน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้ว สารที่สร้างตะกอนที่เป็นสารเคมีหลักในการทำปฏิกิริยากับฟอสเฟต คือ อลูมิเนียมซัลเฟต โซเดียมอลูมิเนต เฟอริคลอไรด์ หรือเฟอริคซัลเฟต และปูนขาว สารเคมีเหล่านี้เมื่อทำปฏิกิริยากับฟอสเฟตแล้วจะทำให้เกิดเกลือที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้น้อย เฟอรัสซัลเฟต เฟอรัสคลอไรด์ สารส้มและเกลือของเหล็ก นำมาใช้ในการเป็นสารช่วยก่อตะกอน ส่วนปูนขาวไม่ค่อยนิยมใช้เพราะจะทำให้เพิ่มมวลร่วมกับตะกอนเมื่อเทียบกับเกลือโลหะ(วาสนา พีธรรมนงค์สิน, 2539)

2.5.3 การกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ

การบำบัดสารประกอบฟอสเฟตโดยใช้เทคโนโลยี Phytoremediation เป็นวิธีการใหม่ที่มีการใช้พืชในการบำบัดสารมลพิษ โดยพืชจะดูดซึมสารประกอบฟอสเฟตในแหล่งน้ำโดยผ่านทางราก แล้วนำไปเก็บสะสมในเนื้อเยื่อพืชส่วนที่เป็น ดอก ใบ ลำต้น และราก ซึ่งวิธีนี้สามารถช่วยลดปริมาณสารประกอบฟอสเฟตในแหล่งน้ำธรรมชาติและแหล่งน้ำเสียได้มาก นอกจากนั้นแล้วยังมีจุลินทรีย์ในการกำจัดฟอสฟอรัส โดยจุลินทรีย์จะดูดใช้ฟอสฟอรัสในกลุ่มออโธฟอสเฟต โพลีฟอสเฟต และอินทรีย์ฟอสเฟต ซึ่งจุลินทรีย์ไม่เพียงแต่ใช้ฟอสฟอรัสในการซ่อมแซมส่วนที่สึกหรอของเซลล์ การสังเคราะห์สารและการถ่ายทอดพลังงานในเซลล์เท่านั้น แต่ยังสามารถเก็บสะสมฟอสฟอรัสไว้ใน

เซลล์เพื่อใช้ประโยชน์ในครั้งต่อไป โดยที่จะเก็บไว้ในรูปโพลีฟอสเฟตภายในโวลูดินกรานูล (volutin granule) (Metcalf และคณะ 1991)

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

2.6 การบำบัดสารมลพิษในแหล่งน้ำเสียชุมชนโดยใช้เทคโนโลยี Phytoremediation

Phytoremediation เป็นการใช้พืชในการบำบัดสารมลพิษในบริเวณที่มีการปนเปื้อน เพื่อลดอันตรายของสารมลพิษต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม โดยเทคโนโลยีนี้สามารถประยุกต์ใช้ในการบำบัดสารมลพิษในรูปสารอินทรีย์ที่อยู่ในตัวกลาง ดิน น้ำ หรืออากาศ การบำบัดสารมลพิษโดยใช้เทคโนโลยี Phytoremediation สิ่งที่สำคัญ คือการเลือกใช้พืชในการบำบัดสารมลพิษในบริเวณที่มีการปนเปื้อน (จันทนี แจ่มแสงทอง, 2552) นอกจากนี้ยังต้องมีความเข้าใจพฤติกรรมของสารมลพิษที่จะทำการบำบัดในตัวกลางนั้นๆ และปัจจัยร่วมอื่นๆ ที่เกิดขึ้นในธรรมชาติเพื่อช่วยในการบำบัดมีประสิทธิภาพมากขึ้นได้แก่ กระบวนการทางฟิสิกส์ เคมี และชีววิทยา ดังนั้น Phytoremediation จึงเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับใช้บำบัดสารมลพิษโดยการพึ่งพาสิ่งที่มีอยู่แล้วในระบบธรรมชาติ และเป็นวิธีที่ประหยัดต้นทุนในการบำบัดสารมลพิษ โดยไม่จำเป็นต้องใช้สารเคมีที่มีราคาแพงและเป็นสาเหตุของการทำลายธรรมชาติ ซึ่งมีงานวิจัยการใช้พืชบำบัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียชุมชน ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 พืชที่มีการศึกษานำมาใช้ในการบำบัดฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำเสียชุมชน

ชนิดพืช	% Total phosphorus removal	Time (days)	ที่มา
หญ้าแฝก (*Vetiveria zizanioides* L.)	35	7	Boonsong K. and Chansiri M. (2008)
ธูปฤาษี (*Typha angustifolia*)	92	7	Oki (1992)
บัวหลวง (*Nelumbo nucifera* Gaerth)	60	10	Thongchi.K and Udomphon.P (2004)
สาหร่ายหางกระรอก (*Hypha angustifolia*)	65	10	
หญ้าแฝก (*Vetiveria zizanioides* L.)	90	7	คารินทร์ และคณะ(2551)
พุทธรักษา (*Canna siamensis*)	75	7	จิตติมา (2547)

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่ 25 ก.ค. 2555
เลขทะเบียน 247169
เลขเรียกหนังสือ

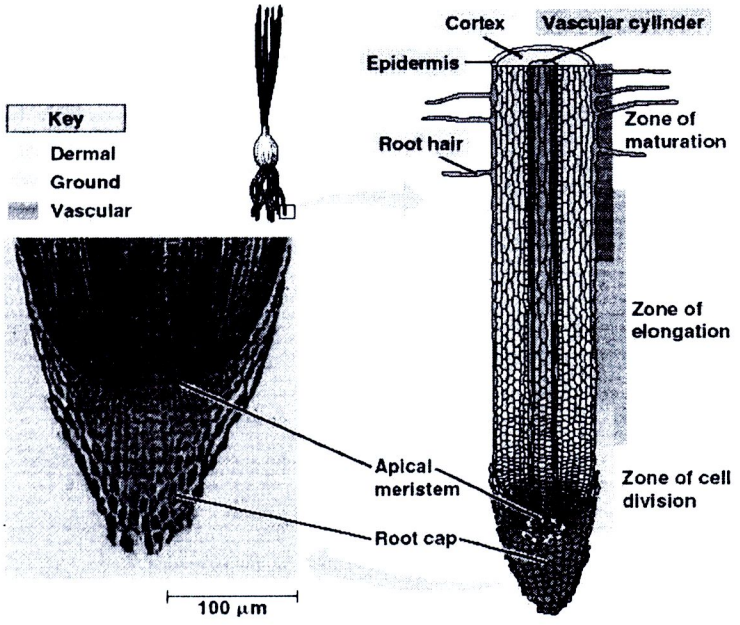
ตารางที่ 2.4 (ต่อ) พืชที่มีการศึกษานำมาใช้ในการบำบัดฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำเสียชุมชน

ชนิดพืช	% Total phosphorus removal	Time (days)	ที่มา
แหนเป็ดเล็ก (*Lemna perpusilla* Torr.)	25	10	ปิยะฉัตร (2546)
ผักกระเฉด (*Neptunia oleracea* Lour)	61	15	จิตติมา (2539)
จอก (*Pistia stratiotes* L.)	56	15	
ผักตบชวา (*Eichhomia carssipe s*(Mart.) Solms)	44	15	

2.6.1 กลไกในการดูดฟอสฟอรัสของพืช

พืชจะดูดธาตุฟอสฟอรัสในรูปของอิออน (ion) โดยจะดูดผ่านรากพืช ซึ่งอาจอยู่ในรูปอิออนอิสระในสารละลายดินหรืออิออนที่ถูกดูดไว้ที่ผิวของอนุภาคดิน โดยพืชจะดูดอิออนแบบแอกทีฟทรานสปอร์ต ซึ่งเป็นกระบวนการแพร่ที่อาศัยพลังงานจากเซลล์ของรากพืช (ยงยุทธ โอสถสภา, 2543)

2.6.1.1 รากพืชจะมีเนื้อเยื่อเจริญที่ปลาย (root apical meristem) ประกอบด้วยโพรเมอริสเทม ที่มีการแบ่งเซลล์เพื่อพัฒนาไปเป็นส่วนต่างๆ เนื้อเยื้อเจริญจะอยู่ส่วนปลายราก ส่วนเซลล์ที่อยู่ตอนบน จะเปลี่ยนแปลงไปเป็นเนื้อเยื่อถาวรต่อไป สามารถแบ่งส่วนของรากพืชตามลักษณะการเจริญเติบโตได้เป็น 4 ส่วนคือ หมวกราก (root cap) บริเวณที่มีการแบ่งเซลล์ (region of cell division) บริเวณที่มีการยืดตัวของเซลล์ (region of elongation) และบริเวณที่เจริญเต็มที่ (region of maturation) (พวงผกา สุนทรชัยนาคแสง, 2548)



รูปที่ 2.2 โครงสร้างตามยาวของรากพืช (ที่มา: http://fws.cc/udontham/index.php)

โครงสร้างของรากพืชจะประกอบไปด้วยเนื้อเยื่อสามกลุ่มคือ อิพิเดอร์มิส (epidermis) คอร์เทกซ์ (cortex) และสทิล (stele) (พวงผกา สุนทรชัยนาคแสง, 2548)

1. อิพิเดอร์มิส (epidermis) เป็นเนื้อเยื่อชั้นนอกสุดหรือเรียกว่าเนื้อเยื่อผิว มีเซลล์ที่เรียงตัวกันเพียงชั้นเดียวและผนังเซลล์บาง ไม่มีคลอโรพลาสต์ บางเซลล์จะเปลี่ยนแปลงไปเป็นขนราก

2. คอร์เทกซ์ (cortex) เป็นบริเวณระหว่างชั้น epidermis และ stele ประกอบด้วยเนื้อเยื่อพาเรงคิมาที่ทำหน้าที่สะสมน้ำและอาหารเป็นส่วนใหญ่ ชั้นในสุดของ cortex จะเป็นเซลล์แถวเดียวเรียก endodermis ในรากพืชใบเลี้ยงเดี่ยวจะเห็นชัดเจนเซลล์ในชั้นนี้เมื่อมีอายุมากขึ้นจะมีผนังหนาเพราะมีสารซูเบอรินหรือลิกนินสะสมอยู่ แต่จะมีช่วงที่มีเซลล์ผนังบางแทรกอยู่ในชั้นนี้และอยู่ตรงกับแนวของไซเลม

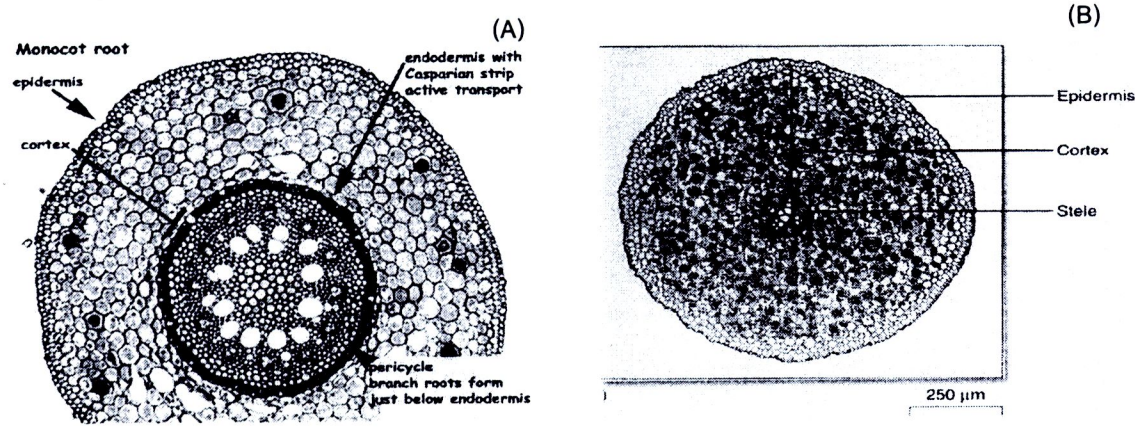
3. สทิล (stele) เป็นบริเวณที่อยู่ถัดจากชั้น endodermis เข้าไปพบว่า stele ในรากจะแคบกว่าชั้น cortex ประกอบด้วยชั้นต่างๆดังนี้

