อภินันทนาการ

สำนักหอสมุด

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การลดปริมาณเหล็กในน้ำบาดาลบ่อตื้นด้วยระบบบึงประดิษฐ์

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยนเรศวร
วันลงทะเบียน 29 ม.ค. 2554
เลขทะเบียน
เลขเรียกหนังสือ

โดย พันธ์ทิพย์ กล่อมเจ๊ก

พฤษภาคม 2553

สัญญาเลขที่ AG-AR-038/2551

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การลดปริมาณเหล็กในน้ำบาดาลบ่อตื้นด้วยระบบบึงประดิษฐ์

คณะผู้วิจัย สังกัด

พันธ์ทิพย์ กล่อมเจ๊ก คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิยาลัยนเรศวร

สนับสนุนโดยกองทุนวิจัยมหาวิทยาลัยนเรศวร

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้ เป็นการศึกษาถึงความเป็นไปได้และประสิทธิภาพของระบบบึงประดิษฐ์ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาล โดยระยะที่ 1 ของการศึกษา ได้ศึกษาถึงประสิทธิภาพของระบบบึงประดิษฐ์ในการบำบัดเหล็กและแมงกานีสในน้ำบาดาล เมื่อระบบทำการปรับปรุงคุณภาพน้ำที่ระยะกักพักน้ำที่แตกต่างกัน ส่วนในระยะที่ 2 ของการศึกษา ได้ศึกษาประสิทธิภาพของระบบบึงประดิษฐ์ในการบำบัดเหล็กและแมงกานีสในน้ำบาดาล เมื่อมีระยะการเก็บเกี่ยวพืชออกจากระบบแตกต่างกัน ผลการศึกษาที่ได้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการจัดการระบบบึงประดิษฐ์ที่นำมาใช้ประโยชน์ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาลอย่างเหมาะสมต่อไป

ในระยะที่ 1 ของการศึกษา น้ำบาดาลได้ถูกระบายลงสู่ระบบบึงประดิษฐ์ที่ทำการปลูกธูปฤาษีด้วยอัตราการระบายน้ำ เท่ากับ 200, 100 และ 50 l/d ซึ่งทำให้น้ำบาดาลมีระยะกักพักภายในระบบเท่ากับ 0.5, 1 และ 2 d ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดเหล็ก และแมงกานีสในน้ำบาดาลของระบบบึงประดิษฐ์ สูงกว่าประสิทธิภาพในการบำบัดของหน่วยควบคุม ประสิทธิภาพในการลดความเข้มข้นของแมงกานีส ของบึงประดิษฐ์ที่ทำการบำบัดน้ำที่ระยะกักพัก 0.5, 1 และ 2 d มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 94.0, 96.4 และ 98.8 % ตามลำดับ ขณะที่ประสิทธิภาพในการลดความเข้มข้นของเหล็กของบึงประดิษฐ์ที่ทำการบำบัดน้ำที่ระยะกักพัก 0.5, 1 และ 2 d มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 79.2, 83.2 และ 86.4 % ตามลำดับ ทั้งนี้ พบว่าระบบที่มีระยะการกักพักน้ำ 2 d มีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดความเข้มข้นของแมงกานีสและเหล็ก อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพในการลดความเข้มข้นของเหล็ก ของระบบที่มีระยะการกักพักที่แตกต่างกัน มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ

ในระยะที่ 2 ของการศึกษา น้ำบาดาลถูกระบายลงสู่ระบบบึงประดิษฐ์ที่ทำการปลูกธูปฤาษี ด้วยอัตราการระบายน้ำ เท่ากับ 200 l/d ซึ่งทำให้น้ำบาดาลมีระยะการกักพักภายในระบบเท่ากับ 0.5 d และทำการศึกษาประสิทธิภาพของระบบบึงประดิษฐ์ในการบำบัดเหล็กและแมงกานีสในน้ำบาดาล เมื่อระบบมีระยะการเก็บเกี่ยวพืชออกจากระบบแตกต่างกัน คือการเก็บเกี่ยวที่ 4, 6 และ 8 wk โดยได้ดำเนินระบบและทำการเก็บเกี่ยวจำนวน 2 รอบ ในแต่ละระยะเก็บเกี่ยวที่ศึกษา ผลการศึกษา พบว่า ระบบที่ทำการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะ 4, 6 และ 8 wk มีประสิทธิภาพในการลดความเข้มข้นของแมงกานีส เท่ากับ 83.96-100.00, 83.94-100.00 และ 75.63-100.00 % ตามลำดับ และมีประสิทธิภาพในการลดความเข้มข้นของเหล็ก เท่ากับ 66.19-96.58, 54.89-99.04 และ 48.58-99.40 % ตามลำดับ อัตราการบำบัดแมงกานีส ของระบบที่ทำการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะ 4, 6 และ 8 wk มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.092, 0.070 และ 0.068 $g/m^2/d$ ตามลำดับ ขณะที่ อัตราการบำบัดเหล็ก มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.383, 0.429 และ 0.432 $g/m^2/d$ ตามลำดับ โดยระบบที่ทำการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะ 4 wk มีอัตราการบำบัดแมงกานีส เฉลี่ยสูงสุด และแตกต่างจากการเก็บเกี่ยวที่ระยะอื่น ขณะที่อัตราการบำบัดเหล็ก ไม่แตกต่างกันระหว่างระบบที่มีระยะการเก็บเกี่ยวพืชที่แตกต่างกัน

Abstract

This research was conducted to investigate the possibility and efficiency of constructed wetland for groundwater quality improvement. Efficiencies of the constructed wetland for iron (Fe) and manganese (Mn) removal from groundwater were examined at various hydraulic retention times (HRT) in the first phase of study. In the second phase of study, the Fe and Mn removal efficiency of constructed wetland was studied at different wetland plant harvest period. The results were aimed to be applied for appropriated constructed wetland management.

In the first phase of study, the groundwater was fed into the constructed wetlands planted with cattails (*Typha angustifolia*) at 200, 100, and 50 l/d resulting in the HRT of 0.5, 1 and 2 days, respectively. The result showed that efficiencies of constructed wetlands for Fe and Mn removal from groundwater were higher than control units. Average efficiencies of the system that operated at 0.5, 1, and 2 days of HRT for reduction of Mn in term of concentrations were 94.0, 96.4 and 98.8 %, respectively. And, average efficiencies of the system that operated at 0.5, 1 and 2 days of HRT for reduction of Fe in term of concentrations were 79.2, 83.2 and 86.4 %, respectively. It was found that the system operated at 2 days of HRT showed the highest efficiency for reduction of Mn and Fe concentrations. However, there was not significant difference between HRT variations for Fe reduction.

In the second phase of study, the groundwater was fed into the constructed wetlands planted with cattails (*Typha angustifolia*) at 200 l/d resulting in the HRT of 0.5 days. Efficiencies of the constructed wetlands for Fe and Mn removal were evaluated at 4, 6 and 8 wk of harvest period. For each tested variation, the constructed wetlands were operated for 2 times of plant harvest. The results showed that efficiencies of the system that operated at 4, 6 and 8 wk of harvest period for reduction of Mn concentrations were 83.96-100.00, 83.94-100.00 and 75.63-100.00 %, respectively. Meanwhile, efficiencies of the system that operated at 4, 6 and 8 wk of harvest period for reduction of Fe concentrations were 66.19-96.58, 54.89-99.04 and 48.58-99.40 %, respectively. Average Mn removal rate of the system that operated at 4, 6 and 8 wk of harvest period were 0.092, 0.070 and 0.068 $g/m^2/d$, respectively. Average Fe removal rate of the system that operated at 4, 6 and 8 wk of harvest period were 0.383, 0.429 and 0.432 $g/m^2/d$, respectively. The highest Mn removal rate was found in the variation of 4 wk of harvest period. This Mn removal rate was significantly different from the remained harvest periods. Differently, Fe removal rate was not significant difference between harvest periods.

Executive summary

การลดปริมาณเหล็กในน้ำบาดาลบ่อตื้นด้วยระบบบึงประดิษฐ์

1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

น้ำเป็นทรัพยากรที่สำคัญ เนื่องจากน้ำเป็นปัจจัยพื้นฐานที่จำเป็นในหลายกิจกรรม มนุษย์จำเป็นต้องใช้น้ำในการอุปโภคบริโภคเพื่อการดำรงอยู่ นอกจากนั้น น้ำยังถูกใช้ในกระบวนการผลิตทั้งทางด้านอุตสาหกรรมและเกษตรกรรม ดังนั้นความต้องการใช้น้ำจึงมีมากและมีอยู่อย่างต่อเนื่อง ปัญหาการขาดแคลนน้ำที่พบในบางพื้นที่ และในบางช่วงเวลา ทำให้มีการเสาะหาทรัพยากรน้ำในแหล่งต่างๆ มาใช้ รวมถึงน้ำบาดาล ซึ่งเป็นน้ำตามธรรมชาติที่ถูกกักเก็บไว้ใต้ดิน โดยทั่วไปแล้ว น้ำบาดาลมักมีสิ่งสกปรกเจือปนน้อย เนื่องจากได้ผ่านการกรองด้วยชั้นดินตามธรรมชาติ อย่างไรก็ตาม ยังพบว่าน้ำบาดาลในบางพื้นที่ มีการปนเปื้อนเหล็กในปริมาณที่สูง โดยเฉพาะในพื้นที่ที่ดินมีเหล็กเป็นองค์ประกอบอยู่มาก ดังที่พบในพื้นที่ภาคเหนือตอนล่างของประเทศไทย เช่นในจังหวัดพิษณุโลก ขณะเดียวกัน น้ำบาดาลในพื้นที่ดังกล่าวได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในปริมาณมาก โดยเฉพาะการใช้ในกิจกรรมการเกษตร โดย ประจญยุทธ (2547) พบว่าในพื้นที่อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก นั้น มีการสูบน้ำบาดาลขึ้นมา เพื่อใช้ในการทำนาในปริมาณมาก โดยเฉพาะในช่วงฤดูแล้ง โดยมีอัตราการใช้ เท่ากับ 1,561 m^3/rai/yr ซึ่งการนำน้ำบาดาลที่มีเหล็กปนเปื้อนในปริมาณสูงมาใช้นั้น สามารถก่อให้เกิดปัญหาหลายประการด้วยกัน ดังนี้คือ เหล็กในน้ำทำให้น้ำมีสีเหลืองหรือแดง และมีกลิ่นสนิมเหล็ก อันเป็นที่น่ารังเกียจต่อการนำไปใช้ นอกจากนั้น เหล็กยังทำให้เสื้อผ้าและเครื่องสุขภัณฑ์เกิดเป็นคราบและมีสี จากสีของเหล็ก และแม้ว่าเหล็กจะเป็นธาตุอาหารที่สำคัญต่อร่างกาย และโดยปกติแล้วไม่ถือว่าเหล็กเป็นสารพิษต่อร่างกาย แต่หากร่างกายได้รับเหล็กในปริมาณมากเกินความต้องการ 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 ประจญยุทธ (2547) พบอัตราการสะสมของเหล็กในดินนาในพื้นที่อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก มีค่าเท่ากับ 10.90 kg/rai/yr โดยเป็นเหล็กที่ตกตะกอนจากน้ำบาดาลถึง 10.55 kg/rai/yr ขณะที่ ข้าวที่แช่อยู่ในน้ำที่มีเหล็กสูงมากกว่า 5-10 mg/l นั้น รากของข้าวจะปลดปล่อยก๊าซออกซิเจน เพื่อลดความเป็นพิษของเหล็ก ซึ่งจะทำให้เกิดคราบสนิมเหล็กเคลือบอยู่ที่รากของข้าว ส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับธาตุอาหารของข้าวลดลง และแม้ว่า

