



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ: ผลของระยะกักพักต่อการลดเหลือใน
น้ำบาดาลบ่อต้นด้วยระบบบึงประดิษฐ์

โดย ผศ.ดร. พันธุ์ทิพย์ กล่อมเจ็ก

ธันวาคม 2553

สัญญาเลขที่ MRG5080394

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ: ผลของระยะกักพักระหว่างการลดเหล็กใน
น้ำบาดาลเบื้องต้นด้วยระบบบึงประดิษฐ์

คณะผู้วิจัย

ผศ.ดร. พันธุ์ทิพย์ กล่อมเจ็ก

สังกัด

มหาวิทยาลัยนเรศวร

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกอ. และ สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

Executive summary

ผลของระยะกักพักต่อการลดเหล็กในน้ำบาดาลบ่อนด้วยระบบบึงประดิษฐ์

1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

น้ำเป็นทรัพยากรที่สำคัญ เนื่องจากน้ำเป็นปัจจัยพื้นฐานที่จำเป็นในหลายกิจกรรม มนุษย์จำเป็นต้องใช้น้ำในการอุปโภคบริโภคเพื่อการดำรงอยู่ นอกจากนั้น น้ำยังถูกใช้ในกระบวนการผลิตทั้งทางด้านอุตสาหกรรมและเกษตรกรรม ดังนั้นความต้องการใช้น้ำจึงมีมากและมีอยู่อย่างต่อเนื่อง ปัญหาการขาดแคลนน้ำที่พบในบางพื้นที่ และในบางช่วงเวลา ทำให้มีการแสวงหาทรัพยากรน้ำในแหล่งต่างๆ มาใช้ รวมถึงน้ำบาดาล ซึ่งเป็นน้ำตามธรรมชาติที่ถูกกักเก็บไว้ใต้ดิน โดยทั่วไปแล้ว น้ำบาดาลมักมีสิ่งสกปรกเจือปนน้อย เนื่องจากได้ผ่านการกรองด้วยชั้นดินตามธรรมชาติ อย่างไรก็ตาม ยังพบว่าน้ำบาดาลในบางพื้นที่ มีการปนเปื้อนเหล็กในปริมาณที่สูง โดยเฉพาะในพื้นที่ที่ดินมีเหล็กเป็นองค์ประกอบอยู่มาก ดังที่พบในพื้นที่ภาคเหนือตอนล่างของประเทศไทย เช่นในจังหวัดพิษณุโลก ขณะเดียวกัน น้ำบาดาลในพื้นที่ดังกล่าวได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในปริมาณมาก โดยเฉพาะการใช้ในกิจกรรมการเกษตร โดย ประจัญฤทธิ์ (2547) พบว่าในพื้นที่อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก นั้น มีการสูบน้ำบาดาลขึ้นมาเพื่อใช้ในการทำนาในปริมาณมาก โดยเฉพาะในช่วงฤดูแล้ง โดยมีอัตราการใช้เท่ากับ $1,561 \text{ m}^3/\text{rai}/\text{yr}$ ซึ่งการนำน้ำบาดาลที่มีเหล็กปนเปื้อนในปริมาณสูงมานั้น สามารถก่อให้เกิดปัญหาหลายประการด้วยกัน ดังนี้คือ เหล็กในน้ำทำให้น้ำมีสีเหลืองหรือแดง และมีกลิ่นสนิมเหล็ก อันเป็นที่น่ารังเกียจต่อการนำไปใช้ นอกจากนั้น เหล็กยังทำให้เสื้อผ้าและเครื่องสุขภัณฑ์เกิดเป็นคราบและมีสี จากสีของเหล็ก และแม้ว่าเหล็กจะเป็นธาตุอาหารที่สำคัญต่อร่างกาย และโดยปกติแล้วไม่ถือว่าเหล็กเป็นสารพิษต่อร่างกาย แต่หากร่างกายได้รับเหล็กในปริมาณมากเกินไปเกินความต้องการ จะทำให้เกิดการสะสมในตับ ม้าม และเกิดการตกตะกอนของธาตุเหล็กในร่างกาย ด้วยเหตุนี้ องค์การอนามัยโลกจึงได้มีการกำหนดค่ามาตรฐานสำหรับเหล็กในน้ำดื่มไว้ไม่เกิน 0.3 mg/l และอนุโลมให้มีเหล็กได้สูงสุดไม่เกิน 1.0 mg/l สำหรับในประเทศไทยนั้น มีการกำหนดค่ามาตรฐานของเหล็กในน้ำที่ใช้ในการบริโภคไว้ไม่เกิน 0.5 mg/l และอนุโลมให้มีได้สูงสุดไม่เกิน 1.0 mg/l

การนำน้ำบาดาลที่มีเหล็กปนเปื้อนในปริมาณมากมาใช้ประโยชน์ในการเกษตรกรรม จะทำให้เกิดการตกตะกอนและสะสมอยู่ในนา ทำให้ดินนาเสื่อมคุณภาพ ซึ่ง ประจัญฤทธิ์ (2547) พบอัตราการสะสมของเหล็กในดินนาในพื้นที่อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก มีค่าเท่ากับ $10.90 \text{ kg}/\text{rai}/\text{yr}$ โดยเป็นเหล็กที่ตกตะกอนจากน้ำบาดาลถึง $10.55 \text{ kg}/\text{rai}/\text{yr}$ ขณะที่ ข้าวที่แช่อยู่ในน้ำที่มีเหล็กสูงมากกว่า $5\text{-}10 \text{ mg/l}$ นั้น รากของข้าวจะปลดปล่อยก๊าซออกซิเจน เพื่อลดความเป็นพิษของเหล็ก ซึ่งจะทำให้เกิดคราบสนิมเหล็กเคลือบอยู่ที่รากของข้าว ส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับธาตุอาหารของข้าวลดลง และแม้ว่า

เกษตรกรจะเพิ่มปุ๋ยลงในนา ก็ไม่สามารถเพิ่มผลผลิตได้อย่างที่ควรเป็น (กิจการ, 2546) ทั้งนี้อาการ เหล็กเป็นพิษต่อข้าว นั้น สามารถสังเกตพบได้ที่บริเวณใบและราก โดยจะเกิดเป็นจุดสีน้ำตาลขนาดเล็ก บนใบล่างของข้าว เริ่มจากปลายใบและขยายสู่ส่วนฐานของใบ จากนั้นจุดจะขยายขนาดรวมกันในเนื้อ ใบ ใบจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลส้มและตายในที่สุด นอกจากนั้น อาจพบว่าใบข้าวมีขนาดแคบกว่าปกติ รากข้าวอาจเปลี่ยนสีและตายได้ เนื่องจากมีออกไซด์ของเหล็กสีน้ำตาลเข้มหรือสีดำจับที่ผิวราก ต้นข้าว หยุดชะงักการเจริญเติบโตและแตกกอลดลง (ทัศนีย์, 2543) ซึ่งส่งผลให้ผลผลิตข้าวของเกษตรกรลดลง และไม่คุ้มค่าต่อการลงทุน ทั้งนี้ กิจการและคณะ (2545) ได้รายงานถึงคุณภาพน้ำบาดาลบ่อต้น ที่มีการ ใช้กันในพื้นที่จังหวัดพิษณุโลก ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงความเหมาะสมต่อการนำมาใช้เพื่อการเกษตร พบว่ามี คุณภาพปานกลาง เนื่องจากมีเหล็กละลายอยู่ในปริมาณสูง และหากพิจารณาถึงการนำมาใช้เพื่อการ อุปโภค พบว่ามีคุณภาพต่ำมาก โดยจะพบเหล็กปนเปื้อนระหว่าง 1.1-23.5 mg/l มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 12.5 mg/l ซึ่งพื้นที่ที่พบปริมาณเหล็กในน้ำบาดาลสูง ได้แก่ พื้นที่อำเภอบางกระทุ่ม พื้นที่บริเวณ ทิศตะวันออกเฉียงใต้ของอำเภอบางระกำ และบริเวณทิศใต้ของอำเภอเมือง นอกจากนี้ ผลการศึกษาได้ ระบุว่า การใช้ น้ำบาดาลบ่อต้นที่มีปริมาณเหล็กสูงยังก่อให้เกิดปัญหากับคุณภาพดิน โดยเกษตรกรใน พื้นที่พบว่าเนื้อดินมีความเหนียวแข็งเพิ่มขึ้น และมีความร่วนเพิ่มมากขึ้น นอกจากนั้น เกษตรกรยังพบว่า ข้าวเป็นโรครากขึ้น โดยพบโรคใบไหม้ ใบเป็นสีเหลือง เป็นจุดสีน้ำตาล และโรครากดำ ซึ่งอาการ คล้ายคลึงกับอาการเหล็กเป็นพิษในดิน

การปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาล ก่อนการนำมาใช้ประโยชน์ จะช่วยลดปัญหาการสะสมของ เหล็กในดิน และลดปัญหาต่อเนื่องจากการสะสมนั้น ซึ่งจะทำให้การนำทรัพยากรน้ำบาดาลมาใช้ สามารถก่อเกิดประโยชน์ได้อย่างสูงสุด คุ้มค่าต่อการลงทุน โดยไม่ก่อผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ช้างเคียง และเป็นแนวทางการจัดการทรัพยากรที่เหมาะสมตามหลักการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติและ สิ่งแวดล้อม

โครงการศึกษาวิจัยนี้ เป็นการนำเสนอแนวทางในการปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาล โดยการลด ปริมาณเหล็กในน้ำด้วยระบบบึงประดิษฐ์ ซึ่งผลการศึกษาที่ได้จะบ่งชี้ถึงความเป็นไปได้ ประสิทธิภาพ และแนวทางในการปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาลด้วยระบบบึงประดิษฐ์ ซึ่งเป็นระบบที่ง่ายในการ ดำเนินการ และเกษตรกรสามารถนำผลการศึกษาไปประยุกต์ใช้ได้จริง ซึ่งจะเป็นการลดปัญหา สิ่งแวดล้อม ก่อเกิดประโยชน์ต่อเกษตรกร และเป็นแนวทางที่ก่อประโยชน์ต่อประเทศ

2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

- 2.1 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ระบบบึงประดิษฐ์ ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาล
- 2.2 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของระบบบึงประดิษฐ์ ในการลดปริมาณเหล็กในน้ำบาดาลที่ระยะกักพืชน้ำที่แตกต่างกัน
- 2.3 เพื่อศึกษาการจัดการบึงประดิษฐ์อย่างเหมาะสม เพื่อการลดปริมาณเหล็กในน้ำบาดาลอย่างมีประสิทธิภาพ

3 วิธีดำเนินการวิจัย

โครงการวิจัยนี้จะทำการศึกษาถึงความเป็นไปได้ และประสิทธิภาพของระบบบึงประดิษฐ์ ในการลดเหล็กในน้ำบาดาล และศึกษาถึงการจัดการระบบบึงประดิษฐ์อย่างเหมาะสม เพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพสูงสุดในการปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาล โดยจะทำการศึกษาถึงระยะเวลากักพืชน้ำที่เหมาะสม ในการนำมาใช้ในการดำเนินระบบ โดยมีขั้นตอน วิธีการวิจัย การเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่าง และการวิเคราะห์ข้อมูล ดังนี้

3.1 การเตรียมหน่วยทดลอง

จัดทำหน่วยทดลอง (Lab scale) ระบบบึงประดิษฐ์ (Constructed wetland) ขนาด กว้าง 0.5 m ยาว 2 m และสูง 0.8 m บรรจุน้ำ ซึ่งใช้เป็นตัวกลางในการปลูกพืช และเป็นตัวกลางในการบำบัดลงในแต่ละหน่วยทดลอง จนมีระดับความสูง 70 cm จากก้นแปลง ดัดตั้งทางระบายน้ำเข้า และออกจากแปลง หลังจากนั้น ทำการปลูกธูปฤาษี (*Typha angustifolia*) ลงในหน่วยทดลอง โดยทำการปลูกที่ความหนาแน่น 20 rhizomes/m² แล้วให้น้ำประปาในการรด จนกระทั่งพืชสามารถปรับตัวและเติบโตได้ในระบบ

3.2 การดำเนินระบบบำบัด

เมื่อพืชในหน่วยทดลอง สามารถปรับตัวและเจริญเติบโตได้ จนมีความสูงประมาณ 20 cm จึงทำการระบายน้ำประปาลงสู่หน่วยทดลองอย่างต่อเนื่อง โดยให้น้ำในระบบมีความสูงเท่ากับ 10 cm จากระดับผิวหน้าวัสดุปลูก (Water depth) ด้วยอัตราการไหล 200, 100 และ 50 l/d ซึ่งจะทำให้มีระยะเวลาการกักพืชน้ำในระบบ (Hydraulic retention time: HRT) เท่ากับ 0.5, 1 และ 2 d ดำเนินการเป็นระยะเวลา 1-2 wk เพื่อให้พืชได้ปรับสภาพภายใต้ระบบน้ำท่วมขัง จากนั้นทำการตัดพืชให้มีความสูง 15 cm แล้วจึงระบายน้ำบาดาลที่สูบจากบ่อบาดาลของเกษตรกรที่ทำการขุดเจาะไว้เพื่อใช้น้ำในการเกษตร ซึ่งเป็นน้ำบาดาลที่มีเหล็กปนเปื้อน ลงสู่หน่วยทดลองแทนน้ำประปา และดำเนินการใน

ลักษณะเดียวกันอย่างต่อเนื่อง เป็นระยะเวลา 10 wk ทั้งนี้ได้ดำเนินการในลักษณะเดียวกันนี้กับหน่วยควบคุม (Control unit) ซึ่งเป็นหน่วยทดลองที่ไม่ได้ทำการปลูกพืชลงในระบบช่วงเวลาเก็บเกี่ยวที่ทำการศึกษา

3.3 การเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่าง

3.3.1 การเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่างดิน

เก็บตัวอย่างดิน (วัสดุปลูก) ในหน่วยทดลอง ก่อนการระบายน้ำบาดาลลงสู่หน่วยทดลอง และเมื่อสิ้นสุดการดำเนินระบบ โดยทำการเก็บตัวอย่างดินในแต่ละหน่วยทดลอง ในลักษณะ Composite sample จาก 5 จุดเก็บ จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้มาทำการวิเคราะห์ ค่า pH, Mn และ Fe ในห้องปฏิบัติการ

3.3.2 การเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ

ภายหลังการระบายน้ำบาดาลลงสู่หน่วยทดลอง เป็นระยะเวลา 1-2 wk จึงเริ่มทำการเก็บตัวอย่างน้ำที่ระบายเข้าสู่ระบบ (Influent) และเก็บตัวอย่างน้ำที่ผ่านการบำบัดภายในระบบ (Effluent) จากจุดระบายน้ำออก ภายหลังจากน้ำบาดาลได้ถูกกักพักภายในระบบ ตามข้อกำหนดการศึกษา คือ 0.5, 1 และ 2 d ทั้งนี้ได้ดำเนินการเก็บตัวอย่างน้ำเป็นประจำทุกสัปดาห์ ตลอดระยะเวลาดำเนินระบบ

นำตัวอย่างน้ำที่ได้ ไปทำการวิเคราะห์ค่าดัชนีคุณภาพน้ำ ได้แก่ Temperature, TDS, DO, EC, pH, Fe และ Mn โดยใช้วิธีการในการเก็บตัวอย่าง รักษาตัวอย่าง และวิธีการวิเคราะห์ตัวอย่าง ตามที่ได้กำหนดไว้ใน Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA, WPCF, 1992)

3.3.3 การเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่างพืช

ทำการเก็บพืชก่อนการระบายน้ำบาดาลลงสู่ระบบและภายหลังเสร็จสิ้นการดำเนินระบบ โดยทำการตัดพืชที่ระดับ 15 cm เหนือวัสดุปลูก ภายในแปลงเก็บตัวอย่างพืช ขนาด 0.25 m² จำนวน 3 sampling point/plot นำตัวอย่างพืชที่ได้มาทำการวิเคราะห์หาไนโตรเจน น้ำหนักแห้ง ปริมาณแมงกานีส (Mn) และปริมาณเหล็ก (Fe) ในส่วนต่างๆ ของพืช ภายในห้องปฏิบัติการ

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

3.4.1 การปรับปรุงคุณภาพน้ำและสมการในการคาดการณ์ประสิทธิภาพของระบบ

นำผลการตรวจวัดมาทำการวิเคราะห์ถึงประสิทธิภาพของระบบในการลดปริมาณแมงกานีส และเหล็กในน้ำ โดยวิเคราะห์ในรูปร้อยละของการบำบัดแมงกานีส (Mn removal) และเหล็ก (Fe removal) และความเข้มข้นของแมงกานีส (Mn concentration) และเหล็ก (Fe concentration) ในน้ำบาดาลภายหลังการบำบัด เปรียบเทียบประสิทธิภาพ และความแตกต่างทางสถิติในการบำบัดแมงกานีสและเหล็กของแต่ละระยะกักพัก (HRT) และทำการวิเคราะห์สมการในการคาดการณ์ประสิทธิภาพของระบบบึงประดิษฐ์ในการบำบัดแมงกานีส และเหล็กในน้ำบาดาล

3.4.2 กระบวนการบำบัดแมงกานีสและเหล็กของระบบ

วิเคราะห์ถึงปัจจัยที่มีผลในการบำบัดแมงกานีสและเหล็กของระบบ ทั้งกระบวนการทางด้านกายภาพ กระบวนการทางเคมี และกระบวนการทางชีวภาพโดยการลดด้วยการดูดซับด้วยส่วนต่างๆ ของพืช ประสิทธิภาพในการดูดซับแมงกานีสและเหล็กของพืช และความแตกต่างทางสถิติของการดูดซับแมงกานีสและเหล็กด้วยส่วนต่างๆ ของพืช

4 สรุปผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 ผลของระยะกักพักต่อประสิทธิภาพในการบำบัดแมงกานีสและเหล็กในน้ำบาดาล

น้ำบาดาลจากจากบ่อบาดาล ซึ่งเกษตรกรขุดขึ้นเพื่อใช้ในการเกษตรกรรม ได้ถูกนำมาใช้ในการศึกษา ซึ่งคุณภาพของน้ำบาดาลก่อนการปรับปรุง พบว่า มีค่าของ Total Mn สูงกว่าค่าสูงสุดของ Total Mn ในแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 3 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1 mg/l และสูงกว่าเกณฑ์ที่ยอมให้มีในน้ำชลประทาน ซึ่งกำหนดให้น้ำชลประทานไม่ควรจะมี Total Mn สูงกว่า 0.2 mg/l ทั้งนี้ Total Mn อาจเป็นพิษต่อพืชได้โดยเฉพาะในพื้นที่ที่เป็นดินกรด (Ayers and Westcot, 1994) ปริมาณ Fe ในน้ำบาดาลก่อนการปรับปรุงมีค่าสูงกว่าค่าที่ยอมให้มีในน้ำชลประทาน ซึ่งกำหนดให้น้ำชลประทาน ไม่ควรมี Total Fe สูงกว่า 5.0 mg/l ซึ่ง Fe สามารถส่งผลทำให้ดินเป็นกรด และสูญเสียปริมาณฟอสฟอรัสและโมลิบดีนัมที่เป็นประโยชน์ (Ayers and Westcot, 1994) นอกจากนั้น ความเข้มข้นของเหล็กในสารละลายดินที่สูงจะส่งผลทำให้การดูดโพแทสเซียมของข้าวลดลง โดยความเป็นพิษของธาตุเหล็ก มักเกิดขึ้นกับข้าวซึ่งปลูกในสภาพน้ำท่วมขัง (ประพาส, 2537)

ในการศึกษาครั้งนี้ น้ำจากบ่อบาดาล ซึ่งมี Total Mn และ Total Fe ปนเปื้อนในน้ำระหว่าง 1.03-5.32 mg/l และ 0.57-19.46 mg/l ถูกระบายลงสู่ระบบบึงประดิษฐ์ด้วยอัตราการไหลเท่ากับ 200, 100 และ 50 l/d ซึ่งทำให้น้ำมีระยะการกักพักภายในระบบ เท่ากับ 0.5, 1 และ 2 day

ตามลำดับ และทำให้ระบบบึงประดิษฐ์ที่ทำการปรับปรุงคุณภาพน้ำที่ระยะกักพัก 0.5, 1 และ 2 day มีอัตราการรองรับ Total Mn เฉลี่ยเท่ากับ 0.656, 0.331 และ 0.166 g/m²/d ตามลำดับ และมีอัตราการรองรับ Total Fe เฉลี่ยเท่ากับ 0.941, 0.571 และ 0.292 g/m²/d ตามลำดับ ภายหลังจากการปรับปรุงคุณภาพน้ำมีปริมาณการปนเปื้อน Total Mn และ Total Fe ลดลง โดยน้ำบาดาลที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพที่ระยะกักพัก 0.5, 1 และ 2 day มี Total Mn ปนเปื้อน เฉลี่ยเท่ากับ 0.145, 0.113 และ 0.039 mg/l ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำผิวดินประเภทที่ 3 (Total Mn ≤ 1 mg/l) และอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดให้มีได้ในน้ำชลประทาน (Total Mn ≤ 0.2 mg/l) และมี Total Fe ปนเปื้อน เฉลี่ยเท่ากับ 0.700, 0.578 และ 0.512 mg/l ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดให้มีได้ในน้ำชลประทาน (Total Fe ≤ 5.0 mg/l) ทั้งนี้ พบว่า ค่าความเข้มข้นของ Total Mn และ Total Fe ในน้ำหลังการปรับปรุงคุณภาพที่ระยะกักพักต่างๆ ไม่แตกต่างกัน แต่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) เมื่อเทียบกับค่าความเข้มข้นของ Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาลก่อนการปรับปรุงคุณภาพ

ผลการศึกษา พบว่า ระบบบึงประดิษฐ์มีประสิทธิภาพในการลด Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาลสูงกว่าระบบควบคุม (Control units) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยบึงประดิษฐ์มีประสิทธิภาพในการลดความเข้มข้นของ Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาล เท่ากับ 46.42-99.84 % และ 9.02-98.89 % การปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาลที่ระยะกักพัก 2 day มีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดความเข้มข้นของ Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาล โดยระบบมีอัตราการบำบัด Total Mn และ Total Fe เท่ากับ 0.050-1.053 g/m²/d และ 0.008-2.219 g/m²/d ทั้งนี้ พบว่า การกักพักน้ำที่ระยะกักพัก 0.5 day มีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดปริมาณ Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาล ต่อพื้นที่ต่อช่วงเวลาที่เท่ากัน และพบว่าประสิทธิภาพแตกต่างจากการบำบัดที่ระยะกักพัก 1 และ 2 day อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ดังนั้น การปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาลโดยการลดปริมาณ Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาล ด้วยการกักพักน้ำในระบบบึงประดิษฐ์ที่ระยะกักพักเท่ากับ 0.5 day จึงเป็นระยะกักพักที่เหมาะสมในการปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาล เนื่องจากเป็นระยะกักพักที่มีอัตราการบำบัด Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาล ต่อพื้นที่ต่อช่วงเวลาที่เท่ากัน สูงกว่าการบำบัดที่ระยะกักพัก 1 และ 2 day อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ นอกจากนั้น ยังสามารถปรับปรุงคุณภาพน้ำ ทำให้น้ำบาดาลหลังการบำบัดมี Total Fe ปนเปื้อนอยู่ในปริมาณที่ไม่แตกต่างจากการปรับปรุงคุณภาพที่ระยะกักพักอื่น ที่ใช้ระยะเวลายาวนานกว่าในการบำบัด ซึ่งอาจทำให้น้ำที่ได้ภายหลังจากการปรับปรุงคุณภาพมีปริมาณไม่เพียงพอต่อการนำไปใช้ในการทำนาหรือการเกษตรกรรมอื่นๆ ซึ่งเป็นกิจกรรมที่ต้องการน้ำในปริมาณมาก

4.2 สมการในการคาดการณ์ประสิทธิภาพการบำบัดแมงกานีส และเหล็กของระบบบึงประดิษฐ์

ข้อมูลจากการศึกษา ถูกนำไปใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้ในการคาดการณ์ประสิทธิภาพเบื้องต้นของระบบในการบำบัด Total Fe และ Total Mn ในรูปของสมการสหสัมพันธ์ถดถอย (Regression) และสมการปฏิกิริยาลำดับหนึ่ง (First-order kinetics) โดยสมการสหสัมพันธ์ถดถอย สำหรับการคาดการณ์ประสิทธิภาพการบำบัดแมงกานีส (Eq. 1) และเหล็ก (Eq. 2) ของระบบบึงประดิษฐ์ ที่กำหนดขึ้นคือ

$$y = 1.0105X_1 + 0.0198X_0 - 0.0411, \text{ for Mn removal} \quad R^2 = 0.9871 \quad \text{_____ (Eq. 1)}$$

$$y = 0.9714X_1 + 0.0575X_0 - 0.1238, \text{ for Fe removal} \quad R^2 = 0.9930 \quad \text{_____ (Eq. 2)}$$

เมื่อ

$$y = \text{Removal rate (g/m}^2\text{/d)}$$

$$X_1 = \text{Loading rate (g/m}^2\text{/d)}$$

$$X_0 = \text{Hydraulic retention time (day)}$$

สมการปฏิกิริยาลำดับหนึ่ง (First-order kinetics) สำหรับการคาดการณ์ประสิทธิภาพการบำบัดแมงกานีส (Eq. 3) และเหล็ก (Eq. 4) ของระบบบึงประดิษฐ์ ที่กำหนดขึ้นคือ

$$R_o = \frac{Q}{A} C \left(1 - \left(e^{-0.8235t} \times 0.050 \right) \right), \text{ for Mn removal} \quad \text{_____ (Eq. 3)}$$

$$R_o = \frac{Q}{A} C \left(1 - \left(e^{-0.4186t} \times 0.171 \right) \right), \text{ for Fe removal} \quad \text{_____ (Eq. 4)}$$

ผลการทดสอบประสิทธิภาพของสมการ Regression และสมการ First order kinetics ที่กำหนดขึ้น (Model validation) ในการคาดการณ์ ประสิทธิภาพของระบบ ด้วยข้อมูลการบำบัด Total Fe และ Total Mn ในน้ำบาดาลด้วยระบบบำบัดประเภทเดียวกันนี้ ซึ่งเป็นการศึกษาในประเด็นอื่น มีดังนี้ การคาดการณ์ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบด้วย Regression prediction model พบว่า อัตราการบำบัด Total Fe และ Total Mn ที่ได้จากการคำนวณ โดยส่วนใหญ่มีค่าต่ำกว่าค่าจากการตรวจวัด และแตกต่างกันทางสถิติ โดยค่าเฉลี่ยของอัตราการบำบัด Total Fe และ Total Mn ที่ได้จากการคำนวณ มีค่าต่ำกว่าค่าเฉลี่ยของอัตราการบำบัดที่ได้จากการตรวจวัดจริง 0.0486 และ 0.0269 g/m²/d ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Pearson correlation) ระหว่างอัตราการบำบัดที่ตรวจวัดจริงและอัตราการบำบัดจากการคำนวณ สำหรับการบำบัด Total Fe และ Total Mn มีค่าเท่ากับ 0.982 และ 0.992 อย่างไรก็ตาม ข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบเป็นข้อมูลจากระบบบึงประดิษฐ์ที่ทำการบำบัดน้ำที่ระยะกักพักเท่ากับ 0.5 day เท่านั้น

ผลการทดสอบประสิทธิภาพของ First order kinetics prediction model (Model validation) ในการคาดการณ์อัตราการบำบัดของระบบ ด้วยข้อมูลการบำบัด Total Fe และ Total Mn ในน้ำบาดาลด้วยระบบบำบัดประเภทเดียวกันนี้ ซึ่งเป็นการศึกษาในประเด็นอื่น พบว่าอัตราการบำบัด Total Fe และ Total Mn ที่ได้จากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการที่ตรวจวัด โดยสัมประสิทธิ์

สหสัมพันธ์ (Pearson correlation) ระหว่างอัตราการบำบัดที่ตรวจวัดได้และอัตราการบำบัดจากการคำนวณ สำหรับการบำบัด Total Fe และ Total Mn มีค่าเท่ากับ 0.982 และ 0.992 และการทดสอบ Pair t-test ระหว่างอัตราการบำบัดทั้งสองประเภท พบว่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ทั้งนี้ พบว่าเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับผลการศึกษาของ Nitisoravut and Klomjek (2005) ซึ่งพบว่า สมการ First order kinetics สามารถประยุกต์ใช้ในการคาดการณ์ประสิทธิภาพของระบบบึงประดิษฐ์ในการลดค่า BOD₅ ในน้ำเสียที่มีค่าความเค็มสูงกว่าปกติได้ อย่างไรก็ตาม ข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบ First order kinetics prediction model ในการศึกษาครั้งนี้เป็นข้อมูลจากระบบบึงประดิษฐ์ที่ทำการบำบัดน้ำที่ระยะกักพักเท่ากับ 0.5 day เท่านั้น

4.3 การสะสมเมกนีسيومและเหล็กขององค์ประกอบภายในระบบบึงประดิษฐ์

เมื่อสิ้นสุดการดำเนินระบบ องค์ประกอบของระบบบึงประดิษฐ์ ประกอบด้วย ดินส่วนต่างๆ ของรูปภาณี และพืชน้ำขนาดเล็กที่เกิดในระบบ (สาหร่าย) ได้ถูกนำมาตรวจวัดค่าความเข้มข้นและอัตราการสะสม Mn และ Fe ซึ่งผลการศึกษามีดังนี้

1) การสะสมเมกนีسيومและเหล็กของดินในระบบบึงประดิษฐ์

ผลการตรวจวัด Mn และ Fe ในดิน เมื่อสิ้นสุดการดำเนินระบบ พบว่า ในระบบที่มีระยะกักพักเท่ากับ 0.5 day นั้น ค่า Mn ของดินที่ระดับผิวดิน (0-5.5 cm) และ ดินชั้นล่าง (>5.5-11.0 cm) มีค่า 591.08-758.44 ppm และ 603.42-759.02 ppm ค่า Fe ของดินที่ระดับผิวดิน และ ดินชั้นล่าง มีค่าเท่ากับ 17.17-31.85 ppm และ 11.59-33.90 ppm ส่วนระบบที่มีระยะกักพักเท่ากับ 1 day ดินที่ระดับผิวดิน และดินชั้นล่าง มีค่า Mn เท่ากับ 602.16-697.35 ppm และ 525.81-703.05 ppm และ ค่า Fe ที่ตรวจวัดได้ในดินที่ระดับผิวดิน และ ดินชั้นล่าง มีค่าเท่ากับ 12.96-87.11 ppm และ 6.44-54.37 ppm ขณะที่ ในระบบที่มีระยะกักพักเท่ากับ 2 day ค่า Mn ของดินที่ระดับผิวดิน และดินชั้นล่าง มีค่า 529.36-621.43 ppm และ 519.89-663.64 ppm ส่วน ค่า Fe ที่ตรวจวัดได้ในดินที่ระดับผิวดิน และ ดินชั้นล่าง มีค่าเท่ากับ 3.10-117.50 ppm และ 2.00-125.00 ppm

ความเข้มข้นของ Mn และ Fe ในดิน ภายหลังการดำเนินระบบ มีค่าเพิ่มสูงขึ้นในทุกๆ ระบบ โดยเฉพาะค่า Mn ผลจากการตรวจวัด พบว่าความเข้มข้นของ Mn ในดินชั้นล่าง และความเข้มข้นของ Fe ในดินชั้นบนและดินชั้นล่าง ในแต่ละระบบที่มีระยะกักพักแตกต่างกัน มีค่าไม่แตกต่างกัน เช่นเดียวกันกับค่าของดัชนีชี้วัดคุณสมบัติของดินตัวอื่นๆ รวมถึงความเข้มข้นของ Mn และ Fe ระหว่างดินชั้นบนและดินชั้นล่างของแต่ละระยะกักพัก ทั้งนี้ ยกเว้นความเข้มข้นของ Fe ของดินชั้นบน ในระบบที่มีระยะกักพัก 0.5 day ซึ่งมีค่าสูงกว่าดินชั้นล่าง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) และพบว่าความเข้มข้นของ Mn ในดินชั้นบน ในระบบที่มีระยะกักพัก 0.5 และ 1 day มีค่าสูงกว่าในระบบที่มีระยะกักพัก 2 day ผลการตรวจวัดโดยส่วนใหญ่ไม่พบความแตกต่างระหว่างชั้นดิน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากตำแหน่งที่ทำการตรวจวัดนั้น มีความใกล้เคียงกัน จึงไม่พบความเปลี่ยนแปลงหรือความ

แตกต่างระหว่างชั้นดิน อันเป็นผลจากการดำเนินระบบ อย่างไรก็ตาม ผลการศึกษา ได้บ่งชี้ชัดเจนถึง การสะสม Mn และ Fe ของดินในระบบ ซึ่งทำให้ดินในระบบมีค่าความเข้มข้นของทั้ง Mn และ Fe สูงขึ้นเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะดินบริเวณผิวหน้าดิน ซึ่งเป็นส่วนที่รองรับตะกอนโลหะหนักทั้งสอง ประเภทจากกระบวนการกรองและการตกตะกอนของโลหะหนักแขวนลอยที่เกิดขึ้นในระบบ ขณะที่ สารละลาย Mn และ Fe ในน้ำมีโอกาสทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในน้ำ รวมถึงออกซิเจนบริเวณรากพืช หรือบริเวณ Rhizosphere แล้วเกิดการตกตะกอนผลึก (Precipitation) ลงสู่ดิน ทำให้ดินมีการสะสม Mn และ Fe มากขึ้น ทั้งจากกระบวนการกรอง การตกตะกอน และการตกตะกอนผลึก ซึ่งพืชในระบบเป็น ปัจจัยหนึ่งที่จะช่วยส่งเสริมการเกิดกระบวนการทั้งทางกายภาพและทางเคมีดังกล่าวด้วย

2) การสะสมแมงกานีสและเหล็กของพืชในระบบบึงประดิษฐ์

เมื่อสิ้นสุดการดำเนินระบบ พบว่าน้ำหนักรากและน้ำหนักแห้งของรูปถ่ายิยส่วน เนื้อดิน ในระบบที่มีระยะกักพัก 0.5, 1 และ 2 day มีค่า 3,852.80-18,732.00, 3,174.40-1,0912.80 และ 3,560.00-12,788.80 g/m² ตามลำดับ และ 956.80-2,398.40, 680.00-1,440.00 และ 817.60-1,297.60 g/m² ตามลำดับ ส่วนน้ำหนักสดของรูปถ่ายิยส่วนใต้ดิน (ราก) ในระบบที่มีระยะกักพัก 0.5, 1 และ 2 day มีค่า 2,904.00-6,380.80, 1,558.40-4,684.80 และ 2,803.20-4,910.40 g/m² ตามลำดับ ขณะที่ น้ำหนักแห้งของ รูปถ่ายิยส่วนใต้ดิน (รวมรากและรากฝอย) ในระบบที่มีระยะกักพัก 0.5, 1 และ 2 day มีค่าเท่ากับ 704.70-1251.90, 397.80-1180.20 และ 607.80-1030.00 g/m² ตามลำดับ

อัตราการเติบโตสัมพัทธ์ (Relative growth rate: RGR) ของรูปถ่ายิยในระบบที่มีระยะ กักพัก 0.5, 1 และ 2 day มีค่า 0.0318-0.0433, 0.0275-0.0369 และ 0.0298-0.0356 per day ตามลำดับ ทั้งนี้ พบว่า น้ำหนักรากและน้ำหนักแห้งของทั้งส่วนเนื้อดินและส่วนใต้ดินของรูปถ่ายิยที่เจริญเติบโต ในระบบ ที่มีระยะกักพักแตกต่างกันนั้น มีค่าเฉลี่ยไม่แตกต่างกัน ขณะที่อัตราการเติบโตสัมพัทธ์ของ รูปถ่ายิยในแต่ละระบบ มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ เช่นเดียวกัน

มวลชีวภาพแห้งของรูปถ่ายิยส่วนเนื้อดิน คือ ส่วนลำต้นและใบ ซึ่งเก็บเกี่ยวจาก ระบบที่มีระยะกักพัก 0.5, 1 และ 2 day มีค่าความเข้มข้นของ Mn เท่ากับ 222.78-444.97, 272.66-401.23 และ 271.87-380.88 mg/kg ตามลำดับ และ 491.08-893.89, 426.72-1152.59 และ 380.58-677.40 mg/kg ตามลำดับ ส่วนค่าความเข้มข้นของ Mn ในมวลชีวภาพแห้งของรูปถ่ายิยส่วนใต้ดิน คือ ส่วนราก และ รากฝอย ซึ่งเก็บเกี่ยวจากระบบที่มีระยะกักพัก 0.5, 1 และ 2 day นั้น มีค่าเท่ากับ 348.34-836.98, 283.28-563.18 และ 325.79-525.02 mg/kg ตามลำดับ และ 4,980.18-7,980.30, 1,684.31-2,400.99 และ 1,567.86-2,168.62 mg/kg ตามลำดับ ทั้งนี้ พบว่าค่าความเข้มข้นของ Mn ในเนื้อเยื่อของรูปถ่ายิยทั้งส่วน เนื้อดินและส่วนใต้ดิน เมื่อสิ้นสุดการดำเนินระบบมีค่าสูงขึ้น โดยเฉพาะค่าความเข้มข้นของ Mn ใน เนื้อเยื่อของรูปถ่ายิยส่วนใต้ดิน โดยเฉพาะรากฝอย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากรากฝอยมีพื้นที่ผิวมาก ทำให้เกิด การกรอง การดูดซับและดูดดึงโลหะหนักไว้ได้มาก ทั้งนี้ พบว่าค่าความเข้มข้นของ Mn ในเนื้อเยื่อทั้ง ส่วนลำต้น รากและรากฝอย มีค่าสูงที่สุดในพืชที่เก็บเกี่ยวจากระบบที่มีระยะกักพัก 0.5 day และค่าความ

เข้มข้นของ Mn ในเนื้อเยื่อทั้งส่วนต้น รากและรากฝอย ที่เก็บเกี่ยวจากระบบที่มีระยะกักพัก 1 day และ 2 day มีค่าลดลง ตามลำดับ และพบว่าค่าความเข้มข้นของ Mn ในพืชที่เก็บเกี่ยวจากระบบที่มีระยะกักพักแตกต่างกันจะมีค่าแตกต่างกันทางสถิติ อย่างไรก็ตาม โดยรวมแล้ว พบว่าความเข้มข้นของ Mn ในเนื้อเยื่อของรูปถ่ายมีส่วนเหนือดิน ซึ่งมีค่าระหว่าง 222.77-1,152.59 mg/kg นั้น มีค่าเฉลี่ยต่ำกว่า และแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจากค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของ Mn ที่พบในรูปถ่ายส่วนใต้ดิน ซึ่งมีค่าระหว่าง 283.28-7,098.47mg/kg โดยสัดส่วนความเข้มข้นของ Mn ในเนื้อเยื่อของรูปถ่ายส่วนใต้ดินต่อความเข้มข้นของ Mn ในเนื้อเยื่อของรูปถ่ายส่วนเหนือดิน (Root:Shoot) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.7-4.2 โดยพบค่า Root:Shoot สูงสุดในระบบที่มีระยะกักพักเท่ากับ 0.5 day

ความเข้มข้นของ Fe ในมวลชีวภาพแห้งของรูปถ่ายส่วนเหนือดิน คือ ส่วนลำต้น และใบ ซึ่งเก็บเกี่ยวจากระบบที่มีระยะกักพัก 0.5, 1 และ 2 day มีค่าเท่ากับ 50.22-102.84, 45.09-146.66 และ 33.32-149.01 mg/kg ตามลำดับ และ 31.94-74.03, 44.51-96.59 และ 52.80-117.44 mg/kg ตามลำดับ ส่วนความเข้มข้นของ Fe ในมวลชีวภาพแห้งของรูปถ่ายส่วนใต้ดิน คือ ส่วนรากและรากฝอย ซึ่งเก็บเกี่ยวจากระบบที่มีระยะกักพัก 0.5, 1 และ 2 day มีค่าเท่ากับ 71,202.38-132,148.11, 55,847.08-105,348.26 และ 80,252.30-123,185.88 mg/kg ตามลำดับ และ 140,418.72-221,902.87, 150,470.30-208,657.07 และ 145,075.94-176,218.32 mg/kg ตามลำดับ ทั้งนี้ พบว่าเมื่อสิ้นสุดการดำเนินระบบ ค่าความเข้มข้นของ Fe ในเนื้อเยื่อของรูปถ่ายส่วนเหนือดินมีค่าลดลง ขณะที่ ความเข้มข้นของ Fe ในเนื้อเยื่อของรูปถ่ายส่วนใต้ดินมีค่าสูงขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเจริญเติบโตของมวลชีวภาพของส่วนเหนือดินที่เพิ่มมากขึ้น ขณะที่การดูดซับ (Adsorption) และดูดดึง (Uptake) Fe โดยส่วนใหญ่ จะเกิดขึ้นกับมวลชีวภาพส่วนใต้ดิน การเจริญเติบโตของมวลชีวภาพส่วนเหนือดินที่มีมากเกินไป การเคลื่อนย้าย Fe จากมวลชีวภาพส่วนใต้ดินมาสะสมไว้ในมวลชีวภาพส่วนเหนือดิน จะทำให้ความเข้มข้นของ Fe ในเนื้อเยื่อพืชส่วนเหนือดิน มีค่าลดลงได้ ขณะที่ พืชส่วนใต้ดิน เป็นส่วนที่มีโอกาสเกิดการสัมผัสกับ Fe ในน้ำและ Fe ที่ตกตะกอนลงสู่พื้นท้องน้ำ นอกจากนั้น อวัยวะส่วนใต้ดิน (ราก) ยังทำหน้าที่หลักในการดูดดึงสารละลายอนินทรีย์เข้าสู่เซลล์ (Groudeva et al., 2001; Barley et al., 2005; Peverly et al., 1995) ดังนั้น เนื้อเยื่อพืชส่วนใต้ดิน จึงเป็นส่วนที่มีโอกาสเกิดการสะสม Fe ได้มาก ในขณะที่การเจริญเติบโต ด้านมวลชีวภาพของส่วนใต้ดินหรือส่วนรากนี้ ไม่สูงเท่ากับการเติบโตของเนื้อเยื่อส่วนเหนือดิน จึงทำให้ความเข้มข้นของ Fe ต่อมวลชีวภาพแห้งของเนื้อเยื่อส่วนใต้ดินมีค่าสูงกว่าเนื้อเยื่อส่วนเหนือดิน ทั้งนี้ จากผลการศึกษาพบว่าค่าความเข้มข้นของ Fe ในเนื้อเยื่อของรูปถ่ายส่วนลำต้นและรากฝอย ที่เก็บเกี่ยวจากระบบที่มีระยะกักพักต่างกัน มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P \geq 0.5$) ขณะที่ ความเข้มข้นของ Fe ในใบของรูปถ่าย มีค่าสูงที่สุดในใบของรูปถ่ายที่เก็บเกี่ยวจากระบบที่มีระยะกักพัก 2 day และแตกต่างจากความเข้มข้นของ Fe ในใบของรูปถ่ายที่เก็บเกี่ยวจากระบบที่มีระยะกักพัก 1 และ 0.5 day อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.5$) ส่วนความเข้มข้นของ Fe ในรากของรูปถ่าย มีค่าสูงที่สุดในรากของรูปถ่ายที่เก็บเกี่ยวจากระบบที่มีระยะกักพัก 2 day เช่นกัน และพบว่ามีค่าสูงกว่า