3.1 Pericycle เป็นเซลล์ผนังบางขนาดเล็กมี 1-2 แถว พบเฉพาะในรากเท่านั้นเป็นแหล่งกำเนิดของรากแขนง (secondary root)

3.2 Vascular bundle ประกอบด้วย xylem อยู่ตรงใจกลางเรียงเป็นแฉกโดยมี phloem อยู่ระหว่างแฉก สำหรับพืชใบเลี้ยงคู่ต่อมาจะเกิดเนื้อเยื่อเจริญ vascular cambium คั่นระหว่าง xylem กับ

phloem ในรากของพืชใบเลี้ยงคู่มีจำนวนแฉกน้อยประมาณ 1-6 แฉก โดยมากมักมี 4 แฉก ส่วนราก ของพืชใบเลี้ยงเดี่ยวมักมีจำนวนแฉกมากกว่า

3.3 pith เป็นบริเวณตรงกลางรากหรือไส้ในของรากเห็นได้ชัดเจนในรากพืชใบเลี้ยงเดี่ยว ส่วนใหญ่เป็นเนื้อเยื่อพาเรงคิมา ส่วนรากพืชใบเลี้ยงคู่ตรงกลางมักเป็น xylem

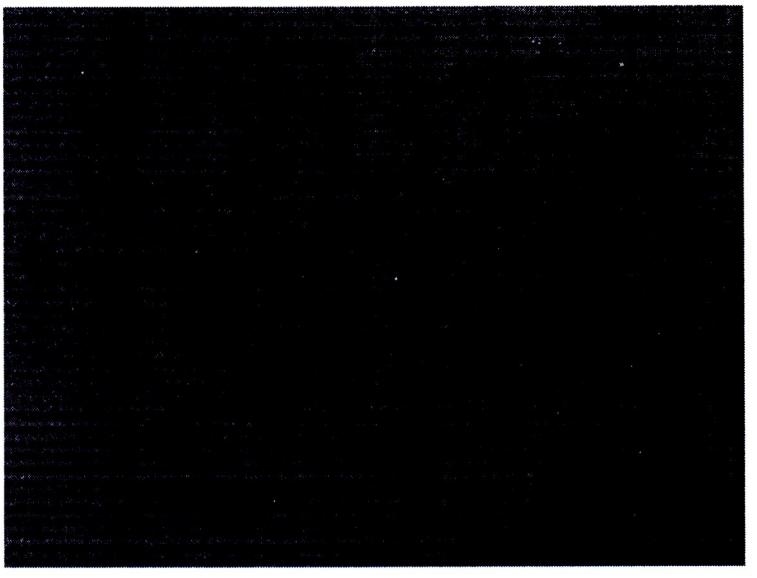


รูปที่ 2.3 แสดงบริเวณทั้ง 3 ชั้นคือ เอพิเดอร์มิส คอร์เท็กซ์ และสตีล ของรากพืช (A พืชใบเลี้ยงเดี่ยว B พืชใบเลี้ยงคู่) (ที่มา: http://fws.cc/udontham/index.php)

2.6.1.2 การดูดธาตุอาหารในรูปของไอออนของรากพืชแต่ละส่วน รากที่กำลังเจริญเติบโตนั้นแต่ละส่วนมีความแตกต่างทั้งในแง่สัณฐาน กายวิภาค และสรีระ โดยแบ่งรากพืชด้วยลักษณะภายนอกตามความยาวออกเป็นสามส่วนคือ ปลายราก ขนราก ส่วนของรากที่เจริญเต็มที่ รากแต่ละชนิดมีอัตราการดูดไอออนแตกต่างกัน คือปลายรากมีอัตราการดูดไอออนมากสุด และลดลงตามลำดับ (ยงยุทธ โอสถสภา, 2543) อัตราการดูดฟอสฟอรัสสูงสุดที่ปลายรากและจะลดลงตามลำดับเมื่อห่างจากปลายรากออกไปทั้งนี้เนื่องจากส่วนที่ห่างจากขนรากไปแล้วพื้นที่ผิวสำหรับการดูดน้ำและธาตุอาหารลดลง นอกจากนี้แล้วอัตราการดูดฟอสฟอรัสของรากยังขึ้นอยู่กับสภาพของฟอสฟอรัสในพืชว่าเพียงพอหรือไม่ด้วย หากพืชอยู่ในภาวะขาดแคลนธาตุ ทุกส่วนของรากจะมีอัตราการดูดสูงกว่าเดิม

2.6.1.3 การขนส่งไอออนเข้าสู่ส่วนกลางของราก การขนส่งเข้าสู่ส่วนราก (radial transport across the roos) จากผิวรากผ่านคอร์เทกซ์ไปยังสตีลมีอยู่ 2 ทางคือ 1 ไปตามผนังเซลล์และช่องระหว่างเซลล์ตามวิถีอะโพพลาสต์ และ 2 ผ่านไซโทพลาสซึมของเซลล์หนึ่งไปยังเซลล์หนึ่งโดยไม่เข้าแวคิวโอล) ตามช่องพลาสโมเดสมาตา เรียกว่าวิถีซิมพลาสต์ (symplasmic pathway) (ยงยุทธ โอสถสภา, 2543) การขนส่งโดยวิถีอะโพพลาสต์เริ่มจากผนังเซลล์ผิวชั้นนอกไปสิ้นสุดที่ผนังเซลล์ของเอนโดเดอร์มิส เนื่องจากในผนังเซลล์ของเอนเดอร์มิสมีสารซูเบอริน(suberin) สะสมอยู่เป็นแถบโดยรอบซึ่งเรียกว่าแถบแคสแพเรียม (Casparian strip) ซึ่งแถบแคสแพเรียมเป็นสิ่งขัดขวางการขนส่งไอออนโดยวิถีอะโพพลาสต์เฉพาะช่วงระหว่างคอร์เทกซ์กับสตีล การมีสิ่งขัดขวางดังกล่าวทำให้การขนส่งตัวละลาย