เกษตรกรจะเพิ่มปุ๋ยลงในนา ก็ไม่สามารถเพิ่มผลผลิตได้อย่างที่ควรเป็น (กิจการ, 2546) ทั้งนี้อาการเหล็กเป็นพิษต่อข้าวนั้น สามารถสังเกตพบได้ที่บริเวณใบและราก โดยจะเกิดเป็นจุดสีน้ำตาลขนาดเล็กบนใบล่างของข้าว เริ่มจากปลายใบและขยายสู่ส่วนฐานของใบ จากนั้นจุดจะขยายขนาดรวมกันในเนื้อใบ ใบจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลส้มและตายในที่สุด นอกจากนั้น อาจพบว่าใบข้าวมีขนาดแคบกว่าปกติ รากข้าวอาจเปลี่ยนสีและตายได้ เนื่องจากมีออกไซด์ของเหล็กสีน้ำตาลเข้มหรือสีดำจับที่ผิวราก ต้นข้าวหยุดชะงักการเจริญเติบโตและแตกกอลดลง (ทัศนีย์, 2543) ซึ่งส่งผลให้ผลผลิตข้าวของเกษตรกรลดลง และไม่คุ้มค่าต่อการลงทุน 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 ผลการศึกษาได้ระบุว่าการใช้น้ำบาดาลบ่อตื้นที่มีปริมาณเหล็กสูงยังก่อให้เกิดปัญหากับคุณภาพดิน โดยเกษตรกรในพื้นที่พบว่าเนื้อดินมีความเหนียวแข็งเพิ่มขึ้น และมีความร่วนเพิ่มมากขึ้น นอกจากนั้น เกษตรกรยังพบว่าข้าวเป็นโรคมากขึ้น โดยพบโรคใบไหม้ ใบเป็นสีเหลือง เป็นจุดสีน้ำตาล และโรครากดำ ซึ่งอาการคล้ายคลึงกับอาการเหล็กเป็นพิษในดิน

การปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาล ก่อนการนำมาใช้ประโยชน์ จะช่วยลดปัญหาการสะสมของเหล็กในดิน และลดปัญหาต่อเนื่องจากการสะสมนั้น ซึ่งจะทำให้การนำทรัพยากรน้ำบาดาลมาใช้สามารถก่อเกิดประโยชน์ได้อย่างสูงสุด คุ้มค่าต่อการลงทุน โดยไม่ก่อผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมข้างเคียง และเป็นแนวทางการจัดการทรัพยากรที่เหมาะสมตามหลักการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

โครงการศึกษาวิจัยนี้ เป็นการนำเสนอแนวทางในปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาล โดยการลดปริมาณเหล็กในน้ำด้วยระบบบึงประดิษฐ์ ซึ่งผลการศึกษาที่ได้จะบ่งชี้ถึงความเป็นไปได้ ประสิทธิภาพและแนวทางในการปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาลด้วยระบบบึงประดิษฐ์ ซึ่งเป็นระบบที่ง่ายในการดำเนินการ และเกษตรกรสามารถนำผลการศึกษาไปประยุกต์ใช้ได้จริง ซึ่งจะเป็นการลดปัญหาสิ่งแวดล้อม ก่อเกิดประโยชน์ต่อเกษตรกร และเป็นแนวทางที่ก่อประโยชน์ต่อประเทศ

2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ระบบบึงประดิษฐ์ ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาล

2.2 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของระบบบึงประดิษฐ์ ในการลดปริมาณเหล็กในน้ำบาดาลที่ระยะกักพักน้ำ และระยะการเก็บเกี่ยวพืชที่แตกต่างกัน

2.3 เพื่อศึกษาการจัดการระบบบึงประดิษฐ์อย่างเหมาะสม เพื่อการลดปริมาณเหล็กในน้ำบาดาลอย่างมีประสิทธิภาพ

3 วิธีดำเนินการวิจัย

โครงการวิจัยนี้ ประกอบด้วยการศึกษาวิจัยในสองส่วน คือ การศึกษาถึงความเป็นไปได้และประสิทธิภาพในการปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาล โดยการลดปริมาณเหล็กในน้ำ ด้วยระบบบึงประดิษฐ์ และการศึกษาถึงการจัดการระบบบึงประดิษฐ์อย่างความเหมาะสม เพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพสูงสุดในการปรับปรุงคุณภาพน้ำ โดยได้ดำเนินการทดลอง เป็น 2 ระยะ คือ

ระยะที่ 1 ศึกษาถึงผลของระยะการกักพักน้ำในระบบ (Hydraulic retention time: HRT) ต่อประสิทธิภาพการบำบัดเหล็กในน้ำ ทั้งนี้เพื่อวิเคราะห์ถึงระยะเวลาการกักพักน้ำในระบบที่เหมาะสม เพื่อนำมาใช้ในการดำเนินระบบ (System operation)

ระยะที่ 2 ศึกษาถึงผลของระยะการเก็บเกี่ยวพืช (Harvest period) ต่อประสิทธิภาพการบำบัดเหล็กของระบบ เพื่อวิเคราะห์ถึงระยะเวลาที่เหมาะสมในการตัดพืช ให้พืชได้แตกตัวใหม่ อันส่งผลต่อกระบวนการดึงดูดเหล็กของพืช (Plant uptake) เพื่อให้ระบบเกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัดเหล็ก

โดยมีขั้นตอน วิธีการวิจัย 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 และเป็นตัวกลางในการบำบัดลงในแต่ละหน่วยทดลอง จนมีระดับความสูง 70 cm จากก้นแปลง ติดตั้งทางระบายน้ำเข้า และออกจากแปลง หลังจากนั้น ทำการปลูกธูปฤาษี (*Typha angustifolia*) ลงในหน่วยทดลอง โดยทำการปลูกที่ความหนาแน่น 20 rhizomes/m^2 แล้วใช้น้ำประปาในการรด จนกระทั่งพืชสามารถปรับตัวและเติบโตได้ในระบบ

3.2 การดำเนินระบบบำบัด

การศึกษาถึงการลดปริมาณเหล็กในน้ำบาดาลด้วยระบบบึงประดิษฐ์ในครั้งนี้ ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ระยะ โดยในแต่ละระยะที่ทำการศึกษามีการดำเนินการ ดังนี้

3.2.1 การศึกษาระยะที่ 1: การศึกษาถึงผลของระยะการกักพักน้ำในระบบต่อประสิทธิภาพการบำบัดเหล็ก

เมื่อพืชในหน่วยทดลอง สามารถปรับตัวและเจริญเติบโตได้ จนมีความสูงประมาณ 20 cm จึงทำการระบายน้ำประปาลงสู่หน่วยทดลองอย่างต่อเนื่อง โดยให้น้ำในระบบมีความสูงเท่ากับ 10 cm จากระดับผิวหน้าวัสดุปลูก (Water depth) ด้วยอัตราการไหล 200, 100 และ 50 l/d ซึ่งจะทำให้น้ำมีระยะการกักพักน้ำในระบบ (Hydraulic retention time: HRT) เท่ากับ 0.5, 1 และ 2 d ดำเนินการเป็นระยะเวลา 1-2 wk เพื่อให้พืชได้ปรับสภาพภายใต้ระบบน้ำท่วมขัง จากนั้นทำการตัดพืชให้มีความสูง 15 cm แล้วจึงระบายน้ำบาดาลที่มีเหล็กปนเปื้อนลงสู่หน่วยทดลองแทนน้ำประปา และดำเนินการในลักษณะเดียวกันอย่างต่อเนื่อง เป็นระยะเวลา 8 wk ทั้งนี้ได้ดำเนินการในลักษณะเดียวกันนี้กับหน่วยควบคุม (Control unit) ซึ่งเป็นหน่วยทดลองที่ไม่ได้ทำการปลูกพืชลงในระบบ

3.2.2 การศึกษาระยะที่ 2: การศึกษาถึงผลของระยะการเก็บเกี่ยวพืชต่อประสิทธิภาพการบำบัดเหล็กของระบบ

หลังเสร็จสิ้นการศึกษาในระยะที่ 1 ทำการเตรียมหน่วยทดลองใหม่ในลักษณะเดิม จากนั้นทำการดำเนินระบบด้วยระยะกักพักที่เหมาะสม (เลือกจากผลการศึกษาในระยะที่ 1) ซึ่งการศึกษาในระยะที่ 2 นี้ พืชที่ปลูกในระบบจะถูกเก็บเกี่ยวออกจากระบบ ที่ระยะเวลาแตกต่างกัน 3 ช่วงเวลา คือที่ระยะ 4, 6 และ 8 wk และดำเนินระบบเป็นระยะเวลา 2 รอบ ของการตัดพืชในแต่ละช่วงเวลาเก็บเกี่ยวที่ทำการศึกษา

3.3 การเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่าง

3.3.1 การเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่างดิน

เก็บตัวอย่างดิน (วัสดุปลูก) ในหน่วยทดลอง ก่อนการระบายน้ำบาดาลลงสู่หน่วยทดลอง และเมื่อสิ้นสุดการดำเนินระบบ โดยทำการเก็บตัวอย่างดินในแต่ละหน่วยทดลอง ในลักษณะ Composite sample จาก 5 จุดเก็บ จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้มาทำการวิเคราะห์ ค่า pH, Fe และ Mn ในห้องปฏิบัติการ ซึ่งการเก็บตัวอย่างดินนี้ จะดำเนินการในทั้ง 2 ระยะของการศึกษา