ความเข้มข้นของ Fe ในรากของรูปถ่าย ที่เก็บเกี่ยวจากระบบที่มีระยะกักพัก 1 day อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.5$)

โดยรวมแล้ว พบว่าในทุกๆ ระบบหรือทุกระยะกักพักที่ศึกษานั้น รูปถ่ายในแต่ละระบบจะมีค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของ Fe ในเนื้อเยื่อส่วนเหนือดิน ต่ำกว่าค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของ Fe ที่พบในรูปถ่ายส่วนใต้ดินอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยเนื้อเยื่อรูปถ่ายส่วนเหนือดิน มีค่าความเข้มข้นของ Fe ระหว่าง 31.94-146.66 mg/kg ส่วนรูปถ่ายส่วนใต้ดินมีค่าความเข้มข้นของ Fe ระหว่าง 55,847.08-221,902.87 mg/kg โดยสัดส่วนความเข้มข้นของ Fe ในเนื้อเยื่อของรูปถ่ายส่วนใต้ดินต่อความเข้มข้นของ Fe ในเนื้อเยื่อของรูปถ่ายส่วนเหนือดิน (Root:Shoot ratio) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1,545-1,879 ซึ่งเป็นสัดส่วนที่สูงมาก โดยพบค่า R:S ratio สูงสุดในระบบที่มีระยะกักพักเท่ากับ 0.5 day เช่นเดียวกับค่า R:S ratio ของ Mn ทั้งนี้ ค่า R:S ratio ที่สูงนี้ เนื่องมาจากค่าความเข้มข้นของ Fe ทั้งในส่วนรากและรากฝอยของรูปถ่ายมีค่าสูงกว่าค่าความเข้มข้นของ Fe ที่พบในใบและลำต้น อย่างมาก โดยเฉพาะความเข้มข้นของ Fe ในรากฝอย ที่พบว่ามีค่าความเข้มข้นระหว่าง 1.6-1.8 % ของน้ำหนักแห้ง ซึ่งเป็นปริมาณการสะสมที่สูงกว่าการสะสมตามปกติ (Hyperaccumulation) ซึ่งสำหรับการสะสมโลหะหนักประเภท Fe และ Mn ที่มีค่าสูงกว่าปกติ นั้น กำหนดให้มีค่ามากกว่า 1 % ของน้ำหนักแห้ง Susarla et al. (2002)

3) การสะสมแมงกานีสและเหล็กของพืชสีเขียวขนาดเล็ก ในระบบบึงประดิษฐ์

การตรวจวัดสาหร่ายที่เกิดและเจริญเติบโตในหน่วยทดลอง เมื่อสิ้นสุดการดำเนินการระบบ พบว่า สาหร่ายมีมวลชีวภาพ ในรูปของน้ำหนักแห้ง เท่ากับ 16.70-204.80 g/m² ความเข้มข้นของ Mn และ Fe ในเนื้อเยื่อของสาหร่าย มีค่า 540.28-7,682.93 และ 115.01-270.75 mg/kg

สาหร่ายที่เกิดขึ้นในระบบเข้าสู่ระบบโดยติดมากับน้ำหรือพืชที่นำมาปลูกในระบบ และเมื่อสาหร่ายได้รับแสงแดดและธาตุอาหาร ทำให้เกิดการเจริญเติบโตเพิ่มจำนวนขึ้นและด้วยความสามารถในการดูดซับและดูดซับ Mn และ Fe ทำให้สาหร่ายซึ่งเจริญเติบโตอยู่ในน้ำและมีโอกาสสัมผัสกับ Mn และ Fe ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำตลอดเวลา สามารถสะสม Mn และ Fe ไว้ในเนื้อเยื่อได้ ซึ่งจากผลการตรวจวัดพบว่าสาหร่ายมีการสะสม Mn ในเนื้อเยื่อสูงกว่าปริมาณการสะสม Fe

4) อัตราการสะสมแมงกานีสและเหล็กของพืชในระบบบึงประดิษฐ์

การลดลงของปริมาณความเข้มข้นของ Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาล ภายหลังการปรับปรุงคุณภาพน้ำด้วยระบบบึงประดิษฐ์ เป็นการลดลงจากกระบวนการบำบัด Total Mn และ Total Fe ในน้ำที่เกิดขึ้นจากหลายกระบวนการด้วยกัน อันได้แก่ กระบวนการกรอง (Filtration) และการตกตะกอน (Sedimentation) และกระบวนการดูดซับ (Adsorption) ติดไปกับวัสดุและส่วนต่างๆ ของพืช ซึ่งเป็นกระบวนการบำบัดทางกายภาพ การบำบัดด้วยกระบวนการดูดซับ (Uptake) และสะสมไว้ (Accumulation) โดยพืชที่ปลูกในระบบและพืชสีเขียวขนาดเล็ก ประเภทสาหร่ายและตะไคร้ที่ที่เกิดขึ้นในระบบ ซึ่งเป็นกระบวนการทางชีวภาพ และการบำบัดด้วยกระบวนการอื่นๆ เช่น การ

เกิดปฏิกิริยาทางเคมีและเกิดการตกตะกอนผลึก (Precipitation) ลงสู่พื้นท้องน้ำ (Kadlec and Knight, 1996; Brix, 1997)

ผลการตรวจวัดปริมาณ Mn และ Fe ที่ถูกดูดซับ ดูดดึงและสะสมไว้โดยพืชสีเขียวภายในระบบที่ทำการศึกษา เมื่อสิ้นสุดการดำเนินระบบ พบว่า อัตราการสะสม Mn ตั้งแต่เริ่มระบายน้ำบาดาลจนสิ้นสุดการดำเนินระบบ โดยเนื้อเยื่อของรูปถ่ายในระบบบึงประดิษฐ์ที่ดำเนินระบบที่ระยะกักพัก 0.5 day พบว่ารูปถ่ายในระบบมีอัตราการสะสม Mn ไว้ในเนื้อเยื่อส่วนเหนือดิน เท่ากับ 5.64-7.65 mg/m²/d โดยเป็นการสะสมไว้ในส่วนของลำต้น เท่ากับ 1.80-2.41 mg/m²/d และสะสมไว้ในส่วนใบ เท่ากับ 3.85-5.24 mg/m²/d ส่วนอัตราการสะสมของ Mn ในเนื้อเยื่อรูปถ่ายมีส่วนใต้ดิน มีค่าเท่ากับ 8.30-13.40 mg/m²/d โดยเป็นการสะสมไว้ในส่วนราก เท่ากับ 2.77-5.66 mg/m²/d และสะสมไว้ในส่วนของรากฝอย เท่ากับ 5.53-7.74 mg/m²/d และมีการสะสมของ Mn ในสาหร่าย ที่เกิดในระบบเท่ากับ 1.33-1.36 mg/m²/d

รูปถ่ายในระบบบึงประดิษฐ์ที่ดำเนินระบบที่ระยะกักพัก 1 day มีอัตราการสะสม Mn ไว้ในเนื้อเยื่อส่วนเหนือดิน ตั้งแต่เริ่มระบายน้ำบาดาลจนสิ้นสุดการดำเนินระบบ เท่ากับ 5.02-5.41 mg/m²/d โดยเป็นการสะสมไว้ในส่วนของลำต้น เท่ากับ 1.56-1.61 mg/m²/d และสะสมไว้ในส่วนใบ เท่ากับ 3.40-3.85 mg/m²/d ส่วนอัตราการสะสมของ Mn ในเนื้อเยื่อส่วนใต้ดิน เท่ากับ 4.37-4.91 mg/m²/d โดยเป็นการสะสมไว้ในส่วนราก เท่ากับ 1.81-2.27 mg/m²/d และสะสมไว้ในส่วนของรากฝอย เท่ากับ 2.56-2.64 mg/m²/d และมีอัตราการสะสมของ Mn ในพืชสีเขียวขนาดเล็ก (สาหร่าย) ที่เกิดในระบบเท่ากับ 6.85-9.87 mg/m²/d

รูปถ่ายในระบบบึงประดิษฐ์ที่ดำเนินระบบที่ระยะกักพัก 2 day มีอัตราการสะสม Mn ไว้ในเนื้อเยื่อส่วนเหนือดินตั้งแต่เริ่มระบายน้ำบาดาลจนสิ้นสุดการดำเนินระบบ เท่ากับ 2.65-2.90 mg/m²/d โดยเป็นการสะสมไว้ในส่วนของลำต้น เท่ากับ 1.10-1.31 mg/m²/d และสะสมไว้ในส่วนใบ เท่ากับ 1.34-1.80 mg/m²/d ส่วนอัตราการสะสมของ Mn ในเนื้อเยื่อรูปถ่ายมีส่วนใต้ดิน เท่ากับ 3.18-5.14 mg/m²/d โดยเป็นการสะสมไว้ในส่วนราก เท่ากับ 1.66-2.88 mg/m²/d และสะสมไว้ในส่วนของรากฝอย เท่ากับ 1.51-2.26 mg/m²/d และมีอัตราการสะสมของ Mn ในพืชสีเขียวขนาดเล็ก (สาหร่าย) ที่เกิดในระบบเท่ากับ 0.86-4.64 mg/m²/d

จากผลการศึกษา พบว่ารูปถ่ายมีส่วนเหนือดินและส่วนใต้ดินของแต่ละระบบที่มีระยะกักพักแตกต่างกันนั้น มีการสะสม Mn ไว้ ในรูปของมวลต่อพื้นที่ต่อช่วงเวลา ในอัตราที่ไม่แตกต่างกัน โดยรูปถ่ายส่วนเหนือดินนั้น จะพบการสะสม Mn ในรูปของมวลต่อพื้นที่ต่อเวลา ในส่วนของใบสูงกว่าส่วนต้น โดยอัตราการสะสมของใบและลำต้นมีค่าสูงที่สุดในระบบที่มีระยะกักพัก 0.5, 1 และ 2 day ตามลำดับ ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากปริมาณการรองรับน้ำและ Mn ของระบบ ทำให้พืชในระบบที่มีปริมาณการรองรับน้ำ และ Mn เข้าสู่ระบบสูงมีอัตราการสะสม Mn สูงด้วย ซึ่งจะพบว่าอัตราการสะสม Mn ในรูปของมวลต่อพื้นที่ต่อเวลาของรากและรากฝอย ก็เกิดขึ้นในลักษณะเดียวกัน คือพบอัตรา

การสะสมสูงในระบบที่มีปริมาณการรองรับน้ำ และ Mn สูง ทั้งนี้ พบว่ารากฝอยมีอัตราการสะสม Mn ในรูปมวลต่อพื้นที่ต่อเวลา สูงกว่าราก การตรวจพบอัตราการสะสม Mn สูง ในรูปธาตุที่เก็บเกี่ยวจากระบบที่มีปริมาณการรองรับน้ำ และ Mn สูงนั้น อาจเนื่องมาจากการที่รูปธาตุได้รับธาตุอาหารซึ่งปนเปื้อนมากับน้ำ พร้อมๆ กับการได้รับ Mn ในปริมาณสูงกว่ารูปธาตุในระบบอื่น จึงทำให้รูปธาตุในระบบดังกล่าวมีอัตราการเติบโตสูงและมีอัตราการสะสม Mn สูงด้วย ซึ่งจะสัมพันธ์กับค่าอัตราการเติบโตสัมพัทธ์ ซึ่งพบว่ามีค่าสูงที่สุดในระบบที่มีปริมาณการรองรับน้ำ และ Mn สูงที่สุดด้วยเช่นกัน อย่างไรก็ตาม พบว่าอัตราการสะสม Mn ของรูปธาตุส่วนเหนือดิน คืออัตราการสะสมของลำต้นและใบ มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P \geq 0.05$) เช่นเดียวกับค่าการสะสมของรากและรากฝอย ซึ่งไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P \geq 0.05$) เช่นเดียวกัน ในลักษณะเดียวกันกับการสะสม Mn ของสาหร่ายในแต่ละระบบที่มีระยะกักพักแตกต่างกัน ซึ่งพบว่ามีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ

ผลการตรวจวัดปริมาณ Fe ที่ถูกดูดซับ ดูดดึงและสะสมไว้โดยพืชสีเขียวภายในระบบที่ทำการศึกษาเมื่อสิ้นสุดการดำเนินระบบ พบว่า ปริมาณการสะสม Fe ในเนื้อเยื่อของรูปธาตุ มีทั้งอัตราการสะสมที่ลดลงและเพิ่มขึ้น ซึ่งอัตราการสะสม Fe ที่ลดลงนั้น พบในเนื้อเยื่อส่วนเหนือดิน โดยเฉพาะส่วนของลำต้น ทั้งนี้ เมื่อทำการตรวจวัดอัตราการสะสม Fe โดยเนื้อเยื่อของรูปธาตุในระบบบึงประดิษฐ์ที่ดำเนินระบบที่ระยะกักพัก 0.5 day พบว่ารูปธาตุในระบบมีการสะสม Fe ไว้ในเนื้อเยื่อส่วนเหนือดินตั้งแต่เริ่มระบายน้ำบาดาลจนสิ้นสุดการดำเนินระบบ เท่ากับ 0.17-0.29 mg/m²/d โดยการสะสมไว้ในส่วนของลำต้นนั้น มีอัตราการสะสมลดลงเท่ากับ -0.22 ถึง -0.01 mg/m²/d ขณะที่อัตราการสะสม Fe ไว้ในส่วนใบ เท่ากับ 0.30-0.38 mg/m²/d ส่วนอัตราการสะสม Fe ในเนื้อเยื่อรูปธาตุส่วนใต้ดิน มีค่าเท่ากับ 750.20-1,285.66 mg/m²/d โดยเป็นการสะสมไว้ในส่วนราก เท่ากับ 629.27-1,037.81 mg/m²/d และสะสมไว้ในส่วนของรากฝอย เท่ากับ 120.93-247.84 mg/m²/d และมีอัตราการสะสมของ Fe ในพืชสีเขียวขนาดเล็ก (สาหร่าย) ที่เกิดในระบบเท่ากับ 0.03-0.04 mg/m²/d

การตรวจวัดอัตราการสะสม Fe ของรูปธาตุในระบบบึงประดิษฐ์ที่ดำเนินระบบที่ระยะกักพัก 1 day พบว่า มีอัตราการสะสม Fe ไว้ในเนื้อเยื่อส่วนเหนือดินตั้งแต่เริ่มระบายน้ำบาดาลจนสิ้นสุดการดำเนินระบบ ระหว่าง -0.06 ถึง 0.07 mg/m²/d โดยการสะสมไว้ในส่วนของลำต้นมีค่าลดลง ทั้งนี้มีค่าระหว่าง -0.26 ถึง -0.20 mg/m²/d การสะสม Fe ไว้ในใบ มีค่าเท่ากับ 0.20-0.27 mg/m²/d ส่วนอัตราการสะสม Fe ในเนื้อเยื่อรูปธาตุส่วนใต้ดิน มีค่าเท่ากับ 721.22-813.93 mg/m²/d โดยเป็นการสะสมไว้ในส่วนราก เท่ากับ 519.94-552.05 mg/m²/d และสะสมไว้ในรากฝอย เท่ากับ 201.28-261.88 mg/m²/d และมีอัตราการสะสมของ Fe ในพืชสีเขียวขนาดเล็ก (สาหร่าย) ที่เกิดในระบบเท่ากับ 0.23-0.40 mg/m²/d

อัตราการสะสม Fe ของรูปธาตุในระบบบึงประดิษฐ์ที่ดำเนินระบบที่ระยะกักพัก 2 day พบว่า มีอัตราการสะสม Fe ไว้ในเนื้อเยื่อส่วนเหนือดินตั้งแต่เริ่มระบายน้ำบาดาลจนสิ้นสุดการดำเนินระบบ ระหว่าง -0.14 ถึง -0.07 mg/m²/d โดยการสะสมในส่วนของลำต้น มีค่าลดลง ทั้งนี้มีค่า

ระหว่าง -0.37 ถึง -0.14 mg/m²/d การสะสม Fe ไว้ในส่วนใบ มีค่าเท่ากับ 0.21-0.23 mg/m²/d ส่วนอัตราการสะสมของ Fe ในเนื้อเยื่อรูปถ่ายิยส่วนใต้ดิน มีค่าเท่ากับ 855.63-1,113.17 mg/m²/d โดยเป็นการสะสมไว้ในราก เท่ากับ 724.49-916.78 mg/m²/d และสะสมไว้ในรากฝอย เท่ากับ 131.14-196.39 mg/m²/d และมีอัตราการสะสมของ Fe ในพืชสีเขียวขนาดเล็ก (สาหร่าย) ที่เกิดในระบบเท่ากับ 0.18-0.39 mg/m²/d

จากผลการศึกษา พบว่ารูปถ่ายิยส่วนเหนือดินและส่วนใต้ดินของแต่ละระบบที่มีระยะกักตักแตกต่างกันนั้น มีการสะสม Fe ไว้ ในรูปของมวลต่อพื้นที่ต่อช่วงเวลา ในอัตราที่ไม่แตกต่างกันระหว่างระบบที่มีระยะกักตักแตกต่างกัน โดยรูปถ่ายิยส่วนเหนือดินนั้น จะพบการสะสม Fe ในรูปของมวลต่อพื้นที่ต่อเวลา ในส่วนของใบสูงกว่าส่วนต้น ทั้งนี้พบว่าอัตราการสะสม Fe ในรูปของมวลต่อพื้นที่ต่อเวลา ของลำต้นมีค่าลดลงหรือติดลบ โดยอัตราการสะสมของทั้งใบและลำต้นมีค่าสูงที่สุดในระบบที่มีระยะกักตัก 0.5, 1 และ 2 day ตามลำดับ ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการสะสม Mn ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากปริมาณการรองรับน้ำ และ Fe ของระบบ ซึ่งทำให้พืชในระบบที่มีปริมาณการรองรับน้ำ ซึ่งมีธาตุอาหารปนเปื้อนมาด้วย และ Fe ในปริมาณสูง มีอัตราการเติบโตและอัตราการสะสม Fe สูงด้วย ซึ่งจะพบว่าอัตราการสะสม Fe ในรูปของมวลต่อพื้นที่ต่อเวลาของรากและรากฝอย ก็เกิดขึ้นในลักษณะเดียวกัน คือมีอัตราการสะสมสูงในระบบที่มีปริมาณการรองรับน้ำ และ Fe สูง ทั้งนี้ พบว่ารากมีอัตราการสะสม Fe ในรูปมวลต่อพื้นที่ต่อเวลา สูงกว่ารากฝอย ซึ่งแตกต่างจากการสะสม Mn ที่มีการสะสมสูงในรากฝอย อย่างไรก็ตาม พบว่าอัตราการสะสม Fe ของรูปถ่ายิยส่วนเหนือดิน คืออัตราการสะสมของลำต้นและใบ มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P \geq 0.05$) เช่นเดียวกับค่าการสะสมของรากและรากฝอย ซึ่งไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P \geq 0.05$) ขณะที่ อัตราการสะสม Fe ของสาหร่ายในแต่ละระบบที่มีระยะกักตักแตกต่างกัน มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติเช่นเดียวกัน

ทั้งนี้พบว่า การบำบัด Mn และ Fe ในน้ำบาดาลด้วยการสะสมไว้ในเนื้อเยื่อของรูปถ่ายิยและพืชสีเขียวขนาดเล็กที่เกิดในระบบ ภายในระบบบึงประดิษฐ์แต่ละระบบที่มีระยะเวลาการกักตักน้ำที่แตกต่างกัน (0.5, 1 และ 2 day) นั้น มีอัตราในการสะสมในแต่ละส่วนของพืชเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ดังนี้คือ การสะสม Mn ของเนื้อเยื่อรูปถ่ายิยส่วนเหนือดินและส่วนใต้ดินมีอัตราการสะสมใกล้เคียงกัน โดยพบว่ารูปถ่ายิยในระบบบึงประดิษฐ์ที่มีระยะเวลาการกักตักน้ำของระบบ เท่ากับ 0.5 day จะมีอัตราการสะสม Mn ทั้งในเนื้อเยื่อรูปถ่ายิยส่วนเหนือดินและส่วนใต้ดินสูงกว่าระบบที่มีระยะกักตักที่ยาวนานกว่า คือ 1 และ 2 day ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาการสะสม Mn แยกเป็นการสะสมในใบ ลำต้น ราก และรากฝอย ก็จะพบว่า อัตราการสะสมของพืชแต่ละส่วนดังกล่าวข้างต้น มีค่าใกล้เคียงกันโดยแต่ละส่วนจะมีค่าการสะสม Mn สูงสุดเรียงลำดับจากพืชในระบบที่มีระยะเวลาการกักตักน้ำของระบบ เท่ากับ 0.5, 1 และ 2 day ตามลำดับ เช่นกัน ยกเว้นการสะสมในรากและสาหร่าย ซึ่งพบว่ามีค่าการสะสมต่อพื้นที่ต่อเวลา สูงสุดในระบบบึงประดิษฐ์ที่มีระยะเวลาการกักตักน้ำ เท่ากับ 0.5,

2 และ 1 day ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม อัตราการสะสมในแต่ละส่วนของพืช ในแต่ละระบบที่มีระยะกักพักแตกต่างกันดังกล่าวข้างต้น มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P \geq 0.05$)

ขณะที่ การสะสม Fe ในเนื้อเยื่อส่วนต่างๆ ของรูปถ่ายและสาหร่าย มีอัตราการสะสมที่แตกต่างกัน โดยเฉพาะการสะสมในเนื้อเยื่อส่วนเหนือดินและส่วนใต้ดินของรูปถ่าย ซึ่งพบว่าเนื้อเยื่อส่วนใต้ดินของรูปถ่าย มีอัตราการสะสม Fe สูงมาก ขณะที่ อัตราการสะสมของเนื้อเยื่อส่วนเหนือดินมีค่าต่ำและมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับปริมาณ Fe ที่มีอยู่เดิมก่อนเริ่มดำเนินระบบ ทั้งนี้ เนื่องจากรูปถ่ายส่วนเหนือดินในระบบบึงประดิษฐ์มีปริมาณของมวลชีวภาพเพิ่มขึ้นสูงมาก แต่ค่าความเข้มข้นของ Fe ในมวลชีวภาพของโครงสร้างส่วนเหนือดินมีค่าลดลงจากก่อนเริ่มดำเนินระบบมาก ทำให้อัตราการสะสม Fe ของเนื้อเยื่อส่วนเหนือดินมีค่าต่ำ ขณะที่ รูปถ่ายส่วนใต้ดินนั้น มีปริมาณมวลชีวภาพเพิ่มขึ้น และมีค่าความเข้มข้นของ Fe ในมวลชีวภาพส่วนใต้ดินสูงขึ้นด้วยเช่นกัน โดยมีค่าความเข้มข้นสูงขึ้นจากเดิมประมาณ 18 เท่า ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการกักเก็บ Fe ของรูปถ่ายส่วนใต้ดิน โดยมีการเคลื่อนย้ายไปยังส่วนอื่นๆ ในปริมาณน้อย ดังนั้น เนื้อเยื่อรูปถ่ายส่วนใต้ดินจึงมีอัตราการสะสม Fe สูงมาก เมื่อเทียบกับรูปถ่ายส่วนเหนือดินและสาหร่าย ทั้งนี้ พบว่าอัตราการสะสม Fe ในแต่ละส่วนของรูปถ่ายในแต่ละระบบที่มีระยะกักพักแตกต่างกัน มีค่าเป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยระยะกักพักไม่ส่งผลที่ชัดเจนต่ออัตราการสะสม Fe ของพืช ขณะที่ระยะกักพักส่งผลให้เห็นแนวโน้มของอัตราการสะสม Mn ของพืช ซึ่งพบว่ามีค่าสูงสำหรับระยะเวลากักพักที่สั้น

กิตติกรรมประกาศ

ผู้ศึกษา ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) และ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้การสนับสนุนด้านงบประมาณ ขอขอบคุณ ศ.ดร. เกษม จันทรแก้ว นักวิจัยที่ปรึกษา ที่ให้คำปรึกษาและคำแนะนำ และขอขอบคุณ ภาควิชาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม และคณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ที่เอื้อให้การสนับสนุนพื้นที่ศึกษาวิจัย ห้องปฏิบัติการ และอำนวยความสะดวกอื่นๆ จนทำให้การศึกษานี้ สามารถดำเนินการจนสำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	i
Abstract	ii
Executive summary	iii
กิตติกรรมประกาศ	xviii
สารบัญ	xix
สารบัญตาราง	xxi
สารบัญภาพ	xxii
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อที่ใช้ในการวิจัย	xxiv
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎี และเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ทฤษฎีการนำ	4
2.2 น้ำบาดาล	5
2.3 การปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาล	7
2.4 การบำบัดโลหะหนักในน้ำด้วยระบบบึงประดิษฐ์	8
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	12
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	
3.1 การเตรียมหน่วยทดลอง	14
3.2 การดำเนินการทดลอง	15
3.3 การเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่าง	16
3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล	18

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	
4.1 ผลของระยะกักพักต่อประสิทธิภาพในการบำบัดแมงกานีส และเหล็กในน้ำบาดาล	19
4.2 สมการในการคาดการณ์ประสิทธิภาพการบำบัดแมงกานีส และเหล็กของระบบบึงประดิษฐ์	30
4.3 การสะสมแมงกานีสและเหล็กขององค์ประกอบภายใน ระบบบึงประดิษฐ์	35
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการวิจัย	52
5.2 ข้อเสนอแนะ	62
บรรณานุกรม	63
Output ที่ได้จากโครงการ	68
ภาคผนวก	
Manuscript บทความวิจัยที่เผยแพร่ในวารสารวิชาการระดับชาติ	69

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
3.1 ดัชนีคุณภาพน้ำที่ทำการตรวจวัด และเครื่องมือหรือวิธีการในการวิเคราะห์	17
3.2 เครื่องมือหรือวิธีการในการวิเคราะห์พืช	18
4.1 คุณสมบัติของน้ำบาดาล	20
4.2 ประสิทธิภาพของระบบบึงประดิษฐ์ในการบำบัด Total Fe และ Total Mn	29
4.3 คุณสมบัติของดินในหน่วยทดลอง เมื่อสิ้นสุดการดำเนินระบบ	36
4.4 ปริมาณ Mn และ Fe ในดิน เมื่อสิ้นสุดการดำเนินระบบ	38
4.5 คุณสมบัติของพืชก่อนเริ่มดำเนินระบบ	39
4.6 อัตราการเติบโตสัมพัทธ์ และมวลชีวภาพของพืช เมื่อสิ้นสุดการดำเนินระบบ	40
4.7 ความเข้มข้นของ Mn และ Fe ในมวลชีวภาพแห้งของพืช เมื่อสิ้นสุดการดำเนินระบบ	41
4.8 น้ำหนักแห้ง และความเข้มข้นของ Mn และ Fe ในสาหร่าย เมื่อสิ้นสุดการดำเนินระบบ	44

สารบัญภาพ

ภาพ	หน้า
3.1 หน่วยทดลองระบบบึงประดิษฐ์	14
3.2 การเก็บเกี่ยวพืชก่อนการระบายน้ำบาดาลลงสู่ระบบ	15
3.3 จุดเก็บตัวอย่างดิน (Soil sampling point) ในแต่ละหน่วยทดลอง	16
3.4 จุดเก็บตัวอย่างน้ำ (Influent-Effluent point) และพืช (Plant sampling point)	17
4.1 Temperature ของน้ำบาดาล ก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพ	21
4.2 pH ของน้ำบาดาล ก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพ	22
4.3 DO ของน้ำบาดาล ก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพ	23
4.4 EC ของน้ำบาดาล ก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพ	23
4.5 TDS ในน้ำบาดาล ก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพ	24
4.6 อัตราการรองรับและอัตราการบำบัด Mn ของระบบบึงประดิษฐ์	25
4.7 อัตราการรองรับและอัตราการบำบัด Fe ของระบบบึงประดิษฐ์	26
4.8 ความเข้มข้นของ Mn ในน้ำบาดาลที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ	27
4.9 ความเข้มข้นของ Fe ในน้ำบาดาลที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ	27
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราการรองรับ, ระยะกักพัก และอัตราการบำบัด	30
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการบำบัดที่ตรวจวัด และอัตราการบำบัดที่คำนวณจาก Regression prediction model	31
4.12 การทดสอบประสิทธิภาพในการคาดการณ์ของ Regression prediction model	32
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง $ln \frac{C_e}{C}$ และ t (HRT)	33
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการบำบัดที่ตรวจวัด และอัตราการบำบัดที่คำนวณจาก First order kinetics prediction model	34
4.15 การทดสอบประสิทธิภาพในการคาดการณ์ของ First order kinetics prediction model	35
4.16 อัตราการสะสม Mn ของรูปถ่ายยีสต์ส่วนเหนียวดิน	45

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ		หน้า
4.17	อัตราการสะสม Mn ของรูปถ่ายมีส่วนใต้ดิน	45
4.18	อัตราการสะสม Mn ของสาหร่ายในระบบบึงประดิษฐ์	46
4.19	อัตราการสะสม Fe ของรูปถ่ายมีส่วนเหนือดิน	48
4.20	อัตราการสะสม Fe ของรูปถ่ายมีส่วนใต้ดิน	49
4.21	อัตราการสะสม Fe ของสาหร่ายในระบบบึงประดิษฐ์	49

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อที่ใช้ในการวิจัย

CW	Constructed wetland
DO	Dissolved oxygen
EC	Electroconductivity
HRT	Hydraulic retention time
HLR	Hydraulic loading rate
RGR	Relative growth rate
TDS	Total dissolved solid
Temp	Temperature
Total Fe, Fe	Total iron
Total Mn, Mn	Total manganese

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

น้ำเป็นทรัพยากรที่สำคัญ เนื่องจากน้ำเป็นปัจจัยพื้นฐานที่จำเป็นในหลายกิจกรรม มนุษย์จำเป็นต้องใช้น้ำในการอุปโภคบริโภคเพื่อการดำรงอยู่ นอกจากนั้น น้ำยังถูกใช้ในกระบวนการผลิตทั้งทางด้านอุตสาหกรรมและเกษตรกรรม ดังนั้นความต้องการใช้น้ำจึงมีมากและมีอยู่อย่างต่อเนื่อง ปัญหาการขาดแคลนน้ำที่พบในบางพื้นที่ และในบางช่วงเวลา ทำให้มีการเสาะหาทรัพยากรน้ำในแหล่งต่างๆ มาใช้ รวมถึงน้ำบาดาล ซึ่งเป็นน้ำตามธรรมชาติที่ถูกกักเก็บไว้ใต้ดิน โดยทั่วไปแล้ว น้ำบาดาลมักมีสิ่งสกปรกเจือปนน้อย เนื่องจากได้ผ่านการกรองด้วยชั้นดินตามธรรมชาติ อย่างไรก็ตาม ยังพบว่าน้ำบาดาลในบางพื้นที่ มีการปนเปื้อนเหล็กในปริมาณที่สูง โดยเฉพาะในพื้นที่ที่ดินมีเหล็กเป็นองค์ประกอบอยู่มาก ดังที่พบในพื้นที่ภาคเหนือตอนล่างของประเทศไทย เช่น ในจังหวัดพิษณุโลก ขณะเดียวกัน น้ำบาดาลในพื้นที่ดังกล่าวได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในปริมาณมาก โดยเฉพาะการใช้ในกิจกรรมการเกษตร โดย ประจักษ์ยุทธ (2547) พบว่าในพื้นที่อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก นั้น มีการสูบน้ำบาดาลขึ้นมา เพื่อใช้ในการทำนาในปริมาณมาก โดยเฉพาะในช่วงฤดูแล้ง โดยมีอัตราการใช้ เท่ากับ $1,561 \text{ m}^3/\text{rai}/\text{yr}$ ซึ่งการนำน้ำบาดาลที่มีเหล็กปนเปื้อนในปริมาณสูงมาใช้นั้น สามารถก่อให้เกิดปัญหาหลายประการด้วยกัน ดังนี้คือ เหล็กในน้ำทำให้น้ำมีสีเหลืองหรือแดง และมีกลิ่นเหม็นเหล็ก อันเป็นที่น่ารังเกียจต่อการนำไปใช้ นอกจากนั้น เหล็กยังทำให้เสื้อผ้าและเครื่องสุขภัณฑ์เกิดเป็นคราบและมีสี จากสีของเหล็ก และแม้ว่าเหล็กจะเป็นธาตุอาหารที่สำคัญต่อร่างกาย และโดยปกติแล้วไม่ถือว่าเหล็กเป็นสารพิษต่อร่างกาย แต่หากร่างกายได้รับเหล็กในปริมาณมากเกินไปเกินความต้องการ จะทำให้เกิดการสะสมในตับ ม้าม และเกิดการตกตะกอนของธาตุเหล็กในร่างกาย ด้วยเหตุนี้ องค์การอนามัยโลกจึงได้มีการกำหนดค่ามาตรฐานสำหรับเหล็กในน้ำดื่มไว้ไม่เกิน 0.3 mg/l และอนุโลมให้มีเหล็กได้สูงสุดไม่เกิน 1.0 mg/l สำหรับในประเทศไทยนั้น มีการกำหนดค่ามาตรฐานของเหล็กในน้ำที่ใช้ในการบริโภคไว้ไม่เกิน 0.5 mg/l และอนุโลมให้มีได้สูงสุดไม่เกิน 1.0 mg/l

การนำน้ำบาดาลที่มีเหล็กปนเปื้อนในปริมาณมากมาใช้ประโยชน์ในการเกษตรกรรม จะทำให้เหล็กเกิดการตกตะกอนและสะสมอยู่ในนา ทำให้ดินนาเสื่อมคุณภาพ ซึ่ง ประจักษ์ยุทธ (2547) พบอัตราการสะสมของเหล็กในดินนาในพื้นที่อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก มีค่าเท่ากับ $10.90 \text{ kg}/\text{rai}/\text{yr}$ โดยเป็นเหล็กที่ตกตะกอนจากน้ำบาดาลถึง $10.55 \text{ kg}/\text{rai}/\text{yr}$ ขณะที่ ข้าวที่แช่อยู่ในน้ำที่มีเหล็กสูงมากกว่า $5\text{--}10 \text{ mg/l}$ นั้น รากของข้าวจะปลดปล่อยก๊าซออกซิเจน เพื่อลดความเป็นพิษของเหล็ก ซึ่งจะทำให้เกิดคราบสนิมเหล็กเคลือบอยู่ที่รากของข้าว ส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับธาตุอาหารของข้าวลดลง และแม้ว่าเกษตรกรจะเพิ่มปุ๋ยลงในนา ก็ไม่สามารถเพิ่มผลผลิตได้อย่างที่ควรเป็น (กิจการ, 2546) ทั้งนี้การ

เหล็กเป็นพิษต่อข้าวนั้น สามารถสังเกตพบได้ที่บริเวณใบและราก โดยจะเกิดเป็นจุดสีน้ำตาลขนาดเล็กบนใบล่างของข้าว เริ่มจากปลายใบและขยายสู่ส่วนฐานของใบ จากนั้นจุดจะขยายขนาดรวมกันในเนื้อใบ ใบจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลส้มและตายในที่สุด นอกจากนี้ อาจพบว่าใบข้าวมีขนาดแคบกว่าปกติ รากข้าวอาจเปลี่ยนสีและตายได้ เนื่องจากมีออกไซด์ของเหล็กสีน้ำตาลเข้มหรือสีดำจับที่ผิวราก ต้นข้าวหยุดชะงักการเจริญเติบโตและแตกกอลดลง (ทัศนีย์, 2543) ซึ่งส่งผลให้ผลผลิตข้าวของเกษตรกรลดลงและไม่คุ้มค่าต่อการลงทุน ทั้งนี้ กิจการและคณะ (2545) ได้รายงานถึงคุณภาพน้ำบาดาลบ่อตื้น ที่มีการใช้กันในพื้นที่จังหวัดพิษณุโลก ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงความเหมาะสมต่อการนำมาใช้เพื่อการเกษตร พบว่ามีคุณภาพปานกลาง เนื่องจากมีเหล็กละลายอยู่ในปริมาณสูง และหากพิจารณาถึงการนำมาใช้เพื่อการอุปโภค พบว่ามีคุณภาพต่ำมาก โดยจะพบเหล็กปนเปื้อนระหว่าง 1.1-23.5 mg/l มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 12.5 mg/l ซึ่งพื้นที่ที่พบปริมาณเหล็กในน้ำบาดาลสูง ได้แก่ พื้นที่อำเภอบางกระทุ่ม พื้นที่บริเวณทิศตะวันออกเฉียงใต้ของอำเภอบางระกำ และบริเวณทิศใต้ของอำเภอเมือง นอกจากนี้ ผลการศึกษาได้ระบุว่า การใช้ น้ำบาดาลบ่อตื้นที่มีปริมาณเหล็กสูงยังก่อให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับคุณภาพดิน โดยเกษตรกรในพื้นที่พบว่าเนื้อดินมีความเหนียวแข็งเพิ่มขึ้น และมีความร่วนเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ เกษตรกรยังพบว่าข้าวเป็นโรคมากขึ้น โดยพบโรคใบไหม้ ใบเป็นสีเหลือง เป็นจุดสีน้ำตาล และโรครากดำ ซึ่งอาการคล้ายคลึงกับอาการเหล็กเป็นพิษในดิน

การปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาล ก่อนการนำมาใช้ประโยชน์ จะช่วยลดปัญหาการสะสมของเหล็กในดิน และลดปัญหาต่อเนื่องจากการสะสมนั้น ซึ่งจะทำให้การนำทรัพยากรน้ำบาดาลมาใช้สามารถก่อเกิดประโยชน์ได้อย่างสูงสุด คุ้มค่าต่อการลงทุน โดยไม่ก่อผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ช้างเคียง และเป็นแนวทางการจัดการทรัพยากรที่เหมาะสมตามหลักการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

โครงการศึกษาวิจัยนี้ เป็นการนำเสนอแนวทางในการปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาล โดยการลดปริมาณเหล็กในน้ำด้วยระบบบึงประดิษฐ์ ซึ่งผลการศึกษาที่ได้จะบ่งชี้ถึงความเป็นไปได้ ประสิทธิภาพ และแนวทางในการปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาลด้วยระบบบึงประดิษฐ์ ซึ่งเป็นระบบที่ง่ายในการดำเนินการ และเกษตรกรสามารถนำผลการศึกษาไปประยุกต์ใช้ได้จริง ซึ่งจะเป็นการลดปัญหาดังกล่าว ลดผลกระทบต่อเกษตรกร และเป็นแนวทางที่ก่อประโยชน์ต่อประเทศ

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ระบบบึงประดิษฐ์ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาล
- 1.2.2 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของระบบบึงประดิษฐ์ ในการลดปริมาณเหล็กในน้ำบาดาลที่ระยะกักน้ำที่แตกต่างกัน
- 1.2.3 เพื่อศึกษาการจัดการบึงประดิษฐ์อย่างเหมาะสม เพื่อการลดปริมาณเหล็กในน้ำบาดาลอย่างมีประสิทธิภาพ

1.3 ขอบเขตการวิจัย

ขอบเขตงานวิจัยของโครงการ คือทำการศึกษาความเป็นไปได้และประสิทธิภาพการลดเหล็กในน้ำบาดาล ด้วยระบบบึงประดิษฐ์ ทั้งนี้โดยการใช้บึงประดิษฐ์ในการลดปริมาณเหล็กที่มีมากในน้ำบาดาล พร้อมๆ กับการศึกษาถึงระยะกักน้ำที่เหมาะสม เพื่อให้ระบบบึงประดิษฐ์สามารถลดปริมาณเหล็กได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้เพื่อเป็นทางเลือกในการปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาลให้มีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้เพื่อการเกษตรกรรม เพื่อลดผลกระทบจากเหล็กที่ปนเปื้อนในน้ำบาดาลต่อทรัพยากรดิน พืช และผลผลิตทางการเกษตร ด้วยวิธีการอย่างง่าย และเกษตรกรสามารถนำไปดำเนินการได้จริง นอกจากนั้นยังศึกษาถึงการสะสมเหล็กไว้ในส่วนต่างๆ ของระบบ เช่น ในตัวกลาง (ดิน) และส่วนต่างๆ ของพืช

