

บทบาทของพืชในพื้นที่ชุ่มน้ำในการบำบัดน้ำเสีย

Role of wetland plants for wastewater treatment

พันธุ์ทิพย์ กล่อมเจ็ก^{1*}

Pantip Klomjek^{1*}

บทนำ

พื้นที่ชุ่มน้ำ (wetland) ทำหน้าที่สำคัญหลากหลายประการในการดำรงไว้ซึ่งสมดุลธรรมชาติ และคุณภาพสิ่งแวดล้อม รวมถึงการช่วยลดปัญหาการเสื่อมโทรมของแหล่งน้ำจากการลดลงของคุณภาพน้ำ โดยพื้นที่ชุ่มน้ำธรรมชาติ จะทำหน้าที่ลดการปนเปื้อนของมลสารในน้ำ (Gray et al., 2000; Kadlec and Knight, 1996) ซึ่งมลสารเหล่านี้ได้ถูกเติมให้กับน้ำขณะที่มีการใช้น้ำในกิจกรรมต่างๆ รวมถึงการชะล้างมลสารขณะที่น้ำไหลผ่านพื้นที่ที่มีมลสารประเภทต่างๆ ตกค้างอยู่ และเมื่อน้ำที่มีการปนเปื้อนนี้อไหลลงสู่พื้นที่ชุ่มน้ำ ซึ่งเป็นที่ลุ่มต่ำมลสารหรือของเสียจะถูกบำบัดก่อนที่จะถูกระบายลงสู่แหล่งน้ำในพื้นที่ที่มีระดับต่ำกว่า หลักการในการบำบัดหรือลดการปนเปื้อนมลสารของน้ำในพื้นที่ชุ่มน้ำเป็นกระบวนการทางธรรมชาติที่เกิดขึ้นโดยการทำหน้าที่ร่วมกันขององค์ประกอบหลักๆ อันได้แก่ ดิน จุลินทรีย์ รวมถึงพืชที่ขึ้นอยู่ในพื้นที่ชุ่มน้ำ (Kivaisi, 2001; Lewis, 1995) ได้ถูกนำมาประยุกต์หรือเลียนแบบในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมหรือระบบบึงประดิษฐ์ (constructed wetland) เพื่อการบำบัดน้ำเสีย โดยลดข้อจำกัดบางประการของพื้นที่ชุ่มน้ำธรรมชาติลง เช่น การเพิ่มความสามารถในการรองรับน้ำ ความสามารถในการกักกักน้ำ รวมทั้ง

การควบคุมปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดน้ำเสียของระบบเพื่อให้ระบบมีความเหมาะสมและมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียมากยิ่งขึ้น (US EPA, 1993; Tauk-Tornisielo, 1998) ทั้งนี้การทำหน้าที่ของพืชในพื้นที่ชุ่มน้ำธรรมชาติและในระบบบึงประดิษฐ์ในการบำบัดน้ำเสียเป็นอีกบทบาทหนึ่งของพืชในการรักษาสมดุลของสิ่งแวดล้อม โดยพบว่าพืชเป็นองค์ประกอบหลักและเป็นปัจจัยสำคัญ ที่ทำให้การบำบัดน้ำเสียทั้งของพื้นที่ชุ่มน้ำธรรมชาติและระบบบึงประดิษฐ์มีความแตกต่างจากการบำบัดโดยระบบบำบัดน้ำเสียประเภทอื่นๆ บทความนี้จึงนำเสนอบทบาทในการบำบัดน้ำเสียของพืชในพื้นที่ชุ่มน้ำ

พืชในพื้นที่ชุ่มน้ำ

พืชในพื้นที่ชุ่มน้ำเป็นพืชที่มีลักษณะเฉพาะสามารถปรับตัวและดำรงอยู่ได้ในพื้นที่ที่ดินชุ่มไปด้วยน้ำ หรือมีน้ำท่วมขังเป็นระยะเวลายาวนาน (Guntenspergen et al. 1989; Mitsch and Gosselink, 2000) ซึ่งพืชที่พบนี้ มีทั้งพืชน้ำและพืชชายน้ำ ทั้งนี้สามารถจำแนกพืชในพื้นที่ชุ่มน้ำที่มีบทบาทเกี่ยวข้องกับการบำบัดมลสารในน้ำเป็นกลุ่มหลักๆ ตามรูปแบบโครงสร้างของพืช (Kadlec and Knight, 1996; Brix, 1993; Cronk and Fennessy, 2001) และพื้นที่ที่พบได้ดังนี้

¹ ภาควิชาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร อ.เมือง จ.พิษณุโลก 65000

Department of Natural Resources and Environment, Faculty of Agriculture, Natural Resources and Environment, Naresuan University, Muang, Phitsanulok 65000.

* Corresponding author: pantipk@nu.ac.th

1. พืชลอยน้ำ (floating plant) เป็นพืชที่มีรากอยู่ในน้ำและมีโครงสร้างส่วนอื่นๆ ลอยอยู่เหนือน้ำ รากของพืชลอยน้ำจะดูดธาตุอาหารและมลสารจากน้ำ ขณะที่โครงสร้างส่วนเหนือน้ำจะรับก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์จากอากาศและยังช่วยลดความแรงของกระแสลมเหนือน้ำ ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อกระบวนการบำบัด พืชเด่นในกลุ่มนี้ ได้แก่ จอก แหน ผักตบชวา เป็นต้น (Brix and Schierup, 1989) นอกจากนี้ ยังอาจจัดพืชที่มีรากอยู่ในดินและมีใบลอยอยู่เหนือน้ำ (floating leaved plant) อันได้แก่ บัว ประทัดต่างๆ ไว้ในกลุ่มพืชลอยน้ำด้วย

2. พืชใต้น้ำ (submerged plant) เป็นพืชที่มีรากอยู่ในดินและมีโครงสร้างส่วนเหนือดินอยู่ในน้ำ ทั้งนี้พบว่าพืชใต้น้ำรวมถึงพืชในกลุ่มอื่นที่มีรากอยู่ในดินและมีส่วนของลำต้นจมอยู่ในน้ำ สามารถช่วยดูดซึมมลสารที่ละลายอยู่ในน้ำ ขณะที่พื้นผิวของพืชส่วนที่อยู่ในน้ำยังช่วยดูดซับมลสารในรูปของสารแขวนลอยได้ด้วย (Williams, 2002; Collins et al., 2005) อย่างไรก็ตาม โดยส่วนใหญ่มักพบพืชกลุ่มนี้ในน้ำที่มีออกซิเจนสูงซึ่งหมายถึงบริเวณที่มีการปนเปื้อนมลสารที่ต้องการใช้ออกซิเจนในกระบวนการย่อยสลายไม่มากนัก (Reed et al., 1998) ตัวอย่างของพืชใต้น้ำ ได้แก่ สันตะวา ใบข้าว เทา สาหร่ายประเภทต่างๆ เป็นต้น