จากคอร์เทกซ์สู่สทีลหรือขนส่งสารจากสทีลสู่คอร์เทกซ์ผ่านเข้าไปในเซลล์ของเอนโดเดอร์มิสหรือวิถีซิมพลาสต์ (ยงยุทธ โอสถสภา, 2543)



รูปที่ 2.4 วิถีอะโพพลาสต์และวิถีซิมพลาสต์สำหรับการเคลื่อนย้ายของไอออนเข้าหาสทีล (ที่มา: ยงยุทธ โอสถสภา, 2543)

เมื่อไอออนเข้าสู่วิถีอะโพพลาสต์และวิถีซิมพลาส ผ่านเนื้อเยื่อผิวหรือคอร์เทกซ์และเคลื่อนย้ายมาจนถึงสทีล ต่อจากนั้นไอออนก็จะเข้าสู่โพลเอมและไซเลมเวสเซลเพื่อเคลื่อนย้ายขึ้นเหนือดินไปยังส่วนต่างๆของพืช เพื่อนำสารอาหารไปใช้ในการเจริญเติบโตต่อไป

2.6.2 บัวหลวง

บัวเป็นพรรณไม้ชนิดหนึ่งที่มีรูปทรงของใบและดอกที่สวยงาม บัวหลวงจัดเป็นพืชที่ปลูกมากที่สุดในจำนวนพืชน้ำ ทั้งนี้เป็นเพราะบัวเป็นพืชที่ใช้ประโยชน์ได้มาก (สุภาวดี ตั้งธีระวัฒนะ และWeidong Ke, 2549) บัวถือเป็นราชินีแห่งพืชน้ำ โดยได้มีการค้นพบเมล็ดบัวหลวงอายุประมาณ 4000 ปีที่ประเทศจีนแล้วนำมาเพาะงอกเป็นต้นได้ ในอดีตกาลจัดว่าบัวเป็นดอกไม้ศักดิ์สิทธ์ใช้บูชาเทพเจ้า ในทางพุทธศาสนาใช้ดอกบัวพันธุ์ปทุมชาติเป็นพุทธบูชา ทั้งในชีวิตประจำวันและในโอกาสพิเศษจึงนับได้ว่าบัวเป็นพืชที่มีดอกสวยและมีกลิ่นหอมแล้ว ยังเป็นพรรณไม้ที่ให้คุณประโยชน์แทบทุกส่วน เช่น ราก ลำต้น ใบ ดอก ผล เมล็ด นอกจากนี้ยังนำมาปลูกเป็นไม้ประดับ ไม้ตัดดอก เป็นอาหาร เป็นเครื่องดื่ม เป็นสมุนไพรหรือยารักษาโรคได้ (สุชาดา ศรีเพ็ญ และวีรญา บุญเตี้ย, 2546)

2.6.2.1 อนุกรมวิธานของบัวหลวง

การจัดลำดับทางอนุกรมวิธานของบัวหลวง เป็นดังนี้

Kingdom Plantae

(unranked) Angiosperms

(unranked) Eudicots

Order Proteales

Family Nelumbonaceae

Genus *Nelumbo*

Species *Nelumbo lutea*

2.6.2.2 ลักษณะโดยทั่วไปของบัวหลวง

บัวหลวงเป็นพืชอยู่ในวงศ์ *Nymphaeaceae* (สุชาดา ศรีเพ็ญ และวีรญา บุญเตี้ย, 2546) บัวหลวงขึ้นกระจายทั่วไปในน้ำจืดที่เป็นสระ ลำธาร ทะเลสาป ในเขตอบอุ่นทั่วโลก บัวหลวงเป็นพืชน้ำล้มลุก ลำต้นมีทั้งที่เป็นเหง้าใต้ดินและเป็นไหลเหนือดิน ใต้น้ำ ใบเดียวแตกจากข้อของลำต้น ก้านใบกลมเรียวแข็ง ใบเจริญที่ผิวน้ำหรือเหนือน้ำ แผ่นใบรูปร่างกลม ขอบใบเรียบและเป็นคลื่นผิวใบก้านใบมีหนามเป็นตุ่มเล็กๆ ภายในก้านใบมีน้ำยางใสเมื่อถูกอากาศเป็นสีคล้ำ ดอกเดียวมีกลิ่นหอมเกิดจากข้อของเหง้าใต้ดินตรงซอกใบ ดอกประกอบด้วยกลีบเลี้ยง 4-5 กลีบ ขนาดเล็กเรียงซ้อนกันหลายชั้น เกสรเพศผู้จำนวนมากอยู่รอบฐานรองดอกที่บวมขยายใหญ่หุ้มรังไข่ไว้ภายใน (สุชาดา ศรีเพ็ญ และวีรญา บุญเตี้ย, 2546)

2.6.2.3 ถิ่นกำเนิดและสภาพแวดล้อมของบัวหลวง

บัวหลวงจะเกิดในแหล่งน้ำที่มีฤทธิ์เป็นกลาง มีความเป็นกรดเล็กน้อย ระหว่างเส้นรุ้ง 15 องศาใต้ ถึง 42 องศาเหนือ ที่มีอุณหภูมิระหว่าง 15-40 องศาเซลเซียส มีแสงแดดช่วงกลางวันระหว่าง 8-16 ชั่วโมง (เสริมลาภ วสุวัต, 2549)

2.6.2.4 ชนิด ประเภท ของพันธ์บัวหลวง

บัวหลวงแบ่งออกเป็นสองชนิดคือ (เสริมลาภ วสุวัต, 2549)

1. บัวหลวงที่มีถิ่นกำเนิดทางซีกโลกตะวันออก นักพฤษศาสตร์ให้ชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Nylumbo nucifera* Gaertn กำเนิดในทวีปเอเชียให้ดอก 2 สี คือ กลุ่มดอกสีขาวและสีชมพู-แดง

2. พวกที่มีถิ่นกำเนิดทางซีกโลกตะวันตก นักพฤษศาสตร์ให้ชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Nylumbo pentapetala* Fernald หรือ *N. lutea* Pers ให้ดอกสีเดียวคือสีเหลือง