3.3.2 การเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ

ภายหลังการระบายน้ำบาดาลลงสู่หน่วยทดลอง เป็นระยะเวลา 1-2 wk จึงเริ่มทำการเก็บตัวอย่างน้ำที่ระบายเข้าสู่ระบบ (Influent) และเก็บตัวอย่างน้ำที่ผ่านการบำบัดภายในระบบ (Effluent) จากจุดระบายน้ำออก ภายหลังจากน้ำบาดาลได้ถูกกักพักภายในระบบ ตามข้อกำหนดการศึกษา คือ 0.5, 1 และ 2 d สำหรับการศึกษาในระยะที่ 1 ส่วนการศึกษาในระยะที่ 2 นั้น จะเลือกใช้ระยะกักพักที่เหมาะสมซึ่งเป็นผลจากการศึกษาของระยะที่ 1 ทั้งนี้ การเก็บตัวอย่างน้ำในทั้ง 2 ระยะของการศึกษานั้น ได้ดำเนินการเป็นประจำทุกสัปดาห์ 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)

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

3.4.1 การปรับปรุงคุณภาพน้ำ

นำผลการตรวจวัดมาทำการวิเคราะห์ถึงประสิทธิภาพของระบบในการลดปริมาณเหล็กและแมงกานีสในน้ำ โดยวิเคราะห์ในรูปร้อยละของการบำบัด (Removal) เหล็กและแมงกานีส และความเข้มข้น (Concentration) ของเหล็กและแมงกานีสในน้ำบาดาลภายหลังการบำบัด เปรียบเทียบประสิทธิภาพและความแตกต่างทางสถิติในการบำบัดเหล็กและแมงกานีสในน้ำบาดาลของแต่ละระยะกักพัก และแต่ละระยะการเก็บเกี่ยวพืชที่ทำการศึกษา

3.4.2 กระบวนการบำบัดเหล็กและแมงกานีสของระบบ

วิเคราะห์ถึงปัจจัยที่มีผลในการบำบัดเหล็กและแมงกานีสของระบบ ประสิทธิภาพในการดูดดึงเหล็กและแมงกานีสของพืช และความแตกต่างทางสถิติของการดูดดึงด้วยพืชที่ระยะการเก็บเกี่ยวพืชที่แตกต่างกัน ซึ่งจะบ่งชี้ได้ถึงความเหมาะสมในการจัดการพืชในระบบ

4 ผลการทดลองและอธิปรายผล

4.1 ผลของระยะกักพักต่อประสิทธิภาพในการลดเหล็ก และแมงกานีสในน้ำบาดาล

4.1.1 ลักษณะน้ำบาดาลก่อนการปรับปรุงคุณภาพ

น้ำบาดาลที่ทำการศึกษา เป็นน้ำจากบ่อบาดาลที่เกษตรกรขุดขึ้นเพื่อใช้ในการเกษตรกรรม การตรวจวัดคุณภาพน้ำ พบว่าน้ำบาดาลก่อนบำบัดมีค่า Temp, pH, DO, EC, TDS, Total Mn และ Total Fe เท่ากับ 25.0-30.1 $^{\circ}$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

น้ำบาดาลก่อนการปรับปรุงคุณภาพมีค่า Temp เป็นไปตามสภาพธรรมชาติ 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 มีค่า EC และ TDS ในปริมาณใกล้เคียงกับค่า EC และ TDS ที่พบได้ในน้ำผิวดิน และอยู่ในเกณฑ์ปกติที่พบในน้ำชลประทาน ซึ่งจะมีค่าของ EC และ TDS ระหว่าง 0-3,000 µS/cm และ 0-2,000 mg/l (Ayers and Westcot, 1994) มีค่าของ Total Mn สูงกว่าค่าสูงสุดของ Total Mn ในแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 3 และสูงกว่าเกณฑ์ที่ยอมให้มีในน้ำชลประทาน ซึ่งกำหนดให้น้ำชลประทานไม่ควรมี Total Mn สูงกว่า 0.2 mg/l ปริมาณ Fe ในน้ำบาดาลก่อนการปรับปรุงมีค่าสูงกว่าค่าที่ยอมให้มีในน้ำชลประทาน ซึ่งกำหนดให้น้ำชลประทานไม่ควรมี Total Fe สูงกว่า 5.0 mg/l

4.1.2 คุณภาพน้ำบาดาลหลังการปรับปรุง และประสิทธิภาพการบำบัดของระบบ

1) คุณภาพน้ำบาดาลหลังการปรับปรุง

คุณภาพน้ำบาดาลหลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยระบบบึงประดิษฐ์ พบว่า น้ำบาดาลมีอุณหภูมิ ระหว่าง 25.1-33.0°C ทั้งนี้ อุณหภูมิของน้ำบาดาลก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพไม่แตกต่างกันนัก ค่า pH ของน้ำบาดาลหลังการปรับปรุงคุณภาพ มีค่าระหว่าง 6.5-10.2 โดยมีค่าเฉลี่ย (pH = 7.8-9.0) สูงกว่าค่า pH เฉลี่ยของน้ำบาดาลก่อนการปรับปรุงคุณภาพ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และ มีค่าอยู่ในเกณฑ์อนุโลมสูงสุดของมาตรฐานน้ำบาดาลที่ใช้บริโภค และมีค่าใกล้เคียงกับค่า pH ของน้ำชลประทานซึ่งโดยทั่วไปมีค่าระหว่าง 6.5-8.4 (Ayers and Westcot, 1994) โดยน้ำบาดาลที่ถูกกักพักในระบบที่ระยะ 0.5 d มีค่าเฉลี่ยของ pH สูงสุด (pH = 9.0) รองลงมาคือน้ำบาดาลที่ถูกกักพักในระบบที่ระยะ 2 d (pH = 8.0) และ 1 d (pH = 7.8) ตามลำดับ การเพิ่มขึ้นของค่า pH ของน้ำเป็นผลจากกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชน้ำที่เจริญเติบโตในระบบ ซึ่งทำให้ CO_2 อิสระในน้ำลดลง และส่งผลให้ค่า pH เพิ่มสูงขึ้น (ประเทือง, 2534) นอกจากนั้น การสังเคราะห์แสงของพืชน้ำยังเป็นการเพิ่ม

ออกซิเจนให้กับน้ำ และทำให้ค่า DO ของน้ำมีค่าสูงขึ้นด้วย ซึ่งพบว่ามีความสัมพันธ์กับค่า DO ที่ตรวจวัดได้

ค่า DO ในน้ำบาดาลหลังการปรับปรุงคุณภาพ มีค่าสูงขึ้น และมีค่าแตกต่างกันทางสถิติ ($P < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยของค่า DO ในน้ำบาดาลก่อนปรับปรุงคุณภาพ โดยมีค่าระหว่าง 2.5-4.1 mg/l เนื่องจากน้ำได้รับออกซิเจนเพิ่มเติมจากอากาศ และจากการสังเคราะห์แสงของพืชน้ำในระบบ ทั้งนี้ พบว่าค่าเฉลี่ยของ DO ของน้ำบาดาลที่ถูกกักพักในระบบที่ระยะ 0.5 d มีค่าสูงสุด ซึ่งมีความสัมพันธ์และเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการเพิ่มขึ้นของค่า pH ของน้ำบาดาล

ค่า EC ของน้ำบาดาลหลังการปรับปรุงคุณภาพ มีค่าระหว่าง 135.4-265.0 µS/cm ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่พบได้ในน้ำผิวดินทั่วไปและในน้ำสำหรับการชลประทาน ผลการศึกษา พบว่า ค่า EC ของน้ำบาดาลที่ถูกกักพักในระบบที่ระยะ 1 d มีค่าเฉลี่ยสูงสุด และไม่แตกต่างกับค่าเฉลี่ย EC ของน้ำบาดาลก่อนการปรับปรุงคุณภาพ โดย EC ของน้ำบาดาลที่ถูกกักพักในระบบที่ระยะ 0.5 d มีค่าเฉลี่ยต่ำสุดและแตกต่างกับค่า EC ของน้ำบาดาลก่อนการปรับปรุงคุณภาพ และ ค่า EC ของ น้ำบาดาลที่ถูกกักพักในระบบที่ระยะกักพักอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) และเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับค่าของ TDS ซึ่งพบว่ามีค่าเฉลี่ยต่ำสุดในน้ำบาดาลที่ถูกกักพักในระบบที่ระยะ 0.5 d และแตกต่างจากค่า TDS ของน้ำบาดาลก่อนการปรับปรุงคุณภาพ และค่า TDS ของน้ำบาดาลที่ถูกกักพักในระบบที่ระยะกักพักอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) โดยค่า TDS ในน้ำบาดาลหลังการปรับปรุงคุณภาพมีค่าระหว่าง 66.8-133.0 mg/l

2) การบำบัดเหล็ก และแมงกานีส

น้ำจากบ่อบาดาลซึ่งมีค่า Total Mn และ Total Fe ปนเปื้อนในน้ำ ระหว่าง 1.03-5.32 mg/l และ 0.57-19.46 mg/l ถูกระบายลงสู่ระบบบึงประดิษฐ์ และด้วยอัตราภาระทางชลศาสตร์ (HLR) เท่ากับ 200, 100 และ 50 l/d และมีระยะการกักพักภายในระบบ (HRT) เท่ากับ 0.5, 1 และ 2 d ตามลำดับ ซึ่งทำให้ระบบบึงประดิษฐ์ มีอัตราการรองรับ Total Mn และ Total Fe เท่ากับ 0.052-1.065 $g/m^2/d$ และ 0.028-3.891 $g/m^2/d$ โดยระบบบึงประดิษฐ์ที่ทำการปรับปรุงคุณภาพน้ำ ที่ระยะกักพัก 0.5, 1 และ 2 d มีอัตราการรองรับ Total Mn เฉลี่ยเท่ากับ 0.656, 0.331 และ 0.164 $g/m^2/d$ ตามลำดับ และมีอัตราการรองรับ Total Fe เฉลี่ยเท่ากับ 1.043, 0.521 และ 0.261 $g/m^2/d$ ตามลำดับ

ภายหลังการปรับปรุงคุณภาพ น้ำบาดาลมีปริมาณการปนเปื้อน 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 น้ำบาดาลที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพน้ำที่ระยะกักพัก 0.5, 1 และ 2 d มี Total Mn ปนเปื้อน เฉลี่ยเท่ากับ 0.145, 0.113 และ 0.039 mg/l ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำผิวดินประเภทที่ 3 (Total Mn $\leq$ 1 mg/l) และอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดให้มีได้ในน้ำชลประทาน (Total Mn $\leq$ 0.2 mg/l) และมี Total Fe ปนเปื้อนเฉลี่ยเท่ากับ 0.700, 0.578 และ 0.512 mg/l ตามลำดับ ซึ่งอยู่ใน

เกณฑ์ที่กำหนดให้มีได้ในน้ำชลประทาน (Total Fe $\leq$ 5.0 mg/l) ทั้งนี้ พบว่า ค่าความเข้มข้นของ Total Mn และ Total Fe ในน้ำหลังการปรับปรุงคุณภาพที่ระยะกักพักต่างๆ ไม่แตกต่างกันทางสถิติ อย่างไรก็ตาม เมื่อเทียบกับค่าความเข้มข้นของ Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาลก่อนการปรับปรุงคุณภาพ จะพบว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