3. พืชโผล่พ้นน้ำ (emerged plant) เป็นพืชที่มีโครงสร้างส่วนเหนือดินชูขึ้นเหนือน้ำ มักพบในเขตน้ำตื้น พืชโผล่พ้นน้ำหรือพืชชายน้ำที่รู้จักกันโดยทั่วไป ได้แก่ กล้วยข้าว อ้อ และกกประเภทต่างๆ ทั้งนี้พบว่ารากของพืชในกลุ่มนี้สามารถดูดซึมมลสารในรูปสารละลายจากดินและน้ำ ขณะที่ส่วนของลำต้นช่วยในการดูดซับและกรองสารแขวนลอยจึงช่วยลดมลสารในน้ำได้ เนื่องจากเป็นกลุ่มที่ขึ้นอยู่บริเวณชายน้ำซึ่งเป็นบริเวณที่น้ำถูกระบายลงสู่พื้นที่ชุ่มน้ำ จึงเป็นพืชกลุ่มแรกที่มีโอกาสสัมผัสกับมลสารในน้ำ และพบว่าสามารถเจริญเติบโตในน้ำที่มีคุณภาพต่ำได้ดีกว่าพืชใต้น้ำ

การดำรงอยู่และการกระจายตัวของพืชในพื้นที่ชุ่มน้ำแต่ละชนิดนั้น จะถูกควบคุมด้วยปัจจัยหลายประการ ซึ่งปัจจัยที่สำคัญในการกำหนดขอบเขตการกระจายตัวของพืช ได้แก่ ระดับน้ำ ปริมาณและ

คุณภาพของแสง และปริมาณธาตุอาหาร โดยพบว่า การเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำ จะส่งผลโดยตรงต่อชนิดของพืชที่พบ รวมถึงการกระจายตัวและการเจริญเติบโตของพืชแต่ละชนิด นอกจากนั้น ปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณและคุณภาพของแสง เช่น ปริมาณสารแขวนลอย ความขุ่น และการเติบโตของสาหร่าย ล้วนมีอิทธิพลต่อพืชในพื้นที่ชุ่มน้ำโดยเฉพาะกลุ่มพืชใต้น้ำ ขณะที่ปริมาณธาตุอาหารที่แตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ จะส่งผลต่อการกระจายตัวและการเจริญเติบโตของพืชในพื้นที่ชุ่มน้ำด้วย

บทบาทของพืชในพื้นที่ชุ่มน้ำในการบำบัดมลสาร

การบำบัดหรือลดความเป็นพิษของมลสารที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมโดยพืช (phytoremediation) แม้จะเป็นเทคโนโลยีที่ใช้ระยะเวลาในการบำบัดนานกว่าเทคโนโลยีประเภทอื่น แต่ก็เป็นวิธีการที่ได้รับการยอมรับในด้านประสิทธิภาพและมีการประยุกต์ใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากการบำบัดด้วยกระบวนการทางธรรมชาติซึ่งไม่ก่อผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของสาธารณะและมีราคาถูก โดยเฉพาะเมื่อนำมาใช้ในการลดการปนเปื้อนมลสารในพื้นที่ขนาดใหญ่หรือการบำบัดมลสารที่มีปริมาณมาก (US EPA, 1998; Meagher, 2000; Macek et al., 2000; Raskin et al., 1997; Zhang et al., 2007) ดังเช่นกระบวนการบำบัดที่เกิดขึ้นในพื้นที่ชุ่มน้ำ ซึ่งมีพืชเป็นทั้งองค์ประกอบหลักในการบำบัด และทำหน้าที่เอื้อให้เกิดสภาพที่เหมาะสมในการบำบัดขององค์ประกอบอื่น เช่น จุลินทรีย์ ทั้งนี้พบว่าบทบาทในการบำบัดน้ำเสียของพืชในพื้นที่ชุ่มน้ำเกิดขึ้นในหลายกระบวนการด้วยกัน

บทบาทในการตกตะกอน (sedimentation) และการกรอง (filtration)

การตกตะกอนเป็นกระบวนการทางกายภาพที่ช่วยบำบัดมลสารในน้ำเสีย โดยเฉพาะมลสารประเภทของแข็ง เมื่อน้ำที่มีมลสารปนเปื้อนไหลลงสู่แหล่งรองรับที่มีปริมาตรในการรับน้ำมาก ความเร็วของกระแสจะลดลง สารแขวนลอยโดยเฉพาะกลุ่มที่มีความหนาแน่นมากกว่าน้ำ จะได้รับอิทธิพลจากแรงโน้มถ่วงมากขึ้นและเกิดการตกตะกอน