2.6.2.5 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของบัวหลวง

ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 5 ส่วน คือ

1. ส่วนของลำต้น มีทั้งเหง้า (rhizome) ไหล (stolon) หรือหัว (tuber) ฝังอยู่ในดิน โคลนใต้ผิวน้ำ ในขณะที่ลำต้นเจริญงอกงามนั้นบางสกุลจะส่งไหลไปตามที่ต่างๆ บางสกุลงอกเป็นเหง้าอ่อนๆ ไปตามปลายเหง้าเดิม หรืองอกเป็นหัวเล็กๆ

2. ส่วนของใบ เป็นใบเดียว มีทั้งขนาดใหญ่ที่มีก้านใบยาว ชูใบให้อยู่ในระดับน้ำหรือเหนือน้ำ ก้านใบเรียบหรือมีหนาม หรือใบอาจมีขนาดเล็กออกจากลำต้นที่ลอยน้ำ ขอบใบโดยทั่วไปมีตั้งแต่เรียบ (entire) จนถึงจักเป็นฟันแหลม (dentate) ในปกติมักจะมีรูปร่างแบนและเกือบกลม(orbicular) แต่ตรงฐานมักเว้า(cordate) มีก้านใบติดกับใบตรงกลางใบ (peltate) ใบติดกับลำต้นแบบสลับในแต่ละข้อ (alternate) ไม่มีหูใบ

3. ส่วนของดอก มีก้านดอกยาว บางสกุลก้านดอกเรียงแต่บางสกุลมีหนาม ก้านดอกชูดอกซึ่งเป็นดอกเดี่ยวสูง เหนือน้ำหรืออยู่ที่ระดับน้ำ ดอกมีทั้งขนาดใหญ่และขนาดเล็ก เป็นดอกสมบูรณ์เพศ (Perfect flower) และมีความเหมือนกันทุกระนาบเมื่อผ่าตามยาว (regular) ดอกมีกลีบนอกตั้งแต่ 3 กลีบหรือมากกว่าปกติมีสีเขียวและมีขนาดใหญ่ใกล้เคียงกับกลีบใน แต่ละกลีบอยู่แยกกัน (polysepalous) และติดที่ฐานรองดอก(receptacle) กลีบในมีจำนวนมากและอยู่แยกกัน (polypetalous) มีหลายชนิดที่กลีบใน ชั้นในๆเข้าไปจะมีขนาดเล็กลงจนถึงชั้นของเกสรตัวผู้ (stamen) และเกสรตัวผู้มีรูปร่างและสีคล้ายกลีบใน (petaloid stamen) กลีบในมีสีต่างๆกันตามชนิดของบัว เกสรตัวผู้มีตั้งแต่ 3 หรือ 6 จนถึงมากอยู่แยกกัน ก้านเกสรตัวผู้ (filament) มีลักษณะเป็นแผ่นแบนและยาว อับเรณู (anther) ฝังติดเข้าสู่ใจกลางของดอก อับเรณูแตกตามความยาวมี 2 เซลล์ บางชนิดมีเนื้อเยื่อที่ส่วนปลายเหนืออับเรณู (connective) เกสรตัวเมีย (pistil) มี carpel จำนวนมากบางชนิด carpel เรียงตัวแบบติดกัน (syncarpous) และบางชนิดเรียงแยกกัน (apocarpous) รังไข่ (ovary) มีทั้งชนิดที่อยู่เหนือส่วนต่างๆของดอก (superior ovary) และชนิดที่อยู่ใต้ส่วนต่างๆของดอก

4. ส่วนของผล เกิดจาก carpel ที่ติดกันหรือแยกกัน ผลที่แก่แล้วอยู่ใต้น้ำหรืออาจลอยอยู่เหนือน้ำ ผลมีหลายลักษณะ เช่นลักษณะที่หนึ่งเป็นผลเดี่ยว ชนิด follicle ที่เกิดจากดอกที่มีเกสรตัวเมียเพียงอันเดียว เมื่อแก่แล้วแตกตะเข็บเดียว ลักษณะที่สองเป็นผลชนิด aggregate fruit ที่เกิดจากดอกที่มีเกสรตัวเมียมี carpel หลายอันและอยู่แยกกัน ในหนึ่งผลนี้จะมีผลย่อยจำนวนมาก และผลย่อยเป็นชนิดผลแห้ง (dry fruit) ชนิด nut เมื่อแก่เปลือกแข็งไม่แตก ภายในหนึ่งผลย่อยมีหนึ่งเมล็ด ลักษณะที่สามเป็นผลเดียวและผลสด (fleshy fruit) ชนิด berry เกิดจากดอกที่มีเกสรตัวเมีย มี carpel หลายอันและอยู่ติดกันเนื้อนุ่มและมีเมล็ดมาก

5. ส่วนของเมล็ด มีขนาดต่างๆกันตามชนิดของบัว บางชนิดมีอาหารพวกแป้งมากบางชนิดมีเยื่อ (aril) หุ้ม บางชนิดไม่มีอะไรหุ้ม

2.6.3 กกราชินี

กกราชินีจะพบตามที่มีน้ำขัง ริมคลอง และตามที่ลุ่มชื้นแฉะทั่วไป ขยายพันธุ์โดยเมล็ดและการแตกกอ กกราชินีใช้เป็นสมุนไพรแก้ช้ำใน และการตกเลือดจากอวัยวะภายใน แก้ปากเป็นแผล ปากเปื่อย บำรุงธาตุ แก้เสมหะ ใช้ฆ่าพยาธิ

2.6.3.1 อนุกรมวิธานของกกราชินี

การจัดลำดับทางอนุกรมวิธานของกกราชินี เป็นดังนี้

Kingdom Plantae

(unranked) Angiosperms

(unranked) Monocots

Order Poales

Family Cyperaceae

Genus *Cyperus*

2.6.3.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของกกราชินี

(ที่มา: http://www.rakbankerd.com/agriculture/page1570plant และhttp://118.175.88.169/botanyhin-sorn/see_treedata.php?id_tree=232)

1. ส่วนของลำต้น ลำต้นสั้นอยู่ใต้ดิน มีลักษณะเป็นเหง้า สามารถแตกกอได้ ชูส่วนของลำต้นเหนือดินสูงประมาณ 1-1.5 เมตร ลำต้นมีลักษณะเป็นสามเหลี่ยมที่ค่อนข้างมนกลม