ระบบบึงประดิษฐ์ที่ทำการศึกษามีประสิทธิภาพในการลด Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาลสูงกว่าระบบควบคุม และมีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยเฉพาะประสิทธิภาพในการลด Total Mn ในน้ำบาดาล ทั้งนี้ พบว่าบึงประดิษฐ์มีประสิทธิภาพในการลดความเข้มข้นของ Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาล เท่ากับ 46.42-99.84 % และ 9.02-98.89 % ตามลำดับ (ตารางที่ 1) โดยการปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาลที่ระยะกักพัก 2 d มีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดความเข้มข้นของ Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาล โดยระบบมีอัตราการบำบัด Total Mn และ Total Fe เท่ากับ 0.050-1.053 $g/m^2/d$ และ 0.008-2.219 $g/m^2/d$ ทั้งนี้ พบว่า การกักพักน้ำที่ระยะกักพัก 0.5 d มีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดปริมาณ Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาล ต่อพื้นที่ต่อช่วงเวลาที่เท่ากัน และพบว่ามีประสิทธิภาพแตกต่างจากการบำบัดที่ระยะกักพัก 1 และ 2 d อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ดังนั้น การลดปริมาณ Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาล ด้วยการกักพักน้ำในระบบบึงประดิษฐ์ที่ระยะกักพักเท่ากับ 0.5 d จึงเป็นระยะกักพักที่เหมาะสมในการปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาล เนื่องจากเป็นระยะกักพักที่มีอัตราการบำบัด Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาล ต่อพื้นที่ต่อช่วงเวลาที่เท่ากัน สูงกว่าการบำบัดที่ระยะกักพัก 1 และ 2 d อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ นอกจากนั้น ยังสามารถปรับปรุงคุณภาพน้ำทำให้น้ำบาดาลมีปริมาณ Total Fe เหลือปนเปื้อนในน้ำ ไม่แตกต่างจากการปรับปรุงคุณภาพที่ระยะกักพักอื่นที่ใช้ระยะเวลายาวนานกว่าในการบำบัด ซึ่งระยะการกักพักที่ใช้เวลายาวนานอาจจะทำให้ได้ปริมาณน้ำหลังการปรับปรุงคุณภาพไม่เพียงพอต่อการนำไปใช้ในการทำนา ซึ่งเป็นกิจกรรมที่ต้องการน้ำในปริมาณมาก

ตารางที่ 1 ประสิทธิภาพของระบบบึงประดิษฐ์ในการบำบัด Fe และ Mn

Design HRT (d)	Fe removal						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 $P \geq 0.05$.

AAR = Area adjusted removal

FOR = First order kinetics removal

4.2 ผลของระยะเก็บเกี่ยวพืชต่อประสิทธิภาพในการลดเหล็ก และแมงกานีสในน้ำบาดาล (ระยะที่ 2 ของการศึกษา)

การปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาลด้วยระบบบึงประดิษฐ์ ที่ระยะกักพัก 0.5 d ซึ่งพบว่ามีประสิทธิภาพสูงในการรองรับและลดปริมาณ Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาลต่อพื้นที่ต่อช่วงเวลา ได้ถูกนำมาใช้ในการศึกษาถึงผลของระยะเวลาในการเก็บเกี่ยวพืชต่อประสิทธิภาพในการลด Fe และ Mn ในน้ำบาดาล โดยมีระยะการเก็บเกี่ยวพืชที่ทำการศึกษา คือ การเก็บเกี่ยวที่ระยะ 4, 6 และ 8 wk ซึ่งผลการศึกษามีดังนี้

4.2.1 ประสิทธิภาพในการลดเหล็ก และแมงกานีสในน้ำบาดาล

ระบบบึงประดิษฐ์ ที่ทำการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะ 4, 6 และ 8 wk มีประสิทธิภาพในการลดความเข้มข้นของ Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาล 48.58-99.40 % และ 48.58-98.82 % ซึ่งทำให้น้ำบาดาลที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ มีค่าความเข้มข้นของ Total Mn และ Total Fe ลดลง โดยมีค่าระหว่าง 0.000-0.106 mg/l และ 0.03-1.89 mg/l ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำเพื่อการชลประทาน โดยระบบมีอัตราการบำบัด Total Mn และ Total Fe ระหว่าง 0.016-0.149 $g/m^2/d$ และ 0.010-0.920 $g/m^2/d$

ประสิทธิภาพการบำบัด Total Mn และ Total Fe ของแต่ละระยะเก็บเกี่ยว (4, 6 และ 8 wk) ไม่แตกต่างกันทางสถิติ โดยมีค่าเฉลี่ยระหว่าง 96.31-97.60 % และ 84.02-86.63 % เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดระหว่างการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 1 กับครั้งที่ 2 ของแต่ละระยะเก็บเกี่ยว พบว่าภายหลังการเก็บเกี่ยวพืชครั้งแรก ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดทั้ง Total Mn และ Total Fe สูงขึ้น และมีค่าแตกต่างกันทางสถิติ ซึ่งผลการศึกษาที่พบนี้ได้สนับสนุน ข้อบ่งชี้ในการจัดการระบบบึงประดิษฐ์เพื่อคงประสิทธิภาพของระบบไว้ด้วยการเก็บเกี่ยวพืชออกจากระบบอย่างเหมาะสม (Reddy and D'Angelo, 1990; Hosoi et al., 1998)

ความเข้มข้นของ Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาลหลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยระบบบึงประดิษฐ์ ที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะ 4, 6 และ 8 wk มีค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลาที่ดำเนินระบบเท่ากับ 0.0210, 0.0208 และ 0.0122 mg/l และ 0.248, 0.278 และ 0.336 mg/l ซึ่งพบว่าความเข้มข้นของ Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาล จากระบบที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะเวลาแตกต่างกัน มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P > 0.05$) ทั้งนี้ พบว่าความเข้มข้นของ Total Mn และ Total Fe ของทั้ง 3 ระยะเก็บเกี่ยว มีค่าแตกต่างกันระหว่างการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 โดยความเข้มข้นของ Total Mn และ Total Fe ของการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 1 มีค่าระหว่าง 0.0080-0.1060 mg/l และ 0.077-0.798 mg/l และความเข้มข้นของ Total Mn และ Total Fe ภายหลังการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 1 (การเก็บเกี่ยวครั้งที่ 2) มีค่าระหว่าง 0.0000-0.1060 mg/l และ 0.028-1.890 mg/l

อัตราการบำบัด Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาลของระบบบึงประดิษฐ์ ที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะ 4, 6 และ 8 wk มีค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลาที่ดำเนินระบบเท่ากับ 0.092, 0.070 และ 0.068 $g/m^2/d$ และ 0.383, 0.429 และ 0.432 $g/m^2/d$ ซึ่งพบว่าอัตราการบำบัด Total Mn ในน้ำบาดาล ของระบบที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะเวลาแตกต่างกัน มีค่าแตกต่างกันทางสถิติ ($P < 0.05$) โดยพบอัตราการบำบัด Total Mn สูงสุด ในระบบที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ 4 wk รองลงมาคืออัตราการบำบัดของระบบที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ 6 และ 8 wk ซึ่งพบว่าอัตราการบำบัดของทั้งสองระบบนี้ ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ขณะที่อัตราการบำบัด Total Fe ในระบบที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะเวลาแตกต่างกัน ไม่แตกต่างกันทางสถิติ

อัตราการบำบัด Total Mn ของระบบมีค่าแตกต่างกันทางสถิติระหว่างการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 โดยอัตราการบำบัด Total Mn ของการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 มีค่าระหว่าง 0.042-0.128 $g/m^2/d$ และ 0.016-0.149 $g/m^2/d$ โดยอัตราการบำบัด Total Mn ของการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 1 มีค่าเฉลี่ยสูงกว่าอัตราการบำบัดของการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 2 ในทั้ง 3 ระยะของการเก็บเกี่ยว ส่วนอัตราการบำบัด Total Fe ของระบบที่ทำการเก็บเกี่ยวที่ระยะ 4, 6 และ 8 wk มีค่าเฉลี่ยไม่แตกต่างกันทางสถิติระหว่างการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 1 และ 2

4.2.2 สมดุลเหล็ก และแมงกานีส

1) เหล็ก และแมงกานีสในดิน

ผลการตรวจวัด Mn และ Fe ในดิน เมื่อสิ้นสุดการดำเนินระบบ พบว่าดินที่ระดับผิวดิน (0-5.5 cm) โดยส่วนใหญ่มีค่าของ Mn และ Fe สูงขึ้น โดยดินในระบบบึงประดิษฐ์ที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ 4, 6 และ 8 wk มีค่า Mn และ Fe ระหว่าง 7.10-29.57, 4.68-9.77 และ 4.70-8.71 ppm และ 18.91-58.41, 11.19-31.92 และ 12.78-71.36 ppm ตามลำดับ ค่าความเข้มข้นของ Mn ในดินมีความแตกต่างกันทางสถิติระหว่างระบบที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่แตกต่างกัน โดยระบบที่ทำการเก็บเกี่ยวพืชที่ 4 wk มีค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของ Mn ในดินสูงสุด ขณะที่ ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของ Fe ในดิน ไม่แตกต่างกันระหว่างระบบที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่แตกต่างกัน

2) เหล็ก และแมงกานีสในน้ำ

คุณสมบัติของน้ำบาดาลที่ใช้ในการศึกษาถึงผลของระยะเก็บเกี่ยวพืชต่อประสิทธิภาพในการลดเหล็กในน้ำบาดาล (การศึกษาในระยะที่ 2) มีลักษณะเดียวกันกับน้ำบาดาลที่ใช้ในการศึกษาถึงผลของระยะกักพักต่อประสิทธิภาพในการลดเหล็กในน้ำบาดาล (การศึกษาในระยะที่ 1) เนื่องจากเป็นน้ำจากบ่อบาดาลเดียวกัน

ผลการศึกษาในระยะที่ 2 พบว่าค่าเฉลี่ยของ Temp, pH, DO, EC และ TDS ของน้ำบาดาลหลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยระบบบึงประดิษฐ์ที่มีระยะเวลาเก็บเกี่ยวพืชออกจากระบบที่แตกต่างกัน มีค่าใกล้เคียงกัน ความเข้มข้นของ Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาลที่ระบายลงสู่ระบบบึงประดิษฐ์ ที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะ 4, 6 และ 8 wk มีค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลาที่ดำเนินระบบเท่ากับ 0.48, 0.38 และ 0.35 mg/l และ 2.16, 2.42 และ 2.50 mg/l ตามลำดับ ความเข้มข้นของ Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาลภายหลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยระบบบึงประดิษฐ์ ที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะ 4, 6 และ 8 wk มีค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลาที่ดำเนินระบบเท่ากับ 0.02, 0.02 และ 0.01 mg/l และ 0.25, 0.28 และ 0.34 mg/l ตามลำดับ