โดยมีพืชที่เจริญเติบโตอยู่ในพื้นที่ชุ่มน้ำโดยเฉพาะบริเวณทางน้ำไหลเข้าเป็นปัจจัยทางธรรมชาติที่สำคัญในการต้านและลดความเร็วของกระแสน้ำลง (Brix, 1997; Gopal, 1998) ซึ่งการตกตะกอนของมลสารนั้นมีความสัมพันธ์กับลักษณะการไหลของน้ำในพื้นที่ชุ่มน้ำ ทั้งนี้ Matagi et al. (1998) ได้ระบุว่าในบริเวณน้ำนิ่ง อนุภาคมลสารที่มีความหนาแน่นมากกว่าน้ำจะจมตัวลงได้ดี การต้านและลดความเร็วของกระแสน้ำโดยส่วนต่างๆ ของพืชนั้น นอกจากจะทำให้สารแขวนลอยขนาดใหญ่ตกตะกอนได้ง่ายขึ้นแล้ว ยังส่งผลให้อนุภาคขนาดเล็กที่มีน้ำหนักเบาหรือมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ มีโอกาสเกิดการรวมตะกอน (flocculation) จนมีขนาดใหญ่ขึ้นแล้วจึงตกตะกอนลง โดยเฉพาะอนุภาคของดินเหนียวและเกลียวอินทรีย์ ซึ่งมีประจุไฟฟ้าที่ผิวของอนุภาค ทำให้เกิดการรวมตัวและตกตะกอนได้ดีกว่าอนุภาคประเภทอื่น ทั้งนี้ นอกจากกระแสน้ำแล้ว ยังมีปัจจัยอื่นที่ส่งผลต่อการรวมตัวกันของอนุภาคขนาดเล็ก อันได้แก่ ค่าความเป็นกรดเป็นด่างของน้ำ ค่าความนำไฟฟ้าของน้ำ และความเข้มข้นของสารแขวนลอยและแพลงค์ตอนในน้ำ (Matagi et al., 1998) ขณะที่ โครงสร้างของพืชส่วนที่จมอยู่ในน้ำช่วยลดความเร็วของกระแสน้ำ โครงสร้างของพืชส่วนเหนือน้ำจะช่วยลดความเร็วของลมที่พัดผ่านผิวน้ำ ซึ่งเป็นการช่วยลดการฟุ้งกระจายของตะกอน (resuspension) จากพื้นท้องน้ำด้วย

การลดมลสารโดยกระบวนการกรองด้วยพืชนั้น จะเกิดขึ้นที่บริเวณพื้นผิวของพืชส่วนที่จมอยู่ในน้ำ ซึ่งพืชจะทำหน้าที่กรอง รองรับ (interception) และดูดซับ (adsorption) สารแขวนลอยขนาดต่างๆ ทั้งที่เป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ไว้ ทั้งนี้ การลดความเร็วของกระแสน้ำจะช่วยเพิ่มระยะเวลาในการสัมผัส (contact time) ระหว่างพืชกับมลสารในน้ำ ทำให้พืชสามารถกรองมลสารได้ดีขึ้น เช่นเดียวกับการตกตะกอน ซึ่ง Hares and Ward (2004) ได้ระบุว่ามลสารส่วนที่ถูกกรองไว้โดยเฉพาะสารแขวนลอยขนาดใหญ่นั้น จะเกิดการตกตะกอนต่อไป ส่วนสารแขวนลอยที่มีขนาดเล็กและเบา อาจถูกกรองและดูดซับติดอยู่กับพื้นผิวของพืชได้เช่นกัน ทั้งนี้ Keskinan (2003) และ Lesage (2007) พบว่าเนื้อเยื่อของพืชในกลุ่มพืชใต้น้ำ (*Myriophyllum*

spicatum L.: Spike watermilfoil) มีความสามารถในการดูดซับ (biosorption) โลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำ โดยเฉพาะทองแดงและสังกะสี

การตกตะกอนและการกรองจะส่งผลโดยตรงต่อมลสารที่แขวนลอยในน้ำทั้งที่เป็นสารอินทรีย์ เช่น สาหร่าย ซากพืชและสัตว์ และสารอนินทรีย์ เช่น อนุภาคโลหะหนักที่แขวนลอยในน้ำ ซึ่ง Muller (1988) อ้างใน Sheoran and Sheoran (2006) ระบุว่า มากกว่า 50 % ของโลหะหนักภายในพื้นที่ชุ่มน้ำ ถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิวของวัตถุและตกตะกอนออกจากน้ำ ขณะที่ Hares and Ward (2004) พบว่าโลหะหนักในน้ำที่ไหลผ่านเข้าสู่พื้นที่ชุ่มน้ำที่มีต้นอ้อหลากหลายชนิด (*Carex riparia*, *Glyceria maxima*, *Callitriche stagnalis*, *Berula erecta*, *Mentha aquatica*, *Sparganium erectum*, *Juncus effusus* และ *Myosotis scorpiodes*) ขึ้นอยู่อย่างหนาแน่นมีปริมาณลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากมวลชีวภาพของพืชดังกล่าว ช่วยลดความเร็วของกระแสน้ำช่วยในการกรอง และทำให้เกิดการตกตะกอนของโลหะหนักและการสะสมในสิ่งมีชีวิต (bioaccumulation) สำหรับมลสารในรูปสารละลายนั้น พืชในพื้นที่ชุ่มน้ำมีส่วนช่วยในการเปลี่ยนรูปให้เป็นสารแขวนลอยได้ภายใต้ปฏิกิริยาการตกตะกอนผลึก (precipitation) โดยพืชจะลำเลียงออกซิเจนจากอากาศผ่านเซลล์ aerenchyma ภายในลำต้นลงสู่บริเวณรากซึ่งอยู่ในน้ำ (Stottmeister et al., 2003) ออกซิเจนเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากับสารละลายอนินทรีย์ประเภทเหล็กและแมงกานีส เกิดเป็นสารประกอบเหล็ก (Fe^{3+}) และแมงกานีส (Mn^{4+}) ซึ่งอยู่ในรูปของของแข็งแขวนลอยแล้วจึงเกิดการกรองและการตกตะกอนออกจากน้ำ (Matagi et al., 1998; Hallberg and Johnson, 2005)

โครงสร้างของพืชที่ทำหน้าที่กรอง รองรับ ดูดซับสารแขวนลอย และนำไปสู่การตกตะกอนของอนุภาคมลสาร รวมถึงโครงสร้างที่ช่วยลดความเร็วของกระแสน้ำและเอื้อให้เกิดการตกตะกอนนั้น เป็นโครงสร้างส่วนที่จมอยู่ในน้ำ ซึ่งพบได้ในกลุ่มพืชใต้น้ำและพืชใต้น้ำ ขณะที่กลุ่มพืชลอยน้ำรวมถึงพืชใต้น้ำ มีโครงสร้างส่วนเหนือน้ำที่ช่วยลดการปั่นป่วนของกระแสน้ำอันเป็นผลจากลม ดังนั้นพืชใต้น้ำจึงเป็นกลุ่มที่มีโครงสร้างเหมาะสมในการลดสาร