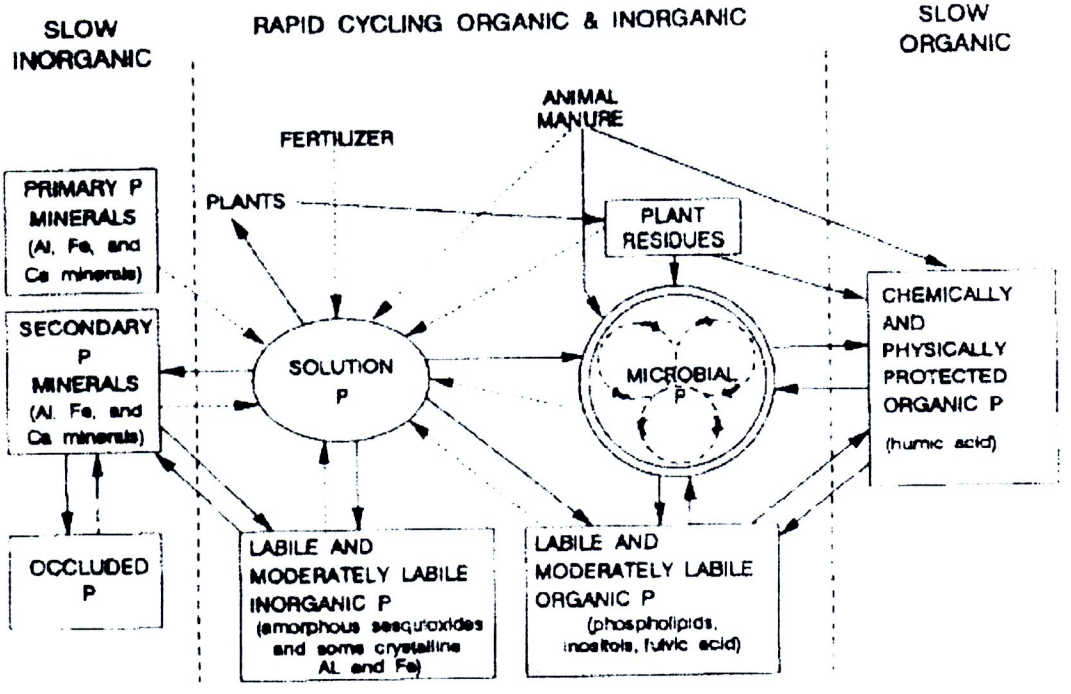
2. ส่วนของใบ เป็นใบเดี่ยวจะเป็นแผ่นบางเป็นกระจุกสามระนาบรอบโคนต้น ปลายลำต้นมีใบประดับรูปร่างเรียวซ้อนกันเป็นวงประมาณ 20 อัน มีลักษณะเรียวแบนปลายตัดยาวประมาณ 30 เซนติเมตร กว้างประมาณ 1 เซนติเมตร สีเขียวสด

3. ส่วนของดอก ดอกจะออกจากโคนต้นตามซอกใบ เป็นช่อดอกเล็กๆ ซ้อนกันสองชั้น ดอกมีขนาดเล็กสีขาวอมเขียว เมื่อแก่จะเป็นสีน้ำตาลอ่อน ก้านช่อดอกสีเขียวอ่อน และมีใบประดับจำนวนมากออกเป็นช่อแบบช่อซี่ร่มย่อยที่ปลายกิ่ง ช่อดอกแตกแขนงย่อย 20-25 แขนง กว้าง 12-20 เซนติเมตร มีใบประดับรองรับช่อดอก 4-10 ใบ กว้าง 6-10 มิลลิเมตร ยาว 15-25 เซนติเมตร แต่ละแขนงมีดอกย่อยช่อละ 8-20 ดอก ดอกย่อยมีกาบหุ้ม กว้างประมาณ 1 มิลลิเมตร ยาว 1-2 มิลลิเมตร

4. ลักษณะผล ผลแห้งเป็นรูปรีหรือรูปไข่ กว้าง 0.4-0.5 มิลลิเมตร ยาว 0.9-1 มิลลิเมตร สีน้ำตาลเปลือกแข็ง มีเมล็ดเดียว

2.7 จุลินทรีย์ต่อการหมุนเวียนของฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำและดิน

ฟอสฟอรัสมีอยู่ในพืช จุลินทรีย์ และสิ่งมีชีวิตทุกชนิด ตลอดจนเป็นองค์ประกอบในอนินทรียสาร ต่างๆ ฟอสฟอรัสสามารถเปลี่ยนจากอนินทรีย์เป็นอินทรีย์ฟอสฟอรัส หรือเปลี่ยนจากอินทรีย์ฟอสฟอรัสเป็นอนินทรีย์ฟอสฟอรัสได้ ซึ่งในธรรมชาติกระบวนการเหล่านี้เกิดขึ้นพร้อมๆกัน



รูปที่ 2.5 การหมุนเวียนของฟอสฟอรัสในดิน (ที่มา: Sharpley, 1995)

จุลินทรีย์ดินมีบทบาทต่อการหมุนเวียนของธาตุอาหารพืช สำหรับการหมุนเวียนของฟอสฟอรัสในดิน จุลินทรีย์เข้าไปมีส่วนในกระบวนการต่างๆ ดังนี้ (สมเกียรติ เกื้อหนุน, 2551)

1. กระบวนการเปลี่ยนอินทรีย์ฟอสฟอรัสเป็นอนินทรีย์ฟอสฟอรัส เป็นการสลายตัวของอินทรีย์ฟอสฟอรัสจากซากพืช ซากสัตว์ และอินทรียวัตถุ รวมถึงส่วนที่เป็นองค์ประกอบในเซลล์จุลินทรีย์ กระบวนการนี้จะเกิดขึ้นเมื่อสัดส่วนของคาร์บอนกับฟอสฟอรัสในตะกอนดิน (C:P ratio) มีประมาณ 300:1 โดยจุลินทรีย์จะผลิตกรดอินทรีย์ หรือเอนไซม์แล้วปลดปล่อยออกสู่สารละลายตะกอนดิน ทำให้อินทรีย์ฟอสฟอรัสสลายตัวได้มากขึ้น