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ทราบถึงความเป็นไปได้และประสิทธิภาพในการปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาล (นำบดเหล็ก) ด้วยระบบบึงประดิษฐ์
- 1.4.2 ทราบถึงการจัดการระบบบึงประดิษฐ์อย่างเหมาะสมในการนำมาใช้ประโยชน์เพื่อการลดปริมาณเหล็กในน้ำบาดาล
- 1.4.3 นำผลการศึกษาที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาล ก่อนนำไปใช้ในการเกษตรกรรม เพื่อลดผลกระทบต่อทรัพยากรดิน และสิ่งแวดล้อมอื่นๆ และเพื่อให้เกษตรกร ได้รับผลผลิตที่คุ้มค่าต่อการลงทุน
- 1.4.4 ใช้ผลการศึกษาที่ได้เป็นองค์ความรู้ในการศึกษาต่อยอดในส่วนที่เกี่ยวข้องต่อไป
- 1.4.5 เพิ่มประสบการณ์ในการศึกษาวิจัยให้กับนักวิจัยรุ่นใหม่
- 1.4.6 นำผลการศึกษาที่ได้ไปเผยแพร่ในวารสารวิชาการระดับต่างๆ

บทที่ 2

ทฤษฎี และเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทรัพยากรน้ำ

น้ำ เป็นทรัพยากรธรรมชาติที่มีความสำคัญ มนุษย์ใช้ทรัพยากรน้ำทั้งในการบริโภคและอุปโภค จึงถือว่า น้ำเป็นสิ่งจำเป็นพื้นฐานในการดำรงชีวิตของมนุษย์ นอกจากนั้น น้ำยังถูกใช้ประโยชน์ในด้านอื่นๆ ได้แก่ ใช้ในกระบวนการผลิตทั้งด้านการเกษตรและอุตสาหกรรม ใช้ชำระล้างสิ่งสกปรก ใช้เป็นแหล่งพักผ่อนหย่อนใจ ใช้ในการผลิตพลังงาน และใช้ในการคมนาคม เป็นต้น

น้ำ เป็นทรัพยากรที่มีการสะสมและหมุนเวียนอยู่ในทั้ง 3 ส่วนหลักของโลก คือ ภาคนบรรยากาศ ภาคนธรณี และในแหล่งน้ำ ความสามารถในการเปลี่ยนรูปและดำรงอยู่ได้ทั้งในรูปของของแข็ง ของเหลว และก๊าซ รวมถึงคุณสมบัติเฉพาะอื่นๆ ของน้ำ ทำให้น้ำสามารถสะสมและหมุนเวียนอยู่ได้ในวัฏจักรของน้ำ

ขณะที่มีการหมุนเวียนของน้ำในวัฏจักร น้ำจะมีการเปลี่ยนแปลงทั้งสถานะและสถานที่อยู่ตลอดเวลา ซึ่งเมื่อน้ำในสถานะของเหลวในแหล่งน้ำต่างๆ ได้รับความร้อนจนถึงระดับหนึ่ง น้ำจะเปลี่ยนรูปจากของเหลวไปเป็นก๊าซหรือไอน้ำซึ่งเบากว่าอากาศและระเหย (Evaporation) ขึ้นสู่บรรยากาศ ไอน้ำเล็กๆ เหล่านี้ จะรวมตัวกันเป็นก้อนเมฆ และเมื่อก้อนเมฆถูกพัดพาไปกระทบกับความเย็น ละอองน้ำจากการรวมตัวกันของไอน้ำในก้อนเมฆ จะกลั่นตัวตกลงมาเป็นฝน (Precipitation) น้ำฝนที่ตกลงสู่พื้นโลก ส่วนหนึ่งจะถูกรองรับไว้ด้วยส่วนต่างๆ ของพืช เรียกว่า น้ำพืชยึด (Interception) น้ำส่วนที่ตกลงสู่พื้นดินโดยตรงจะซึมผ่านหน้าดิน (Infiltration) ลงสู่ดินชั้นล่าง และถูกดูดซับไว้ด้วยอนุภาคดินและรูพรุนของดิน (Soil pore) น้ำอีกส่วนหนึ่งจะไหลบ่าไปตามหน้าดิน (Overland runoff) ลงสู่แหล่งน้ำ น้ำส่วนที่ถูกดูดซับไว้ด้วยดินนั้นส่วนหนึ่งจะกลายเป็นความชื้นและน้ำในดิน ซึ่งเป็นองค์ประกอบหนึ่งของดินที่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืช ขณะที่บางส่วนจะเกิดการสะสมเป็นน้ำใต้ดิน (Groundwater) ซึ่งจะค่อยๆ ไหลระบายออกสู่แหล่งน้ำผิวดิน เมื่อระดับน้ำในแหล่งน้ำผิวดินลดลงในช่วงฤดูแล้ง จึงทำให้พบว่าแหล่งน้ำผิวดินในพื้นที่ธรรมชาติที่มีความอุดมสมบูรณ์ จะมีน้ำไหลหล่อเลี้ยงแหล่งน้ำอยู่ตลอดเวลา

2.2 น้ำบาดาล

แหล่งน้ำที่มีการนำน้ำมาใช้ประโยชน์กันอยู่ในปัจจุบัน มี 2 แหล่งหลัก คือ แหล่งน้ำผิวดิน ซึ่งได้แก่ น้ำในแม่น้ำ ทะเลสาบ ลำธาร คลอง หนอง บึง รวมถึงทะเลและมหาสมุทร ส่วนแหล่งกักเก็บน้ำที่มีการนำน้ำมาใช้อีกประเภทหนึ่ง คือ แหล่งน้ำใต้ดิน ซึ่งเป็นแหล่งน้ำที่อยู่ใต้ผิวดิน เกิดขึ้นจากการซึมของน้ำผ่านชั้นดินลงไปกักเก็บอยู่ใต้ชั้นผิวดิน โดยสามารถแบ่งน้ำส่วนที่ถูกกักเก็บไว้ภายใต้ผิวดินออกเป็น 2 ประเภท คือ

1) น้ำบ่อตื้น เป็นน้ำฝนหรือน้ำผิวดินที่ไหลซึมผ่านชั้นดิน หิน ทราช กรวด ลงไปอยู่ในช่องว่างภายใต้ผิวดินเหนือชั้นหินดาน สามารถขุดพบได้ในระดับตื้นๆ ลึกเพียงไม่กี่เมตร ปริมาณน้ำจะมีการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล

2) น้ำบาดาล ซึ่งหมายถึง น้ำใต้ผิวดินที่อยู่ในเขตอิมน้ำ (Saturated zone) รวมถึงธารน้ำใต้ดิน โดยทั่วไปจะหมายถึง น้ำใต้ผิวดินทั้งหมด ยกเว้นน้ำภายในโลก ซึ่งเป็นน้ำที่อยู่ใต้ระดับเขตอิมน้ำ (คณะอนุกรรมการจัดทำพจนานุกรมศัพท์ธรณีวิทยา, 2530) น้ำบาดาล เป็นน้ำใต้ดินที่ซึมผ่านชั้นหินที่มีรูพรุนลงไปขังอยู่ในช่องว่างของชั้นหินเหนือชั้นหินดาน ลึกกว่าชั้นของน้ำบ่อตื้น น้ำบาดาลจะมีการเปลี่ยนแปลงและมีการไหลเช่นเดียวกับน้ำผิวดิน แต่เป็นไปอย่างช้าๆ โดยน้ำบาดาลจะไหลตามเส้นทางน้ำออกสู่แหล่ง น้ำผิวดินในที่สุด น้ำบาดาลนั้นจะมีการสูญเสียจากการระเหยน้อยกว่าน้ำผิวดินเนื่องจากอยู่ใต้ผิวดิน และเป็นน้ำที่มีความใสในระดับหนึ่ง เนื่องจากสิ่งปนเปื้อนในน้ำจะถูกกรองออกในระหว่างการซึมผ่านชั้นดินและหิน

นอกจากน้ำผิวดินแล้ว จะพบว่าน้ำใต้ดินก็เป็นแหล่งน้ำที่สำคัญแหล่งหนึ่งของประเทศ การเจาะและการพัฒนา เพื่อนำน้ำใต้ดินขึ้นมาใช้ประโยชน์กันในปัจจุบัน จะเป็นไปเพื่อวัตถุประสงค์หลัก 3 ประการ ตามลำดับ ดังนี้ คือ เพื่อการบริโภคอุปโภค การอุตสาหกรรม และสุดท้ายคือ การเกษตรกรรม ซึ่งเป็นการใช้น้ำในการทำนาปรัง การปลูกพืชผักสวนครัว และการเลี้ยงสัตว์ เป็นต้น สำหรับการใช้น้ำใต้ดินหรือน้ำบาดาล เพื่อการบริโภคอุปโภค โดยการเจาะบ่อน้ำบาดาลและจัดทำระบบประปาชนบท ซึ่งทั้งหมดดำเนินการโดยหน่วยงานของรัฐนั้น พบว่าในปัจจุบันมีอัตราการใช้น้ำบาดาลประมาณวันละ 50 l/d/person และคาดว่าปริมาณน้ำใต้ดินที่สูบขึ้นมาใช้ในการนี้ ถึงวันละไม่น้อยกว่า 10 mil. m³ นอกจากเขตชนบทแล้ว น้ำบาดาลยังถูกสูบโดยการประปาส่วนภูมิภาคและหน่วยงานอื่นๆ เพื่อใช้ในกิจกรรมประปาในเขตเมืองอีกเป็นจำนวนมาก ขณะที่การนำน้ำบาดาลมาใช้ในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล โดยส่วนใหญ่จะดำเนินการโดยภาคเอกชน ซึ่งในปัจจุบันมีการสูบน้ำบาดาลขึ้นมาใช้ ถึงวันละประมาณ 2.3 mil. m³ แยกเป็นน้ำเพื่อการบริโภคอุปโภควันละ 0.9 mil. m³ ใช้เพื่อการอุตสาหกรรมวันละประมาณ 1.4 mil. m³ และมีเพียงเล็กน้อยที่ใช้เพื่อการเกษตรกรรม ส่วนการใช้น้ำใต้ดินเพื่อการเกษตรกรรมในพื้นที่อื่นๆ ทั่วประเทศ ซึ่งดำเนินการโดยทั้งภาครัฐ ภาคเอกชน และ

เกษตรกรเองนั้น คาดว่ามีปริมาณการใช้สูง แต่ยังไม่สามารถประเมินปริมาณที่แน่นอนได้ (การประปาส่วนภูมิภาค, ม.ป.ป.)

โดยทั่วไป น้ำบาดาลเป็นน้ำที่สะอาด ปราศจากสารแขวนลอย สารอินทรีย์เคมี และเชื้อโรค อีกทั้งยังไม่มีกลิ่นที่นำรังเกียจ อย่างไรก็ตาม ขณะที่น้ำบาดาลได้ไหลผ่านไปตามชั้นดินหรือชั้นหิน น้ำอาจจะทำการละลายแร่ธาตุในพื้นที่และเกิดการปนเปื้อนของแร่ธาตุนั้นๆ ในน้ำ รวมถึงน้ำบาดาลนั้นอาจถูกปนเปื้อนด้วยน้ำที่มีคุณภาพด้อยกว่า ซึ่งจะทำให้คุณภาพของน้ำบาดาลมีการเปลี่ยนแปลงไป (ศูนย์บริการเทคโนโลยีน้ำบาดาล, 2551) การพิจารณาคุณสมบัติของน้ำบาดาลในด้านคุณภาพนั้น โดยทั่วไปจะพิจารณาคุณสมบัติใน 3 ลักษณะ คือ คุณสมบัติทางเคมี คุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติทางชีวภาพ ดังนี้

1) คุณสมบัติทางเคมีของน้ำบาดาล เนื่องจากน้ำบาดาลไหลผ่านตัวกลางที่มีรูพรุน ทำให้น้ำบาดาลมีโอกาสในการละลายเกลือแร่ต่างๆ ออกมาปะปนอยู่ในรูปของสารละลาย ดังนั้น ส่วนประกอบทางเคมีของน้ำบาดาลที่สำคัญ จึงประกอบด้วย สารเคมีอนินทรีย์และสารเคมีอินทรีย์ประเภทต่างๆ เช่น SO_4 , NO_3 , Cl , F , SiO_2 , Fe , Mn , Ca , Mg , Na , K , CO_3 , HCO_3 เป็นต้น และส่วนประกอบเคมีที่เป็นก๊าซ เช่น CH_4 , O_2 , CO_2 , H_2S เป็นต้น

2) คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำบาดาล จะประกอบด้วยคุณสมบัติที่สำคัญ คือ อุณหภูมิ สี กลิ่น ความหนาแน่น และความขุ่น

2.1) อุณหภูมิ โดยทั่วไป อุณหภูมิของน้ำบาดาลจะต่ำกว่าอุณหภูมิน้ำปกติ โดยเฉพาะในช่วงกลางวัน แต่กลางคืนจะสูงกว่าอุณหภูมิปกติ แต่ในบางเขตพื้นที่ ซึ่งเป็นเขตที่ได้รับอิทธิพลจากภูเขาไฟ เช่น แถบภาคเหนือของไทย พบว่าน้ำบาดาลจะมีอุณหภูมิสูง เหล่านี้เป็นต้น

2.2) สี โดยทั่วไป น้ำบาดาลที่มีคุณภาพดีจะไม่มีสี หากน้ำบาดาลมีสีอาจเกิดจากการมีสิ่งเจือปน เช่น การปนเปื้อนซากพืช การปนเปื้อนแบคทีเรียหรือสาหร่าย เป็นต้น ซึ่งการปนเปื้อนนี้เกิดจากน้ำบาดาลมีการไหลผ่านแหล่งที่มีการทับถมของซากพืชหรือสัตว์ ไหลผ่านแหล่งถ่านหิน หรือไหลผ่านเขตเกษตรกรรม เป็นต้น

2.3) กลิ่นที่พบในน้ำบาดาล ส่วนใหญ่เกิดจาก H_2S ที่ได้จากการนำเปื้อยผุพัง หรือมีกลิ่นของแอลกอฮอล์และอื่นๆ ทั้งนี้ โดยปกติแล้วน้ำที่มีคุณภาพดีจะต้องไม่มีกลิ่น

2.4) ความหนาแน่น น้ำที่มีคุณภาพดีควรมีความหนาแน่นเท่ากับ 1 gm/cm^3 หากน้ำมีค่าความหนาแน่นมากกว่า 1 gm/cm^3 จะหมายถึงน้ำนั้นมีสิ่งเจือปนอยู่มาก

2.5) ความขุ่นในน้ำแสดงถึงการมี Suspended residue ได้แก่ ดิน สารแขวนลอย อินทรีย์วัตถุ หรือจุลินทรีย์เจือปนอยู่ในน้ำ ทั้งนี้ น้ำบาดาลที่ดีควรมีความขุ่นต่ำและปราศจากสิ่งแขวนลอยประเภทต่างๆ

3) คุณสมบัติทางชีวภาพของน้ำบาดาล น้ำบาดาลตามธรรมชาติจะปราศจาก Microorganism โดยการวิเคราะห์คุณภาพน้ำบาดาลด้านชีวภาพนั้น จะเป็นการตรวจสอบถึงการ

ปนเปื้อนจากน้ำผิวดิน การปนเปื้อนจากแหล่งน้ำบาดาลข้างเคียง หรือการปนเปื้อนจากกิจกรรมต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งสิ่งที่ทำการวิเคราะห์ ได้แก่ Coliform group ซึ่งเป็นแบคทีเรียที่พบในระบบทางเดินอาหารของคนและสัตว์และเป็นแบคทีเรียที่ง่ายต่อการตรวจสอบ

2.3 การปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาล

โดยทั่วไป น้ำบาดาลเป็นน้ำที่มีคุณภาพดีปราศจากสิ่งเจือปน แต่บางกรณีอาจพบว่าน้ำบาดาลมีการปนเปื้อนหรือมีสิ่งเจือปนบางประการอยู่สูงกว่าปกติ ดังนั้น จึงจำเป็นต้องทำการปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาลก่อนการนำไปใช้ ทั้งนี้เพื่อให้ น้ำบาดาลนั้นมีความปลอดภัยต่อการอุปโภค หรือบริโภค และไม่ก่อผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาลนั้น โดยส่วนใหญ่เป็นการแก้ไขปัญหาด้วยการกำจัดสิ่งเจือปนในน้ำบาดาล การกำจัดเหล็กและแมงกานีสในน้ำบาดาล การแก้ไขปัญหาหน้าเค็ม และการฆ่าเชื้อโรค

1) การกำจัดสิ่งปนเปื้อน ซึ่งมีหลายวิธีการด้วยกันในการกำจัดสิ่งปนเปื้อนออกจากน้ำ ซึ่งวิธีการเหล่านี้ ได้แก่

1.1) การเติมอากาศ (Aeration) ซึ่งเป็นการทำให้น้ำและอากาศมีการสัมผัสกัน

1.2) การจับตัวของตะกอน (Flocculation) เป็นการเพิ่มการจับตัวกันของ Coagulated solids เพื่อให้เกิดกลุ่มตะกอนขนาดใหญ่ที่มีน้ำหนักมากและตกตัวได้เร็ว หรือสามารถกรองออกได้ง่าย ซึ่งการทำให้เกิด Flocculation นั้น ทำได้โดยเพิ่มเวลาในการกวนให้ยาวขึ้นเพื่อเพิ่มปฏิกิริยาให้สมบูรณ์ ทำให้อนุภาคสามารถจับตัวกันมีขนาดและความหนาแน่นมากขึ้น

1.3) การตกตะกอน (Sedimentation) ซึ่งเป็นการกำจัดกลุ่มตะกอนที่มีอยู่ให้ตกลงสู่ก้นถัง และลดตะกอนที่แขวนลอยในน้ำ

1.4) การกรอง (Filtration) เป็นการแยกอนุภาคแขวนลอย และตะกอนลอยอื่นๆ จากน้ำ โดยให้น้ำไหลผ่านวัสดุที่มีรูพรุน เช่น ชั้นทราย ถ่าน หรืออื่นๆ การกรองที่มีประสิทธิภาพจะช่วยขจัดอนุภาคและสารแขวนลอยที่ไม่ตกตะกอน และช่วยลดความขุ่นของน้ำ

2) การกำจัดเหล็กและแมงกานีส น้ำบาดาลในบางพื้นที่ อาจพบเหล็กและแมงกานีสอยู่สูง และอาจมีค่าเกินเกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งขณะที่อยู่ในชั้นน้ำบาดาลนั้น เหล็กและแมงกานีสจะอยู่ในรูปของ Ferrous และ Manganous ซึ่งอยู่ในสภาพ Anaerobic หรือ Reducing ซึ่งไม่มีสี แต่เมื่อน้ำบาดาลถูกนำขึ้นสู่ผิวดินและสัมผัสกับอากาศ น้ำจะเปลี่ยนสภาพเป็น Aerobic หรือ Oxidizing ทำให้เหล็กและแมงกานีสเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของ Ferric และ Manganic ซึ่งมีสีแดง ทำให้เกิดสีเปรอะเปื้อนเสื้อผ้า สุขภัณฑ์ และอื่นๆ โดยปกติแล้ว เหล็กและแมงกานีส ในรูป Ferrous และ Manganous จะสามารถกำจัดออกจากน้ำได้ด้วยการ Oxidizing ให้อยู่ในรูปของ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ และ MnO_2 แล้วทำการตกตะกอนและการกรองออก ซึ่ง Oxidizing agent ที่ใช้ส่วนใหญ่ ได้แก่ O_2 จากอากาศ Chlorine และ Potassium permanganate ทั้งนี้

อัตราการเกิด Oxidizing ขึ้นกับชนิดและความเข้มข้นของ Oxidant ค่า pH ค่า Alkalinity และโอกาสในการตกผลึก

3) การแก้ไขน้ำเค็มหรือน้ำกร่อย เป็นการลดความเค็มของน้ำหรือลดแร่ธาตุต่างๆ ที่ละลายอยู่ในน้ำ ด้วยกระบวนการ Desalinization หรือ Demineralization ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธีการด้วยกัน ดังนี้

3.1) Ion exchange โดยการปล่อยน้ำผ่าน Rasin ซึ่งสามารถกำจัด Cation และ Anion ได้ โดย Ca, Mg, Na, Fe, Mn จะถูกจับโดย Cation rasin ส่วน HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- จะถูกจับโดย Anion rasin

3.2) Distillation เป็นการกำจัดเกลือโดยวิธีการกลั่นน้ำ

3.3) Electrodialysis โดยปล่อยกระแสไฟฟ้าลงในน้ำที่บรรจุอยู่ใน Container ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 Chamber มี Membrane คั่นกลาง โดย Membrane ด้านหนึ่งยอมให้ Ion ที่มีประจุลบ เช่น Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , CO_3^{2-} ผ่าน ส่วนอีกด้านหนึ่งให้ประจุบวก เช่น Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} ผ่านและมีขั้วไฟฟ้าบวกและลบ Ion ที่เคลื่อนที่ผ่านออกไปจะจับอยู่รอบๆ Electrode และน้ำส่วนที่ Ion ต่างๆ เคลื่อนที่ผ่านออกไปแล้ว จะกลายเป็นน้ำจืด

3.4) การทำให้น้ำเป็นน้ำแข็ง โดยทำให้น้ำแข็งตัว แล้วแยกส่วนที่เป็นก้อนน้ำแข็งออกจากเกลือ แล้วจึงละลายน้ำซึ่งเป็นน้ำจืดมาใช้

3.5) Reverse osmosis โดยบรรจุน้ำจืดและน้ำเค็มลงใน Chamber ซึ่งมี Semipermeable membrane คั่นกลาง โดยคุณสมบัติของ Membrane คือ ยอมให้น้ำจืดผ่านได้แต่ไม่ยอมให้สารหรือแร่ธาตุต่างๆ ที่มีอยู่ในน้ำเค็มผ่าน ในกระบวนการ Osmosis ธรรมดา น้ำจืดจะซึมผ่าน Membrane เข้าสู่ น้ำเค็ม แต่เมื่อเพิ่มความดันลงในช่องที่บรรจุน้ำเค็ม จะทำให้การไหลของน้ำกลับทิศทาง โดยเฉพาะน้ำ ส่วนที่จืดใน Saline chamber จะสามารถซึมผ่าน Membrane และเกลือเกลือไว้ ซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย แต่มีค่าใช้จ่ายสูง เพราะต้องทำการเปลี่ยน Membrane บ่อยๆ

4) การฆ่าเชื้อโรค เป็นการกำจัดจุลชีพที่เป็นอันตรายที่มีอยู่ในน้ำ ซึ่งอาจกำจัดได้โดยใช้ Chlorine, Ozone, Iodine และ Potassium permanganate หรืออาจกำจัดด้วยวิธีการต้ม หรือการใช้แสง Ultraviolet

2.4 การบำบัดโลหะหนักในน้ำด้วยระบบบึงประดิษฐ์

ระบบบึงประดิษฐ์ (Constructed wetland: CW) เป็นระบบบำบัดที่เลียนแบบการทำหน้าที่การบำบัดมลสารในน้ำของพื้นที่ชุ่มน้ำธรรมชาติ (Natural wetland) โดยระบบบึงประดิษฐ์นี้เป็นระบบบำบัดประเภทหนึ่งที่ถูกใช้ในการบำบัดโลหะหนักจากน้ำเสีย และน้ำทิ้งหลากหลายประเภท (Mitsch and Wise, 1998; Lesage et al., 2007) ทั้งนี้รวมถึงน้ำทิ้งที่ระบายจากอุตสาหกรรมเหมืองแร่ และ

อุตสาหกรรมประเภทอื่นๆ ที่มีโลหะหนักปนเปื้อนสูง บึงประดิษฐ์ เป็นระบบบำบัดที่มีราคาถูก ง่ายต่อการสร้าง ดูแลและดำเนินการ อีกทั้งยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม กระบวนการบำบัดโลหะหนักด้วยระบบบึงประดิษฐ์นั้น เป็นการทำงานร่วมกันขององค์ประกอบต่างๆ ภายในระบบ อันได้แก่ อากาศ ดิน และพืช กระบวนการในการบำบัดเป็นกระบวนการบำบัด ทั้งทางด้านกายภาพ เคมี และชีวภาพ

การบำบัดโลหะหนักด้วยกระบวนการทางกายภาพ ภายในระบบบึงประดิษฐ์ เป็นการบำบัดด้วยกระบวนการกรอง (Filtration) และตกตะกอน (Sedimentation) โดยการตกตะกอนจะเป็นกระบวนการทางกายภาพที่ช่วยบำบัดมลสารในน้ำเสีย โดยเฉพาะมลสารประเภทของแข็งรวมถึงโลหะหนักที่อยู่ในรูปของอนุภาคสารแขวนลอย (Particulate) (Kadlec and Knight, 1996) ทั้งนี้เมื่อน้ำที่มีมลสารปนเปื้อนไหลลงสู่แหล่งรองรับที่มีปริมาตรในการรับน้ำมาก ความเร็วของกระแสน้ำจะลดลง สารแขวนลอยโดยเฉพาะกลุ่มที่มีความหนาแน่นมากกว่าน้ำ จะได้รับอิทธิพลจากแรงโน้มถ่วงมากขึ้น และเกิดการตกตะกอน (Sedimentation) จมตัวลงสู่พื้นเบื้องล่าง ทำให้ปริมาณของโลหะหนักในน้ำลดลง (Sheoran and Sheoran, 2006) ซึ่งการตกตะกอนของมลสารนั้นจะมีความสัมพันธ์กับลักษณะการไหลของน้ำ โดยในระบบบึงประดิษฐ์นั้น พืชที่เจริญเติบโตอยู่ในบึงประดิษฐ์โดยเฉพาะบริเวณทางน้ำไหลเข้า จะเป็นปัจจัยสำคัญในการต้านและลดความเร็วของกระแสน้ำลง (Brix, 1997; Gopal, 1998) ทั้งนี้ Matagi et al. (1998) ได้ระบุว่าในบริเวณน้ำนิ่ง อนุภาคมลสารที่มีความหนาแน่นมากกว่าน้ำจะจมตัวลงได้ดี การต้านและลดความเร็วของกระแสน้ำโดยส่วนต่างๆ ของพืชนั้น นอกจากจะทำให้สารแขวนลอยขนาดใหญ่ตกตะกอนได้ง่ายขึ้นแล้ว ยังส่งผลให้อนุภาคขนาดเล็กที่มีน้ำหนักเบาหรือมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ มีโอกาสเกิดการรวมตะกอน (Flocculation) จนมีขนาดใหญ่ขึ้นแล้วจึงตกตะกอนลง ทั้งนี้ พบว่าขณะที่โครงสร้างของพืชส่วนที่จมอยู่ในน้ำช่วยลดความเร็วของกระแสน้ำลง โครงสร้างของพืชส่วนเหนือน้ำจะช่วยลดความเร็วของลมที่พัดผ่านผิวน้ำ ซึ่งเป็นการช่วยลดการฟุ้งกระจายของตะกอน (Resuspension) จากพื้นท้องน้ำลงด้วย

นอกจากการตกตะกอนแล้ว กระบวนการกรองที่เกิดขึ้นในระบบบึงประดิษฐ์นั้น พืชในระบบจัดว่าเป็นองค์ประกอบทางชีวภาพที่สำคัญที่ส่งเสริมให้กระบวนการดังกล่าวสามารถลดปริมาณมลสารรวมถึงโลหะหนักในน้ำลงได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการกรองด้วยพืชนั้นจะเกิดขึ้นที่บริเวณพื้นผิวของพืชส่วนที่จมอยู่ในน้ำ ซึ่งพืชจะทำหน้าที่กรอง (Filtration) รองรับ (Interception) และดูดซับ (Adsorption) สารแขวนลอยขนาดต่างๆ ทั้งที่เป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ไว้ ทั้งนี้ การลดความเร็วของกระแสน้ำจะช่วยเพิ่มระยะเวลาในการสัมผัส (Contact time) ระหว่างพืชกับมลสารในน้ำ ทำให้พืชสามารถกรองมลสารได้ดีขึ้น เช่นเดียวกับการตกตะกอน ซึ่ง Hares and Ward (2004) ได้ระบุว่ามลสารส่วนที่ถูกกรองไว้โดยเฉพาะสารแขวนลอยขนาดใหญ่ นั้น จะเกิดการตกตะกอนต่อไป ส่วนสารแขวนลอยที่มีขนาดเล็กและเบา อาจถูกกรองและดูดซับติดอยู่กับพื้นผิวของพืชได้เช่นกัน ทั้งนี้ Keskinan et al. (2003) และ Lesage et al. (2007) พบว่าเนื้อเยื่อของพืชในกลุ่มพืชได้น้ำ (*Myriophyllum*

spicatum L.: Spike watermilfoil) มีความสามารถในการดูดซับ (Biosorption) โลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำ โดยเฉพาะโลหะหนักประเภททองแดงและสังกะสี

การตกตะกอนและการกรอง จะส่งผลโดยตรงต่อมลสารที่แขวนลอยในน้ำ ทั้งที่เป็นสารอินทรีย์ 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 effuses* และ *Myosotis scorpiodes*) ขึ้นอยู่อย่างหนาแน่น มีปริมาณลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากมวลชีวภาพของพืชดังกล่าว ช่วยลดความเร็วของกระแส น้ำ ช่วยในการกรอง และทำให้เกิดการตกตะกอนของโลหะหนักและการสะสมในสิ่งมีชีวิต (Bioaccumulation)

กระบวนการทางเคมีในการลดปริมาณโลหะหนักในน้ำที่เกิดขึ้นในระบบบึงประดิษฐ์ ได้แก่ กระบวนการ Oxidation and Hydrolysis และ Precipitation เป็นต้น สำหรับโลหะหนักบางชนิดที่อยู่ในรูปของสารละลายนั้น สามารถเกิดการเปลี่ยนรูปเป็นสารแขวนลอยได้ ภายใต้ปฏิกิริยาการตกตะกอนผลึก (Precipitation) โดยการทำปฏิกิริยาทางเคมีกับออกซิเจน ทั้งนี้ พบว่าออกซิเจนจะทำปฏิกิริยากับสารละลายอนินทรีย์ประเภทเหล็กและแมงกานีส เกิดเป็นสารประกอบเหล็ก (Fe^{3+}) และแมงกานีส (Mn^{4+}) ซึ่งอยู่ในรูปของของแข็งแขวนลอย แล้วจึงเกิดการกรองและการตกตะกอนออกจากน้ำ (Matagi et al., 1998; Hallberg and Johnson, 2005) โดยพืชในระบบบึงประดิษฐ์สามารถส่งเสริมกระบวนการดังกล่าวได้ โดยการลำเลียงออกซิเจนจากอากาศส่งผ่านเซลล์ Aerenchyma ภายในลำต้นลงสู่บริเวณรากซึ่งอยู่ในน้ำ (Stottmeister et al., 2003) จึงเป็นการเพิ่มปริมาณออกซิเจนให้กับบริเวณราก (Rhizosphere) และทำให้เกิดปฏิกิริยาการตกตะกอนผลึกได้ดีขึ้น

นอกจากกระบวนการทางกายภาพและเคมีแล้ว โลหะหนักในน้ำสามารถถูกบำบัดได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ โดยการดูดซับของพืช (Assimilation) ในระบบบึงประดิษฐ์ ซึ่งกระบวนการบำบัดหรือลดความเป็นพิษของมลสารที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมโดยพืช (Phytoremediation) นี้ แม้จะเป็นเทคโนโลยีที่ใช้ระยะเวลาในการบำบัดนานกว่าเทคโนโลยีประเภทอื่น แต่ก็ เป็นวิธีการที่ได้รับการยอมรับในด้านประสิทธิภาพและมีการประยุกต์ใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากการบำบัดด้วยกระบวนการทางธรรมชาติซึ่งไม่ก่อผลกระทบต่อเนื่อง เป็นที่ยอมรับของสาธารณะ และมีราคาถูก โดยเฉพาะเมื่อนำมาใช้ในการลดการปนเปื้อนมลสารในพื้นที่ขนาดใหญ่หรือการบำบัดมลสารที่มีปริมาณมาก (US EPA, 1998; Meagher, 2000; Macek et al., 2000; Raskin et al., 1997; Zhang et al., 2007) ทั้งนี้ พบว่านอกจากการดูดซึมธาตุอาหารแล้ว พืชในระบบบึงประดิษฐ์ ยังสามารถลดปริมาณของโลหะหนักในน้ำได้ โดยการดูดซึมผ่านราก (Sheoran and Sheoran, 2006; Rai et al., 1995) และแม้ว่ารากพืชจะเป็นโครงสร้างหลักในการดูดซับสารละลายประเภทต่างๆ แต่พบว่าพืชในพื้นที่ชุ่มน้ำรวมถึงพืชใน

ระบบบึงประดิษฐ์ประเภทพืชโผล่พ้นน้ำ (Emergent plant) พืชใต้น้ำ (Submerged plant) และพืชที่มีใบลอยที่ผิวน้ำ (Floating leaf plant) นั้น สามารถดูดซึมสารละลายโลหะหนักรวมถึงธาตุอาหารได้ทั้งทางรากและใบ ขณะที่พืชลอยน้ำที่มีรากขนาดเล็กจมอยู่ในน้ำ (Floating plant) จะดูดซึมสารละลายผ่านรากเท่านั้น (Vymazal, 2007; Sriyaraj and Shutes, 2001) ทั้งนี้ Guilizzoni (1991) ได้รายงานถึงความสามารถของรากพืชในการดูดซึมโลหะหนักในตะกอน และการดูดซึมโลหะหนักในน้ำผ่านโครงสร้างส่วนเหนือรากของพืชที่มีรากอยู่ในดิน ซึ่งพบว่าการดูดซึมในส่วนนี้จะเกิดได้มาก เมื่อน้ำมีการปนเปื้อนโลหะหนักในปริมาณมาก ทั้งนี้ การดูดซึมไอออนผ่านรากพืชนั้น อาจเป็นการดูดซึมแบบแพสซีฟ (Passive absorption) ซึ่งเกิดจากความต่างศักย์เคมีไฟฟ้า (Electrochemical potential) ของไอออน ซึ่งหากภายนอกมีค่าสูงกว่าภายในเซลล์ ไอออนนั้นจะเคลื่อนผ่านเซลล์เมมเบรน (Cell membrane) เข้าสู่เซลล์ได้ หรือเกิดจากความต่างศักย์ด้านประจุไฟฟ้า ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของประจุบวกหรือประจุลบเข้าสู่เซลล์เพื่อสะเทินประจุ หรือการดูดซึมอาจเป็นแบบแอกทีฟ (Active absorption) ซึ่งใช้พลังงานจากกระบวนการเมแทบอลิซึม (Metabolism process) ในการเคลื่อนย้ายไอออนผ่านเซลล์เมมเบรน โดยมีตัวลำเลียงไอออนซึ่งมีความจำเพาะกับชนิดของไอออนในการนำไอออนเข้าสู่เซลล์ (มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2541) โดย Arisz (1961) อ้างใน Lu et al. (2004) และ Briggs and Robertson (1997) อ้างใน Sheoran and Sheoran (2006) ระบุว่า การดูดซึมเกลือแร่ของพืชส่วนใหญ่เป็นแบบแพสซีฟ ด้วยการแลกเปลี่ยนไอออนบวก (Ion exchange) ที่ผนังเซลล์ สอดคล้องกับ Edroma (1974) อ้างใน Sheoran and Sheoran (2006) ซึ่งระบุว่า การดูดซึมโลหะหนักของพืชเกิดขึ้นที่ผนังเซลล์เช่นกัน และสามารถพบความเข้มข้นของโลหะหนักในเนื้อเยื่อของพืชในพื้นที่ชุ่มน้ำได้มากถึง 200,000 เท่า ของความเข้มข้นที่พบในสิ่งแวดล้อม และด้วยกลไกการดูดซึมทั้งแบบแพสซีฟและแอกทีฟ ทำให้รากพืชสามารถดูดซึมไอออนได้ตลอดเวลาและเกิดการสะสมของไอออนในเนื้อเยื่อของพืช (มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2541) ส่วนการดูดซึมไอออนผ่านใบนั้น Everard and Denny (1985) ระบุว่า สารละลายโลหะหนักสามารถถูกดูดซึมผ่านทางรอยแตกที่ผิวใบ (Cuticle) หรือปากใบ (Stomata) เข้าสู่ผนังเซลล์ (Cell wall) แล้วจึงเข้าสู่เซลล์เมมเบรน ทั้งนี้ความสามารถของพืชในการดูดซึมไอออนประเภทต่างๆ จะแตกต่างกันขึ้นกับอุณหภูมิ ความเป็นกรดเป็นด่าง สมบัติทางเคมีของดินและน้ำ และองค์ประกอบอินทรีย์สารของวัสดุที่พืชใช้ในการเจริญเติบโต รวมถึงชนิดของพืช อัตราการเจริญเติบโต และความเข้มข้นของโลหะหนักในเนื้อเยื่อของพืชด้วย (Sheoran and Sheoran, 2006; Lewis, 1995)

การดูดซึมมลสารของพืช ทำให้พืชเกิดการสะสมมลสารไว้ (Phytoaccumulation) ในส่วนต่างๆ โดยการสะสมจะเกิดขึ้นเมื่อมลสารที่ถูกดูดซึมไม่ได้ถูกย่อยอย่างรวดเร็วและสมบูรณ์ (Susarla et al., 2002) และพบว่าพืชบางชนิดสามารถสะสมมลสารเช่น โลหะหนักไว้ในเนื้อเยื่อได้ในปริมาณที่สูง (Hyperaccumulation) กับการสะสมตามปกติ (Raskin et al., 1997) ซึ่งการสะสมโลหะหนักที่จัดว่ามีค่าสูงกว่าปกตินั้น Susarla et al. (2002) ระบุว่า ต้องมีค่ามากกว่า 0.01 % ของน้ำหนักแห้งของพืชสำหรับการสะสมแคดเมียม มากกว่า 0.1 % ของน้ำหนักแห้งของพืชสำหรับการสะสมนิกเกิล สังกะสี ทองแดง

และโครเมียม และมากกว่า 1 % ของน้ำหนักแห้งของพืชสำหรับการสะสมแร่ธาตุประเภทเหล็ก และแมงกานีส ซึ่งปริมาณการสะสมมลสารในเนื้อเยื่อส่วนต่างๆ อาจแตกต่างกัน หากมีการสะสมสูงในส่วนเหนือราก มลสารที่สะสมนั้นอาจถูกปลดปล่อยกลับสู่สิ่งแวดล้อมได้จากการย่อยสลายของใบแก่ และการปลดปล่อยผ่านทางต่อมเกลือ (Salt gland) ของพืชบางชนิด อย่างไรก็ตาม การเก็บเกี่ยวพืชออกจากพื้นที่ จะช่วยเคลื่อนย้ายมลสารนั้นออกจากสิ่งแวดล้อมได้อย่างถาวร (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 รากของธูปฤาษี (*Typha angustifolia* L.) สามารถสะสมโลหะหนักได้สูงกว่าใบเช่นกัน อย่างไรก็ตาม การดูดซับอนุภาคละเอียดของโลหะหนักโดยพื้นผิวของโครงสร้างส่วนเหนือรากเป็นระยะเวลานาน อาจทำให้พบปริมาณโลหะหนักสูงในส่วนของลำต้นและใบได้เช่นกัน (Weis and Weis, 2004)

ทั้งนี้ อัตราการบำบัดโลหะหนักโดยพืชนั้นค่อนข้างแตกต่างกันมาก ขึ้นกับอัตราการเจริญเติบโตของพืชและความเข้มข้นของโลหะหนักในเนื้อเยื่อของพืช และพบว่าอัตราการดูดซับโลหะหนักด้วยพืชต่อหน่วยพื้นที่ มักมีค่าสูงในพืชล้มลุกหรือไม้เนื้ออ่อน เช่น ธูปฤาษี ทั้งนี้จะพบว่ากระบวนการบำบัดโลหะหนักที่เกิดขึ้นในพื้นที่ชุ่มน้ำนั้น นอกจากพืชจะเป็นองค์ประกอบหลักในการบำบัดแล้ว พืชยังทำหน้าที่เอื้อให้เกิดสภาพที่เหมาะสมในการบำบัดขององค์ประกอบอื่นในระบบ เช่น จุลินทรีย์ รวมถึงเอื้อต่อการบำบัดด้วยกระบวนการทางกายภาพและเคมีด้วย ซึ่งโดยทั่วไป พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดโลหะหนักของระบบบึงประดิษฐ์ จะสูงกว่าการบำบัดโลหะหนักในพื้นที่ชุ่มน้ำธรรมชาติ (Natural wetland) เนื่องจากการจัดการระบบบึงประดิษฐ์ที่เหมาะสม จะสามารถช่วยให้องค์ประกอบต่างๆ ในระบบ สามารถทำหน้าที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Wieder (1989) ได้รายงานถึงการใช้บึงประดิษฐ์ในการบำบัดน้ำทิ้งจากเหมืองแร่ ซึ่งมีปริมาณเหล็กในน้ำทิ้งประมาณ 250 mg/l และสามารถถูกบำบัดลงเหลือ 3 mg/l ซึ่งประสิทธิภาพในการบำบัดมีความสัมพันธ์โดยตรงกับขนาดของพื้นที่ และมีความสัมพันธ์ผกผันกับระดับความลึกของน้ำในระบบบำบัด