แขวนลอยในน้ำ นอกจากนั้นกระบวนการกรองและการตกตะกอนสารแขวนลอยนี้ จะเกิดขึ้นตั้งแต่ น้ำไหลเข้าสู่บริเวณชาน้ำของพื้นที่ชุ่มน้ำ ซึ่งเป็นบริเวณที่พืชใล่พื้นน้ำสามารถเจริญเติบโตได้ดี ขณะที่พืชใล่ใต้น้ำเติบโตในบริเวณดังกล่าวนี้ได้ไม่ดีนัก เนื่องจากเป็นบริเวณที่รับน้ำซึ่งมีการปนเปื้อนของมลสารสูง

บทบาทในการย่อยสลาย (degradation) และเปลี่ยนแปลงมลสาร (transformation)

มลสารที่ถูกชะล้างลงสู่พื้นที่ชุ่มน้ำส่วนหนึ่งจะถูกย่อยสลายและถูกเปลี่ยนรูปไปอยู่ในรูปที่ไม่ก่อผลกระทบโดยสารอินทรีย์นั้น จะถูกย่อยสลายเป็นสารอนินทรีย์ประเภท คาร์บอน แอมโมเนีย ไนเตรต รวมถึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไนโตรเจน เป็นต้น ซึ่งสารอินทรีย์ที่ได้จากการย่อยสลายส่วนใหญ่เป็นธาตุอาหารที่สำคัญต่อพืชและจุลินทรีย์ ส่วนสารอนินทรีย์ เช่น โปรท ตะกั่ว แคดเมียม และดีบุก จะถูกเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของสารประกอบโลหะอินทรีย์ (organometallic compounds) ที่ไม่เป็นพิษ ซึ่งบางส่วน เช่น โปรท สามารถระเหยออกจากพื้นที่ชุ่มน้ำในที่สุด

กระบวนการย่อยสลายและการเปลี่ยนแปลงมลสารในพื้นที่ชุ่มน้ำนี้ มีจุลินทรีย์เป็นผู้ทำหน้าที่หลักและพืชเป็นผู้เอื้อให้กระบวนการดังกล่าวเกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งบทบาทของพืชในส่วนนี้ ได้แก่ การให้สภาพที่เหมาะสมในการดำรงอยู่ของจุลินทรีย์ โดยเฉพาะจุลินทรีย์กลุ่มที่ดำรงชีวิตด้วยการเกาะติดอยู่กับพื้นผิววัตถุ (attached microorganism) ทั้งนี้ Kivaisi (2001) ระบุว่าระบบรากของพืชในพื้นที่ชุ่มน้ำให้พื้นที่ผิวขนาดใหญ่สำหรับการอยู่อาศัยของจุลินทรีย์ประเภทยีสต์เกาะพื้นผิว ซึ่งจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำสูงขึ้น นอกจากนั้นการลำเลียงออกซิเจนลงสู่บริเวณรากของพืชในพื้นที่ชุ่มน้ำยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยและเปลี่ยนแปลงมลสารของ aerobic microorganism อีกด้วย (Zhang et al., 2007; Stottmeister et al., 2003) โดย Anderson et al. (1993) และ Sheoran and Sheoran (2006) ระบุว่าบริเวณรากพืช (rhizosphere) เป็นบริเวณที่พบจุลินทรีย์หนาแน่นและมีกิจกรรมของจุลินทรีย์สูง ซึ่งนอกจากการเอื้อให้เกิดสภาพที่เหมาะสมในการอยู่อาศัยของจุลินทรีย์ดังกล่าวข้างต้นแล้ว รากพืชยังช่วยปลดปล่อยธาตุอาหารและ

สารประกอบคาร์บอนที่จุลินทรีย์นำไปใช้เป็นอาหารได้ (US EPA, 1998) ในขณะที่จุลินทรีย์เองสามารถใช้ซากอินทรีย์พืชที่ทับถมอยู่ในบริเวณราก (rhizodeposition) เป็นแหล่งพลังงานได้อีกเช่นกัน (Stottmeister et al., 2003) อย่างไรก็ตาม พบว่าพืชในพื้นที่ชุ่มน้ำบางชนิดสามารถปลดปล่อยเอนไซม์และโคเอนไซม์ ที่ทำหน้าที่ย่อยและเปลี่ยนรูปมลสารบางประเภทได้ด้วย เช่น จอกแหน (*Spirodela polyrrhiza*: Giant duckweed) สามารถผลิต phosphatase ในการเปลี่ยนรูปสารกำจัดศัตรูพืชกลุ่มออร์กาโนฟอสเฟต สำหรับหลายชนิด และ *Myriophyllum aquaticum* (Parrot feather) ซึ่งเป็นพืชลอยน้ำประเภทหนึ่ง สามารถผลิต dehalogenase ในการเปลี่ยนรูปสารประกอบคลอรีน นอกจากนั้น *Myriophyllum aquaticum* ยังสามารถผลิตเอนไซม์ nitroreductase ในการเปลี่ยนรูปสารประกอบไนเตรต และผลิตเอนไซม์ Laccase ในการลดความเป็นพิษของ trinitrotoluene (TNT) ซึ่งเป็นสารพิษที่ส่งผลกระทบต่ออย่างรุนแรงต่อสุขภาพและเป็นสารก่อมะเร็ง (Susarla et al., 2002)

โครงสร้างพืชส่วนที่ส่งเสริมการย่อยและเปลี่ยนแปลงมลสารของจุลินทรีย์ คือ โครงสร้างส่วนที่จมอยู่ในน้ำและดิน ซึ่งจุลินทรีย์ใช้เป็นที่อยู่อาศัย ขณะที่รากพืชช่วยปลดปล่อยธาตุอาหาร และสารประกอบคาร์บอนอันเป็นแหล่งพลังงานของจุลินทรีย์ และรากยังสามารถปลดปล่อยเอนไซม์และโคเอนไซม์ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงมลสารได้อีกด้วย นอกจากนั้นทุกส่วนของซากพืชอาจถูกใช้เป็นแหล่งคาร์บอนของจุลินทรีย์ได้เช่นกัน ดังนั้นพืชใล่พื้นน้ำที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่และมีการแผ่กระจายของรากจึงทำหน้าที่ในการส่งเสริมจุลินทรีย์ได้ดีกว่าพืชใล่ขนาดเล็ก และพืชลอยน้ำซึ่งมีโครงสร้างเพียงบางส่วนจมอยู่ในน้ำ ในขณะที่การผลิตเอนไซม์และโคเอนไซม์ของพืชนั้น เป็นลักษณะเฉพาะตัวของพืชแต่ละชนิด