ปริมาณ Total Mn และ Total Fe ที่ระบายลงสู่ระบบบึงประดิษฐ์ที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะ 4, 6 และ 8 wk มีค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลาที่ดำเนินระบบเท่ากับ 0.096, 0.075 และ 0.070 $g/m^2/d$ และ 0.432, 0.485 และ 0.499 $g/m^2/d$ ตามลำดับ ขณะที่ ระบบบึงประดิษฐ์ที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะ 4, 6 และ 8 wk มีอัตราการบำบัด Total Mn และ Total Fe เฉลี่ยตลอดระยะเวลาที่ดำเนินระบบเท่ากับ 0.092, 0.070 และ 0.068 $g/m^2/d$ และ 0.383, 0.056 และ 0.067 $g/m^2/d$ ตามลำดับ ซึ่งปริมาณของ Total Mn และ Total Fe ส่วนหนึ่งได้ถูกบำบัดและกักเก็บไว้ด้วยกระบวนการต่างๆ ภายในระบบบึงประดิษฐ์ ทั้งนี้ ระบบที่มีระยะเก็บเกี่ยว 4, 6 และ 8 wk มีระยะเวลาดำเนินระบบทั้งสิ้น 56, 84 และ 112 d ตามลำดับ โดยมีปริมาณ Total Mn ที่ถูกบำบัดและกักเก็บไว้ภายในระบบ เท่ากับ 0.092, 0.070 และ 0.068 g/d หรือ 5.127, 5.913 และ 7.615 g ตามลำดับ และมีปริมาณ Total Fe ที่ถูกบำบัดและกักเก็บไว้ภายในระบบ เท่ากับ 0.383, 0.429 และ 0.432 g/d หรือ 21.438, 36.076 และ 48.368 g ตามลำดับ

3) เหล็ก และแมงกานีสในพืช

อัตราการเติบโตสัมพัทธ์ (Relative growth rate: RGR) ของธูปฤาษีในระบบที่ทำการเก็บเกี่ยวที่ระยะ 4, 6 และ 8 wk ในการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 1 มีค่า 0.181-0.205, 0.136-0.159 และ 0.096-0.112 per day ตามลำดับ สำหรับการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 2 มีค่า 0.192-0.265, 0.148-0.158 และ 0.109-0.121 per day ตามลำดับ ทั้งนี้ พบว่า ค่า RGR ที่ได้จากการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 2 ของธูปฤาษีในระบบที่ทำการเก็บเกี่ยวที่ระยะ 6 และ 8 wk มีค่าสูงกว่า ค่า RGR ของพืชที่ได้จากการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) และพบว่า ค่า RGR ของธูปฤาษีในระบบที่ทำการเก็บเกี่ยวที่ระยะ 4 wk ในทั้ง 2 ครั้งของการเก็บเกี่ยว มีค่าสูงกว่า ค่า RGR ของธูปฤาษีในระบบที่ทำการเก็บเกี่ยวที่ระยะ 6 และ 8 wk ตามลำดับ

ความเข้มข้นของ Mn ในเนื้อเยื่อของธูปฤาษีส่วนเหนือดิน ซึ่งได้จากระบบที่ทำการเก็บเกี่ยวที่ระยะ 4, 6 และ 8 wk ในการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 1 มีค่า 197.04-305.47, 172.03-343.60 และ 120.26-225.36 mg/g ตามลำดับ ส่วนในการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 2 มีค่า 112.82-238.30, 179.41-351.94 และ 182.87-314.30 mg/g ตามลำดับ ขณะที่ความเข้มข้นของ Mn ในเนื้อเยื่อของธูปฤาษีส่วนใต้ดิน ซึ่งได้จากระบบที่ทำการเก็บเกี่ยวที่ระยะ 4, 6 และ 8 wk มีค่า 87.08-173.78, 139.23-398.31 และ 63.04-872.57

mg/g ตามลำดับ ทั้งนี้ พบว่าเนื้อเยื่อของธูปฤาษีส่วนเหนือดิน ในระบบที่ทำการเก็บเกี่ยวที่ระยะ 6 และ 8 wk ที่ได้จากการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 2 มีค่าความเข้มข้นของ Mn สูงกว่า Mn ในเนื้อเยื่อพืชที่ได้จากการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 1 แต่ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ส่วนเนื้อเยื่อของธูปฤาษีส่วนเหนือดิน ในระบบที่ทำการเก็บเกี่ยวที่ระยะ 4 wk ซึ่งได้จากการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 1 มีค่าความเข้มข้นของ Mn สูงกว่าค่าความเข้มข้นของ Mn ในเนื้อเยื่อของธูปฤาษีที่ได้จากการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 2 โดยพบว่า ในการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 1 นั้น ธูปฤาษีในระบบที่ทำการเก็บเกี่ยวที่ระยะ 4 wk มีค่าความเข้มข้นของ Mn ในเนื้อเยื่อสูงกว่า Mn ในเนื้อเยื่อธูปฤาษีส่วนเหนือดินในระบบที่ทำการเก็บเกี่ยวที่ระยะ 8 wk อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P< 0.05$) แต่ไม่แตกต่างทางสถิติเมื่อเทียบกับความเข้มข้นของ Mn ในเนื้อเยื่อของธูปฤาษีส่วนเหนือดินในระบบที่ทำการเก็บเกี่ยวที่ระยะ 6 wk ส่วนในการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 2 พบว่า ความเข้มข้นของ Mn ในเนื้อเยื่อของธูปฤาษีส่วนเหนือดิน ที่ได้จากระบบที่ทำการเก็บเกี่ยวที่ระยะ 6 และ 8 wk มีค่าสูงกว่าความเข้มข้นของ Mn ในเนื้อเยื่อพืชที่ได้จากระบบที่ทำการเก็บเกี่ยวที่ระยะ 4 wk อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P< 0.05$) ขณะที่ความเข้มข้นของ Mn ในเนื้อเยื่อของธูปฤาษีส่วนใต้ดินที่เก็บเกี่ยวจากระบบที่มีระยะการเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกัน มีค่าเฉลี่ยไม่แตกต่างกันทางสถิติ (ตารางที่ 2)

ความเข้มข้นของ Fe ในมวลชีวภาพของธูปฤาษีส่วนเหนือดิน ซึ่งเก็บเกี่ยวจากระบบที่ทำการเก็บเกี่ยวที่ระยะ 4, 6 และ 8 wk ในการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 1 มีค่า 63.40-100.08, 55.05-170.93 และ 43.00-102.26 mg/g ตามลำดับ ส่วนในการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 2 มีค่า 418.16-1,230.13, 720.78-2,970.64 และ 2,188.58-4,041.73 mg/g ตามลำดับ ขณะที่ความเข้มข้นของ Fe ในมวลชีวภาพของธูปฤาษีส่วนใต้ดินในระบบที่ทำการเก็บเกี่ยวที่ระยะ 4, 6 และ 8 wk มีค่า 13,219.50-23,756.21, 14,788.56-24,484.36 และ 19,483.82-32,087.15 mg/g ตามลำดับ ทั้งนี้ พบว่าเนื้อเยื่อของธูปฤาษีส่วนเหนือดิน ซึ่งได้จากการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 2 มีค่าความเข้มข้นของ Fe สูงกว่าค่าความเข้มข้นของ Fe ในเนื้อเยื่อของธูปฤาษีที่ได้จากการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 1 ในทั้ง 3 ระยะเก็บเกี่ยวที่ทำการศึกษา และพบว่า ในการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 1 นั้น ความเข้มข้นของ Fe ในเนื้อเยื่อของธูปฤาษีส่วนเหนือดินที่เก็บเกี่ยวจากระบบที่มีระยะการเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกัน มีค่าเฉลี่ยไม่แตกต่างกันทางสถิติ ส่วนในการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 2 พบว่า ธูปฤาษีในระบบที่ทำการเก็บเกี่ยวที่ระยะ 8 wk มีค่าความเข้มข้นของ Fe ในเนื้อเยื่อสูงกว่าความเข้มข้นของ Fe ในเนื้อเยื่อธูปฤาษีในระบบที่ทำการเก็บเกี่ยวที่ระยะ 6 และ 4 wk ตามลำดับ ขณะที่ความเข้มข้นของ Fe ในเนื้อเยื่อของธูปฤาษีส่วนใต้ดินที่เก็บเกี่ยวจากระบบที่มีระยะการเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกัน มีค่าเฉลี่ยไม่แตกต่างกันทางสถิติ (ตารางที่ 2)

ตารางที่ 2 ความเข้มข้นของ Mn และ Fe ในเนื้อเยื่อพืช ในแต่ละระยะเก็บเกี่ยว

Parameters	Unit	Harvest period		
		Harvesting at 4 wk	Harvesting at 6 wk	Harvesting at 8 wk
Mn concentration	mg/kg			
Aboveground plant				
- first harvest		265.59±40.64^{aA}	245.12±80.85^{ab}	186.76±39.30^{b}
- second harvest		165.77±42.49^{bB}	254.38±68.09^{a}	241.47±57.43^{a}
Underground plant				
- second harvest		130.16±35.84	211.39±97.03	242.55±311.15
Fe concentration	mg/kg			
Aboveground plant				
- first harvest		76.57±16.28^{B}	106.58±45.25^{B}	69.59±27.21^{B}
- second harvest		801.75±278.12^{bA}	1,600.36±763.68^{bA}	3,122.27±834.06^{aA}
Underground plant				
- second harvest		16,951.85±4,389.93	19,452.17±3,326.18	24,857.26±4,934.35

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) = 6

4) อัตราการบำบัดแมงกานีสและเหล็ก ขององค์ประกอบในระบบ

อัตราการบำบัด Total Mn ในน้ำบาดาลของระบบบึงประดิษฐ์ ที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะ 4, 6 และ 8 wk มีค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลาที่ดำเนินระบบ (2 รอบของการเก็บเกี่ยวพืช) เท่ากับ 91.5, 70.4 และ 68.0 mg/d ตามลำดับ ซึ่งพบว่าอัตราการบำบัด Total Mn ในน้ำบาดาล มีค่าลดลงเมื่อระบบมีระยะการเก็บเกี่ยวพืชและมีระยะเวลาในการบำบัดยาวนานขึ้น ขณะที่อัตราการบำบัด Total Fe ในน้ำบาดาล มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อระบบมีระยะการเก็บเกี่ยวพืชและมีระยะเวลาในการบำบัดยาวนานขึ้น โดยระบบบึงประดิษฐ์ ที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะ 4, 6 และ 8 wk มีค่าเฉลี่ยอัตราการบำบัด Total Fe ในน้ำบาดาล ตลอดระยะเวลาที่ดำเนินระบบ (2 รอบของการเก็บเกี่ยวพืช) เท่ากับ 382.8, 429.5 และ 431.9 mg/d ตามลำดับ ซึ่งการบำบัดหรือการลด Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาล ด้วยระบบบึงประดิษฐ์ที่ทำการศึกษานี้ เป็นการบำบัดด้วยการดูดซับ (Absorption) ติดไปกับวัสดุและส่วนต่างๆ ของพืช การ