ในรัฐ Ohio, USA ได้มีการใช้บึงประดิษฐ์ขนาด 0.39 ha จำนวน 9 แปลง ในการบำบัดน้ำทิ้งจากเหมืองแร่ ซึ่งพบว่า ความเข้มข้นของเหล็กในน้ำทิ้งได้ลดลงจาก 166 mg/l เหลือเพียง 32 mg/l และพบว่าลำต้นของธูปฤาษีภายในระบบบึงประดิษฐ์ มีปริมาณเหล็กในเนื้อเยื่อ 2.5 mg/g ความเข้มข้นของ

เหล็กในตะกอนดินที่ระดับ 10 cm มีค่าเฉลี่ย 14.3 % ของน้ำหนักแห้ง และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.2 % ของน้ำหนักแห้ง สำหรับตะกอนดินที่ระดับลึกมากกว่า 30 cm (Mitsch and Wise, 1998)

ขณะที่ ระบบบึงประดิษฐ์ ในเมือง Ontario ซึ่งสร้างเสร็จในปี ค.ศ 1996 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ในการบำบัดน้ำฝนไหลบ่าหน้าดิน (Storm water) ซึ่งระบบนี้ใช้ Substrate เป็นดินเหนียว และมีรูปถ่ายเป็นพืชเด่นนั้น พบว่าระบบดังกล่าวมีความสามารถในการบำบัด Total Fe ได้สูงถึง 72 % และบำบัด Dissolved Fe ได้สูงถึง 60 % ทั้งนี้ประสิทธิภาพการบำบัดจะลดลงในช่วงฤดูหนาว (Goulet et al., 2001)

Demirezen and Aksoy (2006) ได้ศึกษาการบำบัดโลหะหนักขององค์ประกอบในบึงธรรมชาติ (Natural wetland) ในตุรกี ซึ่งเป็นแหล่งรับน้ำทิ้งและตะกอนของเสีย ซึ่งพบว่าส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศในพื้นที่ ซึ่งผลการศึกษา พบว่า ความเข้มข้นของเหล็กในรากของรูปถ่ายในพื้นที่ศึกษา มีค่าเท่ากับ $1,040.3 \mu\text{g/g}$ สูงกว่าที่พบในลำต้นและใบ และพบเหล็กในพืชมากกว่าในตะกอนและในน้ำ

Manyin et al. (1997) ได้ศึกษาถึงผลของความเข้มข้นของเหล็กและอัตราไหลของน้ำต่อประสิทธิภาพการบำบัดเหล็กในน้ำทิ้งจากเหมืองแร่ ของระบบบึงประดิษฐ์ ซึ่งพบว่าความเข้มข้นของเหล็กในน้ำที่ผ่านการบำบัดมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความเข้มข้นของเหล็กในน้ำก่อนการบำบัด และอัตราการไหลของน้ำในระบบ และพบว่าหากต้องการให้น้ำที่ผ่านการบำบัดมีความเข้มข้นของเหล็กเท่ากับ 3.5 mg/l ระบบควรมีขนาดในการรองรับเหล็กเท่ากับ $17.0 \text{ g/m}^2/\text{d}$ ในขณะที่ประสิทธิภาพการบำบัดจะลดลง เมื่อภาระบรรทุกเหล็ก (Iron loading) เพิ่มขึ้น

วรชาติ (2547) ได้ทำการศึกษถึงการกำจัดเหล็กในน้ำบาดาลบ่อต้นโดยใช้วัสดุเหลือใช้จากการทำนา โดยศึกษาการบำบัดน้ำบาดาลที่มีเหล็กน้อยกว่า 10 mg/l และน้ำบาดาลที่มีเหล็กมากกว่า 10 mg/l พบว่า ในน้ำบาดาลที่มีเหล็กน้อยกว่า 10 mg/l นั้น แกลบสามารถกรองเหล็กในน้ำบาดาลได้ดีกว่าฟางข้าว โดยแกลบมีค่าประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กเฉลี่ยเท่ากับ 59.25 % ซึ่งมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับทรายกรอง (ค่าเฉลี่ย 70.25 %) และหินเกล็ด (ค่าเฉลี่ย 56.50 %) ในขณะที่ฟางข้าวมีประสิทธิภาพในการกรองเหล็กเพียง 19.00 % ส่วนในน้ำบาดาลที่มีเหล็กมากกว่า 10 mg/l นั้น การเติมอากาศ การดูดซับโดยแกลบและการกรองทำให้ปริมาณเหล็กลดลงเฉลี่ย 10 %, 15 % และ 45 % ตามลำดับ โดยความหนาของแกลบไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดเหล็ก

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

โครงการวิจัยนี้จะทำการศึกษาถึงความเป็นไปได้ และประสิทธิภาพของระบบบึงประดิษฐ์ ในการลดเหล็กในน้ำบาดาล และศึกษาถึงการจัดการระบบบึงประดิษฐ์อย่างเหมาะสม เพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพสูงสุดในการปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาล โดยจะทำการศึกษาถึงระยะเวลาที่ปลูกที่เหมาะสม ในการนำมาใช้ในการดำเนินระบบ ทั้งนี้จะทำการศึกษากาณานิมิตในพื้นที่ศึกษาวิจัยของคณะ เกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร และทำการวิเคราะห์ตัวอย่าง ในห้องปฏิบัติการของภาควิชาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม และคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร โดยมีขั้นตอน วิธีการ วิจัย การเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่าง และการวิเคราะห์ข้อมูล ดังนี้

3.1 การเตรียมหน่วยทดลอง

จัดทำหน่วยทดลอง (Lab scale) ระบบบึงประดิษฐ์ (Constructed wetland) ขนาด กว้าง 0.50 m ยาว 2 m และสูง 0.8 m บรรจุดิน ซึ่งใช้เป็นตัวกลางในการปลูกพืช และเป็นตัวกลางในการบำบัดลงใน แต่ละหน่วยทดลอง จนมีระดับความสูง 70 cm จากก้นแปลง ดัดตั้งทางระบายน้ำเข้า และออกจากแปลง หลังจากนั้น ทำการปลูกธูปฤาษี (*Typha angustifolia*) ลงในหน่วยทดลอง โดยทำการปลูกที่ความหนาแน่น 20 rhizomes/m² แล้วใช้น้ำประปาในการรด จนกระทั่งพืชสามารถปรับตัวและเติบโตได้ในระบบ (ภาพที่ 3.1)



ภาพที่ 3.1 หน่วยทดลองระบบบึงประดิษฐ์

3.2 การดำเนินการทดลอง

เมื่อพืชในหน่วยทดลอง สามารถปรับตัวและเจริญเติบโตได้ จนมีความสูงประมาณ 20 cm จึงทำการระบายน้ำประปาลงสู่หน่วยทดลองอย่างต่อเนื่อง โดยให้น้ำในระบบมีความสูงเท่ากับ 10 cm จากระดับผิวน้ำวัสดุปลูก (Water depth) ด้วยอัตราการไหล 200, 100 และ 50 l/d ซึ่งจะทำให้มีระยะการกักกักน้ำในระบบ (Hydraulic retention time: HRT) เท่ากับ 0.5, 1 และ 2 d ดำเนินการเป็นระยะเวลา 1-2 wk เพื่อให้พืชได้ปรับสภาพภายใต้ระบบน้ำท่วมขัง จากนั้นทำการตัดพืชให้มีความสูง 15 cm (ภาพที่ 3.2) แล้วจึงระบายน้ำบาดาลที่สูบจากบ่อบาดาลของเกษตรกรที่ทำการขุดเจาะไว้เพื่อใช้น้ำในการเกษตร ซึ่งเป็นน้ำบาดาลที่มีเหล็กปนเปื้อน ลงสู่หน่วยทดลองแทนน้ำประปา และดำเนินการในลักษณะเดียวกันอย่างต่อเนื่อง เป็นระยะเวลา 10 wk ทั้งนี้ได้ดำเนินการในลักษณะเดียวกันนี้กับหน่วยควบคุม (Control unit) ซึ่งเป็นหน่วยทดลองที่ไม่ได้ทำการปลูกพืชลงในระบบ

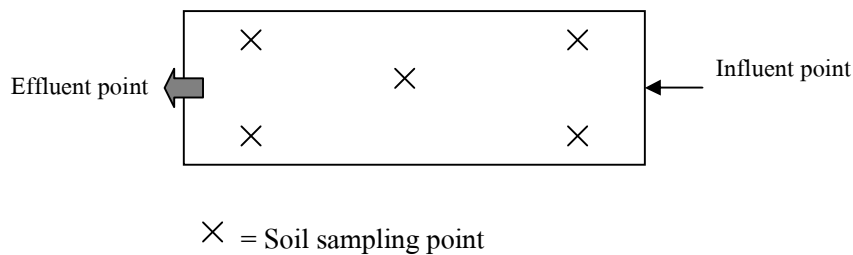


ภาพที่ 3.2 การเก็บเกี่ยวพืชก่อนการระบายน้ำบาดาลลงสู่ระบบ

3.3 การเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่าง

3.3.1 การเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่างดิน

เก็บตัวอย่างดิน (วัสดุปลูก) ในหน่วยทดลอง ก่อนการระบายน้ำบาดาลลงสู่หน่วยทดลอง และเมื่อสิ้นสุดการดำเนินระบบ โดยทำการเก็บตัวอย่างดินในแต่ละหน่วยทดลอง ในลักษณะ Composite sample จาก 5 จุดเก็บ (ภาพที่ 3.3) จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้มาทำการวิเคราะห์ ค่า pH, Mn และ Fe ในห้องปฏิบัติการ

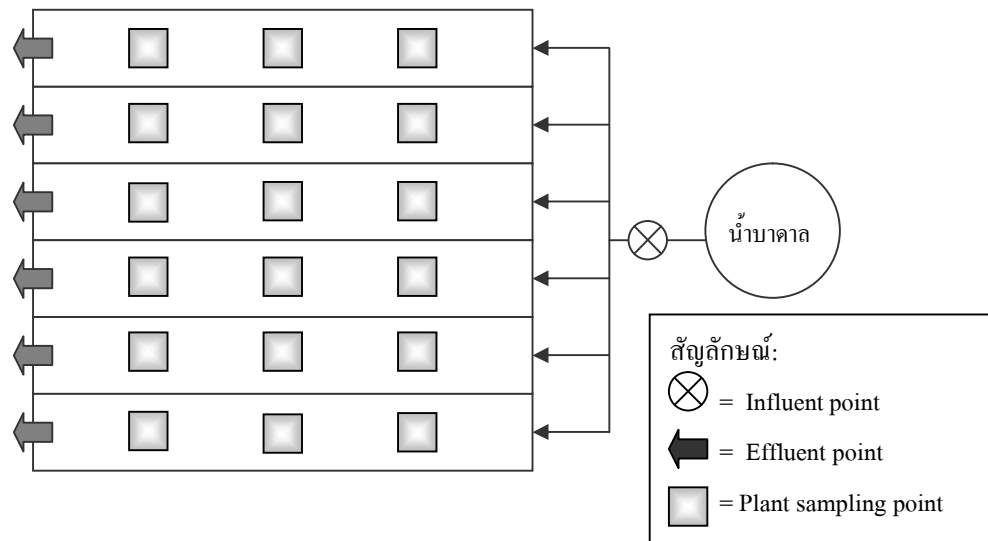


ภาพที่ 3.3 จุดเก็บตัวอย่างดิน (Soil sampling point) ในแต่ละหน่วยทดลอง

3.3.2 การเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ

ภายหลังการระบายน้ำบาดาลลงสู่หน่วยทดลอง เป็นระยะเวลา 1-2 wk จึงเริ่มทำการเก็บตัวอย่างน้ำที่ระบายเข้าสู่ระบบ (Influent) และเก็บตัวอย่างน้ำที่ผ่านการบำบัดภายในระบบ (Effluent) จากจุดระบายน้ำออก (ภาพที่ 3.4) ภายหลังจากน้ำบาดาลได้ถูกกักพักภายในระบบ ตามข้อกำหนดการศึกษา คือ 0.5, 1 และ 2 d ทั้งนี้ ได้ดำเนินการเก็บตัวอย่างน้ำเป็นประจำทุกสัปดาห์ ตลอดระยะเวลาดำเนินระบบ

นำตัวอย่างน้ำที่ได้ ไปทำการวิเคราะห์ค่าดัชนีคุณภาพน้ำตามที่ระบุในตารางที่ 3.1 โดยบางดัชนีได้ทำการตรวจวัดในภาคสนาม ณ จุดเก็บตัวอย่าง และบางดัชนีได้ทำการตรวจวัดภายในห้องปฏิบัติการ โดยใช้วิธีการในการเก็บตัวอย่าง รักษาตัวอย่าง และวิธีการวิเคราะห์ตัวอย่าง ตามที่ได้กำหนดไว้ใน Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA, WPCF, 1992)



ภาพที่ 3.4 จุดเก็บตัวอย่างน้ำ (Influent-Effluent point) และพืช (Plant sampling point)

ตารางที่ 3.1 ดัชนีคุณภาพน้ำที่ทำการตรวจวัด และเครื่องมือหรือวิธีการในการวิเคราะห์

ดัชนีคุณภาพน้ำ	หน่วย	เครื่องมือ/วิธีการวิเคราะห์
TDS	mg/L	Multiprobe water analysis
DO	mg/L	Membrane electrode meter (DO meter)
EC	$\mu\text{S}/\text{cm}$	Conductivity meter
pH	-	Electrometric method (pH meter)
Eh	V	Electrode method
Temperature	$^{\circ}\text{C}$	Thermometer
Dissolved Fe	mg/L	Atomic Absorption Spectroscopy (AAS)
Total Fe	mg/L	Atomic Absorption Spectroscopy (AAS)
Dissolved Mn	mg/L	Atomic Absorption Spectroscopy (AAS)
Total Mn	mg/L	Atomic Absorption Spectroscopy (AAS)
HRT	day	Tracer test

3.3.3 การเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่างพืช

ทำการเก็บพืชก่อนการระบายน้ำบาดาลลงสู่ระบบและภายหลังเสร็จสิ้นการดำเนินระบบ โดยทำการตัดพืชที่ระดับ 15 cm เหนือวัสดุปลูก ภายในแปลงเก็บตัวอย่างพืช ขนาด 0.25 m² จำนวน 3 sampling point/plot (ภาพที่ 3.4) นำตัวอย่างพืชที่ได้มาทำการวิเคราะห์หาปริมาณเหล็ก น้ำหนักแห้ง ปริมาณแมงกานีส (Mn) และปริมาณเหล็ก (Fe) ในส่วนต่างๆ ของพืช ภายในห้องปฏิบัติการ ด้วยวิธีการ ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 เครื่องมือหรือวิธีการในการวิเคราะห์พืช

ดัชนีที่ตรวจวัด	หน่วย	เครื่องมือ/วิธีวิเคราะห์
Fresh weight	kg	Weighting
Dry weight	kg	Drying method and Weighting
Mn	mg/kg	Atomic Absorption Spectroscopy (AAS)
Fe	mg/kg	Atomic Absorption Spectroscopy (AAS)

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

3.4.1 การปรับปรุงคุณภาพน้ำและสมการในการคาดการณ์ประสิทธิภาพของระบบ

นำผลการตรวจวัดมาทำการวิเคราะห์ถึงประสิทธิภาพของระบบในการลดปริมาณ แมงกานีส และเหล็กในน้ำ โดยวิเคราะห์ในรูปร้อยละของการบำบัดแมงกานีส (Mn removal) และเหล็ก (Fe removal) และความเข้มข้นของแมงกานีส (Mn concentration) และเหล็ก (Fe concentration) ใน น้ำบาดาลภายหลังการบำบัด เปรียบเทียบประสิทธิภาพ และความแตกต่างทางสถิติในการบำบัด แมงกานีสและเหล็กของแต่ละระยะกักพัก (HRT) และทำการวิเคราะห์สมการในการคาดการณ์ ประสิทธิภาพของระบบบึงประดิษฐ์ในการบำบัดแมงกานีส และเหล็กในน้ำบาดาล

3.4.2 กระบวนการบำบัดแมงกานีสและเหล็กของระบบ

วิเคราะห์ถึงปัจจัยที่มีผลในการบำบัดแมงกานีสและเหล็กของระบบ ทั้งกระบวนการ ทางด้านกายภาพ กระบวนการทางเคมี และกระบวนการทางชีวภาพโดยการลดด้วยการดูดซับด้วยส่วน ต่างๆ ของพืช ประสิทธิภาพในการดูดซับแมงกานีสและเหล็กของพืช และความแตกต่างทางสถิติของ การดูดซับแมงกานีสและเหล็กด้วยส่วนต่างๆ ของพืช

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ผลของระยะกักพักต่อประสิทธิภาพในการบำบัดแมงกานีสและเหล็กในน้ำบาดาล

4.1.1 ลักษณะน้ำบาดาลก่อนการปรับปรุงคุณภาพ

น้ำบาดาลที่ทำการศึกษา เป็นน้ำจากบ่อบาดาลที่เกษตรกรขุดขึ้นเพื่อใช้ในการเกษตรกรรม ผลการตรวจวัดคุณภาพน้ำ พบว่าน้ำบาดาลก่อนบำบัดมีค่า Temp, pH, DO, EC, TDS, Total Mn และ Total Fe เท่ากับ 25.0-30.1 °C, 6.7-8.9, 2.6-3.6 mg/l, 203.0-249.0 µS/cm, 102.0-123.0 mg/l, 1.03-5.32 mg/l และ 0.57-19.46 mg/l ตามลำดับ (ตารางที่ 4.1) ทั้งนี้ พบว่าน้ำบาดาลก่อนการปรับปรุงคุณภาพ มีค่า pH ค่อนข้างเป็นกลาง มีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำเล็กน้อย เนื่องจากเป็นน้ำที่สูบจากใต้ดิน อย่างไรก็ตาม น้ำจะได้รับออกซิเจนเพิ่มเติมเมื่อน้ำได้สัมผัสกับอากาศขณะที่ถูกสูบขึ้นสู่ผิวดิน

เมื่อเปรียบเทียบคุณภาพน้ำบาดาลกับค่ามาตรฐานน้ำผิวดินในแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 3 ซึ่งจัดเป็นแหล่งน้ำที่ได้รับน้ำทั้งจากกิจกรรมบางประเภท และสามารถใช้เป็นประโยชน์เพื่อการอุปโภคและบริโภคโดยไม่ต้องผ่านการฆ่าเชื้อโรคตามปกติและผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำทั่วไปก่อน และสามารถใช้ในการเกษตรกรรม ตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 8 (พ.ศ.2537) ออกตามความในพระราชบัญญัติส่งเสริม และรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่ม 111 ตอนที่ 16 ง ลงวันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2537 (กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม, 2547) จะพบว่า น้ำบาดาลก่อนการปรับปรุงคุณภาพมีค่า Temp เป็นไปตามสภาพธรรมชาติและไม่สูงกว่าอุณหภูมิตามธรรมชาติเกิน 3 °C มีค่า pH อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำผิวดินที่สามารถใช้ในการเกษตรกรรม ซึ่งกำหนดให้มีค่า pH ระหว่าง 5-9 และมีค่าใกล้เคียงกับค่า pH ในน้ำชลประทานที่พบโดยทั่วไป ซึ่งมีค่าระหว่าง 6.5-8.4 (Ayers and Westcot, 1994) มีค่า DO ต่ำกว่าค่าที่กำหนดไว้สำหรับน้ำผิวดินประเภทที่ 3 ซึ่งกำหนดให้มีค่าไม่ต่ำกว่า 4 mg/l ทั้งนี้เนื่องจากเป็นน้ำที่สูบขึ้นจากใต้ดินจึงมีค่าต่ำ แต่อย่างไรก็ตาม พบว่าค่า DO เฉลี่ยของน้ำบาดาล มีค่าสูงถึง 2.97 mg/l ซึ่งเกิดจากระบวนการเติมออกซิเจนเมื่อน้ำได้สัมผัสกับอากาศ การตรวจวัดค่า EC และ TDS ของน้ำบาดาล ซึ่งแสดงถึงการมีสารที่แตกตัวให้อิออน และมีของแข็งละลายน้ำปะปนอยู่ในน้ำบาดาลนั้น พบว่า น้ำบาดาลก่อนการปรับปรุงมีค่า EC และ TDS ในปริมาณใกล้เคียงกับค่า EC และ TDS ที่พบในน้ำผิวดิน ซึ่งมีค่าระหว่าง 150-300 µS/cm และ 100-200 mg/l (ประเทือง, 2534) และอยู่ในเกณฑ์ปกติที่พบในน้ำชลประทาน ซึ่งจะมีค่าของ EC และ TDS ระหว่าง 0-3,000 µS/cm และ 0-2,000 mg/l (Ayers and Westcot, 1994) น้ำบาดาลก่อนปรับปรุงคุณภาพ มีค่าของ Total Mn สูงกว่าค่าสูงสุดของ Total Mn ที่กำหนดในแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 3 (1 mg/l) และสูงกว่าเกณฑ์ที่ยอมให้มีในน้ำชลประทาน ซึ่งกำหนดให้น้ำชลประทานไม่ควรจะมี Total Mn สูงกว่า 0.2 mg/l

เนื่องจาก Mn อาจเป็นพิษต่อพืชได้โดยเฉพาะในพื้นที่ที่เป็นดินกรด (Ayers and Westcot, 1994) ในกรณีของข้าวนั้น หากข้าวได้รับ Mn มากเกินไป ใบแก่จะเกิดจุดสีน้ำตาล ปลายใบแห้ง เมล็ดลีบ และเจริญเติบโตไม่ดีเท่าที่ควร (ประพาส, 2537) ปริมาณ Total Fe ในน้ำบาดาลก่อนการปรับปรุงมีค่าสูงกว่าค่าที่ยอมรับได้ในน้ำชลประทาน ซึ่งกำหนดให้น้ำชลประทานไม่ควรจะมี Total Fe สูงกว่า 5.0 mg/l เนื่องจาก Fe สามารถส่งผลทำให้ดินเป็นกรด และสูญเสียปริมาณฟอสฟอรัสและโมลิบดีนัมที่เป็นประโยชน์ (Ayers and Westcot, 1994) นอกจากนี้ ความเข้มข้นของ Fe ในดินที่สูง จะส่งผลทำให้การดูดโพแทสเซียมของข้าวลดลง โดยความเป็นพิษของ Fe นี้ มักเกิดขึ้นกับข้าว ซึ่งเป็นพืชที่ปลูกในสภาพน้ำท่วมขัง (ประพาส, 2537)

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของน้ำบาดาล

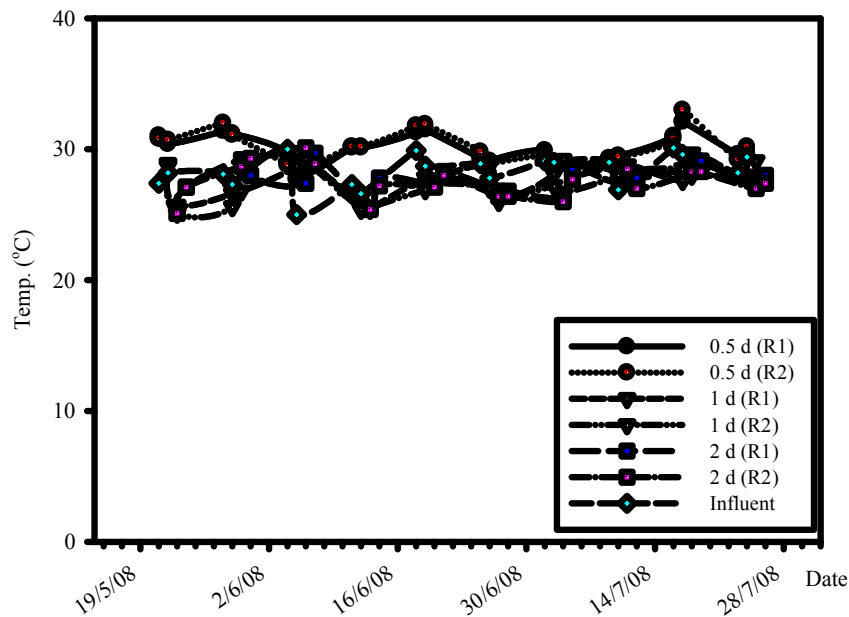
Indicators	Unit	Ground water characteristics or Influent concentration ^{1/}
Temperature	°C	28.3±1.3 (20)
pH	-	7.40±0.7 (17)
DO	mg/l	2.97±0.4 (8)
EC	µS/cm	217.6±10.0 (20)
TDS	mg/l	108.8±4.7 (20)
Total Fe	mg/l	5.21±4.4 (40)
Dissolved Fe	mg/l	1.87±3.2 (40)
Total Mn	mg/l	3.27±1.2 (40)
Dissolved Mn	mg/l	1.73±0.7 (40)

Note: ^{1/} Mean±SD are shown and sample size (n) are in parenthesis.

4.1.2 คุณสมบัติของน้ำบาดาลหลังการปรับปรุงคุณภาพและประสิทธิภาพการบำบัดของระบบ

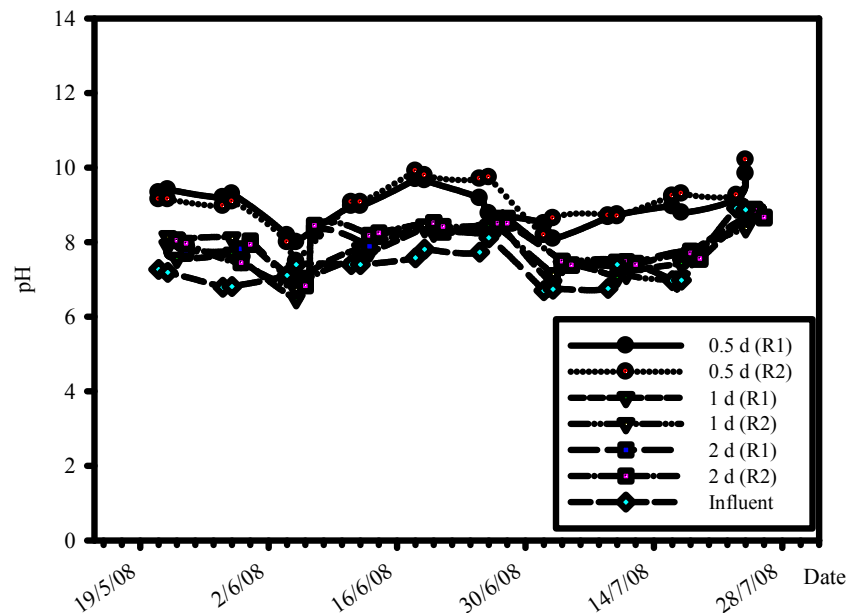
1) คุณสมบัติของน้ำบาดาลหลังการปรับปรุงคุณภาพ

ผลการตรวจวัดคุณภาพน้ำบาดาลหลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยระบบบึงประดิษฐ์ตลอดระยะเวลาที่ทำการศึกษา พบว่า น้ำบาดาลมีอุณหภูมิ ระหว่าง 25.1-33.0°C (ภาพที่ 4.1) ทั้งนี้ อุณหภูมิของน้ำบาดาลก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพไม่แตกต่างกันนัก เนื่องจากน้ำบาดาลก่อนการปรับปรุงคุณภาพได้ถูกสูบขึ้นมาสัมผัสกับอุณหภูมิอากาศเป็นระยะเวลาหนึ่งก่อนการบำบัด ซึ่งอุณหภูมิของน้ำบาดาลทั้งก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพ จะมีการผันแปรตามอุณหภูมิอากาศในพื้นที่ในขณะนั้นเป็นหลัก



ภาพที่ 4.1 Temperature ของน้ำบาดาล ก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพ

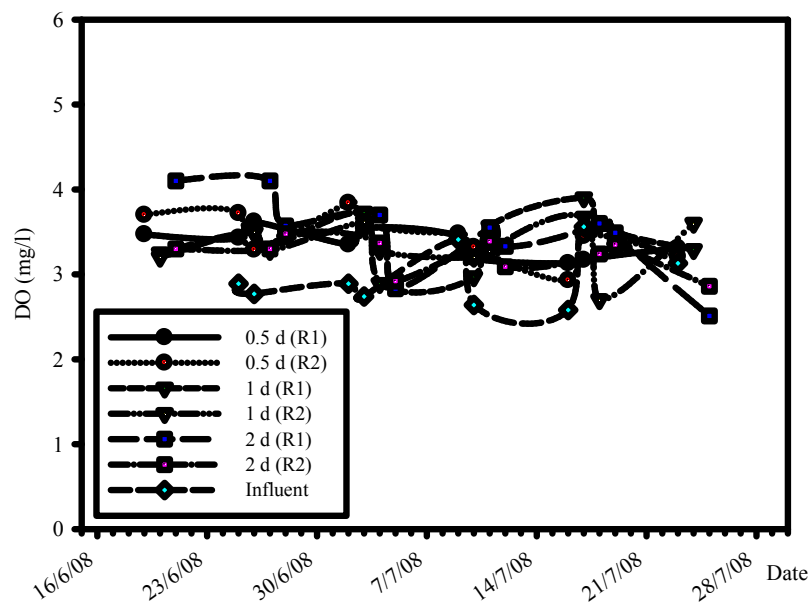
ค่า pH ของน้ำบาดาลหลังการปรับปรุงคุณภาพ มีค่าระหว่าง 6.5-10.2 (ภาพที่ 4.2) โดยมีค่าเฉลี่ยสูงกว่า ค่า pH เฉลี่ยของน้ำบาดาลก่อนการปรับปรุงคุณภาพ ($\text{pH} = 7.4$) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งค่าเฉลี่ยของ pH ของน้ำบาดาลหลังการปรับปรุงคุณภาพ ($\text{pH} = 7.8\text{-}9.0$) มีค่าอยู่ในเกณฑ์อนุโลมสูงสุดของมาตรฐานน้ำบาดาลที่ใช้บริโภค ซึ่งกำหนดให้มีความระหว่าง 6.5-9.2 และมีค่าใกล้เคียงกับค่า pH ของน้ำชลประทานซึ่งโดยทั่วไปมีความระหว่าง 6.5-8.4 (Ayers and Westcot, 1994) และยังพบว่า น้ำบาดาลหลังการปรับปรุงคุณภาพจากทุกหน่วยทดลองที่ทำการศึกษา มีค่า pH โดยส่วนใหญ่สูงกว่า ค่า pH ของน้ำบาดาลก่อนการปรับปรุงคุณภาพตลอดระยะเวลาที่ทำการศึกษา (ภาพที่ 4.2) โดยน้ำบาดาลที่ถูกกักพักในระบบที่มีระยะกักพัก 0.5 day มีค่าเฉลี่ยของ pH สูงสุด ($\text{pH} = 9.0$) รองลงมาคือน้ำบาดาลที่ถูกกักพักในระบบที่มีระยะกักพัก 2 day ($\text{pH} = 8.0$) และ 1 day ($\text{pH} = 7.8$) ตามลำดับ การเพิ่มขึ้นของค่า pH ของน้ำเป็นผลจากกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชน้ำที่เจริญเติบโตในระบบ ซึ่งทำให้ CO_2 อุดมในน้ำลดลง และส่งผลให้ค่า pH เพิ่มขึ้น (ประเทือง, 2534) นอกจากนั้น การสังเคราะห์แสงของพืชน้ำยังเป็นการเพิ่มออกซิเจนให้กับน้ำ และจะทำให้ค่า DO ของน้ำมีค่าสูงขึ้นด้วย ซึ่งพบว่าสัมพันธ์กับค่า DO ที่ตรวจวัดได้



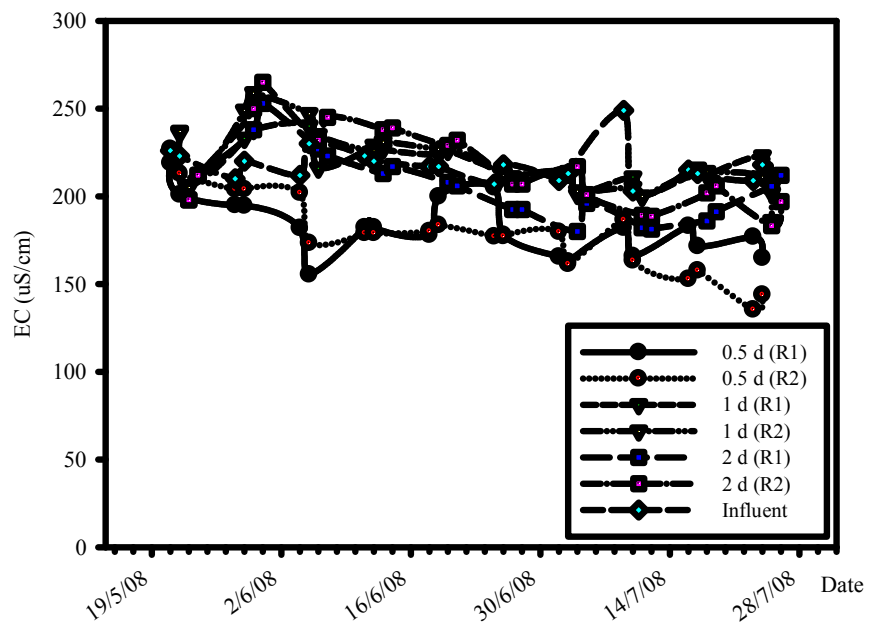
ภาพที่ 4.2 pH ของน้ำบาดาล ก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพ

ค่า DO ในน้ำบาดาลหลังการปรับปรุงคุณภาพ มีค่าสูงขึ้นและมีค่าแตกต่างกันทางสถิติ ($P < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยของค่า DO ในน้ำบาดาลก่อนปรับปรุงคุณภาพ โดยมีค่า 2.5-4.1 mg/l (ภาพที่ 4.3) ทั้งนี้ เนื่องจากน้ำได้รับออกซิเจนเพิ่มเติมจากออกซิเจนในอากาศเมื่อน้ำมีการสัมผัสกับอากาศ นอกจากนั้น การสังเคราะห์แสงของพืชน้ำในระบบยังเป็นปัจจัยหลักในการเพิ่มออกซิเจนให้กับน้ำ ทั้งนี้ พบว่าค่าเฉลี่ยของ DO ของน้ำบาดาลที่ถูกกักพักในระบบที่มีระยะกักพัก 0.5 day มีค่าสูงสุด ซึ่งมีความสัมพันธ์และเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการเพิ่มขึ้นของค่า pH ของน้ำบาดาล

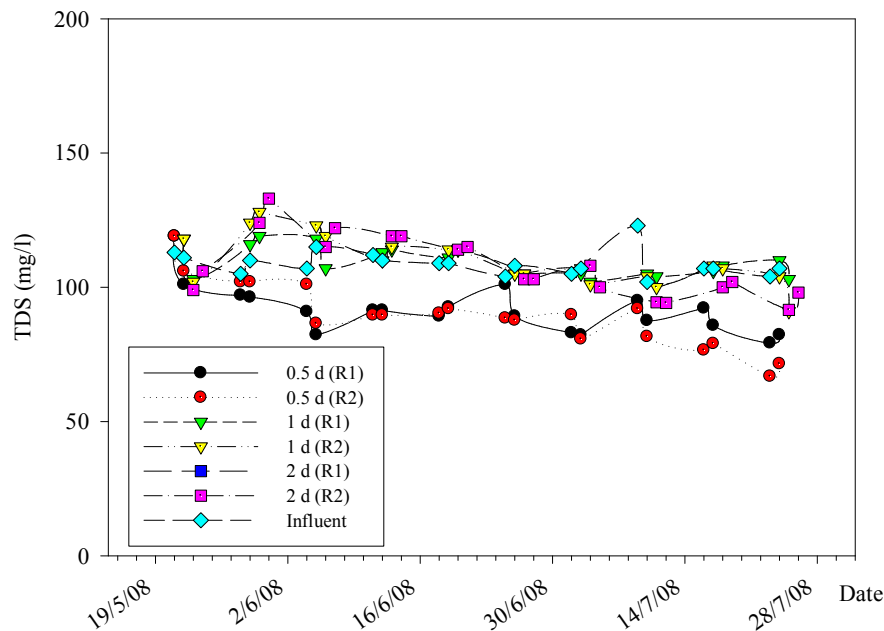
ค่า EC ของน้ำบาดาลหลังการปรับปรุงคุณภาพ มีค่าระหว่าง 135.4-265.0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (ภาพที่ 4.4) ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่พบได้ในน้ำผิวดินทั่วไปและในน้ำสำหรับการชลประทาน ทั้งนี้ หากน้ำมีค่า EC สูงกว่า 3,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ หรือมีค่า TDS สูงกว่า 2,000 mg/l จะหมายถึงการมีสารละลายอนินทรีย์ปะปนอยู่ในน้ำในปริมาณสูง และไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้เพื่อการชลประทาน (Ayers and Westcot, 1994) ผลการศึกษาพบว่า ค่า EC ของน้ำบาดาลที่ถูกกักพักในระบบที่มีระยะกักพัก 1 day มีค่าเฉลี่ยสูงสุด และไม่แตกต่างกับค่าเฉลี่ย EC ของน้ำบาดาลก่อนการปรับปรุงคุณภาพ โดย EC ของน้ำบาดาลที่ถูกกักพักในระบบที่มีระยะกักพัก 0.5 day มีค่าเฉลี่ยต่ำสุดและแตกต่างกับค่า EC ของน้ำบาดาลก่อนการปรับปรุงคุณภาพ และ ค่า EC ของ น้ำบาดาลที่ถูกกักพักในระบบที่ระยะกักพักอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) และเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับค่าของ TDS ซึ่งพบว่ามีค่าเฉลี่ยต่ำสุดในน้ำบาดาลที่ถูกกักพักในระบบที่มีระยะกักพัก 0.5 day และแตกต่างจากค่า TDS ของน้ำบาดาลก่อนการปรับปรุงคุณภาพ และค่า TDS ของน้ำบาดาลที่ถูกกักพักในระบบที่ระยะกักพักอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) โดยค่า TDS ในน้ำบาดาลหลังการปรับปรุงคุณภาพมีค่า 66.8-133.0 mg/l (ภาพที่ 4.5)



ภาพที่ 4.3 DO ของน้ำบาดาล ก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพ



ภาพที่ 4.4 EC ของน้ำบาดาล ก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพ

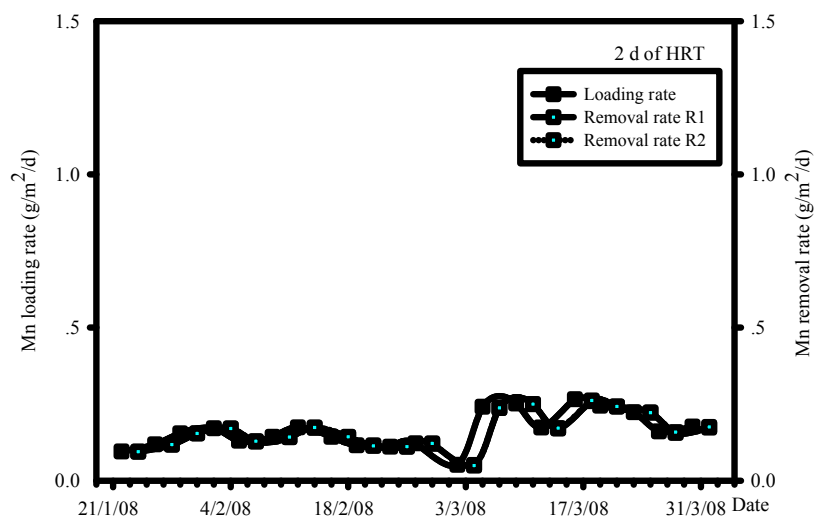
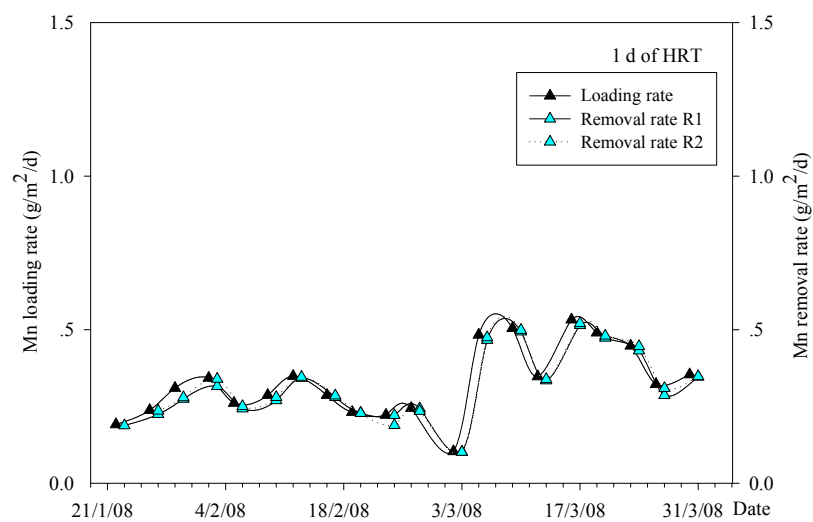
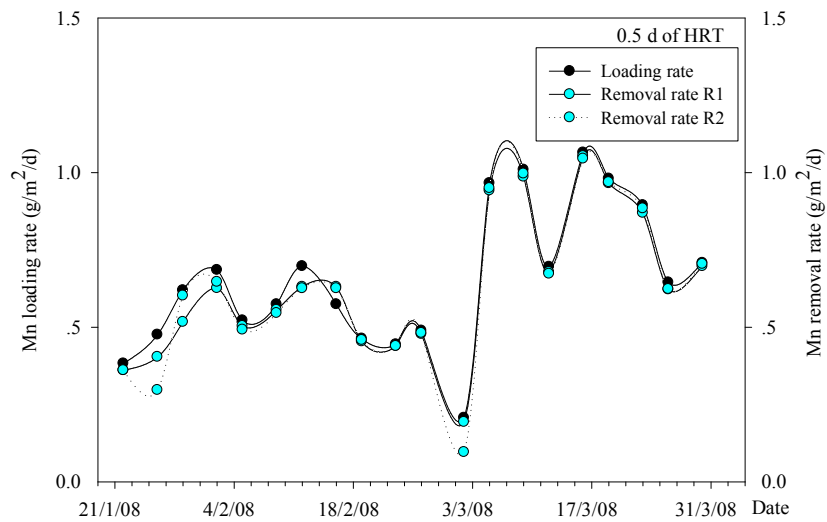