บทบาทในการดูดซึม (uptake, absorption) สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์

การดูดซึมโดยส่วนต่างๆ ของพืชเป็นกระบวนการหนึ่งที่ช่วยลดมลสารในน้ำทั้งในรูปสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ แม้การดูดซึ่มมลสารในรูปสารอินทรีย์ของพืชจะไม่เด่นชัดเมื่อเทียบกับสารอนินทรีย์ แต่อย่างไรก็ตาม ยังคงพบว่าพืชในพื้นที่ชุ่มน้ำสามารถ

ลดสารอินทรีย์ประเภทสารกำจัดศัตรูพืช และ PAHs ได้โดยผ่านกระบวนการดูดซึม

ในส่วนของการอินทรีย์นั้น จะพบว่าพืชในพื้นที่ชุ่มน้ำดูดซึมสารอินทรีย์ในรูปของสารละลายธาตุอาหารจากดินหรือน้ำผ่านราก ซึ่งเป็นการนำธาตุอาหารจากสิ่งแวดล้อมไปใช้ในการเจริญเติบโต ซึ่งหากธาตุอาหารนั้นมีปนเปื้อนอยู่ในปริมาณที่มากจนอาจก่อผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การดูดซึมธาตุอาหารและมลสารโดยพืชนี้ จะช่วยลดความเป็นพิษของมลสารลง ซึ่งพบได้ในพื้นที่ชุ่มน้ำที่รองรับน้ำที่ไหลผ่านพื้นที่เกษตรกรรม อุตสาหกรรมหรือแหล่งชุมชน และน้ำนั้นได้ชะล้างธาตุอาหารและมลสารต่างๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ในพื้นที่ดังกล่าวลงสู่พื้นที่ชุ่มน้ำด้วย การดูดซึมธาตุอาหารโดยเฉพาะธาตุไนโตรเจนและฟอสฟอรัสไปใช้และสะสมไว้ในส่วนต่างๆ ของพืชในพื้นที่ชุ่มน้ำ จะช่วยลดปริมาณธาตุอาหารในน้ำลง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Day Jr et al. (2004) และ Verhoeven et al. (2006) รวมถึง Greenway and Woolley (1999) ซึ่งพบว่า พืชใล้น้ำมีการสะสมธาตุอาหารไว้ในส่วนต่างๆ โดยลำต้นและใบมีการสะสมไนโตรเจนสูงกว่าราก ส่วนรากสามารถสะสมฟอสฟอรัสได้มากกว่า ซึ่งบทบาทของพืชในการดูดซึมธาตุอาหารจากน้ำและการช่วยบำบัดของของโครงร่างพืชส่วนเหนือน้ำ จะช่วยลดปัจจัยที่ก่อให้เกิดการเบ่งบานของแพลงก์ตอนและสาหร่าย (eutrophication) ซึ่งเป็นปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำและสมดุลทางนิเวศ

นอกจากธาตุอาหารแล้ว พืชในพื้นที่ชุ่มน้ำยังช่วยลดปริมาณของโลหะหนักในน้ำได้โดยการดูดซึมผ่านราก (Sheoran and Sheoran, 2006; Rai et al., 1995) และแม้รากพืชจะเป็นโครงสร้างหลักในการดูดซับสารละลายประเภทต่างๆ แต่พบว่าพืชในพื้นที่ชุ่มน้ำประเภทพืชใล้น้ำ พืชได้น้ำ และพืชที่มีใบลอยที่ผิวน้ำนั้นสามารถดูดซึมสารละลายโลหะหนักรวมถึงธาตุอาหารได้ทั้งทางรากและใบ ขณะที่พืชลอยน้ำที่มีรากขนาดเล็กจมอยู่ในน้ำจะดูดซึมสารละลายผ่านรากเท่านั้น (Vymazal, 2007; Sriyraj and Shutes, 2001) ทั้งนี้ Guilizzoni (1991) ได้รายงานถึงความสามารถของรากพืชในการดูดซึมโลหะหนักในตะกอน และการดูดซึมโลหะหนักในน้ำผ่านโครงสร้างส่วนเหนือรากของพืชที่มีรากอยู่ใน

ดิน ซึ่งพบว่า การดูดซึมในส่วนนี้จะเกิดได้มาก เมื่อน้ำมีการปนเปื้อนโลหะหนักในปริมาณมากโดยการดูดซึมไอออนผ่านรากพืชนั้น อาจเป็นการดูดซึมแบบพาสซีฟ (passive absorption) ซึ่งเกิดจากความต่างศักย์เคมีไฟฟ้า (electrochemical potential) ของไอออน ซึ่งหากภายนอกมีค่าสูงกว่าภายในเซลล์ ไอออนนั้นจะเคลื่อนผ่านเซลล์เมมเบรนเข้าสู่เซลล์ได้ หรือเกิดจากความต่างศักย์ด้านประจุไฟฟ้า ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของประจุบวกหรือประจุลบเข้าสู่เซลล์เพื่อสะเทินประจุ หรือการดูดซึมอาจเป็นแบบแอกทีฟ (active absorption) ซึ่งใช้พลังงานจากกระบวนการเมแทบอลิซึมในการเคลื่อนย้ายไอออนผ่านเซลล์เมมเบรน โดยมีตัวลำเลียงไอออนซึ่งมีความจำเพาะกับชนิดของไอออนในการนำไอออนเข้าสู่เซลล์ (มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2541) โดย Arisz (1961) อ้างใน Lu et al. (2004) และ Briggs and Robertson (1997) อ้างใน Sheoran and Sheoran (2006) ระบุว่า การดูดซึมเกลือแร่ของพืชส่วนใหญ่เป็นแบบพาสซีฟ ด้วยการแลกเปลี่ยนไอออนบวก (ion exchange) ที่ผนังเซลล์สอดคล้องกับ Edroma (1974) อ้างใน Sheoran and Sheoran (2006) ซึ่งระบุว่า การดูดซึมโลหะหนักของพืชเกิดขึ้นที่ผนังเซลล์เช่นกัน และสามารถพบความเข้มข้นของโลหะหนักในเนื้อเยื่อของพืชในพื้นที่ชุ่มน้ำได้มากถึง 200,000 เท่า ของความเข้มข้นที่พบในสิ่งแวดล้อม และด้วยกลไกการดูดซึมทั้งแบบพาสซีฟและแอกทีฟ ทำให้รากพืชสามารถดูดซึมไอออนได้ตลอดเวลาและเกิดการสะสมของไอออนในเนื้อเยื่อของพืช (มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2541) ส่วนการดูดซึมไอออนผ่านใบนั้น Everard and Denny (1985) ระบุว่า สารละลายโลหะหนักสามารถถูกดูดซึมผ่านทางรอยแตกที่ผิวใบ (cuticle) หรือปากใบ (stomata) เข้าสู่ผนังเซลล์ (cell wall) แล้วจึงเข้าสู่เซลล์เมมเบรน ทั้งนี้ความสามารถของพืชในการดูดซึมไอออนประเภทต่างๆ จะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความเป็นกรดเป็นด่าง สมบัติทางเคมีของดินและน้ำ และองค์ประกอบอินทรีย์สารของวัสดุที่พืชใช้ในการเจริญเติบโต รวมถึงชนิดของพืช อัตราการเจริญเติบโต และความเข้มข้นของโลหะหนักในเนื้อเยื่อของพืชด้วย (Sheoran and Sheoran, 2006; Lewis, 1995)