บำบัดด้วยกระบวนการดูดดึง (Uptake) โดยพืชที่ปลูกในระบบและพืชสีเขียวขนาดเล็ก ประเภทสาหร่ายและตะไคร้น้ำที่เกิดขึ้นเองในระบบ และการบำบัดด้วยกระบวนการอื่นๆ เช่น การเกิดปฏิกิริยาทางเคมีและเกิดการตกตะกอนลงสู่พื้นท้องน้ำ (Precipitation) เป็นต้น

ผลการศึกษา ได้แสดงถึงอัตราการบำบัดด้วยกระบวนการและองค์ประกอบต่างๆ ภายในระบบที่ทำการศึกษา ดังนี้ อัตราการบำบัด Total Mn ในน้ำบาดาลของระบบบึงประดิษฐ์ ที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะ 4 wk ซึ่งมีค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลาที่ดำเนินระบบ (2 รอบของการเก็บเกี่ยวพืช) เท่ากับ 91.5 mg/d นั้น เป็นการบำบัดโดยการกักเก็บไว้ในส่วนเหนือดินของพืช 1.83-3.73 mg/d คิดเป็น 2.00-4.06 % ของอัตราการบำบัดรวม โดยการกักเก็บไว้ในส่วนใต้ดินของพืช 1.51-2.88 mg/d คิดเป็น 1.64-3.11 % ของอัตราการบำบัดรวม โดยการกักเก็บไว้ในเนื้อเยื่อของพืชสีเขียวขนาดเล็ก 0.26-0.39 mg/d คิดเป็น 0.28-0.43 % ของอัตราการบำบัดรวม และการบำบัดด้วยกระบวนการอื่น ซึ่งได้แก่ การตกตะกอนลงสู่พื้นท้องน้ำ การดูดซับติดอยู่ตามขอบผนังของระบบบำบัดและวัสดุอื่นๆ เท่ากับ 86.22-86.28 mg/d คิดเป็น 93.87-94.55 % ของอัตราการบำบัดรวม

อัตราการบำบัด Total Mn ในน้ำบาดาลของระบบบึงประดิษฐ์ ที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะ 6 wk ซึ่งมีค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลาที่ดำเนินระบบ (2 รอบของการเก็บเกี่ยวพืช) เท่ากับ 70.4 mg/d นั้น เป็นการบำบัดโดยการกักเก็บไว้ในส่วนเหนือดินของพืช 2.70-2.74 mg/d คิดเป็น 3.84-3.90 % ของอัตราการบำบัดรวม โดยการกักเก็บไว้ในส่วนใต้ดินของพืช 1.91-3.00 mg/d คิดเป็น 2.68-4.33 % ของอัตราการบำบัดรวม โดยการกักเก็บไว้ในเนื้อเยื่อของพืชสีเขียวขนาดเล็ก 0.30-0.41 mg/d คิดเป็น 0.42-0.60 % ของอัตราการบำบัดรวม และการบำบัดด้วยกระบวนการอื่นๆ เท่ากับ 63.25-66.47 mg/d คิดเป็น 91.18-93.06 % ของอัตราการบำบัดรวม

อัตราการบำบัด Total Mn ในน้ำบาดาลของระบบบึงประดิษฐ์ ที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะ 8 wk ซึ่งมีค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลาที่ดำเนินระบบ (2 รอบของการเก็บเกี่ยวพืช) เท่ากับ 68.0 mg/d นั้น เป็นการบำบัดโดยการกักเก็บไว้ในส่วนเหนือดินของพืช 2.09-2.14 mg/d คิดเป็น 3.04-3.19 % ของอัตราการบำบัดรวม โดยการกักเก็บไว้ในส่วนใต้ดินของพืช 1.05-3.03 mg/d คิดเป็น 1.57-4.40 % ของอัตราการบำบัดรวม โดยการกักเก็บไว้ในเนื้อเยื่อของพืชสีเขียวขนาดเล็ก 0.41-1.00 mg/d คิดเป็น 0.60-1.49 % ของอัตราการบำบัดรวม และการบำบัดด้วยกระบวนการอื่นๆ เท่ากับ 62.89-63.37 mg/d คิดเป็น 91.97-93.75 % ของอัตราการบำบัดรวม

อัตราการบำบัด Total Fe ในน้ำบาดาลของระบบบึงประดิษฐ์ ที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะ 4 wk ซึ่งมีค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลาที่ดำเนินระบบ (2 รอบของการเก็บเกี่ยวพืช) เท่ากับ 382.8 mg/d นั้น เป็นการบำบัดโดยการกักเก็บไว้ในส่วนเหนือดินของพืช 5.60-11.05 mg/d คิดเป็น 1.43-2.94 % ของอัตราการบำบัดรวม โดยกักเก็บไว้ในส่วนใต้ดินของพืช 182.70-397.79 mg/d คิดเป็น 48.68-101.91 % ของอัตราการบำบัดรวม โดยการกักเก็บไว้ในเนื้อเยื่อของพืชสีเขียวขนาดเล็ก 2.39-3.17 mg/d คิดเป็น

0.61-0.85 % ของอัตราการบำบัดรวม และสามารถเกิดการบำบัดด้วยกระบวนการอื่นๆ ได้สูงถึง 178.41 mg/d ซึ่งคิดเป็น 47.53 % ของอัตราการบำบัดรวม

อัตราการบำบัด Total Fe ในน้ำบาดาลของระบบบึงประดิษฐ์ ที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะ 6 wk ซึ่งมีค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลาที่ดำเนินระบบ (2 รอบของการเก็บเกี่ยวพืช) เท่ากับ 429.5 mg/d นั้น เป็นการบำบัดโดยการกักเก็บไว้ในส่วนเหนือดินของพืช 8.44-12.96 mg/d คิดเป็น 1.98-3.00 % ของอัตราการบำบัดรวม โดยการกักเก็บไว้ในส่วนใต้ดินของพืช 197.55-254.30 mg/d คิดเป็น 46.29-58.84 % ของอัตราการบำบัดรวม โดยการกักเก็บไว้ในเนื้อเยื่อของพืชสีเขียวขนาดเล็ก 1.68-3.62 mg/d คิดเป็น 0.39-0.85 % ของอัตราการบำบัดรวม และการบำบัดด้วยกระบวนการอื่นๆ เท่ากับ 163.21-217.18 mg/d คิดเป็น 37.77-50.89 % ของอัตราการบำบัดรวม

อัตราการบำบัด Total Fe ในน้ำบาดาลของระบบบึงประดิษฐ์ ที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะ 8 wk ซึ่งมีค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลาที่ดำเนินระบบ (2 รอบของการเก็บเกี่ยวพืช) เท่ากับ 431.9 mg/d นั้น เป็นการบำบัดโดยการกักเก็บไว้ในส่วนเหนือดินของพืช 17.83-20.52 mg/d คิดเป็น 4.26-4.61 % ของอัตราการบำบัดรวม โดยการกักเก็บไว้ในส่วนใต้ดินของพืช 207.37-228.00 mg/d คิดเป็น 49.59-51.17 % ของอัตราการบำบัดรวม โดยการกักเก็บไว้ในเนื้อเยื่อของพืชสีเขียวขนาดเล็ก 4.50-7.32 mg/d คิดเป็น 1.08-1.64 % ของอัตราการบำบัดรวม และการบำบัดด้วยกระบวนการอื่นๆ เท่ากับ 188.46-189.71 mg/d คิดเป็น 42.58-45.07 % ของอัตราการบำบัดรวม

ทั้งนี้พบว่า การบำบัด Total Mn และ Total Fe ขององค์ประกอบภายในบึงประดิษฐ์แต่ละระบบที่มีระยะเวลาเก็บเกี่ยวพืชที่แตกต่างกัน (4, 6 และ 8 wk) นั้น มีสัดส่วนในการบำบัดของแต่ละกระบวนการหรือแต่ละองค์ประกอบของระบบเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ดังนี้คือ ในการบำบัด Total Mn นั้น พบว่าการบำบัดด้วยกระบวนการทางกายภาพและเคมี มีสัดส่วนของการบำบัดที่สูง รองลงมาเป็นการบำบัดโดยธูปฤาษีที่ปลูกภายในระบบ ซึ่งมีการกักเก็บ Mn ไว้ในเนื้อเยื่อของธูปฤาษีส่วนเหนือดินและส่วนใต้ดินในสัดส่วนที่ใกล้เคียงกัน และมีการกักเก็บไว้ในเนื้อเยื่อของพืชสีเขียวขนาดเล็กในสัดส่วนที่ต่ำรองลงมา ขณะที่ การบำบัด Total Fe ซึ่งในแต่ละระบบการเก็บเกี่ยวพืชมีสัดส่วนการบำบัดของแต่ละองค์ประกอบเป็นไปในทิศทางเดียวกัน เช่นเดียวกันกับที่พบในการบำบัด Total Mn นั้น กลับพบว่าการบำบัดโดยส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากการกักเก็บ Fe ไว้ในเนื้อเยื่อของพืชส่วนใต้ดิน รองลงมาเป็นการบำบัดด้วยกระบวนการทางกายภาพและเคมี และการกักเก็บไว้ในเนื้อเยื่อของพืชส่วนเหนือดิน และการกักเก็บไว้ในเนื้อเยื่อของพืชสีเขียวขนาดเล็กที่เกิดขึ้นเองภายในระบบด้วยสัดส่วนที่ต่ำรองลงมาตามลำดับ