ภาพที่ 4.5 TDS ของน้ำบาดาล ก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพ

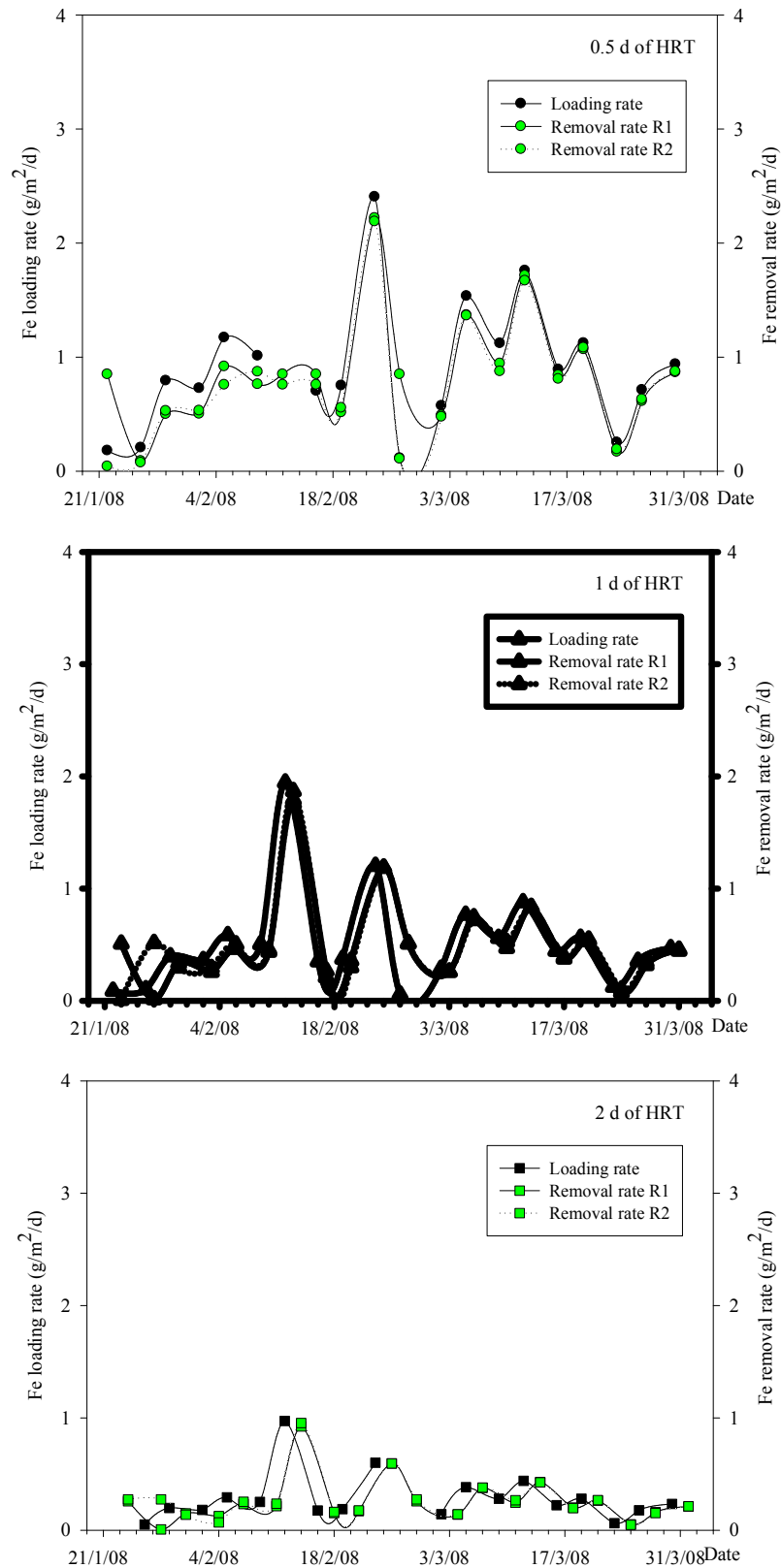
2) การบำบัดเหล็ก และแมงกานีส

น้ำจากบ่อบาดาลซึ่งมีค่า Total Mn และ Total Fe ปนเปื้อนในน้ำ ระหว่าง 1.03-5.32 mg/l และ 0.57-19.46 mg/l (ตารางที่ 4.1) ถูกระบายลงสู่ระบบบึงประดิษฐ์ ด้วยอัตราภาระทางชลศาสตร์ (Hydraulic loading rate: HLR) เท่ากับ 200, 100 และ 50 l/d ซึ่งทำให้น้ำบาดาลมีระยะการกักพักภายในระบบ (Hydraulic retention time: HRT) เท่ากับ 0.5, 1 และ 2 day ตามลำดับ จากค่าความเข้มข้นของ Total Mn และ Total Fe และอัตราการไหลของน้ำเข้าสู่ระบบ ทำให้ระบบบึงประดิษฐ์ มีอัตราการรองรับ Total Mn และ Total Fe เท่ากับ 0.052-1.065 g/m²/d และ 0.052-2.405 g/m²/d โดยระบบบึงประดิษฐ์ที่ทำการปรับปรุงคุณภาพน้ำที่ระยะกักพัก 0.5, 1 และ 2 day มีอัตราการรองรับ Total Mn เฉลี่ยเท่ากับ 0.656, 0.331 และ 0.166 g/m²/d ตามลำดับ (ภาพที่ 4.6) และมีอัตราการรองรับ Total Fe เฉลี่ยเท่ากับ 0.941, 0.571 และ 0.292 g/m²/d ตามลำดับ (ภาพที่ 4.7)

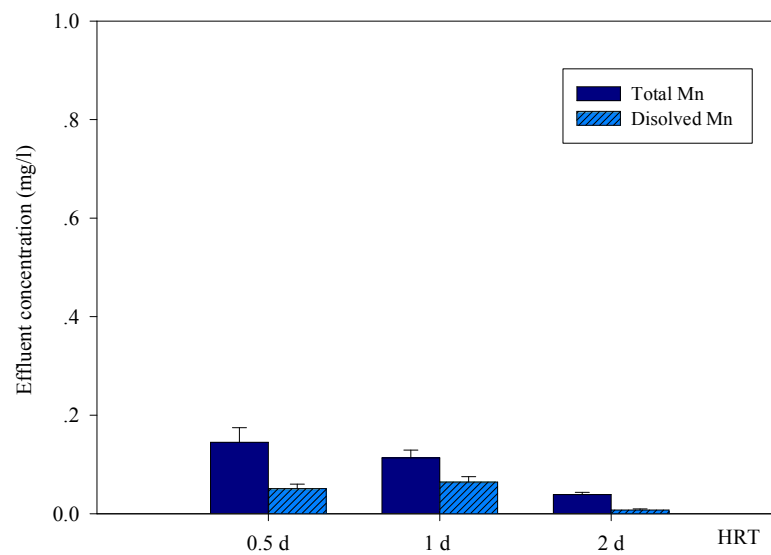
น้ำบาดาลภายหลังการปรับปรุงคุณภาพน้ำ มีปริมาณการปนเปื้อน Total Mn และ Total Fe ลดลง โดยพบ Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาลภายหลังการบำบัดเท่ากับ 0.005-0.897 mg/l และ 0.027-2.236 mg/l ทั้งนี้พบ Mn และ Fe ในรูปของ Dissolved Mn และ Dissolved Fe เท่ากับ 0-0.292 mg/l และ 0-1.337 mg/l โดยน้ำบาดาลที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพน้ำที่ระยะกักพัก 0.5, 1 และ 2 day มี Total Mn ปนเปื้อน เฉลี่ยเท่ากับ 0.145, 0.113 และ 0.039 mg/l ตามลำดับ (ภาพที่ 4.8) ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำผิวดินประเภทที่ 3 (Total Mn ≤ 1 mg/l) และอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดให้มีได้ในน้ำชลประทาน (Total Mn ≤ 0.2 mg/l) และพบว่า น้ำบาดาลที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพที่ระยะกักพัก 0.5, 1 และ 2 day มีค่า Total Fe ปนเปื้อนเฉลี่ย 0.700, 0.578 และ 0.512 mg/l ตามลำดับ (ภาพที่ 4.9) ซึ่ง



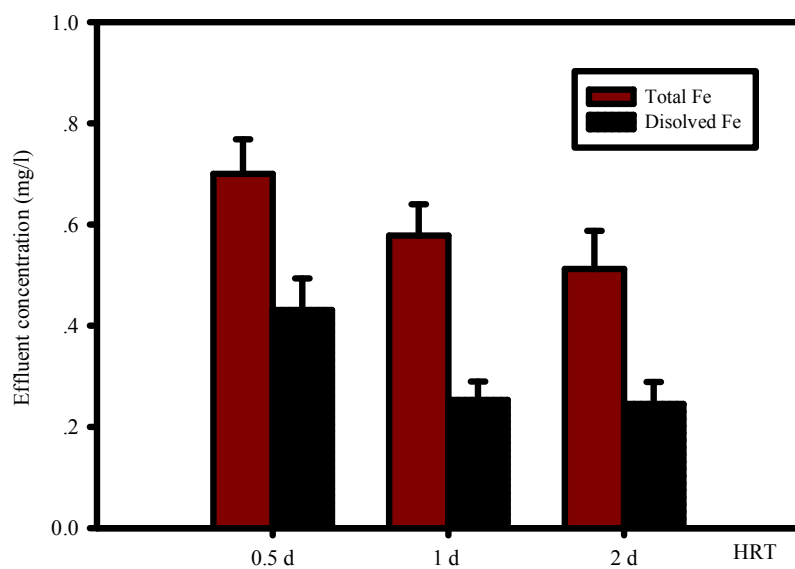
ภาพที่ 4.6 อัตราการรองรับและอัตราการบำบัด Mn ของระบบบึงประดิษฐ์



ภาพที่ 4.7 อัตราการรองรับและอัตราการบำบัด Fe ของระบบบึงประดิษฐ์



ภาพที่ 4.8 ความเข้มข้นของ Mn ในน้ำบาดาลที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ



ภาพที่ 4.9 ความเข้มข้นของ Fe ในน้ำบาดาลที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ

อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดให้มีได้ในน้ำชลประทาน ($\text{Total Fe} \leq 5.0 \text{ mg/l}$) ทั้งนี้ พบว่า ความเข้มข้นของ Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาลหลังการปรับปรุงคุณภาพที่ระยะกักพักต่างๆ มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ อย่างไรก็ตาม เมื่อเทียบกับค่าความเข้มข้นของ Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาลก่อนการปรับปรุงคุณภาพ จะพบว่ามีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

จากผลการศึกษา พบว่าระบบบึงประดิษฐ์ที่ทำการศึกษามีประสิทธิภาพในการลด Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาลสูงกว่าระบบควบคุม และสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) โดยเฉพาะประสิทธิภาพในการลด Total Mn ในน้ำบาดาล ซึ่งพบว่าบึงประดิษฐ์มีประสิทธิภาพในการลดความเข้มข้นของ Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาล เท่ากับ 46.42-99.84 และ 9.02-98.89 % (ตารางที่ 4.2) โดยการปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาลที่ระยะกักพัก 2 day มีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดความเข้มข้นของ Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาล

ระบบมีอัตราการบำบัด Total Mn และ Total Fe เท่ากับ 0.050-1.053 $\text{g/m}^2/\text{d}$ (ภาพที่ 4.6) และ 0.008-2.219 $\text{g/m}^2/\text{d}$ (ภาพที่ 4.7) ทั้งนี้ พบว่า การกักพักน้ำที่ระยะกักพัก 0.5 day มีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดปริมาณ Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาล ต่อพื้นที่ต่อช่วงเวลาเท่ากัน และพบว่าประสิทธิภาพแตกต่างจากการบำบัดที่ระยะกักพัก 1 และ 2 day อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ดังตารางที่ 4.2 ดังนั้น การปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาลโดยการลดปริมาณ Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาล ด้วยการกักพักน้ำในระบบบึงประดิษฐ์ที่ระยะกักพักเท่ากับ 0.5 day จึงเป็นระยะกักพักที่เหมาะสมในการปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาล เนื่องจากเป็นระยะกักพักที่มีอัตราการบำบัด Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาล ต่อพื้นที่ต่อช่วงเวลาเท่ากัน สูงกว่าการบำบัดที่ระยะกักพัก 1 และ 2 day อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ นอกจากนี้ ยังพบว่าการปรับปรุงคุณภาพน้ำที่ระยะกักพัก 0.5 day ทำให้น้ำบาดาลมีปริมาณ Total Fe เหลือปนเปื้อนในน้ำ ไม่แตกต่างจากการปรับปรุงคุณภาพที่ระยะกักพักอื่นที่ใช้ระยะเวลายาวนานกว่าในการบำบัด ซึ่งการปรับปรุงคุณภาพน้ำด้วยระยะการกักพักน้ำที่ใช้ระยะเวลายาวนาน อาจทำให้ได้ปริมาณน้ำภายหลังการปรับปรุงคุณภาพไม่เพียงพอต่อการนำไปใช้ในการทำการเกษตรหรือทำนา ซึ่งเป็นกิจกรรมที่ต้องการน้ำในปริมาณมาก

ตารางที่ 4.2 ประสิทธิภาพของระบบบึงประดิษฐ์ในการบำบัด Total Fe และ Total Mn

Designed HRT (d)	Total Fe removal						Total Mn removal					
	Treatment efficiency (%)		AAR (g/m ² /d)		FOR (m/d)		Treatment efficiency (%)		AAR (g/m ² /d)		FOR (m/d)	
	CW system	Control system	CW system	Control system	CW system	Control system	CW system	Control system	CW system	Control system	CW system	Control system
0.5	79.21A (33)	61.49Bb (15)	0.801a (33)	0.733a (15)	0.381Aa (33)	0.231Ba (15)	93.98Ab (36)	70.26Bb (18)	0.628Aa (36)	0.483Ba (20)	0.695Aa (36)	0.293Ba (18)
1	83.18 (36)	72.73ab (16)	0.513Ab (36)	0.190Bb (16)	0.229b (36)	0.181ab (16)	96.44Aab (39)	70.98Bb (9)	0.320Ab (39)	0.160Bb (9)	0.373Ab (39)	0.151Bb (9)
2	86.37 (35)	89.62a (10)	0.267Ac (35)	0.118Bb (10)	0.128c (35)	0.129b (10)	98.82Aa (38)	98.31Ba (9)	0.165c (38)	0.139b (9)	0.234Ac (38)	0.144Bb (9)

Note: Mean values within each row followed by the same letter (large letter) are not significantly different at $P \geq 0.05$.

Mean values within each column followed by the same letter (small letter) are not significantly different at $P \geq 0.05$.

Sample size (n) are in parenthesis.

AAR = Area adjusted removal

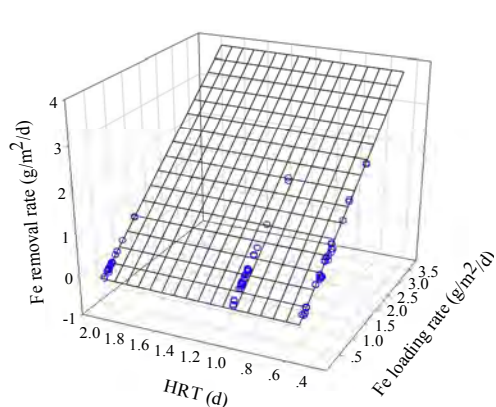
FOR = First order kinetics removal

4.2 สมการในการคาดการณ์ประสิทธิภาพการบำบัดแมงกานีส และเหล็กของระบบบึงประดิษฐ์

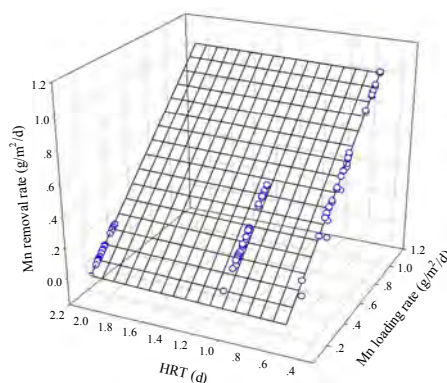
ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโลหะหนัก (Fe และ Mn concentration) อัตราการรองรับ (Fe และ Mn loading rate) ระยะการกักพื้ในในระบบ (HRT) และอัตราการบำบัดของระบบ (Fe และ Mn removal rate) ถูกใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้ในการคาดการณ์ประสิทธิภาพเบื้องต้นของระบบในการบำบัด Fe และ Mn ในรูปของสมการสหสัมพันธ์ถดถอย (Regression) และสมการปฏิกิริยาลำดับหนึ่ง (First-order kinetics) ดังนี้

4.2.1 การประยุกต์ใช้สมการสหสัมพันธ์ถดถอย (Regression) ในการคาดการณ์ประสิทธิภาพการบำบัดเหล็ก และแมงกานีสของระบบ

จากความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการรองรับ (Loading rate) ระยะกักพื้ในในระบบ (HRT) และอัตราการบำบัดของระบบ (Removal rate) ดังแสดงในภาพที่ 4.10 สามารถสร้างสมการสหสัมพันธ์ (Regression model) ในการคาดการณ์อัตราการบำบัด Fe และ Mn ของระบบได้ดังแสดงในสมการที่ 1 และ 2 ตามลำดับ



a) Fe removal



b) Mn removal

ภาพที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราการรองรับ, ระยะกักพื้ และอัตราการบำบัด

$$y = 0.9714X_1 + 0.0575X_0 - 0.1238, \text{ for Fe removal} \quad R^2 = 0.9871 \quad \text{_____ (Eq. 1)}$$

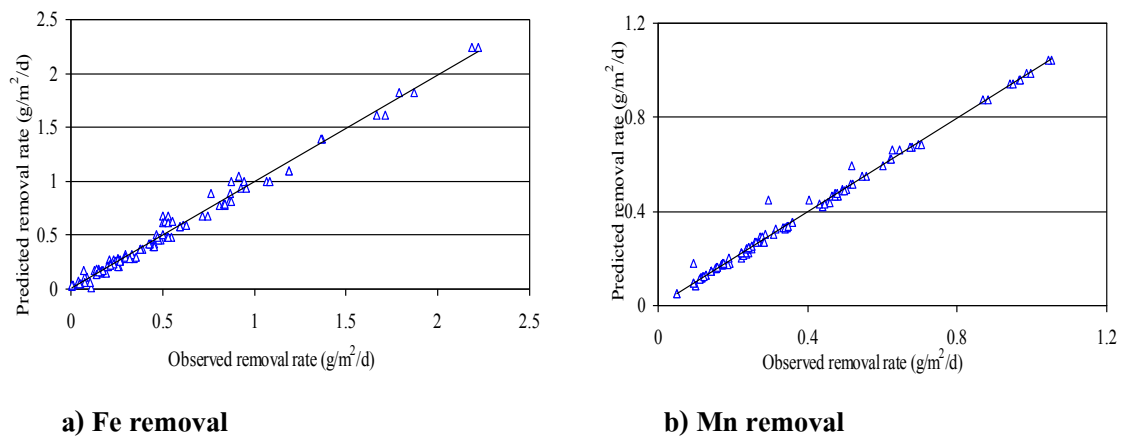
$$y = 1.0105X_1 + 0.0198X_0 - 0.0411, \text{ for Mn removal} \quad R^2 = 0.9930 \quad \text{_____ (Eq. 2)}$$

เมื่อ $y =$ Removal rate ($\text{g/m}^2/\text{d}$)

$X_1 =$ Loading rate ($\text{g/m}^2/\text{d}$)

$X_0 =$ Hydraulic retention time (day)

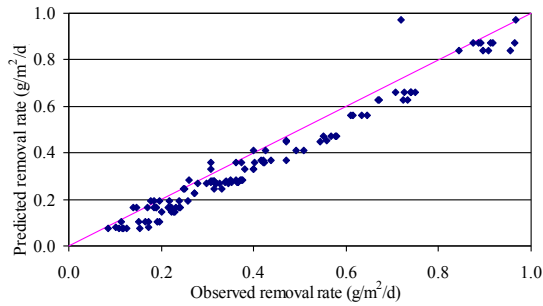
ทั้งนี้ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Pearson correlation) ระหว่างอัตราการบำบัดที่ตรวจวัดได้ซึ่งเป็นชุดข้อมูลที่ใช้ในการกำหนดสมการ กับอัตราการบำบัด Fe และ Mn ที่คำนวณจากสมการที่ 1 และ 2 (ภาพที่ 4.11) มีค่าเท่ากับ 0.994 และ 0.996 ตามลำดับ โดยอัตราการบำบัดที่ได้จากการตรวจวัดมีค่าเฉลี่ยสูงกว่าอัตราการบำบัด Fe และ Mn ที่ได้จากสมการ เท่ากับ 1.6×10^{-5} และ 2.0×10^{-5} g/m²/d ตามลำดับ การทดสอบ Pair t-test ระหว่างอัตราการบำบัดที่ตรวจวัดได้และอัตราการบำบัดจากการคำนวณ ทั้งการบำบัด Fe และ Mn พบว่าไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05



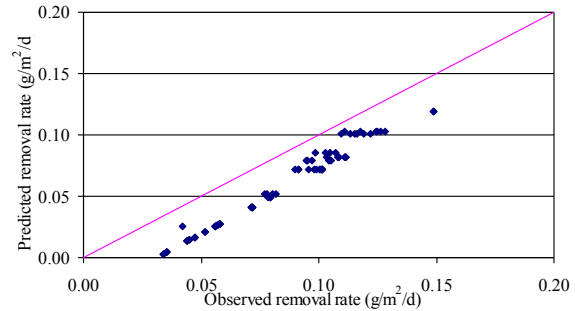
ภาพที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการบำบัดที่ตรวจวัด และอัตราการบำบัดที่คำนวณจาก

Regression prediction model

ข้อมูลจากการศึกษาการบำบัด Fe และ Mn ในน้ำบาดาลด้วยระบบบำบัดประเภทเดียวกันนี้ ซึ่งเป็นการศึกษาในประเด็นอื่น ได้นำมาใช้ทดสอบประสิทธิภาพของสมการที่ 1 และ 2 ในการคาดการณ์อัตราการบำบัด (Model validation) ซึ่งผลการศึกษาพบว่าอัตราการบำบัด Fe และ Mn ที่ได้จากการคำนวณ โดยส่วนใหญ่มีค่าต่ำกว่าค่าจากการตรวจวัด (ภาพที่ 4.12) และแตกต่างกันทางสถิติ โดยค่าเฉลี่ยของอัตราการบำบัด Fe และ Mn ที่ได้จากการคำนวณ มีค่าต่ำกว่าค่าเฉลี่ยของอัตราการบำบัดที่ได้จากการตรวจวัดจริง 0.0486 และ 0.0269 g/m²/d ตามลำดับ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Pearson correlation) ระหว่างอัตราการบำบัดที่ตรวจวัดจริงและอัตราการบำบัดจากการคำนวณ สำหรับการบำบัด Fe และ Mn มีค่าเท่ากับ 0.982 และ 0.992 ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบเป็นข้อมูลจากระบบบึงประดิษฐ์ที่ทำการบำบัดน้ำที่ระยะกักพักเท่ากับ 0.5 day เท่านั้น



a) Fe removal



b) Mn removal

ภาพที่ 4.12 การทดสอบประสิทธิภาพในการคาดการณ์ของ Regression prediction model

4.2.2 การประยุกต์ใช้สมการลำดับที่หนึ่ง (First order reaction) ในการคาดการณ์ประสิทธิภาพการบำบัดเหล็ก และแมงกานีสของระบบ

First order kinetics reaction ดังแสดงในสมการที่ 3 และ 4 ถูกใช้อย่างแพร่หลายในการประเมินประสิทธิภาพการบำบัดของระบบบึงประดิษฐ์ (Kadlec and Knight, 1996; Lesley et al., 2008; Tarutis et al., 1999; Mitchell et al., 1998) เมื่อนำข้อมูลการบำบัด Total Fe และ Total Mn ในน้ำบาดาลของระบบ สร้างเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \frac{C_e}{C}$ และ t (HRT) ดังแสดงในภาพที่ 4.13 จึงได้สมการความสัมพันธ์ที่ 5 และ 6 และสมการที่ 7 และ 8 สำหรับการบำบัด Fe และ Mn ตามลำดับ จากสมการที่ 5 จะพบว่าค่า K_T ของการบำบัด Fe มีค่าเท่ากับ 0.4186 per day ซึ่งต่ำกว่า ค่า K_T ของการบำบัด Mn ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.8235 per day ดังแสดงในสมการที่ 7

$$\frac{C_e}{C} = e^{-K_T t} \quad \text{_____ (Eq. 3)}$$

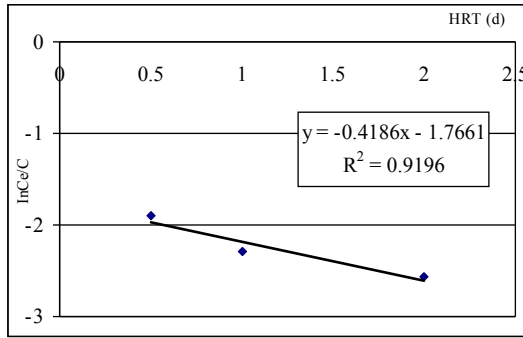
หรือ $\ln \frac{C_e}{C} = -K_T t \quad \text{_____ (Eq. 4)}$

เมื่อ C = Influent concentration, g/m^3

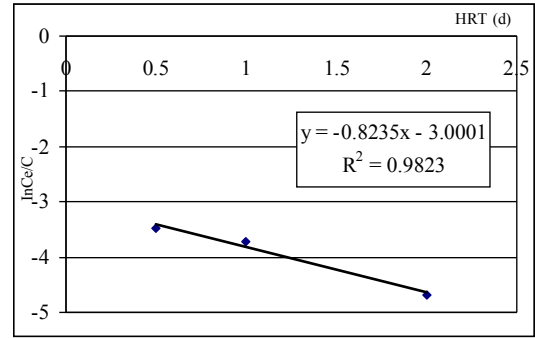
C_e = Effluent concentration, g/m^3

t = Hydraulic retention time, day

K_T = First-order reactions rate constant, day^{-1}



a) Fe removal



b) Mn removal

ภาพที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \frac{C_e}{C}$ และ t (HRT)

$$\ln \frac{C_e}{C} = -0.4186t - 1.7661, \text{ for Fe removal} \quad \text{_____ (Eq. 5)}$$

ดังนั้น $\frac{C_e}{C} = e^{-0.4186t} \cdot e^{-1.7661} = e^{-0.4186t} \times 0.171, \text{ for Fe removal} \quad \text{_____ (Eq. 6)}$

$$\ln \frac{C_e}{C} = -0.8235t - 3.0001, \text{ for Mn removal} \quad \text{_____ (Eq. 7)}$$

หรือ $\frac{C_e}{C} = e^{-0.8235t} \cdot e^{-3.0001} = e^{-0.8235t} \times 0.050, \text{ for Mn removal} \quad \text{_____ (Eq. 8)}$

เมื่อนำค่า $\frac{C_e}{C}$ แทนในสมการ Area-adjusted removal for first order ซึ่ง $R_o = \frac{Q}{A}C \left(1 - \frac{C_e}{C}\right)$ _____ (Eq. 9)

ซึ่งเป็นสมการแสดงประสิทธิภาพการบำบัดของระบบในหน่วยของมวลต่อพื้นที่ต่อช่วงเวลา (Mitchell and McNevin, 2001)

เมื่อ R_o = General removal rate, g/m²/d

Q = Flow rate of the system, m³/d

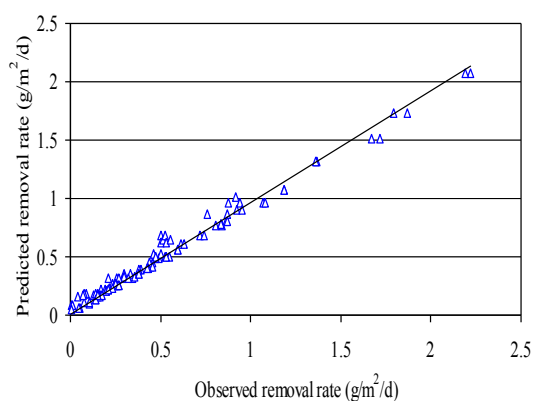
A = Area of the system, m²

จึงได้สมการที่ 10 และ 11 ในการคาดการณ์อัตราการบำบัด Fe และ Mn ต่อพื้นที่ต่อช่วงเวลา ดังนี้

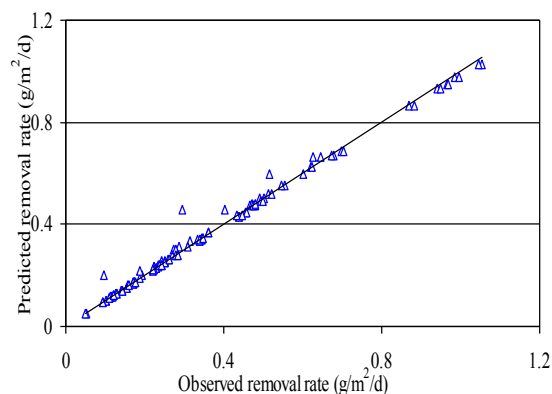
$$R_o = \frac{Q}{A} C (1 - (e^{-0.4186t} \times 0.171))), \text{ for Fe removal} \quad \text{_____ (Eq. 10)}$$

$$R_o = \frac{Q}{A} C (1 - (e^{-0.8235t} \times 0.050))), \text{ for Mn removal} \quad \text{_____ (Eq. 11)}$$

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยอัตราการบำบัด Fe และ Mn ที่ตรวจวัดได้ กับค่าเฉลี่ยอัตราการบำบัด Fe และ Mn ที่คำนวณจากสมการที่ 10 และ 11 (ภาพที่ 4.14) พบว่า อัตราการบำบัดจากการตรวจวัดมีค่าต่ำกว่า เท่ากับ 0.002 และ 0.004 g/m²/d ตามลำดับ โดยสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Pearson correlation) ระหว่างอัตราการบำบัดที่ตรวจวัดได้และอัตราการบำบัด Fe และ Mn จากการคำนวณ มีค่าเท่ากับ 0.993 และ 0.996 ตามลำดับ การทดสอบ Pair t-test ระหว่างอัตราการบำบัดที่ตรวจวัดจริงและอัตราการบำบัดจากการคำนวณ ทั้งการบำบัด Fe และ Mn พบว่าไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05



a) Fe removal



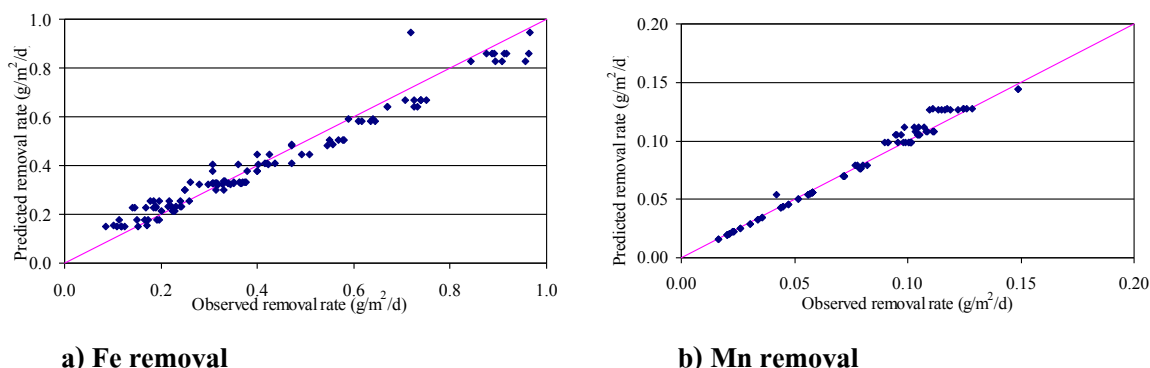
b) Mn removal

ภาพที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการบำบัดที่ตรวจวัด และอัตราการบำบัดที่คำนวณจาก

First order kinetics prediction model

การทดสอบประสิทธิภาพของสมการที่ 10 และ 11 ในการคาดการณ์อัตราการบำบัด (Model validation) ด้วยข้อมูลการบำบัด Fe และ Mn ในน้ำบาดาลด้วยระบบบำบัดประเภทเดียวกันนี้ ซึ่งเป็นการศึกษาในประเด็นอื่น พบว่าอัตราการบำบัด Fe และ Mn ที่ได้จากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการที่ตรวจวัด (ภาพที่ 4.15) โดยสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Pearson correlation) ระหว่าง

อัตราการบำบัดที่ตรวจวัดได้และอัตราการบำบัดจากการคำนวณ สำหรับการบำบัด Fe และ Mn มีค่าเท่ากับ 0.982 และ 0.992 ตามลำดับ และการทดสอบ Pair t-test ระหว่างอัตราการบำบัดทั้งสองประเภทพบว่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ อย่างไรก็ตาม ข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบเป็นข้อมูลจากระบบบึงประดิษฐ์ที่ทำการบำบัดน้ำที่ระยะกักพักเท่ากับ 0.5 day เท่านั้น



ภาพที่ 4.15 การทดสอบประสิทธิภาพในการคาดการณ์ของ First order kinetics prediction model

4.3 การสะสมแมงกานีสและเหล็กขององค์ประกอบภายในระบบบึงประดิษฐ์

4.3.1 การสะสมแมงกานีสและเหล็กของดินในระบบบึงประดิษฐ์

ดินที่ใช้ปลูกพืชในหน่วยทดลองเป็นดินเหนียวมีค่า OM ระหว่าง 0.473-0.484 % ซึ่งจัดได้ว่ามี OM ในระดับต่ำมาก คือ มี OM น้อยกว่า 2 % (Metson, 1961 อ้างใน Landon, 1991) ดินมีค่า pH, EC และ CEC ระหว่าง 7.40-7.81, 0.15-0.23 dS/m และ 35.85-45.22 C mole/kg ธาตุอาหาร ได้แก่ Total N และ Total P มีค่าเท่ากับ 0.002-0.006 % และ 33.1-41.0 $\mu\text{g P/g}$ ส่วน Mn และ Fe ในดิน มีค่า 8.77-15.15 ppm และ 5.72-10.54 ppm

ผลการตรวจวัดคุณสมบัติของดินในหน่วยทดลอง เมื่อสิ้นสุดการดำเนินระบบ ซึ่งทำการตรวจวัดที่ระดับ 0-5.5 cm (ดินชั้นบน) และที่ระดับมากกว่า 5.5-11.0 cm (ดินชั้นล่าง) นั้น พบว่าดินชั้นบนในระบบที่มีระยะกักพักเท่ากับ 0.5 day มีค่า pH, EC และ OM ระหว่าง 7.58-8.15, 0.032-0.105 dS/m และ 0.19-0.89 % ธาตุอาหาร Total N และ Total P มีค่าเท่ากับ 0.002-0.012 % และ 35.5-45.1 $\mu\text{g P/g}$ ส่วนดินชั้นล่าง มีค่า pH, EC และ OM ระหว่าง 7.69-8.19, 0.040-0.183 dS/m และ 0.19-0.88 % ธาตุอาหาร Total N และ Total P มีค่าเท่ากับ 0.001-0.004 % และ 35.5-49.2 $\mu\text{g P/g}$ (ตารางที่ 4.3)

ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติของดินในหน่วยทดลอง เมื่อสิ้นสุดการดำเนินระบบ

Indicators (Unit)	Sampling point ^{1/}	Operation system		
		0.5 day of HRT	1 day of HRT	2 day of HRT
pH	0-5.5 cm	7.77±0.18	7.79±0.09	7.73±0.21
	>5.5-11.0 cm	8.01±0.17	8.00±0.09	7.95±0.17
OM (%)	0-5.5 cm	0.62±0.23	0.76±0.18	0.78±0.18
	>5.5-11.0 cm	0.57±0.23	0.69±0.19	0.67±0.19
EC (dS/m)	0-5.5 cm	0.043±0.022	0.051±0.018	0.052±0.028
	>5.5-11.0 cm	0.072±0.041	0.061±0.022	0.060±0.016
TN (%)	0-5.5 cm	0.0043±0.0029	0.0033±0.0006	0.0037±0.0016
	>5.5-11.0 cm	0.0029±0.0009	0.0036±0.0013	0.0036±0.0010
TP (µg P/g)	0-5.5 cm	40.3±2.8	41.1±4.3	45.0±4.9
	>5.5-11.0 cm	42.4±4.4	39.5±6.4	44.4±8.0

Note: Mean values±SD are shown.