การดูดซึมมลสารของพืช ทำให้พืชเกิดการสะสมมลสารไว้ (phytoaccumulation) ในส่วนต่างๆ โดยการ

สะสมจะเกิดขึ้นเมื่อมลสารที่ถูกดูดซึมไม่ได้ถูกย่อยอย่างรวดเร็วจึงสะสมในปม (Susarla et al., 2002) และพบว่าพืชบางชนิดสามารถสะสมมลสารเช่นโลหะหนักไว้ในเนื้อเยื่อได้ในปริมาณที่สูง (hyperaccumulation) กว่า การสะสมตามปกติ (Raskin et al., 1997) ซึ่งการสะสมโลหะหนักที่จัดว่ามีค่าสูงกว่าปกตินั้น Susarla et al. (2002) ระบุว่า ต้องมีค่ามากกว่า 0.01 % ของน้ำหนักแห้งของพืชสำหรับการสะสมแคดเมียมมากกว่า 0.1 % ของน้ำหนักแห้งของพืชสำหรับการสะสมนิกเกิลสังกะสี ทองแดง และโครเมียม และมากกว่า 1 % ของน้ำหนักแห้งของพืชสำหรับการสะสมแร่ธาตุประเภทเหล็ก และแมงกานีส ซึ่งปริมาณการสะสมมลสารในเนื้อเยื่อส่วนต่างๆ อาจแตกต่างกัน หากมีการสะสมสูงในส่วนเหนือราก มลสารที่สะสมนั้นอาจถูกปลดปล่อยกลับสู่สิ่งแวดล้อมได้จากการย่อยสลายของใบแก่ และการปลดปล่อยผ่านทางต่อมเกลือ (salt gland) ของพืชบางชนิด อย่างไรก็ตาม การเก็บเกี่ยวพืชออกจากพื้นที่จะช่วยเคลื่อนย้ายมลสารนั้นออกจากสิ่งแวดล้อมได้อย่างถาวร (Nellessen and Fletcher, 1993) ทั้งนี้พบว่าพืชในพื้นที่ชุ่มน้ำส่วนใหญ่มีความสามารถในการบำบัดโลหะหนัก โดยมีรากเป็นโครงสร้างหลักในการดูดซึมและสะสมโลหะหนัก (Groudeva et al., 2001; Barley et al., 2005; Peverly et al., 1995) ซึ่ง Lu et al. (2004) และ Soltan and Rashed (2003) พบว่ารากของผักตบชวาสามารถสะสมโลหะหนักได้สูงกว่าใบ และ Demirezen and Aksoy (2004) พบว่า รากของธูปฤๅษี (*Typha angustifolia* L.) สามารถสะสมโลหะหนักได้สูงกว่าใบเช่นกัน อย่างไรก็ตาม การดูดซับอนุภาคละเอียดของโลหะหนักโดยพื้นผิวของโครงสร้างส่วนเหนือรากเป็นระยะเวลานาน อาจทำให้พบปริมาณโลหะหนักสูงในส่วนของลำต้นและใบได้เช่นกัน (Weis and Weis, 2004)

โครงสร้างของพืชในพื้นที่ชุ่มน้ำที่ทำหน้าที่ในการดูดซึม และดูดซับมลสาร ได้แก่ รากทั้งที่อยู่ใต้ดินและในน้ำ รวมถึงโครงสร้างส่วนเหนือรากที่สัมผัสผิวน้ำ ดังนั้น พืชใล่ผิวน้ำและพืชใต้น้ำ ซึ่งมีโครงสร้างส่วนใหญ่อยู่ในน้ำจึงมีบทบาทในกระบวนการเหล่านี้สูงกว่าพืชลอยน้ำ และเนื่องจากพืชใล่ผิวน้ำสามารถเจริญเติบโตได้อย่างรวดเร็วมีมวลชีวภาพสูง จึงสะสม

ธาตุอาหารและมลสารได้มากกว่าพืชประเภทอื่น อย่างไรก็ตาม มลสารที่สะสมอยู่ในเนื้อเยื่อพืชเหล่านี้ อาจถูกย่อยสลายกลับคืนสู่สิ่งแวดล้อมได้ จึงจำเป็นต้องเก็บเกี่ยวออกไปกำจัดต่อไป ทั้งนี้การแตกยอดใหม่ของพืชหลังเก็บเกี่ยวจะช่วยเพิ่มปริมาณการดูดซึมของพืชด้วย ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Greenway and Woolley (1999) และ Hosoi et al. (1998)

จากบทบาทและความสามารถของพืชที่ได้กล่าวข้างต้น ทำให้พืชในพื้นที่ชุ่มน้ำถูกใช้ประโยชน์หลักในการบำบัดน้ำเสียของระบบบึงประดิษฐ์ ซึ่งเป็นระบบบำบัดที่ได้รับการยอมรับกันโดยทั่วไป เช่น การใช้ผักตบชวาในบึงผักก้าน การใช้ธูปฤๅษี แผลก และกกในระบบบึงประดิษฐ์ของเทศบาลนครหาดใหญ่ และเทศบาลเมืองเพชรบุรี เป็นต้น