2. กระบวนการเปลี่ยนอนินทรีย์ฟอสฟอรัสเป็นอินทรีย์ฟอสฟอรัส เกิดจากการดูดใช้อนินทรีย์ฟอสฟอรัสเข้าไปใช้ใน กระบวนการเจริญเติบโต และเพิ่มจำนวนของจุลินทรีย์ ทำให้ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์มีปริมาณลดลงกระบวนการนี้จะเกิดขึ้นเมื่อสัดส่วนของคาร์บอนกับฟอสฟอรัสในดินมี

ประมาณ 200:1 ฟอสฟอรัสในส่วนนี้พืชจะสามารถนำไปใช้ได้อีกครั้งเมื่อจุลินทรีย์ตายและสลายตัวแล้วปลดปล่อยฟอสฟอรัสกลับคืนสู่สารละลายดิน

3. กระบวนการเพิ่มและลดออกซิเจน จุลินทรีย์หลายชนิดมีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการเพิ่มและลดออกซิเจนให้แก่ธาตุต่างๆได้ เช่น จุลินทรีย์กลุ่มที่เจริญได้ในสภาพที่ไม่มีออกซิเจน (anaerobes หรือ facultative aerobes) จะใช้สารประกอบที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบเพื่อดำเนินกิจกรรมการย่อยสลายอินทรียวัตถุ (ไพบูลย์ ประพฤติธรรม, 2543) ดังนี้ ฟอสเฟตไอออน (PO_4^{3-}) จึงถูกลดจำนวนออกซิเจนทำให้เปลี่ยนรูปเป็นฟอสฟีน ดังสมการที่ 2

$$H_3PO_4 \longrightarrow H_3PO_3 \longrightarrow H_3PO_2 \longrightarrow PO_3 \quad —(2.2)$$

สำหรับกระบวนการเพิ่มออกซิเจนแก่ฟอสฟอรัส เกิดขึ้นโดยฟอสไฟต์ (H_2PO^{3-}) จะถูกเพิ่มจำนวนเพิ่มจำนวนออกซิเจนในโครงสร้างทำให้เกิดเป็นฟอสเฟตได้ดังสมการที่ 3

$$H_2PO_3 \longrightarrow HPO_4^{2-} \qquad \text{——————} \quad (2.3)$$

4. การย่อยละลาย โดยทั่วไปในสภาพธรรมชาติฟอสฟอรัสส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของสารประกอบต่างๆ ซึ่งมีทั้งอินทรีย์ฟอสฟอรัสและอนินทรีย์ฟอสฟอรัส ซึ่งมีจุลินทรีย์หลายชนิดสามารถย่อยละลายสารประกอบเหล่านั้นได้ โดยการปล่อยเอนไซม์และกรดอินทรีย์ออกมาย่อยละลาย เช่น เชื้อ *Penicillium radicum* สามารถผลิตกรดกลูโคนิก (gluconic) ออกมาย่อยละลายหินฟอสเฟตได้ เชื้อ *Aspergillus* sp. *Emmericella* sp. *Penicillium* sp. ปลดปล่อยเอนไซม์แอซิดฟอสฟาเทส และไฟเทส ออกมาย่อยละลายไฟเทต และไกลเซอโรฟอสเฟต ซึ่งเป็นอินทรีย์ฟอสฟอรัสได้ (สมเกียรติ เกื้อหนุน, 2551) นอกจากกิจกรรมต่างๆ ของจุลินทรีย์ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว การปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ของ จุลินทรีย์มีผลทำให้ฟอสฟอรัสละลายได้มากขึ้นเช่นกัน

2.7.1. จุลินทรีย์ต่อความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดิน

ผลการศึกษาจากงานวิจัยต่างๆ พบว่ามีจุลินทรีย์หลายชนิดที่สามารถย่อยละลายและส่งเสริมให้พืชสามารถดูดใช้ฟอสฟอรัสจากดินได้มากขึ้น โดยกระบวนการย่อยละลายสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ

1. การย่อยละลายโดยเอนไซม์ จุลินทรีย์ปลดปล่อยเอนไซม์ออกมาช่วยเร่งการสลายตัวของสารประกอบฟอสเฟต โดยเฉพาะอินทรีย์ฟอสฟอรัส เอนไซม์ที่จุลินทรีย์ปลดปล่อยออกมาย่อยละลายฟอสฟอรัสเรียกโดยรวมว่า “ฟอสโฟไฮโดรเลส” ซึ่งสามารถจำแนกออกได้เป็น 3 กลุ่ม ตามชนิดของอินทรีย์ฟอสฟอรัสที่เอนไซม์นั้นสามารถย่อยละลายได้ (Mullen, 2005)

1.1 ไฟเทส (phytase) สามารถย่อยละลายฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปไฟเทต ซึ่งสลายตัวได้ยาก จุลินทรีย์ที่สามารถผลิตเอนไซม์ไฟเทสส่วนใหญ่จะพบได้ในกลุ่ม *Aspergillus Penicillium Rhizopus Cunninghamella Arthrobacter* และ *Bacillus* แต่กิจกรรมในดินของจุลินทรีย์ดังกล่าวเกิดขึ้นได้น้อย (Mullen, 2005)

1.2 ฟอสโฟโมโนเอสเทอเรส (phosphomonoesterase) เป็นเอนไซม์ที่ย่อยละลายฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปเอสเทอร์โมเลกุลเดี่ยว (monoester) ได้ดี เช่น นิวคลีโอไทด์ ฟอสโฟไลปิด เป็นต้น

1.3 ฟอสโฟไดเอสเทอเรส (phosphodiesterase) เป็นเอนไซม์ที่สามารถย่อยละลายฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปเอสเทอร์โมเลกุลคู่(diester) ได้ดี เช่น กรดนิวคลีอิก เป็นต้น