Sample size (n) = 10

^{1/} Distance from ground surface

ดินชั้นบนในระบบที่มีระยะกักพักเท่ากับ 1 day มีค่า pH, EC และ OM ระหว่าง 7.65-7.94, 0.025-0.089 dS/m และ 0.31-1.05 % ธาตุอาหาร Total N และ Total P มีค่าเท่ากับ 0.003-0.004 % และ 32.8-47.9 µg P/g ส่วนดินชั้นล่าง มีค่า pH, EC และ OM ระหว่าง 7.81-8.12, 0.030-0.093 dS/m และ 0.36-1.00 % ธาตุอาหาร Total N และ Total P มีค่าเท่ากับ 0.002-0.007 % และ 23.2-45.1 µg P/g

ดินชั้นบนในระบบที่มีระยะกักพักเท่ากับ 2 day มีค่า pH, EC และ OM ระหว่าง 7.36-8.00, 0.023-0.109 dS/m และ 0.55-1.18 % ธาตุอาหาร Total N และ Total P มีค่าเท่ากับ 0.001-0.008 % และ 35.6-52.0 µg P/g ส่วนดินชั้นล่าง มีค่า pH, EC และ OM ระหว่าง 7.66-8.23, 0.031-0.087 dS/m และ 0.33-1.02 % ธาตุอาหาร Total N และ Total P มีค่าเท่ากับ 0.002-0.005 % และ 36.9-58.8 µg P/g

ทั้งนี้ พบว่า ค่าดัชนีบ่งชี้คุณสมบัติของดินโดยส่วนใหญ่มีค่าไม่แตกต่างไปจากคุณสมบัติของดินก่อนดำเนินระบบ อย่างไรก็ตาม พบว่าเมื่อสิ้นสุดการดำเนินระบบ ดินมีค่า OM และ TP เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ขณะที่ค่า EC ของดินลดต่ำลง ทั้งนี้ พบว่าดินชั้นบน (ระดับ 0-5.5 cm จากผิวดิน) และดินชั้นล่าง (ระดับ > 5.5-11.0 cm จากผิวดิน) ในแต่ละระบบมีคุณสมบัติไม่แตกต่างกัน เนื่องจากดินชั้นบนและดินชั้นล่างที่ทำการตรวจวัดนี้ มีระยะห่างจากผิวดินไม่แตกต่างกันนัก การบำบัดของระบบจึงไม่ส่งผลให้เห็นการเปลี่ยนแปลงหรือความแตกต่างของค่าดัชนีบ่งชี้คุณสมบัติของดินระหว่างชั้นดิน

ที่ชัดเจน นอกจากนั้น ยังพบว่าคุณสมบัติของดินในระบบบึงประดิษฐ์ที่มีการดำเนินระบบด้วยระยะกักพักที่แตกต่างกัน มีค่าคุณสมบัติของดินเป็นไปในทิศทางเดียวกัน (ตารางที่ 4.3)

ผลการตรวจวัด Mn และ Fe ในดิน เมื่อสิ้นสุดการดำเนินระบบ พบว่า ในระบบที่มีระยะกักพักเท่ากับ 0.5 day นั้น ค่า Mn ของดินที่ระดับผิวดิน (0-5.5 cm) และ ดินชั้นล่าง (>5.5-11.0 cm) มีค่า 591.08-758.44 ppm และ 603.42-759.02 ppm ค่า Fe ของดินที่ระดับผิวดิน และ ดินชั้นล่าง มีค่าเท่ากับ 17.17-31.85 ppm และ 11.59-33.90 ppm ส่วนระบบที่มีระยะกักพักเท่ากับ 1 day ดินที่ระดับผิวดิน และดินชั้นล่าง มีค่า Mn เท่ากับ 602.16-697.35 ppm และ 525.81-703.05 ppm และ ค่า Fe ที่ตรวจวัดได้ในดินที่ระดับผิวดิน และ ดินชั้นล่าง มีค่าเท่ากับ 12.96-87.11 ppm และ 6.44-54.37 ppm ขณะที่ ในระบบที่มีระยะกักพักเท่ากับ 2 day ค่า Mn ของดินที่ระดับผิวดิน และดินชั้นล่าง มีค่า 529.36-621.43 ppm และ 519.89-663.64 ppm ส่วน ค่า Fe ที่ตรวจวัดได้ในดินที่ระดับผิวดิน และ ดินชั้นล่าง มีค่าเท่ากับ 3.10-117.50 ppm และ 2.00-125.00 ppm (ตารางที่ 4.4)

ทั้งนี้ พบว่า ความเข้มข้นของ Mn และ Fe ในดิน ภายหลังการดำเนินระบบ มีค่าเพิ่มสูงขึ้นในทุกระบบ โดยเฉพาะค่า Mn ผลจากการตรวจวัด พบว่าความเข้มข้นของ Mn ในดินชั้นล่าง และความเข้มข้นของ Fe ในดินชั้นบนและดินชั้นล่าง ในแต่ละระบบที่มีระยะกักพักแตกต่างกัน มีค่าไม่แตกต่างกัน เช่นเดียวกันกับค่าของดัชนีชี้วัดคุณสมบัติของดินตัวอื่นๆ รวมถึงความเข้มข้นของ Mn และ Fe ระหว่างดินชั้นบนและดินชั้นล่างของแต่ละระยะกักพัก ทั้งนี้ ยกเว้นความเข้มข้นของ Fe ของดินชั้นบน ในระบบที่มีระยะกักพัก 0.5 day ซึ่งมีค่าสูงกว่าดินชั้นล่าง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) และพบว่า ความเข้มข้นของ Mn ในดินชั้นบน ในระบบที่มีระยะกักพัก 0.5 และ 1 day มีค่าสูงกว่าในระบบที่มีระยะกักพัก 2 day (ตารางที่ 4.4) อย่างไรก็ตาม ผลการศึกษาของ Mitsch and Wise (1998) ซึ่งได้ตรวจวัดความเข้มข้นของ Fe ในตะกอนดินภายในบึงประดิษฐ์ที่รับน้ำทิ้งจากเหมืองแร่ พบว่าความเข้มข้นของ Fe ในตะกอนดินที่ระดับตื้นจะมีค่าสูงกว่าค่าความเข้มข้นของ Fe ในตะกอนดินที่ระดับลึก ซึ่ง Mitsch and Wise (1998) พบความเข้มข้นของเหล็กในตะกอนดินที่ระดับ 10 cm มีค่าเฉลี่ย 14.3 % ของน้ำหนักแห้ง ขณะที่ตะกอนดินที่ระดับลึกมากกว่า 30 cm มีค่าความเข้มข้นของเหล็กเฉลี่ยเท่ากับ 7.2 % ของน้ำหนักแห้ง ขณะที่ ผลจากการศึกษาในครั้งนี้ซึ่งทำการตรวจวัดดินที่ระดับ 0-5.5 cm และที่ระดับ มากกว่า 5.5-11 cm นั้น ไม่พบความแตกต่างระหว่างชั้นดิน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากตำแหน่งที่ทำการตรวจวัดนั้น มีความใกล้เคียงกัน จึงไม่พบความเปลี่ยนแปลงหรือความแตกต่างระหว่างชั้นดิน อันเป็นผลจากการดำเนินระบบ อย่างไรก็ตาม ผลการศึกษา ได้บ่งชี้ชัดเจนถึงการสะสม Mn และ Fe ของดินในระบบ ซึ่งทำให้ดินในระบบมีค่าความเข้มข้นของทั้ง Mn และ Fe สูงขึ้นเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะดินบริเวณผิวดิน ซึ่งเป็นส่วนที่รองรับตะกอนโลหะหนักทั้งสองประเภทจากกระบวนการกรองและการตกตะกอนของโลหะหนักแขวนลอยที่เกิดขึ้นในระบบ ขณะที่ สารละลาย Mn และ Fe ในน้ำมีโอกาสดำเนินปฏิกิริยากับออกซิเจนในน้ำ รวมถึงออกซิเจนบริเวณรากพืชหรือบริเวณ Rhizosphere แล้วเกิดการตกตะกอนผลึก (Precipitation) ลงสู่ดิน ทำให้ดินมีการสะสม Mn และ Fe มากขึ้น ทั้งจาก

กระบวนการกรอง การตกตะกอน และการตกตะกอนผลึก ซึ่งพืชในระบบเป็นปัจจัยหนึ่งที่ช่วยส่งเสริมการเกิดกระบวนการทั้งทางกายภาพและทางเคมีดังกล่าวด้วย

ตารางที่ 4.4 ปริมาณ Mn และ Fe ในดิน เมื่อสิ้นสุดการดำเนินระบบ

Indicators (Unit)	Sampling point ^{1/}	Operation system		
		0.5 day of HRT	1 day of HRT	2 day of HRT
Mn (ppm)	0-5.5 cm	650.85±55.32 ^a	637.29±29.34 ^a	580.88±29.95 ^b
	>5.5-11.0 cm	658.97±44.86	625.61±69.00	607.23±52.79
Fe (ppm)	0-5.5 cm	23.28±5.46 ^A	25.85±24.99	48.41±47.79
	>5.5-11.0 cm	17.04±7.67 ^B	19.38±15.24	30.93±43.18

Note: Mean values±SD are shown.

Mean values within each row followed by the same letter (small letter) are not significantly different at $P \geq 0.05$.

Mean values within each column followed by the same letter (capital letter) are not significantly different at $P \geq 0.05$.

Sample size (n) = 8

^{1/} Distance from ground surface

4.3.2 การสะสมแมงกานีสและเหล็กของพืชในระบบบึงประดิษฐ์

พืชที่ใช้ปลูกในหน่วยทดลอง คือ ธูปฤาษี (*Typha angustifolia*) ซึ่งเป็นพืชชายน้ำที่เจริญเติบโตได้ดีในพื้นที่น้ำท่วมขัง นอกจากนั้น ยังพบว่าธูปฤาษีสามารถลดปริมาณธาตุอาหาร และโลหะหนักที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำได้อีกด้วย (Maine et al., 2006; Mays and Edwards, 2001)

ผลจากการตรวจวัดธูปฤาษีก่อนการระบายน้ำบาดาลลงสู่ระบบ พบว่า ธูปฤาษีในหน่วยทดลองมีมวลชีวภาพส่วนเหนือดิน (ลำต้นและใบ) ในรูปของน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้ง มีค่าเท่ากับ 372.8-974.4 g/m² และ 73.6-209.6 g/m² ขณะที่ มวลชีวภาพส่วนใต้ดิน (ราก) ในรูปของน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้ง มีค่าเท่ากับ 656.0-2033.6 g/m² และ 134.4-483.2 g/m² เปอร์เซ็นต์ความชื้นของพืชส่วนเหนือดินและส่วนใต้ดิน มีค่า 78.5-81.1 % และ 72.4-83.2 % (ตารางที่ 4.5)

ความเข้มข้นของ Mn ในเนื้อเยื่อของธูปฤาษีส่วนเหนือดิน และส่วนใต้ดิน มีค่า 92.1-582.9 และ 86.3-129.4 mg/kg ส่วนความเข้มข้นของ Fe ในเนื้อเยื่อของธูปฤาษีส่วนเหนือดิน และส่วนใต้ดิน มีค่า 140.3-460.8 และ 6,419.3-6,720.3 mg/kg (ตารางที่ 4.5)

ตารางที่ 4.5 คุณสมบัติของพืชก่อนเริ่มดำเนินระบบ

Plant organs	Plant characteristics				
	Fresh weight (g/m ²)	Dry weight (g/m ²)	Moisture (%)	Fe content (mg/kg)	Mn content (mg/kg)
Aboveground plant/Shoot (Stem and leaf)	643.7±305.2	131.2±70.3	79.9±1.3	310.2±82.2	279.6±196.0
Underground plant (Root)	1,479.5±727.2	319.5±175.4	78.4±5.5	6,572.2±99.6	103.1±14.8

Note: Mean values±SD are shown.

เมื่อสิ้นสุดการดำเนินระบบ พบว่าน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของรูปถ่ายิยส่วนเหนือดิน ในระบบที่มีระยะกักพัก 0.5, 1 และ 2 day มีค่า 3,852.80-18,732.00, 3,174.40-1,0912.80 และ 3,560.00-12,788.80 g/m² ตามลำดับ และ 956.80-2,398.40, 680.00-1,440.00 และ 817.60-1,297.60 g/m² ตามลำดับ ส่วนน้ำหนักสดของรูปถ่ายิยส่วนใต้ดิน (ราก) ในระบบที่มีระยะกักพัก 0.5, 1 และ 2 day มีค่า 2,904.00-6,380.80, 1,558.40-4,684.80 และ 2,803.20-4,910.40 g/m² ตามลำดับ ขณะที่ น้ำหนักแห้งของรูปถ่ายิยส่วนใต้ดิน (รวมรากและรากฝอย) ในระบบที่มีระยะกักพัก 0.5, 1 และ 2 day มีค่าเท่ากับ 704.70-1251.90, 397.80-1180.20 และ 607.80-1030.00 g/m² ตามลำดับ (ตารางที่ 4.6)

อัตราการเติบโตสัมพัทธ์ (Relative growth rate: RGR) ของรูปถ่ายิยในระบบที่มีระยะกักพัก 0.5, 1 และ 2 day มีค่า 0.0318-0.0433, 0.0275-0.0369 และ 0.0298-0.0356 per day ตามลำดับ (ตารางที่ 4.6) ทั้งนี้ พบว่า น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของทั้งส่วนเหนือดินและส่วนใต้ดินของรูปถ่ายิยที่เจริญเติบโตในระบบ ที่มีระยะกักพักแตกต่างกันนั้น มีค่าเฉลี่ยไม่แตกต่างกัน ขณะที่อัตราการเติบโตสัมพัทธ์ ของรูปถ่ายิยในแต่ละระบบ มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ เช่นเดียวกัน

มวลชีวภาพแห้งของรูปถ่ายิยส่วนเหนือดิน คือ ส่วนลำต้นและใบ ซึ่งเก็บเกี่ยวจากระบบที่มีระยะกักพัก 0.5, 1 และ 2 day มีค่าความเข้มข้นของ Mn เท่ากับ 222.78-444.97, 272.66-401.23 และ 271.87-380.88 mg/kg ตามลำดับ และ 491.08-893.89, 426.72-1152.59 และ 380.58-677.40 mg/kg ตามลำดับ ส่วนค่าความเข้มข้นของ Mn ในมวลชีวภาพแห้งของรูปถ่ายิยส่วนใต้ดิน คือ ส่วนรากและรากฝอย ซึ่งเก็บเกี่ยวจากระบบที่มีระยะกักพัก 0.5, 1 และ 2 day นั้น มีค่าเท่ากับ 348.34-836.98, 283.28-563.18 และ 325.79-525.02 mg/kg ตามลำดับ และ 4,980.18-7,980.30, 1,684.31-2,400.99 และ 1,567.86-2,168.62 mg/kg ตามลำดับ ทั้งนี้ พบว่าค่าความเข้มข้นของ Mn ในเนื้อเยื่อของรูปถ่ายิยทั้งส่วนเหนือดินและส่วนใต้ดินเมื่อสิ้นสุดการดำเนินระบบมีค่าสูงขึ้น โดยเฉพาะค่าความเข้มข้นของ Mn ในเนื้อเยื่อของรูปถ่ายิยส่วนใต้ดิน โดยเฉพาะรากฝอย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากรากฝอยมีพื้นที่ผิวมาก ทำให้เกิดการกรอง การดูดซับและดูดดึงโลหะหนักไว้ได้มาก ทั้งนี้ พบว่าค่าความเข้มข้นของ Mn ในเนื้อเยื่อทั้งส่วนลำต้น รากและรากฝอย มีค่าสูงที่สุดในพืชที่เก็บเกี่ยวจากระบบที่มีระยะกักพัก 0.5 day และค่าความ

เข้มข้นของ Mn ในเนื้อเยื่อทั้งส่วนต้น รากและรากฝอย ที่เก็บเกี่ยวจากระบบที่มีระยะกักพัก 1 day และ 2 day มีค่าลดลง ตามลำดับ และพบว่าค่าความเข้มข้นของ Mn ในพืชที่เก็บเกี่ยวจากระบบที่มีระยะกักพักแตกต่างกันจะมีค่าแตกต่างกันทางสถิติ (ตารางที่ 4.7) อย่างไรก็ตาม โดยรวมแล้ว พบว่าความเข้มข้นของ Mn ในเนื้อเยื่อของรูปถ่ายิส่วนเหนือดิน ซึ่งมีค่าระหว่าง 222.77-1,152.59 mg/kg นั้นมีค่าเฉลี่ยต่ำกว่า และแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจากค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของ Mn ที่พบในรูปถ่ายิส่วนใต้ดิน ซึ่งมีค่าระหว่าง 283.28-7,098.47mg/kg โดยสัดส่วนความเข้มข้นของ Mn ในเนื้อเยื่อของรูปถ่ายิส่วนใต้ดินต่อความเข้มข้นของ Mn ในเนื้อเยื่อของรูปถ่ายิส่วนเหนือดิน (Root:Shoot ratio) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.7-4.2 โดยพบค่า R:S ratio สูงสุดในระบบที่มีระยะกักพักเท่ากับ 0.5 day

ตารางที่ 4.6 อัตราการเติบโตสัมพัทธ์ และมวลชีวภาพของพืช เมื่อสิ้นสุดการดำเนินระบบ

Parameters	Unit	Operation system		
		0.5 day of HRT	1 day of HRT	2 day of HRT
<u>Fresh weight</u>	g/m^2			
Aboveground plant		9,623.47±6,030.59	6,524.67±2,600.78	6,275.07±3,604.15
- Stems		4,012.00±986.89	2,890.93±681.62	2,888.80±788.09
- Leaves		3,218.67±1,688.16	2213.33±663.77	1785.87±686.69
Underground plant (Root)		4,253.33±1,314.00	2,956.00±1,198.66	3,556.0000±743.87
<u>Dry weight</u>	g/m^2			
Aboveground plant		1,643.73±624.94	1,087.20±281.02	1,028.00±208.66
- Stems		777.60±139.77 ^a	577.07±125.01 ^b	597.33±111.69 ^b
- Leaves		866.13±494.86	510.13±157.67	430.67±150.42
Underground plant (Root and Fibrous roots)		943.38±216.92	744.20±264.05	788.50±154.44
- Root		860.53±223.46	641.60±263.66	707.20±137.70
- Fibrous roots ^{1/}		82.85±23.40	102.60±3.39	81.30±24.75
<u>RGR of aboveground biomass</u>	per day	0.0377±0.0051	0.0330±0.0035	0.0325±0.0025

Note: Mean values±SD are shown.

Mean values within each row followed by the same letter (small letter) are not significantly different at $P \geq 0.05$.

Sample size (n) = 6

^{1/}Sample size (n) = 2

ตารางที่ 4.7 ความเข้มข้นของ Mn และ Fe ในมวลชีวภาพแห้งของพืช เมื่อสิ้นสุดการดำเนินระบบ

Parameters	Unit	Operation system		
		0.5 day of HRT	1 day of HRT	2 day of HRT
<u>Mn concentration</u>	ppm			
Aboveground plant		532.91±190.34 ^B	554.84±287.89 ^B	440.73±144.61 ^B
- Stems		371.18±63.50 ^a	336.15±40.82 ^{ab}	316.41±35.69 ^b
- Leaves		681.25±148.07 ^{ab}	773.52±259.41 ^a	552.10±111.16 ^b
Underground plant		2,222.71±2,662.60 ^A	935.28±808.51 ^A	876.56±730.23 ^A
- Root		587.98±163.46 ^a	389.22±80.40 ^b	383.08±68.03 ^b
- Fibrous root ^{1/}		6,451.75±1,175.60 ^a	2,027.41±247.74 ^b	1,863.53±222.33 ^b
<u>Fe concentration</u>	ppm			
Aboveground plant		64.21±19.04 ^B	69.91±25.49 ^B	78.07±25.68 ^B
- Stems		76.94±14.71	81.23±29.61	86.83±35.67
- Leaves		51.49±13.71 ^b	58.59±14.23 ^b	75.22±20.27 ^a
Underground plant		120,661.24±44,509.75 ^A	113,813.48±51,398.94 ^A	120,638.86±32,612.85 ^A
- Root		96,291.39±17,801.94 ^a	80,661.36±15,727.29 ^b	100,093.48±14,353.90 ^a
- Fibrous root ^{1/}		172,693.85±32,345.69	180,117.72±22,910.12	161,729.63±11,124.02

Note: Mean values±SD are shown.

Mean values within each row followed by the same letter (small letter) are not significantly different at $P \geq 0.05$.

Mean values of aboveground and underground plant of each metal species followed by the same letter (large letter) are not significantly different at $P \geq 0.05$.

Sample size (n) = 12

^{1/}Sample size (n) = 6

ความเข้มข้นของ Fe ในมวลชีวภาพแห้งของรูปถ่ายิยัส่วนเหนือดิน คือ ส่วนลำต้นและใบ ซึ่งเก็บเกี่ยวจากระบบที่มีระยะกักพัก 0.5, 1 และ 2 day มีค่าเท่ากับ 50.22-102.84, 45.09-146.66 และ 33.32-149.01 mg/kg ตามลำดับ และ 31.94-74.03, 44.51-96.59 และ 52.80-117.44 mg/kg ตามลำดับ ส่วนความเข้มข้นของ Fe ในมวลชีวภาพแห้งของรูปถ่ายิยัส่วนใต้ดิน คือ ส่วนรากและรากฝอย ซึ่งเก็บเกี่ยวจากระบบที่มีระยะกักพัก 0.5, 1 และ 2 day มีค่าเท่ากับ 71,202.38-132,148.11, 55,847.08-105,348.26 และ 80,252.30-123,185.88 mg/kg ตามลำดับ และ 140,418.72-221,902.87, 150,470.30-208,657.07 และ 145,075.94-176,218.32 mg/kg ตามลำดับ ทั้งนี้ พบว่าเมื่อสิ้นสุดการดำเนินระบบ ค่าความเข้มข้นของ Fe ในเนื้อเยื่อของรูปถ่ายิยัส่วนเหนือดินมีค่าลดลง ขณะที่ ความเข้มข้นของ Fe ใน

เนื้อเยื่อของรูปถ่ายมีส่วนใต้ดินมีค่าสูงขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเจริญเติบโตของมวลชีวภาพของส่วนเหนือดินที่เพิ่มมากขึ้น ขณะที่การดูดซับ (Adsorption) และดูดดึง (Uptake) Fe โดยส่วนใหญ่ จะเกิดขึ้นกับมวลชีวภาพส่วนใต้ดิน การเจริญเติบโตของมวลชีวภาพส่วนเหนือดินที่มีมากเกินไป การเคลื่อนย้าย Fe จากมวลชีวภาพส่วนใต้ดินมาสะสมไว้ในมวลชีวภาพส่วนเหนือดิน จะทำให้ความเข้มข้นของ Fe ในเนื้อเยื่อพืชส่วนเหนือดิน มีค่าลดลงได้ ขณะที่ พืชส่วนใต้ดิน เป็นส่วนที่มีโอกาสเกิดการสัมผัสกับ Fe ในน้ำและ Fe ที่ตกตะกอนลงสู่พื้นท้องน้ำ นอกจากนั้น อวัยวะส่วนใต้ดิน (ราก) ยังทำหน้าที่หลักในการดูดดึงสารละลายอนินทรีย์เข้าสู่เซลล์ (Groudeva et al., 2001; Barley et al., 2005; Peverly et al., 1995) ดังนั้น เนื้อเยื่อพืชส่วนใต้ดิน จึงเป็นส่วนที่มีโอกาสเกิดการสะสม Fe ได้มาก ในขณะที่การเจริญเติบโต ด้านมวลชีวภาพของส่วนใต้ดินหรือส่วนรากนี้ ไม่สูงเท่ากับการเติบโตของเนื้อเยื่อส่วนเหนือดิน จึงทำให้ความเข้มข้นของ Fe ต่อมวลชีวภาพแห้งของเนื้อเยื่อส่วนใต้ดินมีค่าสูงกว่าเนื้อเยื่อส่วนเหนือดิน ทั้งนี้ จากผลการศึกษาคพบว่าค่าความเข้มข้นของ Fe ในเนื้อเยื่อของรูปถ่ายมีส่วนลำต้นและรากฝอย ที่เก็บเกี่ยวจากระบบที่มีระยะกักพักต่างกัน มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P \geq 0.5$) ขณะที่ ความเข้มข้นของ Fe ในใบของรูปถ่าย มีค่าสูงที่สุดในใบของรูปถ่ายที่เก็บเกี่ยวจากระบบที่มีระยะกักพัก 2 day และแตกต่างจากความเข้มข้นของ Fe ในใบของรูปถ่ายที่เก็บเกี่ยวจากระบบที่มีระยะกักพัก 1 และ 0.5 day อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.5$) ส่วนความเข้มข้นของ Fe ในรากของรูปถ่าย มีค่าสูงที่สุดในรากของรูปถ่ายที่เก็บเกี่ยวจากระบบที่มีระยะกักพัก 2 day เช่นกัน และพบว่ามีค่าสูงกว่าความเข้มข้นของ Fe ในรากของรูปถ่าย ที่เก็บเกี่ยวจากระบบที่มีระยะกักพัก 1 day อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.5$) ดังแสดงในตารางที่ 4.7

โดยรวมแล้ว พบว่าในทุกๆ ระบบหรือทุกระยะกักพักที่ศึกษานั้น รูปถ่ายในแต่ละระบบจะมีค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของ Fe ในเนื้อเยื่อส่วนเหนือดิน ต่ำกว่าค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของ Fe ที่พบในรูปถ่ายส่วนใต้ดินอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยเนื้อเยื่อรูปถ่ายส่วนเหนือดิน มีค่าความเข้มข้นของ Fe ระหว่าง 31.94-146.66 mg/kg ส่วนรูปถ่ายส่วนใต้ดินมีค่าความเข้มข้นของ Fe ระหว่าง 55,847.08-221,902.87 mg/kg โดยสัดส่วนความเข้มข้นของ Fe ในเนื้อเยื่อของรูปถ่ายส่วนใต้ดินต่อความเข้มข้นของ Fe ในเนื้อเยื่อของรูปถ่ายส่วนเหนือดิน (Root:Shoot ratio) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1,545-1,879 ซึ่งเป็นสัดส่วนที่สูงมาก โดยพบค่า R:S ratio สูงสุดในระบบที่มีระยะกักพักเท่ากับ 0.5 day เช่นเดียวกับค่า R:S ratio ของ Mn ทั้งนี้ ค่า R:S ratio ที่สูงนี้ เนื่องมาจากค่าความเข้มข้นของ Fe ทั้งในส่วนรากและรากฝอยของรูปถ่ายมีค่าสูงกว่าค่าความเข้มข้นของ Fe ที่พบในใบและลำต้น อย่างมาก โดยเฉพาะความเข้มข้นของ Fe ในรากฝอย (ตารางที่ 4.7) ที่พบว่ามีค่าความเข้มข้นระหว่าง 1.6-1.8 % ของน้ำหนักแห้ง ซึ่งเป็นปริมาณการสะสมที่สูงกว่าการสะสมตามปกติ (Hyperaccumulation) ซึ่งสำหรับการสะสมโลหะหนักประเภท Fe และ Mn ที่มีค่าสูงกว่าปกตินั้น กำหนดให้มีค่ามากกว่า 1 % ของน้ำหนักแห้ง Susarla et al. (2002)

จากผลการศึกษา พบว่าเมื่อสิ้นสุดการดำเนินระบบ เนื้อเยื่อของรูปถ่ายมีส่วนใต้ดินจะมีค่าความเข้มข้นของทั้ง Mn และ Fe สูงกว่ารูปถ่ายส่วนเหนือดิน ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับผลการศึกษาของ Lu et al. (2004) และ Soltan and Rashed (2003) ซึ่งพบว่ารากของผักตบชวาสามารถสะสมโลหะหนักได้สูงกว่าใบ และ Demirezen and Aksoy (2004) พบว่า รากของรูปถ่าย (*Typha angustifolia* L.) สามารถสะสมโลหะหนักได้สูงกว่าใบเช่นกัน อย่างไรก็ตาม Weis and Weis (2004) ได้ระบุว่า การดูดซับอนุภาคละเอียดของโลหะหนักโดยพื้นผิวของโครงสร้างส่วนเหนือรากเป็นระยะเวลานาน อาจทำให้พบปริมาณโลหะหนักสูงในส่วนของลำต้นและใบได้เช่นกัน ในการศึกษาครั้งนี้พบว่าพืชส่วนใต้ดินมีการสะสมทั้ง Mn และ Fe สูง โดยเฉพาะรากฝอยซึ่งพบว่ามีค่าความเข้มข้นของ Mn และ Fe สูงมาก ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากเนื้อเยื่อส่วนเหนือดินของพืชจะมีการเติบโตด้านมวลชีวภาพสูงกว่าเนื้อเยื่อส่วนใต้ดิน ขณะที่อวัยวะส่วนใต้ดินเป็นส่วนที่สัมผัสกับโลหะหนักทั้งส่วนที่เป็นตะกอนและสารละลาย ทำให้มีโอกาสดูดซับติดอยู่กับผิวราก และดูดซึมเข้าสู่รากได้ และหากการเคลื่อนย้ายโลหะหนักที่รากดูดซึมไว้ไปสู่ส่วนอื่นๆ ของพืช เกิดขึ้นน้อยจะทำให้เกิดการสะสมอยู่ในเนื้อเยื่อส่วนใต้ดิน ทำให้เนื้อเยื่อส่วนใต้ดินมีค่าความเข้มข้นของโลหะหนักนั้นๆ สูง สำหรับรากฝอยนั้นเป็นอวัยวะขนาดเล็กที่มีผิวสัมผัสมากทำให้มีโอกาสดูดซับและดูดซึมได้มาก ในขณะที่มีมวลชีวภาพน้อยเมื่อเทียบกับอวัยวะพืชส่วนอื่นๆ จึงพบว่ามีค่าความเข้มข้นของทั้ง Mn และ Fe ในรากฝอยสูง ขณะที่ออกซิเจนบริเวณราก รวมถึงรากฝอยเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งเสริมให้เกิดการตกตะกอนผลึกของ Mn และ Fe เกิดเป็นตะกอนสะสมที่ดินบริเวณพื้นที่ท้องน้ำ และถูกดูดซับติดอยู่กับรากและรากฝอยด้วย

4.3.3 การสะสมแมงกานีสและเหล็กของพืชสีเขียวขนาดเล็ก ในระบบบึงประดิษฐ์

ในระหว่างการดำเนินระบบ พบว่ามีสาหร่ายเกิดขึ้นในระบบเป็นจำนวนมาก ผลการตรวจวัดสาหร่าย เมื่อสิ้นสุดการดำเนินระบบ พบว่า สาหร่ายที่เกิดและเจริญเติบโตในหน่วยทดลองนั้นมีมวลชีวภาพ ในรูปของน้ำหนักแห้ง เท่ากับ 16.70-204.80 g/m² ความเข้มข้นของ Mn และ Fe ในเนื้อเยื่อของสาหร่าย มีค่า 540.28-7,682.93 และ 115.01-270.75 mg/kg (ตารางที่ 4.8)

สาหร่ายที่เกิดขึ้นในระบบเข้าสู่ระบบโดยติดมากับน้ำหรือพืชที่นำมาปลูกในระบบ และเมื่อสาหร่ายได้รับแสงแดดและธาตุอาหาร ทำให้เกิดการเจริญเติบโตเพิ่มจำนวนขึ้นและด้วยความสามารถในการดูดซับและดูดซึม Mn และ Fe ทำให้สาหร่ายซึ่งเจริญเติบโตอยู่ในน้ำและมีโอกาสสัมผัสกับ Mn และ Fe ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำตลอดเวลา สามารถสะสม Mn และ Fe ไว้ในเนื้อเยื่อได้ ซึ่งจากผลการตรวจวัดพบว่าสาหร่ายมีการสะสม Mn ในเนื้อเยื่อสูงกว่าปริมาณการสะสม Fe

ตารางที่ 4.8 น้ำหนักแห้ง และความเข้มข้นของ Mn และ Fe ในสาหร่าย เมื่อสิ้นสุดการดำเนินระบบ

Parameters	Unit	Operation system		
		0.5 day of HRT	1 day of HRT	2 day of HRT
Dry weight ^{1/}	g/m ²	21.15±6.29	125.10±0.57	152.50±73.96
Mn concentration	mg/kg	5,351.55±1,465.27 ^a	5,342.42±1,190.37 ^a	1,247.97±707.19 ^b
Fe concentration	mg/kg	131.28±10.72	201.54±65.84	148.16±17.49

Note: Mean values±SD are shown.

Mean values within each row followed by the same letter (small letter) are not significantly different at $P \geq 0.05$.

Sample size (n) = 6

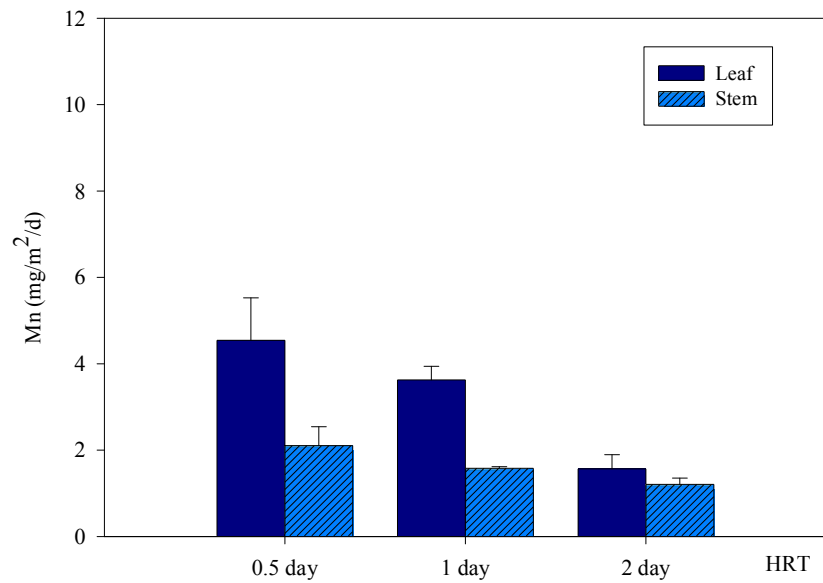
^{1/}Sample size (n) = 2

4.3.4 อัตราการสะสมแมงกานีสและเหล็กของพืชในระบบบึงประดิษฐ์

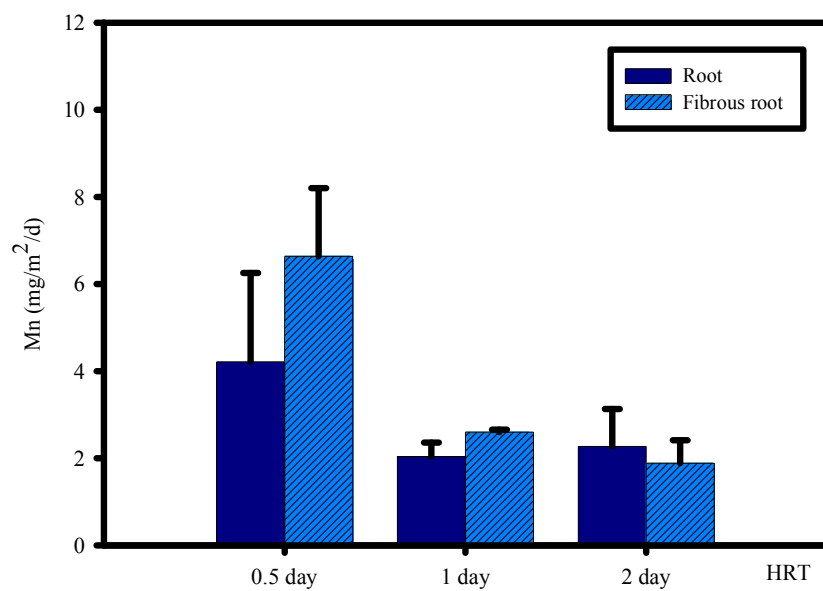
การลดลงของปริมาณความเข้มข้นของ Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาล ภายหลังจากการปรับปรุงคุณภาพน้ำด้วยระบบบึงประดิษฐ์ เป็นการลดลงจากกระบวนการบำบัด Total Mn และ Total Fe ในน้ำที่เกิดขึ้นจากหลายกระบวนการด้วยกัน อันได้แก่ กระบวนการกรอง (Filtration) และการตกตะกอน (Sedimentation) และกระบวนการดูดซับ (Adsorption) ติดไปกับวัสดุและส่วนต่างๆ ของพืช ซึ่งเป็นกระบวนการบำบัดทางกายภาพ การบำบัดด้วยกระบวนการดูดซับ (Uptake) และสะสมไว้ (Accumulation) โดยพืชที่ปลูกในระบบและพืชสีเขียวขนาดเล็ก ประเภทสาหร่ายและตะไคร่น้ำที่เกิดขึ้นในระบบ ซึ่งเป็นกระบวนการทางชีวภาพ และการบำบัดด้วยกระบวนการอื่นๆ เช่น การเกิดปฏิกิริยาทางเคมีและเกิดการตกตะกอนผลึก (Precipitation) ลงสู่พื้นท้องน้ำ (Kadlec and Knight, 1996; Brix, 1997)

ผลการตรวจวัดปริมาณ Mn และ Fe ที่ถูกดูดซับ ดูดซับและสะสมไว้โดยพืชสีเขียวภายในระบบที่ทำการศึกษา เมื่อสิ้นสุดการดำเนินระบบ พบว่า ปริมาณการสะสมทั้ง Mn และ Fe ในเนื้อเยื่อของรูปถ่ายแต่ละส่วนโดยส่วนใหญ่มีปริมาณการสะสมเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้ เนื้อเยื่อของรูปถ่ายส่วนเหนือดินในระบบบึงประดิษฐ์ที่ทำการศึกษาก่อนการระบายน้ำบาดาลลงสู่ระบบ มีปริมาณการสะสม Mn เท่ากับ 0.44 g/m² ขณะที่เนื้อเยื่อของรูปถ่ายส่วนใต้ดินก่อนการระบายน้ำบาดาลลงสู่ระบบ มีปริมาณการสะสม Mn เท่ากับ 0.71 g/m² เมื่อทำการตรวจวัดอัตราการสะสม Mn โดยเนื้อเยื่อของรูปถ่ายในระบบบึงประดิษฐ์ที่ดำเนินระบบที่ระยะกักพัก 0.5 day พบว่ารูปถ่ายในระบบมีอัตราการสะสม Mn ไว้ในเนื้อเยื่อส่วนเหนือดินตั้งแต่เริ่มระบายน้ำบาดาลจนสิ้นสุดการดำเนินระบบ เท่ากับ 5.64-7.65 mg/m²/d โดยเป็นการสะสมไว้ในส่วนของลำต้น เท่ากับ 1.80-2.41 mg/m²/d และสะสมไว้ในส่วนใบ เท่ากับ 3.85-5.24 mg/m²/d (ภาพที่ 4.16) ส่วนอัตราการสะสมของ Mn ในเนื้อเยื่อรูปถ่ายส่วนใต้ดินตั้งแต่เริ่มระบายน้ำบาดาลจนสิ้นสุดการดำเนินระบบ มีค่าเท่ากับ 8.30-13.40 mg/m²/d โดยเป็นการสะสมไว้ใน

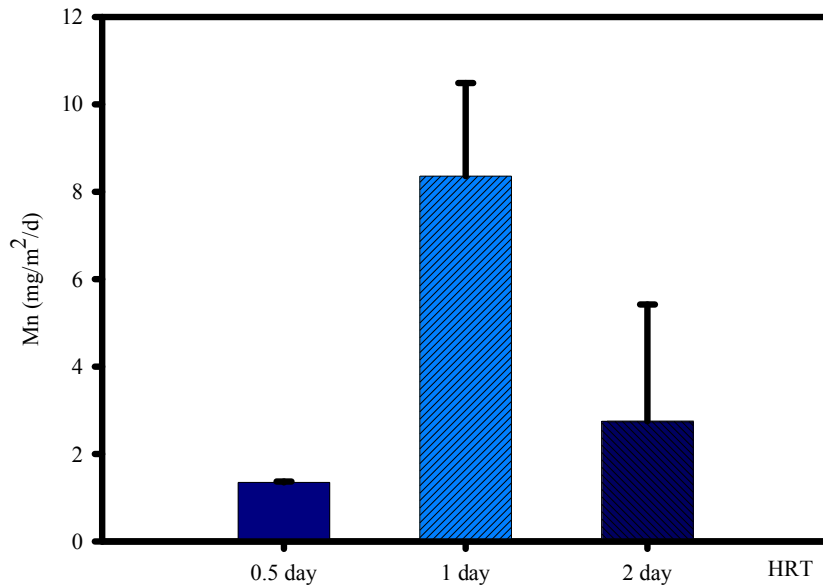
ส่วนราก เท่ากับ 2.77-5.66 mg/m²/d และสะสมไว้ในส่วนของรากฝอย เท่ากับ 5.53-7.74 mg/m²/d (ภาพที่ 4.17) และมีการสะสมของ Mn ในสาหร่าย ที่เกิดในระบบเท่ากับ 1.33-1.36 mg/m²/d (ภาพที่ 4.18)



ภาพที่ 4.16 อัตราการสะสม Mn ของรูปถ่ายี่ส่วนเหนือดิน



ภาพที่ 4.17 อัตราการสะสม Mn ของรูปถ่ายี่ส่วนใต้ดิน



ภาพที่ 4.18 อัตราการสะสม Mn ของสาหร่ายในระบบบึงประดิษฐ์

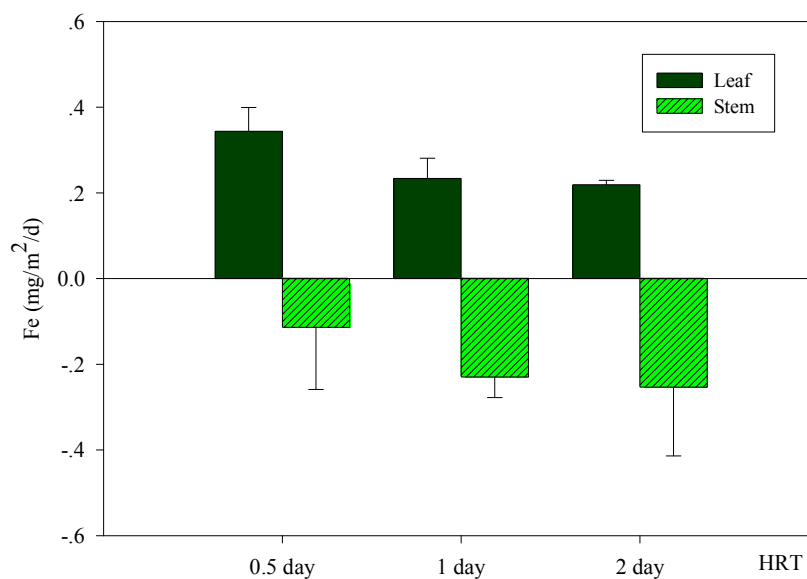
รูปถ่ายในระบบบึงประดิษฐ์ที่ดำเนินระบบที่ระยะกักพัก 1 day มีอัตราการสะสม Mn ไว้ในเนื้อเยื่อส่วนเหนือดินตั้งแต่เริ่มระบายน้ำบาดาลจนสิ้นสุดการดำเนินระบบ เท่ากับ 5.02-5.41 mg/m²/d โดยเป็นการสะสมไว้ในส่วนของลำต้น เท่ากับ 1.56-1.61 mg/m²/d และสะสมไว้ในส่วนใบ เท่ากับ 3.40-3.85 mg/m²/d (ภาพที่ 4.16) ส่วนอัตราการสะสมของ Mn ในเนื้อเยื่อส่วนใต้ดินตั้งแต่เริ่มระบายน้ำบาดาลจนสิ้นสุดการดำเนินระบบ เท่ากับ 4.37-4.91 mg/m²/d โดยเป็นการสะสมไว้ในส่วนราก เท่ากับ 1.81-2.27 mg/m²/d และสะสมไว้ในส่วนของรากฝอย เท่ากับ 2.56-2.64 mg/m²/d (ภาพที่ 4.17) และมีอัตราการสะสมของ Mn ในพืชสีเขียวขนาดเล็ก (สาหร่าย) ที่เกิดในระบบเท่ากับ 6.85-9.87 mg/m²/d (ภาพที่ 4.18)

รูปถ่ายในระบบบึงประดิษฐ์ที่ดำเนินระบบที่ระยะกักพัก 2 day มีอัตราการสะสม Mn ไว้ในเนื้อเยื่อส่วนเหนือดินตั้งแต่เริ่มระบายน้ำบาดาลจนสิ้นสุดการดำเนินระบบ เท่ากับ 2.65-2.90 mg/m²/d โดยเป็นการสะสมไว้ในส่วนของลำต้น เท่ากับ 1.10-1.31 mg/m²/d และสะสมไว้ในส่วนใบ เท่ากับ 1.34-1.80 mg/m²/d (ภาพที่ 4.16) ส่วนอัตราการสะสมของ Mn ในเนื้อเยื่อรูปถ่ายส่วนใต้ดินตั้งแต่เริ่มระบายน้ำบาดาลจนสิ้นสุดการดำเนินระบบ เท่ากับ 3.18-5.14 mg/m²/d โดยเป็นการสะสมไว้ในส่วนราก เท่ากับ 1.66-2.88 mg/m²/d และสะสมไว้ในส่วนของรากฝอย เท่ากับ 1.51-2.26 mg/m²/d (ภาพที่ 4.17) และมีอัตราการสะสมของ Mn ในพืชสีเขียวขนาดเล็ก (สาหร่าย) ที่เกิดในระบบเท่ากับ 0.86-4.64 mg/m²/d (ภาพที่ 4.18)