การเลือกพืชในพื้นที่ชุ่มน้ำเพื่อการบำบัดมลสาร

การใช้ประโยชน์พืชในพื้นที่ชุ่มน้ำเพื่อลดการปนเปื้อนมลสารนั้น การพิจารณาเลือกพืชที่เหมาะสม จะช่วยให้กระบวนการบำบัดเกิดขึ้นได้ตรงตามวัตถุประสงค์และมีประสิทธิภาพ (Sheoran and Sheoran, 2006; Macek et al., 2000) ซึ่งมีประเด็นในการพิจารณาหลายประการด้วยกัน ได้แก่ การเลือกประเภทและชนิดของพืชที่เหมาะสมกับประเภทของมลสารที่ต้องการบำบัดและกระบวนการในการบำบัดมลสารนั้น โดยพืชที่เลือกใช้นั้นต้องสามารถเจริญเติบโตได้ในพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนมลสารที่ต้องการทำการบำบัดสูง มีโครงสร้างหรือลักษณะเฉพาะที่ส่งเสริมให้กระบวนการในการบำบัดมลสารนั้นๆ เกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้ต้องพิจารณาถึงผลกระทบเกี่ยวเนื่องที่อาจเกิดขึ้นด้วย เช่น การเลือกพืชที่สามารถควบคุมการเพิ่มจำนวนหรือแพร่กระจายไม่ให้เป็นวัชพืช โดยเฉพาะการเลือกใช้กลุ่มพืชลอยน้ำ เช่น ผักตบชวา จอก แหน (Greenway, 1997) หรือการเลือกพืชที่สามารถเก็บเกี่ยวได้สะดวก เพื่อง่ายต่อการเคลื่อนย้ายมลสารออกจากพื้นที่ อันเป็นการป้องกันการเพิ่มมลสารให้กับพื้นที่เมื่อพืชนั้นแก่และเกิดการย่อยสลาย ซึ่งเป็นการบำบัดมลสารออกจากระบบอย่างถาวร อย่างไรก็ตาม การเก็บเกี่ยวพืชออกจากพื้นที่ชุ่มน้ำธรรมชาติ อาจส่งผลกระทบต่อ

ลักษณะทางนิเวศของพื้นที่ จึงต้องพิจารณาปัจจัยอื่นประกอบด้วย

สรุป

พืชในพื้นที่ชุ่มน้ำมีบทบาทที่สำคัญหลายประการ รวมถึงการทำหน้าที่ในการบำบัดมลสารที่ถูกระบายลงสู่พื้นที่ชุ่มน้ำ โดยพืชจะทำหน้าที่หลักในกระบวนการบำบัด เช่น การดูดซึมธาตุอาหาร การกรอง และดูดซับมลสาร และทำหน้าที่เป็นปัจจัยส่งเสริมทำให้กระบวนการอื่นๆ เช่น กระบวนการบำบัดที่ดำเนินการโดยจุลินทรีย์เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งลักษณะโครงสร้างของพืชในพื้นที่ชุ่มน้ำรวมถึงชนิดพืชที่แตกต่างกัน จะส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดมลสารแต่ละชนิดในแต่ละกระบวนการของการบำบัด ดังนั้นการเลือกใช้พืชที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งที่จะทำให้บทบาทของพืชในการบำบัดมลสารมีประสิทธิภาพสูงขึ้น

เอกสารอ้างอิง

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2541. ปฐพีวิทยาเบื้องต้น. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

Anderson, T.A., E.A. Guthrie, and B.T. Walton. 1993. Bioremediation in the rhizosphere. Environ. Sci. Technol. 27: 2630-2636.

Barley, R.W., C. Hutton, M.M.E. Brown, J.E. Cusworth, and T.J. Hamilton. 2005. Trends in biomass and metal sequestration associated with reeds and algae at Wheal Jane Biorem pilot passive treatment plant. Sci. Total Environ. 345: 279-286.

Brix, H. 1993. Wastewater treatment in constructed wetlands: system design, removal processes, and treatment performance. In Constructed Wetlands for Water Quality Improvement. CRC Press, Inc.

Brix, H. 1997. Do macrophytes play a role in constructed treatment wetland? Water Sci. Technol. 35: 11-17.

Brix, H. and H. H. Schierup. 1989. The use of aquatic macrophytes in water pollution control. Ambio. 18: 100-115.

Collins, B.S., R.R. Sharitz and D.P. Coughlin. 2005. Elemental composition of native wetland plants in constructed mesocosm treatment wetlands. Bioresour. Technol. 96: 937-948.

Cronk, J.K. and M.S. Fennessy. 2001. *Wetland Plant: Biology and Ecology*. Boca Raton, FL.

Day Jr, J.W., J-Y. Ko, J. Rybczyk, D. Sabins, R. Bean, G. Berthelot, C. Brantley, L. Cardoch, W. Conner, J.N. Day, A.J. Englande, S. Feagley, E. Hyfield, R. Lane, J. Lindsey, J. Mistich, E. Reyes, and R. Twilley. 2004. The use of wetlands in the Mississippi Delta for wastewater assimilation: a review. Ocean Coast. Manage. 47: 671-691.

Demirezen, D. and A. Aksoy. 2004. Accumulation of heavy metal in *Typha angustifolia* (L.) and *Potamogeton pectinatus* (L.) living in Sultan Marsh (Kayseri, Turkey). Chemosphere. 56: 685-696.

Everard, M. and P. Denny. 1985. Flux of lead in submerged plants and its relevance to a freshwater system. Aquat. Bot. 21: 181-193.

Gopal, B. 1998. Natural and constructed wetland for wastewater treatment: potentials and problems, paper presented in the Proceeding of the 6th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control in Sao Paulo, Brazil, 27 September-2 October 1998.

Gray, S., J. Kinross, P. Read and A. Marland. 2000. The nutrient assimilative capacity of maerl as a substrate in constructed wetland systems for waste treatment. Water Res. 34: 2183-2190.

Greenway, M. 1997. Nutrient content of wetland plants in constructed wetlands receiving municipal effluent in tropical Australia. Water Sci. Technol. 35: 135-142.

Greenway, M. and A. Woolley. 1997. Constructed wetlands in Queensland: Performance efficiency and nutrient bioaccumulation. Ecol. Eng. 12: 39-55.

Groudeva, V.I., S.N. Groudev and A.S. Doycheva. 2001. Bioremediation of waters contaminated with crude oil and toxic heavy metals. Int. J. Miner. Process. 62: 293-299.