แต่เนื่องจากเอนไซม์มีความจำเพาะต่อรูปของฟอสฟอรัส ดังนั้นประสิทธิภาพในการละลายอินทรีย์ฟอสฟอรัสของเอนไซม์แต่ละชนิดจึงแตกต่างกัน โดยพบว่า เอนไซม์ของจุลินทรีย์บางชนิดสามารถย่อยละลายสารประกอบของฟอสฟอรัสได้หลากหลายรูปแบบ เช่น *Psudomonas fluorescens Burkholderia cepacia Enterobacter aerogenes* (สมเกียรติ เกื้อหนุน, 2551) เป็นต้น แต่บางชนิดกลับมีความจำเพาะ เช่น Bacillus subtilis สามารถปลดปล่อยเอนไซม์ไฟเทสซึ่งสามารถย่อยละลายไอโนซิทอลฟอสเฟตได้ เป็นต้น ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 จุลินทรีย์ที่สามารถผลิตเอนไซม์ที่ย่อยละลายฟอสฟอรัสรูปต่างได้

จุลินทรีย์	เอนไซม์	รูปของฟอสฟอรัส
Pseudomonas fluorescens	acid phosphatase	Non-specific
Pseudomonas sp.	acid phosphatase	Non-specific
Burkholderia cepacia	acid phosphatase	Non-specific
Enterobacter aerogenes	acid phosphatase	Non-specific
Enterobacter cloacae	acid phosphatase	Non-specific
Citrobacter freudii	acid phosphatase	Non-specific
Proteus mirabilis	acid phosphatase	Non-specific
Serratia marcanscens	acid phosphatase	Non-specific
Bacillus subtilis	phytase	Inositol phosphate
Pseudomonas putida	phytase	Inositol phosphate
Pseudomonas mendocina	phytase	Inositol phosphate
Pseudomonas fluorescens	Phosphonoacetate hydrolase	Phosphonoacetate
Klebsiella aerogenes	C-P Lyase	Phosphonates

(ที่มา: สมเกียรติ เกื้อหนุน, 2551)

อินทรีย์ฟอสฟอรัสส่วนใหญ่ได้จากการสลายตัวของอินทรีย์วัตถุ ซึ่งประกอบด้วยฟอสฟอรัสในรูปต่างๆ เช่น นิวคลีโอไทด์ ฟอสโฟไลปิด กรดนิวคลีอิก เป็นต้น ดังนั้นการย่อยสลายจึงเกิดอย่างช้าๆ โดยมีจุลินทรีย์หลายกลุ่มเข้ามามีบทบาทในการสลายตัว รวมทั้งเอนไซม์ที่จุลินทรีย์ผลิตขึ้นนั้นก็แตกต่างไปตามลักษณะของสารประกอบในอินทรียสาร รวมถึงสภาพดินซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพของเอนไซม์ด้วย เช่น เอนไซม์ไฟเทส และแอซิดฟอสฟาเทสจากเชื้อ Trichoderma reesei สามารถช่วยเร่งการย่อยสลายพืชอาหารสัตว์ (ข้าวโพด ข้าวบาร์เลย์ และกากถั่วเหลือง) โดยเอนไซม์แอซิดฟอสฟาเทสสามารถย่อยสลายอินทรีย์ฟอสฟอรัสได้ดีกว่าเอนไซม์ไฟเทสในสภาพในสภาพที่เป็นกรด แต่ประสิทธิภาพจะลดลงเมื่อมีความเป็นด่างมากขึ้น ในขณะที่เอนไซม์ไฟเทสมีประสิทธิภาพลดลงเล็กน้อย และเมื่อใช้เอนไซม์แอซิดฟอสฟาเทสร่วมกับไฟเทสพบว่า ได้ผลดีในสภาพที่เป็นกรด (Nasi และคณะ, 1999) ในขณะที่เอนไซม์แอซิดฟอสฟาเทสจากเชื้อ *Aspergillus* spp. สามารถทำให้ไฟเทต (phytate) เลซิทิน (lecithin) และไกลเซอโรฟอสเฟต (glycerophosphate) ย่อยสลายได้มากขึ้น (Tarafdar และคณะ, 2001)

2. การย่อยละลายฟอสฟอรัสโดยกรดอินทรีย์ จุลินทรีย์หลายชนิดสามารถปลดปล่อยกรดอินทรีย์ที่สามารถช่วยให้อนินทรีย์ฟอสฟอรัสย่อยละลายได้ เช่น กรดอะซีติก (acetic acid) กรดซิทริก (citric acid) กรดออกซาลิก (oxalic acid) กรดกลูโคนิก (gluconic acid) เป็นต้น (สมเกียรติ เกื้อหนุน, 2551) ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 การย่อยละลายอนินทรีย์ฟอสฟอรัสโดยกรดอินทรีย์จากจุลินทรีย์

จุลินทรีย์	กรดอินทรีย์	ที่มา
Penicillium radicum	Gluconic	Whitelaw และคณะ (1999)
Aspergillus niger	Gluconic oxalic citric	Illmer และคณะ (1995)
Azospirillum spp.	Gluconic	Rodrigucz และคณะ(2004)
Penicillium rugulosum	Gluconic citric	Reyes และคณะ (2001)
Yarowia lipolytica	citric	Vassileva และคณะ(2000)
Rahnella aquatilis	gluconic	Kim และคณะ(1997)
Serratia marcescens	gluconic	Krishnaraj และ Goldstein (2001)
Pseudomonas ccpacia	gluconic	Babu-Khan และคณะ (1995)

(ที่มา: สมเกียรติ เกื้อหนุน, 2551)

นอกจากนี้การปลดปล่อยไฮโดรเจนไอออน (H^+) จากการหายใจ หรือการดูดใช้แอมโมเนียม(NH_4^+) ของจุลินทรีย์ สามารถทำให้ฟอสเฟตไอออนที่ถูกดูดซับละลายออกมาอยู่ในสารละลายดินได้เช่นกัน ดังสมการ (สมเกียรติ เกื้อหนุน, 2551)

$$AlPO_4 + 2H^+ \longrightarrow Al^{3+}H_2PO_4^- \qquad (2.4)$$

จุลินทรีย์ใช้ฟอสฟอรัสไปสร้างเป็นองค์ประกอบบางอย่างของสารโมเลกุลใหญ่หลายชนิดในเซลล์ จุลินทรีย์บางชนิดเช่น พีเอโอในระบบกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพมีความสามารถที่จะสะสมพลังงานไว้ในเซลล์ โดยเก็บไว้ในรูปของโพลีฟอสเฟตในกรานูล (ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และคณะ, 2536)