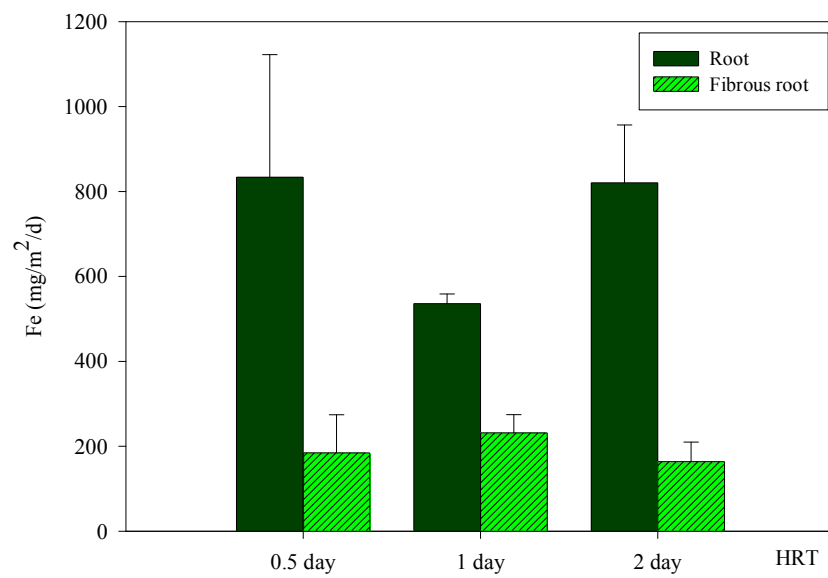
จากผลการศึกษา พบว่ารูปถ่ายมีส่วนเหนือดินและส่วนใต้ดินของแต่ละระบบที่มีระยะกักพักแตกต่างกันนั้น มีการสะสม Mn ไว้ ในรูปของมวลต่อพื้นที่ต่อช่วงเวลา ในอัตราที่ไม่แตกต่างกัน โดยรูปถ่ายมีส่วนเหนือดินนั้น จะพบการสะสม Mn ในรูปของมวลต่อพื้นที่ต่อเวลา ในส่วนของใบสูงกว่าส่วนต้น โดยอัตราการสะสมของใบและลำต้นมีค่าสูงที่สุดในระบบที่มีระยะกักพัก 0.5, 1 และ 2 day ตามลำดับ ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากปริมาณการรองรับน้ำและ Mn ของระบบ ทำให้พืชในระบบที่มีปริมาณการรองรับน้ำ และ Mn เข้าสู่ระบบสูงมีอัตราการสะสม Mn สูงด้วย ซึ่งจะพบว่าอัตราการสะสม Mn ในรูปของมวลต่อพื้นที่ต่อเวลาของรากและรากฝอย ก็เกิดขึ้นในลักษณะเดียวกัน คือพบอัตราการสะสมสูงในระบบที่มีปริมาณการรองรับน้ำ และ Mn สูง ทั้งนี้ พบว่ารากฝอยมีอัตราการสะสม Mn ในรูปมวลต่อพื้นที่ต่อเวลา สูงกว่าราก การตรวจพบอัตราการสะสม Mn สูง ในรูปถ่ายที่เก็บเกี่ยวจากระบบที่มีปริมาณการรองรับน้ำ และ Mn สูงนั้น อาจเนื่องมาจากการที่รูปถ่ายได้รับธาตุอาหารซึ่งปนเปื้อนมากับน้ำ พร้อมๆ กับการได้รับ Mn ในปริมาณสูงกว่ารูปถ่ายในระบบอื่น จึงทำให้รูปถ่ายในระบบดังกล่าวมีอัตราการเติบโตสูงและมีอัตราการสะสม Mn สูงด้วย ซึ่งจะสัมพันธ์กับค่าอัตราการเติบโตสัมพัทธ์ ซึ่งพบว่ามีค่าสูงที่สุดในระบบที่มีปริมาณการรองรับน้ำและ Mn สูงที่สุดด้วยเช่นกัน อย่างไรก็ตาม พบว่าอัตราการสะสม Mn ของรูปถ่ายมีส่วนเหนือดิน คืออัตราการสะสมของลำต้นและใบ มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P \geq 0.05$) เช่นเดียวกับค่าการสะสมของรากและรากฝอย ซึ่งไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P \geq 0.05$) เช่นเดียวกัน ในลักษณะเดียวกันกับการสะสม Mn ของสาหร่ายในแต่ละระบบที่มีระยะกักพักแตกต่างกัน ซึ่งพบว่ามีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ

ผลการตรวจวัดปริมาณ Fe ที่ถูกดูดซับ ดูดดึงและสะสมไว้โดยพืชสีเขียวภายในระบบที่ทำการศึกษ เมื่อสิ้นสุดการดำเนินระบบ พบว่า ปริมาณการสะสม Fe ในเนื้อเยื่อของรูปถ่าย มีทั้งอัตราการสะสมที่ลดลงและเพิ่มขึ้น ซึ่งอัตราการสะสม Fe ที่ลดลงนั้น พบในเนื้อเยื่อส่วนเหนือดิน โดยเฉพาะส่วนของลำต้น ทั้งนี้ เนื้อเยื่อของรูปถ่ายมีส่วนเหนือดินในระบบบึงประดิษฐ์ที่ทำการศึกษาก่อนการระบายน้ำบาดาลลงสู่ระบบ มีปริมาณการสะสม Fe เท่ากับ 0.53 g/m^2 ขณะที่เนื้อเยื่อของรูปถ่ายมีส่วนใต้ดินก่อนการระบายน้ำบาดาลลงสู่ระบบ มีปริมาณการสะสม Fe เท่ากับ 38.89 g/m^2 และเมื่อทำการตรวจวัดอัตราการสะสม Fe โดยเนื้อเยื่อของรูปถ่ายในระบบบึงประดิษฐ์ที่ดำเนินระบบที่ระยะกักพัก 0.5 day พบว่ารูปถ่ายในระบบมีการสะสม Fe ไว้ในเนื้อเยื่อส่วนเหนือดินตั้งแต่เริ่มระบายน้ำบาดาลจนสิ้นสุดการดำเนินระบบ เท่ากับ $0.17\text{-}0.29 \text{ mg/m}^2/\text{d}$ โดยการสะสมไว้ในส่วนของลำต้นนั้น มีอัตราการสะสมลดลงเท่ากับ -0.22 ถึง $-0.01 \text{ mg/m}^2/\text{d}$ ขณะที่อัตราการสะสม Fe ไว้ในส่วนใบ เท่ากับ $0.30\text{-}0.38 \text{ mg/m}^2/\text{d}$ (ภาพที่ 4.19) ส่วนอัตราการสะสม Fe ในเนื้อเยื่อรูปถ่ายส่วนใต้ดิน ตั้งแต่เริ่มระบายน้ำบาดาลจนสิ้นสุดการดำเนินระบบ มีค่าเท่ากับ $750.20\text{-}1,285.66 \text{ mg/m}^2/\text{d}$ โดยเป็นการสะสมไว้ในส่วนราก เท่ากับ $629.27\text{-}1,037.81 \text{ mg/m}^2/\text{d}$ และสะสมไว้ในส่วนของรากฝอย เท่ากับ $120.93\text{-}247.84 \text{ mg/m}^2/\text{d}$ (ภาพที่ 4.20) และมีอัตราการสะสมของ Fe ในพืชสีเขียวขนาดเล็ก (สาหร่าย) ที่เกิดในระบบเท่ากับ $0.03\text{-}0.04 \text{ mg/m}^2/\text{d}$ (ภาพที่ 4.21)

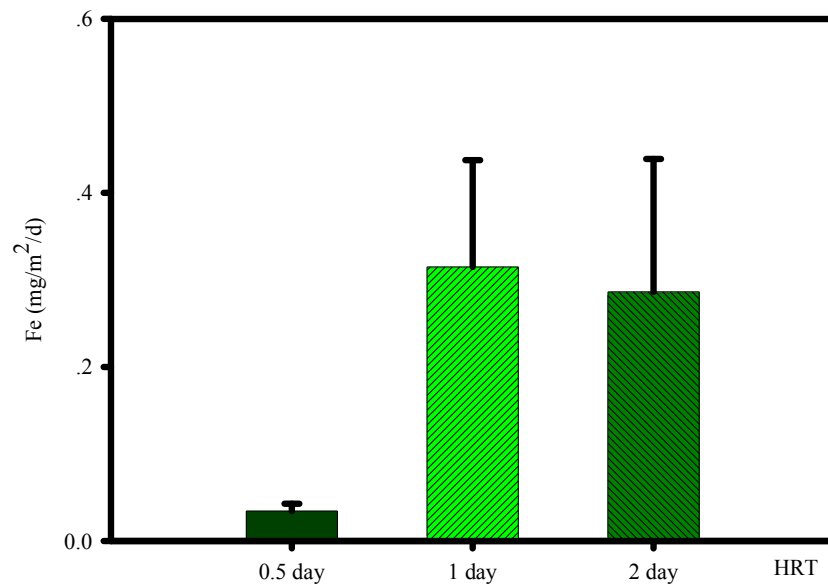
การตรวจวัดอัตราการสะสม Fe ของรูปถ่ายในระบบบึงประดิษฐ์ที่ดำเนินระบบที่ระยะกักพัก 1 day พบว่า มีอัตราการสะสม Fe ไว้ในเนื้อเยื่อส่วนเหนือดินตั้งแต่เริ่มระบายน้ำบาดาลจนสิ้นสุดการดำเนินระบบ ระหว่าง -0.06 ถึง $0.07 \text{ mg/m}^2/\text{d}$ (ภาพที่ 4.19) โดยการสะสมไว้ในส่วนของลำต้นนั้นมีค่าลดลง ทั้งนี้มีค่าระหว่าง -0.26 ถึง $-0.20 \text{ mg/m}^2/\text{d}$ การสะสม Fe ไว้ในใบ มีค่าเท่ากับ 0.20 - $0.27 \text{ mg/m}^2/\text{d}$ ส่วนอัตราการสะสม Fe ในเนื้อเยื่อรูปถ่ายส่วนใต้ดิน ตั้งแต่เริ่มระบายน้ำบาดาลจนสิ้นสุดการดำเนินระบบ มีค่าเท่ากับ 721.22 - $813.93 \text{ mg/m}^2/\text{d}$ โดยเป็นการสะสมไว้ในส่วนราก เท่ากับ 519.94 - $552.05 \text{ mg/m}^2/\text{d}$ และสะสมไว้ในรากฝอย เท่ากับ 201.28 - $261.88 \text{ mg/m}^2/\text{d}$ (ภาพที่ 4.20) และมีอัตราการสะสมของ Fe ในพืชสีเขียวขนาดเล็ก (สาหร่าย) ที่เกิดในระบบเท่ากับ 0.23 - $0.40 \text{ mg/m}^2/\text{d}$ (ภาพที่ 4.21)



ภาพที่ 4.19 อัตราการสะสม Fe ของรูปถ่ายส่วนเหนือดิน



ภาพที่ 4.20 อัตราการสะสม Fe ของรูปถ่ายส่วนใต้ดิน



ภาพที่ 4.21 อัตราการสะสม Fe ของสาหร่ายในระบบบึงประดิษฐ์

อัตราการสะสม Fe ของรูปธาตุในระบบบึงประดิษฐ์ที่ดำเนินระบบที่มีระยะกักพัก 2 day พบว่า มีอัตราการสะสม Fe ไว้ในเนื้อเยื่อส่วนเหนือดินตั้งแต่เริ่มระบายน้ำบาดาลจนสิ้นสุดการดำเนินระบบ ระหว่าง -0.14 ถึง -0.07 $\text{mg/m}^2/\text{d}$ โดยการสะสมในส่วนของลำต้น มีค่าลดลง ทั้งนี้มีค่าระหว่าง -0.37 ถึง -0.14 $\text{mg/m}^2/\text{d}$ การสะสม Fe ไว้ในส่วนใบ มีค่าเท่ากับ 0.21 - 0.23 $\text{mg/m}^2/\text{d}$ (ภาพที่ 4.19) ส่วนอัตราการสะสมของ Fe ในเนื้อเยื่อรูปธาตุส่วนใต้ดินตั้งแต่เริ่มระบายน้ำบาดาลจนสิ้นสุดการดำเนินระบบ มีค่าเท่ากับ 855.63 - $1,113.17$ $\text{mg/m}^2/\text{d}$ โดยเป็นการสะสมไว้ในราก เท่ากับ 724.49 - 916.78 $\text{mg/m}^2/\text{d}$ และสะสมไว้ในรากฝอย เท่ากับ 131.14 - 196.39 $\text{mg/m}^2/\text{d}$ (ภาพที่ 4.20) และมีอัตราการสะสมของ Fe ในพืชสีเขียวขนาดเล็ก (สาหร่าย) ที่เกิดในระบบเท่ากับ 0.18 - 0.39 $\text{mg/m}^2/\text{d}$ (ภาพที่ 4.21)

จากผลการศึกษา พบว่ารูปธาตุส่วนเหนือดินและส่วนใต้ดินของแต่ละระบบที่มีระยะกักพักแตกต่างกันนั้น มีการสะสม Fe ไว้ ในรูปของมวลต่อพื้นที่ต่อช่วงเวลา ในอัตราที่ไม่แตกต่างกันระหว่างระบบที่มีระยะกักพักแตกต่างกัน โดยรูปธาตุส่วนเหนือดินนั้น จะพบการสะสม Fe ในรูปของมวลต่อพื้นที่ต่อเวลา ในส่วนของใบสูงกว่าส่วนต้น ทั้งนี้พบว่าอัตราการสะสม Fe ในรูปของมวลต่อพื้นที่ต่อเวลา ของลำต้นมีค่าลดลงหรือติดลบ โดยอัตราการสะสมของทั้งใบและลำต้นมีค่าสูงที่สุดในระบบที่มีระยะกักพัก 0.5, 1 และ 2 day ตามลำดับ ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการสะสม Mn ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากปริมาณการรองรับน้ำ และ Fe ของระบบ ซึ่งทำให้พืชในระบบที่มีปริมาณการรองรับน้ำ ซึ่งมีธาตุอาหารปนเปื้อนมาด้วย และ Fe ในปริมาณสูง มีอัตราการเติบโตและอัตราการสะสม Fe สูงด้วย ซึ่งจะพบว่าอัตราการสะสม Fe ในรูปของมวลต่อพื้นที่ต่อเวลาของรากและรากฝอย ก็เกิดขึ้นในลักษณะเดียวกัน คือมีอัตราการสะสมสูงในระบบที่มีปริมาณการรองรับน้ำ และ Fe สูง ทั้งนี้ พบว่ารากมีอัตราการสะสม Fe ในรูปมวลต่อพื้นที่ต่อเวลา สูงกว่ารากฝอย ซึ่งแตกต่างจากการสะสม Mn ที่มีการสะสมสูงในรากฝอย อย่างไรก็ตาม พบว่าอัตราการสะสม Fe ของรูปธาตุส่วนเหนือดิน คืออัตราการสะสมของลำต้นและใบ มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P \geq 0.05$) เช่นเดียวกับค่าการสะสมของรากและรากฝอย ซึ่งไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P \geq 0.05$) ขณะที่ อัตราการสะสม Fe ของสาหร่ายในแต่ละระบบที่มีระยะกักพักแตกต่างกัน มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติเช่นเดียวกัน

ทั้งนี้พบว่า การบำบัด Mn และ Fe ในน้ำบาดาลด้วยการสะสมไว้ในเนื้อเยื่อของรูปธาตุ และพืชน้ำสีเขียวขนาดเล็กที่เกิดในระบบ ภายในระบบบึงประดิษฐ์แต่ละระบบที่มีระยะเวลากักพักน้ำที่แตกต่างกัน (0.5, 1 และ 2 day) นั้น มีอัตราในการสะสมในแต่ละส่วนของพืชเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ดังนี้คือ การสะสม Mn ของเนื้อเยื่อรูปธาตุส่วนเหนือดินและส่วนใต้ดินมีอัตราการสะสมใกล้เคียงกัน โดยพบว่ารูปธาตุในระบบบึงประดิษฐ์ที่มีระยะเวลากักพักน้ำของระบบ เท่ากับ 0.5 day จะมีอัตราการสะสม Mn ทั้งในเนื้อเยื่อรูปธาตุส่วนเหนือดินและส่วนใต้ดินสูงกว่าระบบที่มีระยะกักพักที่ยาวนานกว่า คือ 1 และ 2 day ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาการสะสม Mn แยกเป็นการสะสมในใบ ลำต้น ราก และรากฝอย ก็จะพบว่า อัตราการสะสมของพืชแต่ละส่วนดังกล่าวข้างต้นมีค่าใกล้เคียงกัน โดยแต่ละส่วนจะมีค่าการสะสม Mn สูงสุดเรียงลำดับจากพืชในระบบที่มีระยะเวลากักพักน้ำของ

ระบบ เท่ากับ 0.5, 1 และ 2 day ตามลำดับ เช่นกัน ยกเว้นการสะสมในรากและสาหร่าย ซึ่งพบว่ามีค่าการสะสมต่อพื้นที่ต่อเวลา สูงสุดในระบบบึงประดิษฐ์ที่มีระยะเวลาการกักพืชน้ำ เท่ากับ 0.5, 2 และ 1 day ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม อัตราการสะสมในแต่ละส่วนของพืช ในแต่ละระบบที่มีระยะกักพืชน้ำแตกต่างกันดังกล่าวข้างต้น มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P \geq 0.05$)

ขณะที่ การสะสม Fe ในเนื้อเยื่อส่วนต่างๆ ของรูกุญแจและสาหร่าย มีอัตราการสะสมที่แตกต่างกัน โดยเฉพาะการสะสมในเนื้อเยื่อส่วนเหนือดินและส่วนใต้ดินของรูกุญแจ ซึ่งพบว่าเนื้อเยื่อส่วนใต้ดินของรูกุญแจ มีอัตราการสะสม Fe สูงมาก ขณะที่ อัตราการสะสมของเนื้อเยื่อส่วนเหนือดินมีค่าต่ำและมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับปริมาณ Fe ที่มีอยู่เดิมก่อนเริ่มดำเนินระบบ ทั้งนี้ เนื่องจากรูกุญแจส่วนเหนือดินในระบบบึงประดิษฐ์มีปริมาณของมวลชีวภาพเพิ่มขึ้นสูงมาก แต่ค่าความเข้มข้นของ Fe ในมวลชีวภาพของโครงสร้างส่วนเหนือดินมีค่าลดลงจากก่อนเริ่มดำเนินระบบมาก ทำให้อัตราการสะสม Fe ของเนื้อเยื่อส่วนเหนือดินมีค่าต่ำ ขณะที่ รูกุญแจส่วนใต้ดินนั้น มีปริมาณมวลชีวภาพเพิ่มสูงขึ้น และมีค่าความเข้มข้นของ Fe ในมวลชีวภาพส่วนใต้ดินสูงขึ้นด้วยเช่นกัน โดยมีค่าความเข้มข้นสูงขึ้นจากเดิมประมาณ 18 เท่า ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการกักเก็บ Fe ของรูกุญแจส่วนใต้ดิน โดยมีการเคลื่อนย้ายไปยังส่วนอื่นๆ ในปริมาณน้อย ดังนั้น เนื้อเยื่อรูกุญแจส่วนใต้ดินจึงมีอัตราการสะสม Fe สูงมาก เมื่อเทียบกับรูกุญแจส่วนเหนือดินและสาหร่าย ทั้งนี้ พบว่าอัตราการสะสม Fe ในแต่ละส่วนของรูกุญแจในแต่ละระบบที่มีระยะกักพืชน้ำแตกต่างกัน มีค่าเป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยระยะกักพืชน้ำไม่ส่งผลที่ชัดเจนต่ออัตราการสะสม Fe ของพืช ขณะที่ระยะกักพืชน้ำส่งผลให้เห็นแนวโน้มของอัตราการสะสม Mn ของพืช ซึ่งพบว่ามีค่าสูงสำหรับระยะเวลาการกักพืชน้ำที่สั้น

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 ผลของระยะกักพักต่อประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียและเหล็กในน้ำบาดาล

น้ำบาดาลจากจากบ่อบาดาล ซึ่งเกษตรกรขุดขึ้นเพื่อใช้ในการเกษตรกรรม ได้ถูกนำมาใช้ในการศึกษา ซึ่งคุณภาพของน้ำบาดาลก่อนการปรับปรุง พบว่า มีค่าของ Total Mn สูงกว่าค่าสูงสุดของ Total Mn ในแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 3 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1 mg/l และสูงกว่าเกณฑ์ที่ยอมให้มีในน้ำชลประทาน ซึ่งกำหนดให้น้ำชลประทานไม่ควรจะมี Total Mn สูงกว่า 0.2 mg/l ทั้งนี้ Total Mn อาจเป็นพิษต่อพืชได้โดยเฉพาะในพื้นที่ที่เป็นดินกรด (Ayers and Westcot, 1994) ปริมาณ Fe ในน้ำบาดาลก่อนการปรับปรุงมีค่าสูงกว่าค่าที่ยอมให้มีในน้ำชลประทาน ซึ่งกำหนดให้น้ำชลประทาน ไม่ควรมี Total Fe สูงกว่า 5.0 mg/l ซึ่ง Fe สามารถส่งผลทำให้ดินเป็นกรด และสูญเสียปริมาณฟอสฟอรัสและ โมลิบดีนัม ที่เป็นประโยชน์ (Ayers and Westcot, 1994) นอกจากนี้ ความเข้มข้นของเหล็กในสารละลายดินที่สูง จะส่งผลทำให้การดูดโพแทสเซียมของข้าวลดลง โดยความเป็นพิษของธาตุเหล็ก มักเกิดขึ้นกับข้าวซึ่งปลูกในสภาพน้ำท่วมขัง (ประพาส, 2537)

ในการศึกษาครั้งนี้ น้ำจากบ่อบาดาล ซึ่งมี Total Mn และ Total Fe ปนเปื้อนในน้ำระหว่าง 1.03-5.32 mg/l และ 0.57-19.46 mg/l ถูกระบายลงสู่ระบบบึงประดิษฐ์ด้วยอัตราการไหลเท่ากับ 200, 100 และ 50 l/d ซึ่งทำให้น้ำมีระยะการกักพักภายในระบบ เท่ากับ 0.5, 1 และ 2 day ตามลำดับ และทำให้ระบบบึงประดิษฐ์ที่ทำการปรับปรุงคุณภาพน้ำที่ระยะกักพัก 0.5, 1 และ 2 day มีอัตราการรองรับ Total Mn เฉลี่ยเท่ากับ 0.656, 0.331 และ 0.166 g/m²/d ตามลำดับ และมีอัตราการรองรับ Total Fe เฉลี่ยเท่ากับ 0.941, 0.571 และ 0.292 g/m²/d ตามลำดับ ภายหลังจากการปรับปรุงคุณภาพน้ำมีปริมาณการปนเปื้อน Total Mn และ Total Fe ลดลง โดยน้ำบาดาลที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพที่ระยะกักพัก 0.5, 1 และ 2 day มี Total Mn ปนเปื้อน เฉลี่ยเท่ากับ 0.145, 0.113 และ 0.039 mg/l ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำผิวดินประเภทที่ 3 (Total Mn ≤ 1 mg/l) และอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดให้มีได้ในน้ำชลประทาน (Total Mn ≤ 0.2 mg/l) และมี Total Fe ปนเปื้อน เฉลี่ยเท่ากับ 0.700, 0.578 และ 0.512 mg/l ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดให้มีได้ในน้ำชลประทาน (Total Fe ≤ 5.0 mg/l) ทั้งนี้ พบว่า ค่าความเข้มข้นของ Total Mn และ Total Fe ในน้ำหลังการปรับปรุงคุณภาพที่ระยะกักพักต่างๆ ไม่แตกต่างกัน แต่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) เมื่อเทียบกับค่าความเข้มข้นของ Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาลก่อนการปรับปรุงคุณภาพ

ผลการศึกษา พบว่า ระบบบึงประดิษฐ์มีประสิทธิภาพในการลด Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาลสูงกว่าระบบควบคุม (Control units) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยบึงประดิษฐ์มีประสิทธิภาพในการลดความเข้มข้นของ Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาล เท่ากับ 46.42-99.84 % และ 9.02-98.89 % การปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาลที่ระยะกักพัก 2 day มีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดความเข้มข้นของ Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาล โดยระบบมีอัตราการบำบัด Total Mn และ Total Fe เท่ากับ 0.050-1.053 g/m²/d และ 0.008-2.219 g/m²/d ทั้งนี้ พบว่า การกักพักน้ำที่ระยะกักพัก 0.5 day มีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดปริมาณ Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาล ต่อพื้นที่ต่อช่วงเวลาเท่ากัน และพบว่า มีประสิทธิภาพแตกต่างจากการบำบัดที่ระยะกักพัก 1 และ 2 day อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ดังนั้น การปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาลโดยการลดปริมาณ Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาล ด้วยการกักพักน้ำในระบบบึงประดิษฐ์ที่ระยะกักพักเท่ากับ 0.5 day จึงเป็นระยะกักพักที่เหมาะสมในการปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาล เนื่องจากเป็นระยะกักพักที่มีอัตราการบำบัด Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาล ต่อพื้นที่ต่อช่วงเวลาเท่ากัน สูงกว่าการบำบัดที่ระยะกักพัก 1 และ 2 day อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ นอกจากนี้ ยังสามารถปรับปรุงคุณภาพน้ำ ทำให้น้ำบาดาลหลังการบำบัดมี Total Fe ปนเปื้อนอยู่ในปริมาณที่ไม่แตกต่างจากการปรับปรุงคุณภาพที่ระยะกักพักอื่น ที่ใช้ระยะเวลา ยาวนานกว่าในการบำบัด ซึ่งอาจทำให้น้ำที่ได้ภายหลังการปรับปรุงคุณภาพมีปริมาณไม่เพียงพอต่อการนำไปใช้ในการทำนาหรือการเกษตรกรรมอื่นๆ ซึ่งเป็นกิจกรรมที่ต้องการน้ำในปริมาณมาก

5.1.2 สมการในการคาดการณ์ประสิทธิภาพการบำบัดแมงกานีส และเหล็กของระบบบึงประดิษฐ์

ข้อมูลจากการศึกษา ถูกนำไปใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้ในการคาดการณ์ประสิทธิภาพเบื้องต้นของระบบในการบำบัด Total Fe และ Total Mn ในรูปของสมการสหสัมพันธ์ถดถอย (Regression) และสมการปฏิกิริยาลำดับหนึ่ง (First-order kinetics) โดยสมการสหสัมพันธ์ถดถอย สำหรับการคาดการณ์ประสิทธิภาพการบำบัดแมงกานีส (Eq. 1) และเหล็ก (Eq. 2) ของระบบบึงประดิษฐ์ ที่กำหนดขึ้นคือ

$$y = 1.0105X_1 + 0.0198X_0 - 0.0411, \text{ for Mn removal} \quad R^2 = 0.9871 \quad \text{_____ (Eq. 1)}$$

$$y = 0.9714X_1 + 0.0575X_0 - 0.1238, \text{ for Fe removal} \quad R^2 = 0.9930 \quad \text{_____ (Eq. 2)}$$

เมื่อ

$$y = \text{Removal rate (g/m}^2\text{/d)}$$

$$X_1 = \text{Loading rate (g/m}^2\text{/d)}$$

$$X_0 = \text{Hydraulic retention time (day)}$$

สมการปฏิกิริยาลำดับหนึ่ง (First-order kinetics) สำหรับการคาดการณ์ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนีย (Eq. 3) และเหล็ก (Eq. 4) ของระบบบึงประดิษฐ์ ที่กำหนดขึ้นคือ

$$R_o = \frac{Q}{A} C (1 - (e^{-0.8235t} \times 0.050)), \text{ for Mn removal} \quad \text{_____ (Eq. 3)}$$

$$R_o = \frac{Q}{A} C (1 - (e^{-0.4186t} \times 0.171)), \text{ for Fe removal} \quad \text{_____ (Eq. 4)}$$

ผลการทดสอบประสิทธิภาพของสมการ Regression และสมการ First order kinetics ที่กำหนดขึ้น (Model validation) ในการคาดการณ์ ประสิทธิภาพของระบบ ด้วยข้อมูลการบำบัด Total Fe และ Total Mn ในน้ำบาดาลด้วยระบบบำบัดประเภทเดียวกันนี้ ซึ่งเป็นการศึกษาในประเด็นอื่น มีดังนี้ การคาดการณ์ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบด้วย Regression prediction model พบว่า อัตราการบำบัด Total Fe และ Total Mn ที่ได้จากการคำนวณ โดยส่วนใหญ่มีค่าต่ำกว่าค่าจากการตรวจวัด และแตกต่างกันทางสถิติ โดยค่าเฉลี่ยของอัตราการบำบัด Total Fe และ Total Mn ที่ได้จากการคำนวณ มีค่าต่ำกว่าค่าเฉลี่ยของอัตราการบำบัดที่ได้จากการตรวจวัดจริง 0.0486 และ 0.0269 g/m²/d ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Pearson correlation) ระหว่างอัตราการบำบัดที่ตรวจวัดจริงและอัตราการบำบัดจากการคำนวณ สำหรับการบำบัด Total Fe และ Total Mn มีค่าเท่ากับ 0.982 และ 0.992 อย่างไรก็ตาม ข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบเป็นข้อมูลจากระบบบึงประดิษฐ์ที่ทำการบำบัดน้ำที่ระยะกักพักเท่ากับ 0.5 day เท่านั้น

ผลการทดสอบประสิทธิภาพของ First order kinetics prediction model (Model validation) ในการคาดการณ์อัตราการบำบัดของระบบ ด้วยข้อมูลการบำบัด Total Fe และ Total Mn ในน้ำบาดาลด้วยระบบบำบัดประเภทเดียวกันนี้ ซึ่งเป็นการศึกษาในประเด็นอื่น พบว่าอัตราการบำบัด Total Fe และ Total Mn ที่ได้จากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการที่ตรวจวัด โดยสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Pearson correlation) ระหว่างอัตราการบำบัดที่ตรวจวัดได้และอัตราการบำบัดจากการคำนวณ สำหรับการบำบัด Total Fe และ Total Mn มีค่าเท่ากับ 0.982 และ 0.992 และการทดสอบ Pair t-test ระหว่างอัตราการบำบัดทั้งสองประเภท พบว่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ทั้งนี้ พบว่าเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับผลการศึกษาของ Nitisoravut and Klomjek (2005) ซึ่งพบว่า สมการ First order kinetics สามารถประยุกต์ใช้ในการคาดการณ์ประสิทธิภาพของระบบบึงประดิษฐ์ในการลดค่า BOD₅ ในน้ำเสียที่มีค่าความเข้มข้นสูงกว่าปกติได้ อย่างไรก็ตาม ข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบ First order kinetics prediction model ในการศึกษาครั้งนี้เป็นข้อมูลจากระบบบึงประดิษฐ์ที่ทำการบำบัดน้ำที่ระยะกักพักเท่ากับ 0.5 day เท่านั้น

5.1.3 การสะสมแมงกานีสและเหล็กขององค์ประกอบภายในระบบบึงประดิษฐ์

เมื่อสิ้นสุดการดำเนินระบบ องค์ประกอบของระบบบึงประดิษฐ์ ประกอบด้วย ดิน ส่วนต่างๆ ของรูปภาณี และพืชขนาดเล็กที่เกิดในระบบ (สาหร่าย) ได้ถูกนำมาตรวจวัดค่าความเข้มข้นและอัตราการสะสม Mn และ Fe ซึ่งผลการศึกษามีดังนี้

1) การสะสมแมงกานีสและเหล็กของดินในระบบบึงประดิษฐ์

ผลการตรวจวัด Mn และ Fe ในดิน เมื่อสิ้นสุดการดำเนินระบบ พบว่า ในระบบที่มีระยะกักพักเท่ากับ 0.5 day นั้น ค่า Mn ของดินที่ระดับผิวดิน (0-5.5 cm) และ ดินชั้นล่าง (>5.5-11.0 cm) มีค่า 591.08-758.44 ppm และ 603.42-759.02 ppm ค่า Fe ของดินที่ระดับผิวดิน และ ดินชั้นล่าง มีค่าเท่ากับ 17.17-31.85 ppm และ 11.59-33.90 ppm ส่วนระบบที่มีระยะกักพักเท่ากับ 1 day ดินที่ระดับผิวดิน และดินชั้นล่าง มีค่า Mn เท่ากับ 602.16-697.35 ppm และ 525.81-703.05 ppm และ ค่า Fe ที่ตรวจวัดได้ในดินที่ระดับผิวดิน และ ดินชั้นล่าง มีค่าเท่ากับ 12.96-87.11 ppm และ 6.44-54.37 ppm ขณะที่ ในระบบที่มีระยะกักพักเท่ากับ 2 day ค่า Mn ของดินที่ระดับผิวดิน และดินชั้นล่าง มีค่า 529.36-621.43 ppm และ 519.89-663.64 ppm ส่วน ค่า Fe ที่ตรวจวัดได้ในดินที่ระดับผิวดิน และ ดินชั้นล่าง มีค่าเท่ากับ 3.10-117.50 ppm และ 2.00-125.00 ppm

ความเข้มข้นของ Mn และ Fe ในดิน ภายหลังการดำเนินระบบ มีค่าเพิ่มสูงขึ้นในทุก ระบบ โดยเฉพาะค่า Mn ผลจากการตรวจวัด พบว่าความเข้มข้นของ Mn ในดินชั้นล่าง และความเข้มข้นของ Fe ในดินชั้นบนและดินชั้นล่าง ในแต่ละระบบที่มีระยะกักพักแตกต่างกัน มีค่าไม่แตกต่างกัน เช่นเดียวกันกับค่าของดัชนีชี้วัดคุณสมบัติของดินตัวอื่นๆ รวมถึงความเข้มข้นของ Mn และ Fe ระหว่างดินชั้นบนและดินชั้นล่างของแต่ละระยะกักพัก ทั้งนี้ ยกเว้นความเข้มข้นของ Fe ของดินชั้นบน ในระบบที่มีระยะกักพัก 0.5 day ซึ่งมีค่าสูงกว่าดินชั้นล่าง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) และพบว่าความเข้มข้นของ Mn ในดินชั้นบน ในระบบที่มีระยะกักพัก 0.5 และ 1 day มีค่าสูงกว่าในระบบที่มีระยะกักพัก 2 day ผลการตรวจวัดโดยส่วนใหญ่ไม่พบความแตกต่างระหว่างชั้นดิน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากตำแหน่งที่ทำการตรวจวัดนั้น มีความใกล้เคียงกัน จึงไม่พบความเปลี่ยนแปลงหรือความแตกต่างระหว่างชั้นดิน อันเป็นผลจากการดำเนินระบบ อย่างไรก็ตาม ผลการศึกษา ได้บ่งชี้ชัดเจนถึงการสะสม Mn และ Fe ของดินในระบบ ซึ่งทำให้ดินในระบบมีค่าความเข้มข้นของทั้ง Mn และ Fe สูงขึ้นเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะดินบริเวณผิวน้ำดิน ซึ่งเป็นส่วนที่รองรับตะกอนโลหะหนักทั้งสองประเภทจากกระบวนการกรองและการตกตะกอนของโลหะหนักแขวนลอยที่เกิดขึ้นในระบบ ขณะที่สารละลาย Mn และ Fe ในน้ำมีโอกาสทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในน้ำ รวมถึงออกซิเจนบริเวณรากพืชหรือบริเวณ Rhizosphere แล้วเกิดการตกตะกอนผลึก (Precipitation) ลงสู่ดิน ทำให้ดินมีการสะสม Mn และ Fe มากขึ้น ทั้งจากกระบวนการกรอง การตกตะกอน และการตกตะกอนผลึก ซึ่งพืชในระบบเป็นปัจจัยหนึ่งที่ช่วยส่งเสริมการเกิดกระบวนการทั้งทางกายภาพและทางเคมีดังกล่าวด้วย

2) การสะสมแมงกานีสและเหล็กของพืชในระบบบึงประดิษฐ์

เมื่อสิ้นสุดการดำเนินระบบ พบว่าน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของรูปถ่ายิส่วนเหนือดิน ในระบบที่มีระยะกักพัก 0.5, 1 และ 2 day มีค่า 3,852.80-18,732.00, 3,174.40-1,0912.80 และ 3,560.00-12,788.80 g/m² ตามลำดับ และ 956.80-2,398.40, 680.00-1,440.00 และ 817.60-1,297.60 g/m² ตามลำดับ ส่วนน้ำหนักสดของรูปถ่ายิส่วนใต้ดิน (ราก) ในระบบที่มีระยะกักพัก 0.5, 1 และ 2 day มีค่า 2,904.00-6,380.80, 1,558.40-4,684.80 และ 2,803.20-4,910.40 g/m² ตามลำดับ ขณะที่ น้ำหนักแห้งของรูปถ่ายิส่วนใต้ดิน (รวมรากและรากฝอย) ในระบบที่มีระยะกักพัก 0.5, 1 และ 2 day มีค่าเท่ากับ 704.70-1251.90, 397.80-1180.20 และ 607.80-1030.00 g/m² ตามลำดับ

อัตราการเติบโตสัมพัทธ์ (Relative growth rate: RGR) ของรูปถ่ายิในระบบที่มีระยะกักพัก 0.5, 1 และ 2 day มีค่า 0.0318-0.0433, 0.0275-0.0369 และ 0.0298-0.0356 per day ตามลำดับ ทั้งนี้ พบว่า น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของทั้งส่วนเหนือดินและส่วนใต้ดินของรูปถ่ายิที่เจริญเติบโตในระบบ ที่มีระยะกักพักแตกต่างกันนั้น มีค่าเฉลี่ยไม่แตกต่างกัน ขณะที่อัตราการเติบโตสัมพัทธ์ของรูปถ่ายิในแต่ละระบบ มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ เช่นเดียวกัน

มวลชีวภาพแห้งของรูปถ่ายิส่วนเหนือดิน คือ ส่วนลำต้นและใบ ซึ่งเก็บเกี่ยวจากระบบที่มีระยะกักพัก 0.5, 1 และ 2 day มีค่าความเข้มข้นของ Mn เท่ากับ 222.78-444.97, 272.66-401.23 และ 271.87-380.88 mg/kg ตามลำดับ และ 491.08-893.89, 426.72-1152.59 และ 380.58-677.40 mg/kg ตามลำดับ ส่วนค่าความเข้มข้นของ Mn ในมวลชีวภาพแห้งของรูปถ่ายิส่วนใต้ดิน คือ ส่วนรากและ รากฝอย ซึ่งเก็บเกี่ยวจากระบบที่มีระยะกักพัก 0.5, 1 และ 2 day นั้น มีค่าเท่ากับ 348.34-836.98, 283.28-563.18 และ 325.79-525.02 mg/kg ตามลำดับ และ 4,980.18-7,980.30, 1,684.31-2,400.99 และ 1,567.86-2,168.62 mg/kg ตามลำดับ ทั้งนี้ พบว่าค่าความเข้มข้นของ Mn ในเนื้อเยื่อของรูปถ่ายิทั้งส่วนเหนือดินและส่วนใต้ดิน เมื่อสิ้นสุดการดำเนินระบบมีค่าสูงขึ้น โดยเฉพาะค่าความเข้มข้นของ Mn ในเนื้อเยื่อของรูปถ่ายิส่วนใต้ดิน โดยเฉพาะรากฝอย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากรากฝอยมีพื้นที่ผิวมาก ทำให้เกิดการกรอง การดูดซับและดูดดึงโลหะหนักไว้ได้มาก ทั้งนี้ พบว่าค่าความเข้มข้นของ Mn ในเนื้อเยื่อทั้งส่วนลำต้น รากและรากฝอย มีค่าสูงที่สุดในพืชที่เก็บเกี่ยวจากระบบที่มีระยะกักพัก 0.5 day และค่าความเข้มข้นของ Mn ในเนื้อเยื่อทั้งส่วนต้น รากและรากฝอย ที่เก็บเกี่ยวจากระบบที่มีระยะกักพัก 1 day และ 2 day มีค่าลดลง ตามลำดับ และพบว่าค่าความเข้มข้นของ Mn ในพืชที่เก็บเกี่ยวจากระบบที่มีระยะกักพักแตกต่างกันจะมีค่าแตกต่างกันทางสถิติ อย่างไรก็ตาม โดยรวมแล้ว พบว่าความเข้มข้นของ Mn ในเนื้อเยื่อของรูปถ่ายิส่วนเหนือดิน ซึ่งมีค่าระหว่าง 222.77-1,152.59 mg/kg นั้น มีค่าเฉลี่ยต่ำกว่า และแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจากค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของ Mn ที่พบในรูปถ่ายิส่วนใต้ดิน ซึ่งมีค่าระหว่าง 283.28-7,098.47mg/kg โดยสัดส่วนความเข้มข้นของ Mn ในเนื้อเยื่อของรูปถ่ายิส่วนใต้ดินต่อความเข้มข้นของ Mn ในเนื้อเยื่อของรูปถ่ายิส่วนเหนือดิน (Root:Shoot) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.7-4.2 โดยพบค่า Root:Shoot สูงสุดในระบบที่มีระยะกักพักเท่ากับ 0.5 day