Guilizzoni, P. 1991. The role of heavy metals and toxic materials in the physiological ecology of submersed macrophytes. Aquat. Bot. 41: 87-109.

Guntenspergen, G.R., F. Stearns and J.A. Kadlec. 1989. Wetland vegetation. P. 73-88. In: D.A. Hammer. Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: Municipal, Industrial and Agricultural. Lewis Publishers, MI.

Hallberg, K.B. and D.B. Johnson. 2005. Biological manganese removal from acid mine drainage in constructed wetlands and prototype bioreactors. Sci. Total Environ. 338: 115-124.

Hares, R.J. and N.I. Ward. 2004. Sediment accumulation in newly constructed vegetative treatment facilities along a new major road. Sci. Total Environ. 334-335: 473-479.

- Hosoi, Y., Y. Kido, M. Miki and M. Sumida. 1998. Field examination on reed growth, harvest and regeneration for nutrient removal. *Water Sci. Technol.* 38: 351-359.
- Kadlec, R.H. and R.L. Knight. 1996. *Treatment Wetlands*. Lewis Publishers, FL.
- Keskinkan, O., M.Z.L. Goksu, A. Yuceer, M. Basibuyuk and C.F. Forster. 2003. Heavy metal adsorption characteristics of a submerged aquatic plant (*Myriophyllum spicatum*). *Process Biochem.* 39: 179-183.
- Kivaisi, K.A. 2001. The potential for constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in developing countries: a review. *Ecol. Eng.* 16: 545-560.
- Lesage, E., C. Mundia, D.P.L. Rousseau, A.M.K. Van de Moortel, G. Du Laing, E. Meers, F.M.G. Tack, N. De Pauw and M.G. Verloo. 2007. Sorption of Co, Cu, Ni and Zn from industrial effluents by the submerged aquatic macrophyte *Myriophyllum spicatum* L.. *Ecol. Eng.* 30: 320-325.
- Lewis, M.A. 1995. Use of freshwater plants for phytotoxicity testing: A review. *Environ. Pollut.* 87: 319-336.
- Lu, X., M. Kruatrachue, P. Pokethitiyook and K. Homyok. 2004. Removal of Cadmium and Zinc by Water Hyacinth, *Eichhornia crassipes*. *ScienceAsia*. 30: 93-103.
- Macek, T., M. Mackova and J. Kas. 2000. Exploitation of plants for the removal of organics in environmental remediation. *Biotechnol. Adv.* 18: 23-34.
- Matagi, S.V., D. Swai, and R. Mugabe. 1998. Heavy Metal Removal Mechanisms in Wetlands. *Afr. J. Trop. Hydrobiol. Fish.* 8: 23-35.
- Meagher, R.B. 2002. Phytoremediation of toxic elemental and organic pollutants. *Curr. Opin. Plant Biol.* 3: 153-162.
- Mitsch, W.J. and J.G. Gosselink. 2000. *Wetland*. John Wiley & Sons, NY.
- Nellessen, J.E and J.S. Fletcher. 1993. Assessment of published literature on the uptake, accumulation, and translocation of heavy metals by vascular plants. *Chemosphere*. 27: 669-1680.
- Peverly, J.H., J.M. Surface and T. Wang. 1995. Growth and trace metal absorption by *Phragmites australis* in wetlands constructed for landfill leachate treatment. *Ecol. Eng.* 5: 21-35.
- Rai, U. N., S. Sinha, R.D. Tripathi and P. Chandra. 1995. Wastewater treatability potential of some aquatic macrophytes: Removal of heavy metals. *Ecol. Eng.* 5: 5-12.
- Raskin, I., R.D. Smith and D.E. Salt. 1997. Phytoremediation of metals: using plants to remove pollutants from the environment. *Curr. Opin. Biotech.* 8: 221-226.
- Reed, S.C., R.W. Crites, and E.J. Middlebrooks. 1998. *Natural Systems for Waste Management and Treatment*. McGraw-Hill, NY.
- Sheoran, A.S. and V. Sheoran. 2006. Heavy metal removal mechanism of acid mine drainage in wetlands: A critical review. *Miner. Eng.* 19: 105-116.
- Soltan, M.E and M.N. Rashed. 2003. Laboratory study on the survival of water hyacinth under several conditions of heavy metal concentrations. *Adv. Environ. Res.* 7: 321-334.
- Sriyraj, K. and R.B.E. Shutes. 2001. An assessment of the impact of motorway runoff on a pond, wetland and stream. *Environ. Int.* 26: 433-439.
- Stottmeister, U., A. Wiebner, P. Kusch, U. Kappelmeyer, M. Kastner, O. Bederski, R.A. Muller and H. Moormann. 2003. Effect of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment. *Biotechnol. Adv.* 22: 93-117.
- Susarla, S., V.F. Medina and S.C. McCutcheon. 2002. Phytoremediation: an ecological solution to organic chemical contamination. *Ecol. Eng.* 18: 647-658.
- Tauk-Tornisielo, S.M. 1998. Benefits for constructed wetlands, paper presented in the Proceeding of the 6th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control in Sao Paulo, Brazil, 27 September-2 October 1998.
- U.S. EPA (United States Environmental Protection Agency). 1993. *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment and Wildlife Habitat: 17 Case Studies*, EPA832-R-93-005.
- U.S. EPA (United States Environmental Protection Agency). 1998. *A Citizen's Guide to Phytoremediation*. Technology Innovation Office, Washington, DC.
- Weis, J.S. and P. Weis. 2004. Metal uptake, transport and release by wetland plants: implications for phytoremediation and restoration. *Environ. Int.* 30: 685-700.
- Williams, J.B. 2002. Phytoremediation in wetland ecosystems: progress, problems, and potential. *Crit. Rev. Plant Sci.* 21: 607-635.
- Verhoeven, J.T.A., B. Arheimer, C. Yin and M.M. Hefting. 2006. Regional and global concerns over wetlands and water quality. *Trends Ecol. Evol.* 21: 96-103.
- Vymazal, J. (2007). Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Sci. Total Environ.* 380: 48-65.
- Zhang, X.P., P. Liu, Y.S. Yang and W.R. Chen. 2007. Phytoremediation of urban wastewater by model wetlands with ornamental hydrophytes. *J. Environ. Sci.* 19: 902-909.