5 สรุปผล

5.1 ผลของระยะกักพักต่อประสิทธิภาพในการลดเหล็ก และแมงกานีสในน้ำบาดาล

น้ำบาดาลก่อนปรับปรุงคุณภาพ มีค่าของ Total Mn สูงกว่าค่าสูงสุดของ Total Mn ในแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 3 และสูงกว่าเกณฑ์ที่ยอมให้มีในน้ำชลประทาน ซึ่งกำหนดให้น้ำชลประทานไม่ควรมี Total Mn สูงกว่า 0.2 mg/l ซึ่ง Total Mn อาจเป็นพิษต่อพืชได้โดยเฉพาะในพื้นที่ที่เป็นดินกรด (Ayers and Westcot, 1994) ในกรณีของข้าวนั้น หากข้าวได้รับแมงกานีสมากเกินไป ใบแก่จะเกิดจุดสีน้ำตาล ปลายใบแห้ง เมล็ดลีบ และเจริญเติบโตไม่ดีเท่าที่ควร (ประพาส, 2537) ปริมาณ Fe ในน้ำบาดาลก่อนการปรับปรุงมีค่าสูงกว่าค่าที่ยอมให้มีในน้ำชลประทาน ซึ่งกำหนดให้น้ำชลประทาน ไม่ควรมี Total Fe สูงกว่า 5.0 mg/l ซึ่ง Total Fe สามารถส่งผลทำให้ดินเป็นกรด และสูญเสียปริมาณฟอสฟอรัสและโมลิบดินัมที่เป็นประโยชน์ (Ayers and Westcot, 1994) นอกจากนั้น ความเข้มข้นของเหล็กในสารละลายดินที่สูง จะส่งผลทำให้การดูดโพแทสเซียมของข้าวลดลง โดยความเป็นพิษของธาตุเหล็ก มักเกิดขึ้นกับข้าว ซึ่งปลูกในสภาพน้ำท่วมขัง (ประพาส, 2537)

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 % ตามลำดับ การปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาลที่ระยะกักพัก 2 d มีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดความเข้มข้นของ Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาล โดยระบบมีอัตราการบำบัด Total Mn และ Total Fe เท่ากับ 0.050-1.053 $g/m^2/d$ และ 0.008-2.219 $g/m^2/d$ ทั้งนี้ พบว่า การกักพักน้ำที่ระยะกักพัก 0.5 d มีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดปริมาณ Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาล ต่อพื้นที่ต่อช่วงเวลาที่เท่ากัน และพบว่ามีประสิทธิภาพแตกต่างจากการบำบัดที่ระยะกักพัก 1 และ 2 d อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ดังนั้น การปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาลโดยการลดปริมาณ Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาล ด้วยการกักพักน้ำในระบบบึงประดิษฐ์ที่ระยะกักพักเท่ากับ 0.5 d จึงเป็นระยะกักพักที่เหมาะสมในการปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาล เนื่องจากเป็นระยะกักพักที่มีอัตราการบำบัด Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาล ต่อพื้นที่ต่อช่วงเวลาที่เท่ากัน สูงกว่าการบำบัดที่ระยะกักพัก 1 และ 2 d อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ นอกจากนั้น ยังสามารถปรับปรุงคุณภาพน้ำ ทำให้น้ำบาดาลหลังการบำบัดมี Total Fe ปนเปื้อนอยู่ในปริมาณที่ไม่แตกต่างจากการปรับปรุงคุณภาพที่ระยะกักพักอื่น ที่ใช้ระยะเวลายาวนานกว่าในการบำบัด ซึ่งอาจทำให้น้ำที่ได้ภายหลังการปรับปรุงคุณภาพมีปริมาณไม่เพียงพอต่อการนำไปใช้ในการทำนา ซึ่งเป็นกิจกรรมที่ต้องการน้ำในปริมาณมาก

5.2 ผลของระยะเก็บเกี่ยวพืชต่อประสิทธิภาพในการลดเหล็ก และแมงกานีสในน้ำบาดาล

5.2.1 ประสิทธิภาพในการลดเหล็ก และแมงกานีสในน้ำบาดาล

ประสิทธิภาพของระบบบึงประดิษฐ์ ที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะ 4, 6 และ 8 wk ในการลดความเข้มข้นของ Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาล มีค่าระหว่าง 48.58-99.40 % และ 48.58-98.82 % ทำให้น้ำบาดาลที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพมีค่าความเข้มข้นของ Total Mn และ Total Fe ลดลง โดยมีค่าระหว่าง 0.000-0.106 mg/l และ 0.03-1.89 mg/l ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำเพื่อการชลประทาน โดยระบบมีอัตราการบำบัด Total Mn และ Total Fe ระหว่าง 0.016-0.149 $g/m^2/d$ และ 0.010-0.920 $g/m^2/d$

ประสิทธิภาพการบำบัด Total Mn และ Total Fe ของแต่ละระยะเก็บเกี่ยวไม่แตกต่างกันทางสถิติ โดยมีค่าเฉลี่ยระหว่าง 96.31-97.60 % และ 84.02-86.63 % เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดระหว่างการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 1 กับครั้งที่ 2 ของแต่ละระยะเก็บเกี่ยว พบว่าภายหลังการเก็บเกี่ยวพืชครั้งแรก ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดทั้ง Total Mn และ Total Fe สูงขึ้น และมีค่าแตกต่างกันทางสถิติ โดยในครั้งแรกของการเก็บเกี่ยวระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัด Total Mn และ Total Fe ระหว่าง 75.63-100.00 % และ 48.58-96.82 % ส่วนครั้งที่ 2 ของการเก็บเกี่ยว ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัด Total Mn และ Total Fe ระหว่าง 98.05-100.00 % และ 55.71-99.40 % ซึ่งผลการศึกษาที่พบนี้ได้สนับสนุน ข้อบ่งชี้ในการจัดการระบบบึงประดิษฐ์เพื่อคงประสิทธิภาพของระบบไว้ ด้วยการเก็บเกี่ยวพืชออกจากระบบอย่างเหมาะสม

ความเข้มข้นของ Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาลหลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยระบบบึงประดิษฐ์ ที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะ 4, 6 และ 8 wk มีค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลาที่ดำเนินระบบเท่ากับ 0.0210, 0.0208 และ 0.0122 mg/l และ 0.248, 0.278 และ 0.336 mg/l ซึ่งพบว่าความเข้มข้นของ Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาล จากระบบที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะเวลาแตกต่างกัน มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P > 0.05$) ทั้งนี้ พบว่าความเข้มข้นของ Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาลหลังการปรับปรุงคุณภาพ จากทั้ง 3 ระยะเก็บเกี่ยว มีค่าแตกต่างกันระหว่างการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 โดยความเข้มข้นของ Total Mn และ Total Fe ของการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 1 มีค่าระหว่าง 0.1060-0.0080 mg/l และ 0.077-0.798 mg/l และความเข้มข้นของ Total Mn และ Total Fe หลังการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 1 (การเก็บเกี่ยวครั้งที่ 2) มีค่าระหว่าง 0.0000-0.1060 mg/l และ 0.028-1.890 mg/l

อัตราการบำบัด Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาลของระบบบึงประดิษฐ์ ที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะ 4, 6 และ 8 wk มีค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลาที่ดำเนินระบบเท่ากับ 0.092, 0.070 และ 0.068 $g/m^2/d$ และ 0.383, 0.429 และ 0.432 $g/m^2/d$ ซึ่งพบว่าอัตราการบำบัด Total Mn ในน้ำบาดาล ของระบบที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะเวลาแตกต่างกัน มีค่าแตกต่างกันทางสถิติ ($P < 0.05$) โดยพบอัตราการบำบัด Total Mn สูงสุด ในระบบที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ 4 wk รองลงมาคืออัตราการบำบัดของระบบที่มี

การเก็บเกี่ยวพืชที่ 6 และ 8 wk ซึ่งพบว่าอัตราการบำบัดของทั้งสองระบบนี้ ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ขณะที่อัตราการบำบัด Total Fe ในระบบที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะเวลาแตกต่างกัน ไม่แตกต่างกันทางสถิติ

อัตราการบำบัด Total Mn ของระบบมีค่าแตกต่างกันทางสถิติระหว่างการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 โดยอัตราการบำบัด Total Mn ของการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 มีค่าระหว่าง 0.042-0.128 $g/m^2/d$ และ 0.016-0.149 $g/m^2/d$ โดยอัตราการบำบัด Total Mn ของการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 1 มีค่าสูงกว่าอัตราการบำบัดของการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 2 ในทั้ง 3 ระยะของการเก็บเกี่ยว ส่วนอัตราการบำบัด Total Fe ของระบบที่ทำการเก็บเกี่ยวที่ระยะ 4, 6 และ 8 wk มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติระหว่างการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 1 และ 2 โดยพบว่าอัตราการบำบัดของการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 1 ของระบบที่ทำการเก็บเกี่ยวที่ระยะ 4 wk มีค่าเฉลี่ยสูงกว่าอัตราการบำบัดเฉลี่ยของการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 2 เล็กน้อย ขณะที่อัตราการบำบัดของการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 2 ของระบบที่ทำการเก็บเกี่ยวที่ระยะ 6 และ 8 wk มีค่าเฉลี่ยสูงกว่าอัตราการบำบัดเฉลี่ยของการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 1

5.2.2 อัตราการบำบัดแมงกานีสและเหล็ก ขององค์ประกอบในระบบ

อัตราการบำบัด Total Mn ในน้ำบาดาลของระบบบึงประดิษฐ์ ที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะ 4, 6 และ 8 wk มีค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลาที่ดำเนินระบบ (2 รอบของการเก็บเกี่ยวพืช) เท่ากับ 91.5, 70.4 และ 68.0 mg/d ตามลำดับ ซึ่งพบว่าอัตราการบำบัด Total Mn ในน้ำบาดาล มีค่าลดลง เมื่อระบบมีระยะการเก็บเกี่ยวพืชและมีระยะเวลาในการบำบัดยาวนานขึ้น ขณะที่อัตราการบำบัด Total Fe ในน้ำบาดาล มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระบบมีระยะการเก็บเกี่ยวพืชและมีระยะเวลาในการบำบัดยาวนานขึ้น โดยระบบบึงประดิษฐ์ ที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะ 4, 6 และ 8 wk มีค่าเฉลี่ยอัตราการบำบัด Total Fe ในน้ำบาดาล ตลอดระยะเวลาที่ดำเนินระบบ (2 รอบของการเก็บเกี่ยวพืช) เท่ากับ 382.8, 429.5 และ 431.9 mg/d ตามลำดับ

อัตราการบำบัด Total Mn ในน้ำบาดาลของระบบบึงประดิษฐ์ ที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะ 4 wk ซึ่งมีค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลาที่ดำเนินระบบ (2 รอบของการเก็บเกี่ยวพืช) เท่ากับ 91.5 mg/d นั้น เป็นการบำบัดโดยการกักเก็บไว้ในส่วนเหนือดินของพืช 1.83-3.73 mg/d คิดเป็น 2.00-4.06 % ของอัตราการบำบัดรวม โดยการกักเก็บไว้ในส่วนใต้ดินของพืช 1.51-2.88 mg/d คิดเป็น 1.64-3.11 % ของอัตราการบำบัดรวม โดยการกักเก็บไว้ในเนื้อเยื่อของพืชสีเขียวขนาดเล็ก 0.26-0.39 mg/d คิดเป็น 0.28-0.43 % ของอัตราการบำบัดรวม และการบำบัดด้วยกระบวนการอื่น ซึ่งได้แก่การตกตะกอนลงสู่พื้นท้องน้ำ ถูกดูดซับติดอยู่ตามขอบผนังของระบบบำบัด และวัสดุอื่นๆ เท่ากับ 86.22-86.28 mg/d คิดเป็น 93.87-94.55 % ของอัตราการบำบัดรวม