ความเข้มข้นของ Fe ในมวลชีวภาพแห้งของรูปถ่ายิยัส่วนเหนือดิน คือ ส่วนลำต้น และใบ ซึ่งเก็บเกี่ยวจากระบบที่มีระยะกักพัค 0.5, 1 และ 2 day มีค่าเท่ากับ 50.22-102.84, 45.09-146.66 และ 33.32-149.01 mg/kg ตามลำดับ และ 31.94-74.03, 44.51-96.59 และ 52.80-117.44 mg/kg ตามลำดับ ส่วนความเข้มข้นของ Fe ในมวลชีวภาพแห้งของรูปถ่ายิยัส่วนใต้ดิน คือ ส่วนรากและรากฝอย ซึ่งเก็บเกี่ยวจากระบบที่มีระยะกักพัค 0.5, 1 และ 2 day มีค่าเท่ากับ 71,202.38-132,148.11, 55,847.08-105,348.26 และ 80,252.30-123,185.88 mg/kg ตามลำดับ และ 140,418.72-221,902.87, 150,470.30-208,657.07 และ 145,075.94-176,218.32 mg/kg ตามลำดับ ทั้งนี้ พบว่าเมื่อสิ้นสุดการดำเนินระบบ ค่าความเข้มข้นของ Fe ในเนื้อเยื่อของรูปถ่ายิยัส่วนเหนือดินมีค่าลดลง ขณะที่ ความเข้มข้นของ Fe ในเนื้อเยื่อของรูปถ่ายิยัส่วนใต้ดินมีค่าสูงขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเจริญเติบโตของมวลชีวภาพของส่วนเหนือดินที่เพิ่มมากขึ้น ขณะที่การดูดซับ (Adsorption) และดูดดึง (Uptake) Fe โดยส่วนใหญ่ จะเกิดขึ้นกับมวลชีวภาพส่วนใต้ดิน การเจริญเติบโตของมวลชีวภาพส่วนเหนือดินที่มีมากเกินไป การเคลื่อนย้าย Fe จากมวลชีวภาพส่วนใต้ดินมาสะสมไว้ในมวลชีวภาพส่วนเหนือดิน จะทำให้ความเข้มข้นของ Fe ในเนื้อเยื่อพืชส่วนเหนือดิน มีค่าลดลงได้ ขณะที่ พืชส่วนใต้ดิน เป็นส่วนที่มีโอกาสเกิดการสัมผัสกับ Fe ในน้ำและ Fe ที่ตกตะกอนลงสู่พื้นท้องน้ำ นอกจากนั้น วัชวะส่วนใต้ดิน (ราก) ยังทำหน้าที่หลักในการดูดดึงสารละลายอนินทรีย์เข้าสู่เซลล์ (Groudeva et al., 2001; Barley et al., 2005; Peverly et al., 1995) ดังนั้น เนื้อเยื่อพืชส่วนใต้ดิน จึงเป็นส่วนที่มีโอกาสเกิดการสะสม Fe ได้มาก ในขณะที่การเจริญเติบโต ด้านมวลชีวภาพของส่วนใต้ดินหรือส่วนรากนี้ ไม่สูงเท่ากับการเติบโตของเนื้อเยื่อส่วนเหนือดิน จึงทำให้ความเข้มข้นของ Fe ต่อมวลชีวภาพแห้งของเนื้อเยื่อส่วนใต้ดินมีค่าสูงกว่าเนื้อเยื่อส่วนเหนือดิน ทั้งนี้ จากผลการศึกษพบว่าค่าความเข้มข้นของ Fe ในเนื้อเยื่อของรูปถ่ายิยัส่วนลำต้นและรากฝอย ที่เก็บเกี่ยวจากระบบที่มีระยะกักพัคต่างกัน มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P \geq 0.5$) ขณะที่ ความเข้มข้นของ Fe ในใบของรูปถ่ายิยั มีค่าสูงที่สุดในใบของรูปถ่ายิยัที่เก็บเกี่ยวจากระบบที่มีระยะกักพัค 2 day และแตกต่างจากความเข้มข้นของ Fe ในใบของรูปถ่ายิยัที่เก็บเกี่ยวจากระบบที่มีระยะกักพัค 1 และ 0.5 day อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.5$) ส่วนความเข้มข้นของ Fe ในรากของรูปถ่ายิยั มีค่าสูงที่สุดในรากของรูปถ่ายิยัที่เก็บเกี่ยวจากระบบที่มีระยะกักพัค 2 day เช่นกัน และพบว่ามีความสูงกว่าความเข้มข้นของ Fe ในรากของรูปถ่ายิยั ที่เก็บเกี่ยวจากระบบที่มีระยะกักพัค 1 day อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.5$)

โดยรวมแล้ว พบว่าในทุกๆ ระบบหรือทุกระยะกักพัคที่ศึกษานั้น รูปถ่ายิยัในแต่ละระบบจะมีค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของ Fe ในเนื้อเยื่อส่วนเหนือดิน ต่ำกว่าค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของ Fe ที่พบในรูปถ่ายิยัส่วนใต้ดินอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยเนื้อเยื่อรูปถ่ายิยัส่วนเหนือดิน มีค่าความเข้มข้นของ Fe ระหว่าง 31.94-146.66 mg/kg ส่วนรูปถ่ายิยัส่วนใต้ดินมีค่าความเข้มข้นของ Fe ระหว่าง 55,847.08-221,902.87 mg/kg โดยสัดส่วนความเข้มข้นของ Fe ในเนื้อเยื่อของรูปถ่ายิยัส่วนใต้ดินต่อความเข้มข้นของ Fe ในเนื้อเยื่อของรูปถ่ายิยัส่วนเหนือดิน (Root:Shoot ratio) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ

1,545-1,879 ซึ่งเป็นสัดส่วนที่สูงมาก โดยพบค่า R:S ratio สูงสุดในระบบที่มีระยะกักพักเท่ากับ 0.5 day เช่นเดียวกับค่า R:S ratio ของ Mn ทั้งนี้ ค่า R:S ratio ที่สูงนี้ เนื่องมาจากค่าความเข้มข้นของ Fe ทั้งในส่วนรากและรากฝอยของรูกุญชรที่มีค่าสูงกว่าค่าความเข้มข้นของ Fe ที่พบในใบและลำต้น อย่างมาก โดยเฉพาะความเข้มข้นของ Fe ในรากฝอย ที่พบว่ามีค่าความเข้มข้นระหว่าง 1.6-1.8 % ของน้ำหนักแห้ง ซึ่งเป็นปริมาณการสะสมที่สูงกว่าการสะสมตามปกติ (Hyperaccumulation) ซึ่งสำหรับการสะสมโลหะหนักประเภท Fe และ Mn ที่มีค่าสูงกว่าปกตินั้น กำหนดให้มีค่ามากกว่า 1 % ของน้ำหนักแห้ง Susarla et al. (2002)

3) การสะสมแมงกานีสและเหล็กของพืชสีเขียวขนาดเล็ก ในระบบบึงประดิษฐ์

การตรวจวัดสาหร่ายที่เกิดและเจริญเติบโตในหน่วยทดลอง เมื่อสิ้นสุดการดำเนินระบบ พบว่า สาหร่ายมีมวลชีวภาพ ในรูปของน้ำหนักแห้ง เท่ากับ 16.70-204.80 g/m² ความเข้มข้นของ Mn และ Fe ในเนื้อเยื่อของสาหร่าย มีค่า 540.28-7,682.93 และ 115.01-270.75 mg/kg

สาหร่ายที่เกิดขึ้นในระบบเข้าสู่ระบบโดยติดมากับน้ำหรือพืชที่นำมาปลูกในระบบ และเมื่อสาหร่ายได้รับแสงแดดและธาตุอาหาร ทำให้เกิดการเจริญเติบโตเพิ่มจำนวนขึ้นและด้วยความสามารถในการดูดซับและดูดซับ Mn และ Fe ทำให้สาหร่ายซึ่งเจริญเติบโตอยู่ในน้ำและมีโอกาสสัมผัสกับ Mn และ Fe ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำตลอดเวลา สามารถสะสม Mn และ Fe ไว้ในเนื้อเยื่อได้ ซึ่งจากผลการตรวจวัดพบว่าสาหร่ายมีการสะสม Mn ในเนื้อเยื่อสูงกว่าปริมาณการสะสม Fe

4) อัตราการสะสมแมงกานีสและเหล็กของพืชในระบบบึงประดิษฐ์

การลดลงของปริมาณความเข้มข้นของ Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาลภายหลังการปรับปรุงคุณภาพน้ำด้วยระบบบึงประดิษฐ์ เป็นการลดลงจากกระบวนการบำบัด Total Mn และ Total Fe ในน้ำที่เกิดขึ้นจากหลายกระบวนการด้วยกัน อันได้แก่ กระบวนการกรอง (Filtration) และการตกตะกอน (Sedimentation) และกระบวนการดูดซับ (Adsorption) ติดไปกับวัสดุและส่วนต่างๆ ของพืช ซึ่งเป็นกระบวนการบำบัดทางกายภาพ การบำบัดด้วยกระบวนการดูดซับ (Uptake) และสะสมไว้ (Accumulation) โดยพืชที่ปลูกในระบบและพืชสีเขียวขนาดเล็ก ประเภทสาหร่ายและตะไคร่น้ำที่เกิดขึ้นในระบบ ซึ่งเป็นกระบวนการทางชีวภาพ และการบำบัดด้วยกระบวนการอื่นๆ เช่น การเกิดปฏิกิริยาทางเคมีและเกิดการตกตะกอนผลึก (Precipitation) ลงสู่พื้นท้องน้ำ (Kadlec and Knight, 1996; Brix, 1997)

ผลการตรวจวัดปริมาณ Mn และ Fe ที่ถูกดูดซับ ดูดซับและสะสมไว้โดยพืชสีเขียวภายในระบบที่ทำการศึกษ เมื่อสิ้นสุดการดำเนินระบบ พบว่า อัตราการสะสม Mn ตั้งแต่เริ่มระบายน้ำบาดาลจนสิ้นสุดการดำเนินระบบ โดยเนื้อเยื่อของรูกุญชรในระบบบึงประดิษฐ์ที่ดำเนินระบบที่ระยะกักพัก 0.5 day พบว่ารูกุญชรในระบบมีอัตราการสะสม Mn ไว้ในเนื้อเยื่อส่วนเหนือดิน เท่ากับ 5.64-7.65 mg/m²/d โดยเป็นการสะสมไว้ในส่วนของลำต้น เท่ากับ 1.80-2.41 mg/m²/d และสะสมไว้ในส่วนใบ เท่ากับ 3.85-5.24 mg/m²/d ส่วนอัตราการสะสมของ Mn ในเนื้อเยื่อรูกุญชรส่วนใต้ดิน มีค่าเท่ากับ 8.30-

13.40 mg/m²/d โดยเป็นการสะสมไว้ในส่วนราก เท่ากับ 2.77-5.66 mg/m²/d และสะสมไว้ในส่วนของ รากฝอย เท่ากับ 5.53-7.74 mg/m²/d และมีการสะสมของ Mn ในสาหร่าย ที่เกิดในระบบเท่ากับ 1.33-1.36 mg/m²/d

รูปถ่ายในระบบบึงประดิษฐ์ที่ดำเนินระบบที่ระยะกักพัก 1 day มีอัตราการสะสม Mn ไว้ในเนื้อเยื่อส่วนเหนือดิน ตั้งแต่เริ่มระบายน้ำบาดาลจนสิ้นสุดการดำเนินระบบ เท่ากับ 5.02-5.41 mg/m²/d โดยเป็นการสะสมไว้ในส่วนของลำต้น เท่ากับ 1.56-1.61 mg/m²/d และสะสมไว้ในส่วนใบ เท่ากับ 3.40-3.85 mg/m²/d ส่วนอัตราการสะสมของ Mn ในเนื้อเยื่อส่วนใต้ดิน เท่ากับ 4.37-4.91 mg/m²/d โดยเป็นการสะสมไว้ในส่วนราก เท่ากับ 1.81-2.27 mg/m²/d และสะสมไว้ในส่วนของ รากฝอย เท่ากับ 2.56-2.64 mg/m²/d และมีอัตราการสะสมของ Mn ในพืชสีเขียวขนาดเล็ก (สาหร่าย) ที่ เกิดในระบบเท่ากับ 6.85-9.87 mg/m²/d

รูปถ่ายในระบบบึงประดิษฐ์ที่ดำเนินระบบที่ระยะกักพัก 2 day มีอัตราการสะสม Mn ไว้ในเนื้อเยื่อส่วนเหนือดินตั้งแต่เริ่มระบายน้ำบาดาลจนสิ้นสุดการดำเนินระบบ เท่ากับ 2.65-2.90 mg/m²/d โดยเป็นการสะสมไว้ในส่วนของลำต้น เท่ากับ 1.10-1.31 mg/m²/d และสะสมไว้ในส่วนใบ เท่ากับ 1.34-1.80 mg/m²/d ส่วนอัตราการสะสมของ Mn ในเนื้อเยื่อรูปถ่ายมีส่วนใต้ดิน เท่ากับ 3.18-5.14 mg/m²/d โดยเป็นการสะสมไว้ในส่วนราก เท่ากับ 1.66-2.88 mg/m²/d และสะสมไว้ในส่วนของ รากฝอย เท่ากับ 1.51-2.26 mg/m²/d และมีอัตราการสะสมของ Mn ในพืชสีเขียวขนาดเล็ก (สาหร่าย) ที่ เกิดในระบบเท่ากับ 0.86-4.64 mg/m²/d

จากผลการศึกษา พบว่ารูปถ่ายมีส่วนเหนือดินและส่วนใต้ดินของแต่ละระบบที่มี ระยะกักพักแตกต่างกันนั้น มีการสะสม Mn ไว้ ในรูปของมวลต่อพื้นที่ต่อช่วงเวลา ในอัตราที่ไม่ แตกต่างกัน โดยรูปถ่ายส่วนเหนือดินนั้น จะพบการสะสม Mn ในรูปของมวลต่อพื้นที่ต่อเวลา ในส่วน ของใบสูงกว่าส่วนต้น โดยอัตราการสะสมของใบและลำต้นมีค่าสูงที่สุดในระบบที่มีระยะกักพัก 0.5, 1 และ 2 day ตามลำดับ ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากปริมาณการรองรับน้ำและ Mn ของระบบ ทำให้พืชในระบบ ที่มีปริมาณการรองรับน้ำ และ Mn เข้าสู่ระบบสูงมีอัตราการสะสม Mn สูงด้วย ซึ่งจะพบว่าอัตราการ สะสม Mn ในรูปของมวลต่อพื้นที่ต่อเวลาของรากและรากฝอย ก็เกิดขึ้นในลักษณะเดียวกัน คือพบอัตรา การสะสมสูงในระบบที่มีปริมาณการรองรับน้ำ และ Mn สูง ทั้งนี้ พบว่ารากฝอยมีอัตราการสะสม Mn ในรูปมวลต่อพื้นที่ต่อเวลา สูงกว่าราก การตรวจพบอัตราการสะสม Mn สูง ในรูปถ่ายที่เก็บเกี่ยวจาก ระบบที่มีปริมาณการรองรับน้ำ และ Mn สูงนั้น อาจเนื่องมาจากการที่รูปถ่ายได้รับธาตุอาหารซึ่ง ปนเปื้อนมากับน้ำ พร้อมๆ กับการได้รับ Mn ในปริมาณสูงกว่ารูปถ่ายในระบบอื่น จึงทำให้รูปถ่ายใน ระบบดังกล่าวมีอัตราการเติบโตสูงและมีอัตราการสะสม Mn สูงด้วย ซึ่งจะสัมพันธ์กับค่าอัตราการ เติบโตสัมพัทธ์ ซึ่งพบว่ามีค่าสูงที่สุดในระบบที่มีปริมาณการรองรับน้ำและ Mn สูงที่สุดด้วยเช่นกัน อย่างไรก็ตาม พบว่าอัตราการสะสม Mn ของรูปถ่ายส่วนเหนือดิน คืออัตราการสะสมของลำต้นและใบ มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P \geq 0.05$) เช่นเดียวกับค่าการสะสมของรากและรากฝอย ซึ่งไม่แตกต่างกัน

ทางสถิติ ($P \geq 0.05$) เช่นเดียวกัน ในลักษณะเดียวกันกับการสะสม Mn ของสาหร่ายในแต่ละระบบที่มีระยะกักพักแตกต่างกัน ซึ่งพบว่ามีความไม่แตกต่างกันทางสถิติ

ผลการตรวจวัดปริมาณ Fe ที่ถูกดูดซับ ดูดดึงและสะสมไว้โดยพืชสีเขียวภายในระบบที่ทำการศึกษา เมื่อสิ้นสุดการดำเนินระบบ พบว่า ปริมาณการสะสม Fe ในเนื้อเยื่อของรูปถ่ายมีทั้งอัตราการสะสมที่ลดลงและเพิ่มขึ้น ซึ่งอัตราการสะสม Fe ที่ลดลงนั้น พบในเนื้อเยื่อส่วนเหนือดิน โดยเฉพาะส่วนของลำต้น ทั้งนี้ เมื่อทำการตรวจวัดอัตราการสะสม Fe โดยเนื้อเยื่อของรูปถ่ายในระบบบึงประดิษฐ์ที่ดำเนินระบบที่ระยะกักพัก 0.5 day พบว่ารูปถ่ายในระบบมีการสะสม Fe ไว้ในเนื้อเยื่อส่วนเหนือดินตั้งแต่เริ่มระบบน้ำบาดาลจนถึงสิ้นสุดการดำเนินระบบ เท่ากับ $0.17-0.29 \text{ mg/m}^2/\text{d}$ โดยการสะสมไว้ในส่วนของลำต้นนั้น มีอัตราการสะสมลดลงเท่ากับ -0.22 ถึง $-0.01 \text{ mg/m}^2/\text{d}$ ขณะที่อัตราการสะสม Fe ไว้ในส่วนใบ เท่ากับ $0.30-0.38 \text{ mg/m}^2/\text{d}$ ส่วนอัตราการสะสม Fe ในเนื้อเยื่อรูปถ่ายส่วนใต้ดิน มีค่าเท่ากับ $750.20-1,285.66 \text{ mg/m}^2/\text{d}$ โดยเป็นการสะสมไว้ในส่วนราก เท่ากับ $629.27-1,037.81 \text{ mg/m}^2/\text{d}$ และสะสมไว้ในส่วนของรากฝอย เท่ากับ $120.93-247.84 \text{ mg/m}^2/\text{d}$ และมีอัตราการสะสมของ Fe ในพืชสีเขียวขนาดเล็ก (สาหร่าย) ที่เกิดในระบบเท่ากับ $0.03-0.04 \text{ mg/m}^2/\text{d}$

การตรวจวัดอัตราการสะสม Fe ของรูปถ่ายในระบบบึงประดิษฐ์ที่ดำเนินระบบที่ระยะกักพัก 1 day พบว่า มีอัตราการสะสม Fe ไว้ในเนื้อเยื่อส่วนเหนือดินตั้งแต่เริ่มระบบน้ำบาดาลจนถึงสิ้นสุดการดำเนินระบบ ระหว่าง -0.06 ถึง $0.07 \text{ mg/m}^2/\text{d}$ โดยการสะสมไว้ในส่วนของลำต้นมีค่าลดลง ทั้งนี้มีค่าระหว่าง -0.26 ถึง $-0.20 \text{ mg/m}^2/\text{d}$ การสะสม Fe ไว้ในส่วนใบ มีค่าเท่ากับ $0.20-0.27 \text{ mg/m}^2/\text{d}$ ส่วนอัตราการสะสม Fe ในเนื้อเยื่อรูปถ่ายส่วนใต้ดิน มีค่าเท่ากับ $721.22-813.93 \text{ mg/m}^2/\text{d}$ โดยเป็นการสะสมไว้ในส่วนราก เท่ากับ $519.94-552.05 \text{ mg/m}^2/\text{d}$ และสะสมไว้ในรากฝอย เท่ากับ $201.28-261.88 \text{ mg/m}^2/\text{d}$ และมีอัตราการสะสมของ Fe ในพืชสีเขียวขนาดเล็ก (สาหร่าย) ที่เกิดในระบบเท่ากับ $0.23-0.40 \text{ mg/m}^2/\text{d}$

อัตราการสะสม Fe ของรูปถ่ายในระบบบึงประดิษฐ์ที่ดำเนินระบบที่ระยะกักพัก 2 day พบว่า มีอัตราการสะสม Fe ไว้ในเนื้อเยื่อส่วนเหนือดินตั้งแต่เริ่มระบบน้ำบาดาลจนถึงสิ้นสุดการดำเนินระบบ ระหว่าง -0.14 ถึง $-0.07 \text{ mg/m}^2/\text{d}$ โดยการสะสมในส่วนส่วนของลำต้น มีค่าลดลง ทั้งนี้มีค่าระหว่าง -0.37 ถึง $-0.14 \text{ mg/m}^2/\text{d}$ การสะสม Fe ไว้ในส่วนใบ มีค่าเท่ากับ $0.21-0.23 \text{ mg/m}^2/\text{d}$ ส่วนอัตราการสะสมของ Fe ในเนื้อเยื่อรูปถ่ายส่วนใต้ดิน มีค่าเท่ากับ $855.63-1,113.17 \text{ mg/m}^2/\text{d}$ โดยเป็นการสะสมไว้ในราก เท่ากับ $724.49-916.78 \text{ mg/m}^2/\text{d}$ และสะสมไว้ในรากฝอย เท่ากับ $131.14-196.39 \text{ mg/m}^2/\text{d}$ และมีอัตราการสะสมของ Fe ในพืชสีเขียวขนาดเล็ก (สาหร่าย) ที่เกิดในระบบเท่ากับ $0.18-0.39 \text{ mg/m}^2/\text{d}$

จากผลการศึกษา พบว่ารูปถ่ายส่วนเหนือดินและส่วนใต้ดินของแต่ละระบบที่มีระยะกักพักแตกต่างกันนั้น มีการสะสม Fe ไว้ ในรูปของมวลต่อพื้นที่ต่อช่วงเวลา ในอัตราที่ไม่แตกต่างกันระหว่างระบบที่มีระยะกักพักแตกต่างกัน โดยรูปถ่ายส่วนเหนือดินนั้น จะพบการสะสม Fe ในรูป

ของมวลต่อพื้นที่ต่อเวลา ในส่วนของใบสูงกว่าส่วนต้น ทั้งนี้พบว่าอัตราการสะสม Fe ในรูปของมวลต่อพื้นที่ต่อเวลา ของลำต้นมีค่าลดลงหรือติดลบ โดยอัตราการสะสมของทั้งใบและลำต้นมีค่าสูงที่สุดในระบบที่มีระยะกักพัก 0.5, 1 และ 2 day ตามลำดับ ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการสะสม Mn ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากปริมาณการรองรับน้ำ และ Fe ของระบบ ซึ่งทำให้พืชในระบบที่มีปริมาณการรองรับน้ำ ซึ่งมีธาตุอาหารปนเปื้อนมาด้วย และ Fe ในปริมาณสูง มีอัตราการเติบโตและอัตราการสะสม Fe สูงด้วย ซึ่งจะพบว่าอัตราการสะสม Fe ในรูปของมวลต่อพื้นที่ต่อเวลาของรากและรากฝอย ก็เกิดขึ้นในลักษณะเดียวกัน คือมีอัตราการสะสมสูงในระบบที่มีปริมาณการรองรับน้ำ และ Fe สูง ทั้งนี้ พบว่ารากมีอัตราการสะสม Fe ในรูปมวลต่อพื้นที่ต่อเวลา สูงกว่ารากฝอย ซึ่งแตกต่างจากการสะสม Mn ที่มีการสะสมสูงในรากฝอย อย่างไรก็ตาม พบว่าอัตราการสะสม Fe ของรูปถ่ายยีสต์ส่วนเหนือดิน คืออัตราการสะสมของลำต้นและใบ มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P \geq 0.05$) เช่นเดียวกับค่าการสะสมของรากและรากฝอย ซึ่งไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P \geq 0.05$) ขณะที่ อัตราการสะสม Fe ของสาหร่ายในแต่ละระบบที่มีระยะกักพักแตกต่างกัน มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติเช่นเดียวกัน

ทั้งนี้พบว่า การบำบัด Mn และ Fe ในน้ำบาดาลด้วยการสะสมไว้ในเนื้อเยื่อของรูปถ่ายยีสต์และพืชน้ำสีเขียวขนาดเล็กที่เกิดในระบบ ภายในระบบบึงประดิษฐ์แต่ละระบบที่มีระยะเวลากักพักน้ำที่แตกต่างกัน (0.5, 1 และ 2 day) นั้น มีอัตราในการสะสมในแต่ละส่วนของพืชเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ดังนี้คือ การสะสม Mn ของเนื้อเยื่อรูปถ่ายยีสต์ส่วนเหนือดินและส่วนใต้ดินมีอัตราการสะสมใกล้เคียงกัน โดยพบว่ารูปถ่ายยีสต์ในระบบบึงประดิษฐ์ที่มีระยะเวลากักพักน้ำของระบบ เท่ากับ 0.5 day จะมีอัตราการสะสม Mn ทั้งในเนื้อเยื่อรูปถ่ายยีสต์ส่วนเหนือดินและส่วนใต้ดินสูงกว่าระบบที่มีระยะกักพักที่ยาวนานกว่า คือ 1 และ 2 day ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาการสะสม Mn แยกเป็นการสะสมในใบ ลำต้น ราก และรากฝอย ก็จะพบว่า อัตราการสะสมของพืชแต่ละส่วนดังกล่าวข้างต้น มีค่าใกล้เคียงกันโดยแต่ละส่วนจะมีค่าการสะสม Mn สูงสุดเรียงลำดับจากพืชในระบบที่มีระยะเวลากักพักน้ำของระบบ เท่ากับ 0.5, 1 และ 2 day ตามลำดับ เช่นกัน ยกเว้นการสะสมในรากและสาหร่าย ซึ่งพบว่ามีการสะสมต่อพื้นที่ต่อเวลา สูงสุดในระบบบึงประดิษฐ์ที่มีระยะเวลากักพักน้ำ เท่ากับ 0.5, 2 และ 1 day ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม อัตราการสะสมในแต่ละส่วนของพืช ในแต่ละระบบที่มีระยะกักพักแตกต่างกันดังกล่าวข้างต้น มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P \geq 0.05$)

ขณะที่ การสะสม Fe ในเนื้อเยื่อส่วนต่างๆ ของรูปถ่ายยีสต์และสาหร่าย มีอัตราการสะสมที่แตกต่างกัน โดยเฉพาะการสะสมในเนื้อเยื่อส่วนเหนือดินและส่วนใต้ดินของรูปถ่ายยีสต์ ซึ่งพบว่าเนื้อเยื่อส่วนใต้ดินของรูปถ่ายยีสต์ มีอัตราการสะสม Fe สูงมาก ขณะที่ อัตราการสะสมของเนื้อเยื่อส่วนเหนือดินมีค่าต่ำและมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับปริมาณ Fe ที่มีอยู่เดิมก่อนเริ่มดำเนินระบบ ทั้งนี้ เนื่องจากรูปถ่ายยีสต์ส่วนเหนือดินในระบบบึงประดิษฐ์มีปริมาณของมวลชีวภาพเพิ่มขึ้นสูงมาก แต่ค่าความเข้มข้นของ Fe ในมวลชีวภาพของโครงสร้างส่วนเหนือดินมีค่าลดลงจากก่อนเริ่มดำเนินระบบมาก ทำให้อัตราการสะสม Fe ของเนื้อเยื่อส่วนเหนือดินมีค่าต่ำ ขณะที่ รูปถ่ายยีสต์ส่วนใต้ดินนั้น มีปริมาณมวลชีวภาพเพิ่ม

สูงขึ้น และมีค่าความเข้มข้นของ Fe ในมวลชีวภาพส่วนใต้ดินสูงขึ้นด้วยเช่นกัน โดยมีค่าความเข้มข้นสูงขึ้นจากเดิมประมาณ 18 เท่า ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการกักเก็บ Fe ของรูกุญสีส่วนใต้ดิน โดยมีการเคลื่อนย้ายไปยังส่วนอื่นๆ ในปริมาณน้อย ดังนั้น เนื้อเยื่อรูกุญสีส่วนใต้ดินจึงมีอัตราการสะสม Fe สูงมาก เมื่อเทียบกับรูกุญสีส่วนเหนือดินและสาหร่าย ทั้งนี้ พบว่าอัตราการสะสม Fe ในแต่ละส่วนของรูกุญสีในแต่ละระบบที่มีระยะกักพักแตกต่างกัน มีค่าเป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยระยะกักพักไม่ส่งผลที่ชัดเจนต่ออัตราการสะสม Fe ของพืช ขณะที่ระยะกักพักส่งผลให้เห็นแนวโน้มของอัตราการสะสม Mn ของพืช ซึ่งพบว่ามีค่าสูงสำหรับระยะเวลาพักที่สั้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ผลการศึกษาบ่งชี้ถึงความสามารถของระบบบึงประดิษฐ์ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาล โดยการลดปริมาณของ Total Fe และ Total Mn ในน้ำบาดาล ดังนั้น จึงสามารถใช้ระบบบึงประดิษฐ์เป็นทางเลือกหนึ่งในการปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาล เพื่อการใช้ประโยชน์ในการเกษตรกรรม

5.2.2 ควรทำการศึกษาเพิ่มเติมถึงการใช้ระบบบึงประดิษฐ์ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาลในพื้นที่จริง และศึกษาถึงการนำน้ำที่ผ่านการปรับปรุงไปใช้ประโยชน์ในการทำนาหรือการทำการเกษตรในพื้นที่จริง เพื่อการนำไปประยุกต์ใช้อย่างเหมาะสมต่อไป

5.2.3 ควรศึกษาถึงประสิทธิภาพของระบบและข้อจำกัดของระบบ ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาล หากมีการใช้ระบบอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลายาวนาน รวมถึงการศึกษาถึงแนวทางในการลดข้อจำกัดดังกล่าว

บรรณานุกรม

- กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม. 2547. พระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. ๒๕๓๕ และกฎกระทรวง ประกาศกฎกระทรวง ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ออกตามความในพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. ๒๕๓๕ เล่มที่ ๑ (พ.ศ. ๒๕๓๕ - พ.ศ. ๒๕๔๑). กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์ดอกเบญจ. 41-44.
- การประปาภูมิภาค. (ม.ป.ป.). การใช้น้ำบาดาล. สืบค้น 28 มิถุนายน 2547, จาก <http://www.pwa.co.th/index.html>
- กิจการ พรหมมา, อมรลักษณ์ ปรีชาหาญ, จรัสดาว คงเมือง, จริญญา บุญญานุภาพ และวิภา หอมหวล. 2545. ผลกระทบของการใช้น้ำบาดาลบ่อน้ำก่อนและหลังการบำบัดคุณภาพน้ำ ที่มีต่อสภาพแวดล้อมในนาข้าวและชุมชนใกล้เคียง ในเขตจังหวัดพิษณุโลก. คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร
- กิจการ พรหมมา. 2546. น้ำบาดาลระดับตื้น. คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร
- คณะกรรมการจัดทำพจนานุกรมธรณีวิทยา. 2530. พจนานุกรมศัพท์ธรณีวิทยาอังกฤษ-ไทย. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- ทัศนีย์ อัดตะนันท์. 2543. ดินที่ใช้ปลูกข้าว. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ประจัญอุท ขัมแพ. 2547. การสะสมของเหล็กและแมงกานีสจากน้ำบาดาลเข้าสู่ดินนาและข้าว. วิทยานิพนธ์ สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยนเรศวร
- ประเทือง เชาว์วันกลาง. 2534. คุณภาพน้ำทางการประมง. กรุงเทพฯ: หจก. สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซ็นเตอร์.
- ประพาส วีระแพทย์. 2537. ปัญหาในนาข้าว. กรุงเทพฯ: ไทยวัฒนาพานิช.
- มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2541. ปฐพีวิทยาเบื้องต้น. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- วรชาติ พวงเงิน. 2547. การกำจัดเหล็กในน้ำบาดาลบ่อน้ำโดยใช้วัสดุเหลือใช้จากการทำนา. วิทยานิพนธ์ สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยนเรศวร
- ศูนย์บริการเทคโนโลยีน้ำบาดาล. 2551. น้ำบาดาล. สืบค้น 20 ธันวาคม 2552, จาก http://geothai.net/gtsc/index.php?option=com_content&view=article&id=55:groundwater&catid=35:service
- APHA, AWWA, WPCF. (1992). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 18th edition. American Public Health Association Inc., Washington D.C, USA.
- Ayers, R.S. and Westcot, D.W. (1994). *Water quality for agriculture*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.

- Barley, R.W., Hutton, C., Brown, M.M.E., Cusworth, J.E. and Hamilton, T.J. (2005). Trends in biomass and metal sequestration associated with reeds and algae at Wheal Jane Bioremediation pilot passive treatment plant. *Science of The Total Environment*, **345**, pp. 279-286.
- Brix, H. (1997). Do macrophytes play a role in constructed treatment wetland? *Water Science and Technology*, **35**, pp. 11-17.
- Demirezen, D. and Aksoy, A. (2004). Accumulation of heavy metal in *Typha angustifolia* (L.) and *Potamogeton pectinatus* (L.) living in Sultan Marsh (Kayseri, Turkey). *Chemosphere*, **56**, pp. 685-696.
- Demirezen, D. and Aksoy, A. (2006). Common hydrophytes as bioindicators of iron and manganese pollutions. *Ecological Indicators*, **6**, pp. 388-393.
- Everard, M. and Denny, P. (1985). Flux of lead in submerged plants and its relevance to a freshwater system. *Aquatic Botany*, **21**, pp. 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.
- Goulet, R.R., Pick, F.R. and Droste, R.L. (2001). Test of the first-order removal for metal retention in a young constructed wetland. *Ecological Engineering*, **17**, pp. 357-371.
- Groudeva, V.I., Groudev, S.N. and Doycheva, A.S. (2001). Bioremediation of waters contaminated with crude oil and toxic heavy metals. *International Journal of Mineral Processing*, **62**, pp. 293-299.
- Guilizzoni, P. (1991). The role of heavy metals and toxic materials in the physiological ecology of submersed macrophytes. *Aquatic Botany*, **41**, pp. 87-109.
- Hallberg, K.B. and Johnson, D.B. (2005). Biological manganese removal from acid mine drainage in constructed wetlands and prototype bioreactors. *Science of The Total Environment*, **338**, pp. 115-124.
- Hares, R.J. and Ward, N.I. (2004). Sediment accumulation in newly constructed vegetative treatment facilities along a new major road. *Science of The Total Environment*, **334-335**, pp 473-479.
- Kadlec, R.H. and Knight, R.L. (1996). *Treatment Wetlands*. Lewis Publishers, Florida.
- Keskinkan, O., Goksu, M.Z.L., Yuceer, A., Basibuyuk, M. and Forster, C.F. (2003). Heavy metal adsorption characteristics of a submerged aquatic plant (*Myriophyllum spicatum*). *Process Biochemistry*, **39**, pp. 179-183.
- Landon, J.R. (1991). *Book Tropical Soil Manual*. Longman Group Limited, Hongkong. 106-156.

- Lesage, E., Rousseau, D.P.L., Meers, E., Tack, F.M.G. and De Pauw, N. (2007). Accumulation of metals in a horizontal subsurface flow constructed wetland treating domestic wastewater in Flanders, Belgium. *Science of The Total Environment*, **380**, pp. 102-115.
- Lesley, B., Daniel, H. and Paul, Y. (2008). Iron and manganese removal in wetland treatment system: Rates, processes and implications for management. *Science of The Total Environment*, **394**, pp. 1-8.
- Lewis, M.A. (1995). Use of freshwater plants for phytotoxicity testing: A review. *Environmental Pollution*, **87**, pp. 319-336.
- Lu, X., Kruatrachue, M., Pokethitiyook, P. and Homyok, K. (2004). Removal of Cadmium and Zinc by Water Hyacinth, *Eichhornia crassipes*. *ScienceAsia*, **30**, pp. 93-103.
- Macek, T., Mackova, M. and Kas, J. (2000). Exploitation of plants for the removal of organics in environmental remediation. *Biotechnology Advances*, **18**, pp. 23-34.
- Maine, M.A., Sune, N., Hadad, H., Sanchez, G. and Bonetto, C. (2006). Nutrient and metal removal in a constructed wetland for wastewater treatment from a metallurgic industry. *Ecological Engineering*, **26**, pp. 341-347.
- Manyin, T., Williams, F.M. and Stark, L.R. (1997). Effects of iron concentration and flow rate on treatment of coal mine drainage in wetland mesocosms: An experimental approach to sizing of constructed wetlands. *Ecological Engineering*, **9**, pp. 171-185.
- Matagi, S.V., Swai, D., Mugabe, R. (1998). A review of heavy metal removal mechanisms in wetlands. *African Journal for Tropical Hydrobiology and Fisheries*, **8**, pp. 13-25.
- Mays, P.A and Edwards, G.S. (2001). Comparison of heavy metal accumulation in a natural wetland and constructed wetlands receiving acid mine drainage. *Ecological Engineering*, **16**, pp. 487-500.
- Meagher, R.B. (2002). Phytoremediation of toxic elemental and organic pollutants. *Current Opinion in Plant Biology*, **3**, pp. 153-162.
- Mitchell, C. and McNevin, D. (2001). Alternative analysis of BOD removal in subsurface flow constructed wetlands employing Monod kinetic. *Water Research*, **35**, pp. 1295-1303.
- Mitchell, C., Wiese, R. and Young, R. (1998). Design of wastewater wetland. In: Young, R., White, G., Brown, M., Burton, J., Atkins, B. (Eds.), *The Constructed Wetlands Manual*. Department of Land and Water Conservation, NSW, Sydney.

- Mitsch, W.J. and Wise, K.M. (1998). Water quality, fate of metals, and predictive model validation of a constructed wetland treating acid mine drainage. *Water Research*, **32**, pp. 1888-1900.
- Muller, G. (1988). Chemical decontamination of dredged materials, combustion residues, soil and other materials contaminated with heavy metals. In: Wolf, K., Van, W.J., Brink, D.E., Colon, F.J. (Eds.), Proceedings of the II international TNO/BMFT conference on contaminated soil, vol. 2. pp. 1439-1442.
- Nellessen, J.E and Fletcher, J.S. (1993). Assessment of published literature on the uptake, accumulation, and translocation of heavy metals by vascular plants. *Chemosphere*, **27**, pp. 669-1680.
- Nitorisavut, S and Klomjek, P. (2005). Inhibition kinetics of salt-affected wetland for municipal wastewater treatment. *Water Research*, **39**, pp. 4413-4419.
- Peverly, J.H., Surface, J.M. and Wang, T. (1995). Growth and trace metal absorption by *Phragmites australis* in wetlands constructed for landfill leachate treatment. *Ecological Engineering*, **5**, pp. 21-35.
- Rai, U.N., Sinha, S., Tripathi, R.D. and Chandra, P. (1995). Wastewater treatability potential of some aquatic macrophytes: Removal of heavy metals. *Ecological Engineering*, **5**, pp. 5-12.
- Raskin, I., Smith, R.D. and Salt, D.E. (1997). Phytoremediation of metals: using plants to remove pollutants from the environment. *Current Opinion in Biotechnology*, **8**, pp. 221-226.
- Reddy, K.R. and D'Angelo, E.M. (1990). Biomass yield and nutrient removal by water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) as influenced by harvesting frequency. *Biomass*, **21**, pp. 27-42.
- Sheoran, A.S and Sheoran, V. (2006). Heavy metal removal mechanism of acid mine drainage in wetland: A critical review. *Minerals Engineering*, **19**, pp. 105-116.
- Soltan, M.E and Rashed, M.N. (2003). Laboratory study on the survival of water hyacinth under several conditions of heavy metal concentrations. *Advances in Environmental Research*, **7**, pp. 321-334.
- Sriyaraj, K. and Shutes, R.B.E. (2001). An assessment of the impact of motorway runoff on a pond, wetland and stream. *Environment International*, **26**, pp. 433-439.
- Stottmeister, U., Wiebner, A., Kusch, P., Kappelmeyer, U., Kastner, M., Bederski, O., Muller, R.A. and Moormann, H. (2003). Effect of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment. *Biotechnology Advances*, **22**, pp. 93-117.

- Susarla, S., Medina, V.F. and McCutcheon, S.C. (2002). Phytoremediation: an ecological solution to organic chemical contamination. *Ecological Engineering*, **18**, pp. 647-658.
- Tarutis, W.J., Stark, L.R. and Williams, F.M. (1999). Sizing and performance estimation of coal mine drainage wetland. *Ecological Engineering*, **12**, pp. 353-372.
- U.S. EPA (United States Environmental Protection Agency). (1998). A Citizen's Guide to Phytoremediation. Technology Innovation Office, Washington, DC.
- Vymazal, J. (2007). Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Science of The Total Environment*, **380**, pp. 48-65.
- Weis, J.S. and Weis, P. (2004). Metal uptake, transport and release by wetland plants: implications for phytoremediation and restoration. *Environment International*, **30**, pp. 685-700.
- Wieder, R.K. (1989). A survey of constructed wetlands for acid coal mine drainage treatment in the eastern United States. *Wetland*, **9**, pp. 299-315.
- Zhang, X.P., Liu, P., Yang, Y.S. and Chen, W.R. (2007). Phytoremediation of urban wastewater by model wetlands with ornamental hydrophytes. *Journal of Environmental Sciences*, **19**, pp. 902-909.

Output ที่ได้จากโครงการ

- 1 การตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารวิชาการระดับชาติ ที่จัดอยู่ในฐานข้อมูลของ Thai Journal Citation Index (TCI) และเป็นวารสารที่มี Impact factor จำนวน 1 เรื่อง ดังนี้

พันธุ์ทิพย์ กล่อมเจ็ก. (2553). การประยุกต์ใช้ระบบบึงประดิษฐ์ในการลดเหล็กและแมงกานีสในน้ำบาดาล. วิทยาศาสตร์ มข., 38, 249-260.

ภาคผนวก

Manuscript บทความวิจัยที่เผยแพร่ในวารสารวิชาการระดับชาติ