อัตราการบำบัด Total Mn ในน้ำบาดาลของระบบบึงประดิษฐ์ ที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะ 6 wk ซึ่งมีค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลาที่ดำเนินระบบ (2 รอบของการเก็บเกี่ยวพืช) เท่ากับ 70.4 mg/d นั้น เป็นการบำบัดโดยการกักเก็บไว้ในส่วนเหนือดินของพืช 2.70-2.74 mg/d คิดเป็น 3.84-3.90 % ของอัตราการบำบัดรวม โดยการกักเก็บไว้ในส่วนใต้ดินของพืช 1.91-3.00 mg/d คิดเป็น 2.68-4.33 % ของอัตราการบำบัดรวม โดยการกักเก็บไว้ในเนื้อเยื่อของพืชสีเขียวขนาดเล็ก 0.30-0.41 mg/d คิดเป็น 0.42-0.60 % ของอัตราการบำบัดรวม และการบำบัดด้วยกระบวนการอื่นๆ เท่ากับ 63.25-66.47 mg/d คิดเป็น 91.18-93.06 % ของอัตราการบำบัดรวม

อัตราการบำบัด Total Mn ในน้ำบาดาลของระบบบึงประดิษฐ์ ที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะ 8 wk ซึ่งมีค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลาที่ดำเนินระบบ (2 รอบของการเก็บเกี่ยวพืช) เท่ากับ 68.0 mg/d นั้น เป็นการบำบัดโดยการกักเก็บไว้ในส่วนเหนือดินของพืช 2.09-2.14 mg/d คิดเป็น 3.04-3.19 % ของอัตราการบำบัดรวม โดยการกักเก็บไว้ในส่วนใต้ดินของพืช 1.05-3.03 mg/d คิดเป็น 1.57-4.40 % ของอัตราการบำบัดรวม โดยการกักเก็บไว้ในเนื้อเยื่อของพืชสีเขียวขนาดเล็ก 0.41-1.00 mg/d คิดเป็น 0.60-1.49 % ของอัตราการบำบัดรวม และการบำบัดด้วยกระบวนการอื่นๆ เท่ากับ 62.89-63.37 mg/d คิดเป็น 91.97-93.75 % ของอัตราการบำบัดรวม

อัตราการบำบัด Total Fe ในน้ำบาดาลของระบบบึงประดิษฐ์ ที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะ 4 wk ซึ่งมีค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลาที่ดำเนินระบบ (2 รอบของการเก็บเกี่ยวพืช) เท่ากับ 382.8 mg/d นั้น เป็นการบำบัดโดยการกักเก็บไว้ในส่วนเหนือดินของพืช 5.60-11.05 mg/d คิดเป็น 1.43-2.94 % ของอัตราการบำบัดรวม โดยการกักเก็บไว้ในส่วนใต้ดินของพืช 182.70-397.79 mg/d คิดเป็น 48.68-101.91 % ของอัตราการบำบัดรวม โดยการกักเก็บไว้ในเนื้อเยื่อของพืชสีเขียวขนาดเล็ก 2.39-3.17 mg/d คิดเป็น 0.61-0.85 % ของอัตราการบำบัดรวม และสามารถเกิดการบำบัดด้วยกระบวนการอื่นๆ ได้สูงถึง 178.41 mg/d ซึ่งคิดเป็น 47.53 % ของอัตราการบำบัดรวม

อัตราการบำบัด Total Fe ในน้ำบาดาลของระบบบึงประดิษฐ์ ที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะ 6 wk ซึ่งมีค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลาที่ดำเนินระบบ (2 รอบของการเก็บเกี่ยวพืช) เท่ากับ 429.5 mg/d นั้น เป็นการบำบัดโดยการกักเก็บไว้ในส่วนเหนือดินของพืช 8.44-12.96 mg/d คิดเป็น 1.98-3.00 % ของอัตราการบำบัดรวม โดยการกักเก็บไว้ในส่วนใต้ดินของพืช 197.55-254.30 mg/d คิดเป็น 46.29-58.84 % ของอัตราการบำบัดรวม โดยการกักเก็บไว้ในเนื้อเยื่อของพืชสีเขียวขนาดเล็ก 1.68-3.62 mg/d คิดเป็น 0.39-0.85 % ของอัตราการบำบัดรวม และการบำบัดด้วยกระบวนการอื่นๆ เท่ากับ 163.21-217.18 mg/d คิดเป็น 37.77-50.89 % ของอัตราการบำบัดรวม

อัตราการบำบัด Total Fe ในน้ำบาดาลของระบบบึงประดิษฐ์ ที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะ 8 wk ซึ่งมีค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลาที่ดำเนินระบบ (2 รอบของการเก็บเกี่ยวพืช) เท่ากับ 431.9 mg/d นั้น เป็นการบำบัดโดยการกักเก็บไว้ในส่วนเหนือดินของพืช 17.83-20.52 mg/d คิดเป็น 4.26-4.61 % ของอัตราการบำบัดรวม โดยการกักเก็บไว้ในส่วนใต้ดินของพืช 207.37-228.00 mg/d คิดเป็น 49.59-

51.17 % ของอัตราการบำบัดรวม โดยการกักเก็บไว้ในเนื้อเยื่อของพืชสีเขียวขนาดเล็ก 4.50-7.32 mg/d คิดเป็น 1.08-1.64 % ของอัตราการบำบัดรวม และการบำบัดด้วยกระบวนการอื่นๆ เท่ากับ 188.46-189.71 mg/d คิดเป็น 42.58-45.07 % ของอัตราการบำบัดรวม

ทั้งนี้พบว่า การบำบัด Total Mn และ Total Fe ขององค์ประกอบภายในบึงประดิษฐ์แต่ละระบบที่มีระยะเวลาเก็บเกี่ยวพืชที่แตกต่างกัน (4, 6 และ 8 wk) นั้น มีสัดส่วนในการบำบัดของแต่ละกระบวนการหรือแต่ละองค์ประกอบของระบบเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ดังนี้คือ ในการบำบัด Total Mn นั้น พบว่าการบำบัดด้วยกระบวนการทางกายภาพและเคมีมีสัดส่วนของการบำบัดที่สูง รองลงมาเป็นการบำบัดโดยธูปฤาษีที่ปลูกภายในระบบ ซึ่งมีการกักเก็บ Mn ไว้ในเนื้อเยื่อของธูปฤาษีส่วนเหนือดินและส่วนใต้ดินในสัดส่วนที่ใกล้เคียงกัน และมีการกักเก็บไว้ในเนื้อเยื่อของพืชสีเขียวขนาดเล็กในสัดส่วนที่ต่ำรองลงมา ขณะที่ การบำบัด Total Fe ซึ่งในแต่ละระบบการเก็บเกี่ยวพืชมีสัดส่วนการบำบัดของแต่ละองค์ประกอบเป็นไปในทิศทางเดียวกัน เช่นเดียวกันกับที่พบในการบำบัด Total Mn นั้น กลับพบว่าการบำบัดโดยส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากการกักเก็บ Fe ไว้ในเนื้อเยื่อของพืชส่วนใต้ดิน รองลงมาเป็นการบำบัดด้วยกระบวนการทางกายภาพและเคมี และการกักเก็บไว้ในเนื้อเยื่อของพืชส่วนเหนือดิน และการกักเก็บไว้ในเนื้อเยื่อของพืชสีเขียวขนาดเล็กที่เกิดขึ้นเองภายในระบบด้วยสัดส่วนที่ต่ำรองลงมาตามลำดับ

สารบัญ

บทที่			หน้า
1	**บทนำ**		
	1.1	**ความสำคัญและที่มาของปัญหา**	1
	1.2	วัตถุประสงค์งานวิจัย	3
	1.3	ขอบเขตการวิจัย	3
	1.4	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2	**ทฤษฎี และเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง**		
	2.1	ทรัพยากรน้ำ	4
	2.2	น้ำบาดาล	5
	2.3	การปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาล	7
	2.4	ระบบบึงประดิษฐ์	9
	2.5	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	10
3	**วิธีดำเนินการวิจัย**		
	3.1	การเตรียมหน่วยทดลอง	12
	3.2	การดำเนินระบบบำบัด	13
	3.3	การเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่าง	14
	3.4	การวิเคราะห์ข้อมูล	17
4	**ผลการทดลองและอธิปรายผล**		
	4.1	ผลของระยะกักพักต่อประสิทธิภาพในการลดเหล็ก และแมงกานีสในน้ำบาดาล	18
	4.2	**ผลของระยะเก็บเกี่ยวพืชต่อประสิทธิภาพในการลดเหล็ก และแมงกานีสในน้ำบาดาล (ระยะที่ 2 ของการศึกษา)**	29

สารบัญ (ต่อ)

บทที่			หน้า
5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ		
	5.1	สรุปผลการวิจัย	50
	5.2	ข้อเสนอแนะ	55
บรรณานุกรม			56
Output ที่ได้จากโครงการ			59
ภาคผนวก			
	Manuscript บทความวิจัยที่เผยแพร่ในวารสารวิชาการระดับชาติ		60

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
3.1	ดัชนีคุณภาพน้ำที่ทำการตรวจวัด และวิธีการในการวิเคราะห์	16
3.2	ดัชนีตัวอย่างพืชที่ทำการตรวจวัด และระยะเวลาในการตรวจวัด	16
3.3	วิธีการหรือเครื่องมือในการวิเคราะห์พืช	17
4.1	คุณสมบัติของน้ำบาดาล (ระยะที่ 1 ของการศึกษา)	19
4.2	ประสิทธิภาพของระบบบึงประดิษฐ์ในการบำบัด Fe และ Mn	28
4.3	คุณสมบัติของน้ำบาดาล (ระยะที่ 2 ของการศึกษา)	35
4.4	น้ำหนักมวลชีวภาพและอัตราการเติบโตสัมพัทธ์ของพืช ในแต่ละระยะเก็บเกี่ยว	42
4.5	ความเข้มข้นของ Mn และ Fe ในเนื้อเยื่อพืช ในแต่ละระยะเก็บเกี่ยว	44

สารบัญภาพ

ภาพ		หน้า
3.1	หน่วยทดลองระบบบึงประดิษฐ์	13
3.2	การเก็บเกี่ยวพืชในระบบ	14
3.3	จุดเก็บตัวอย่างดิน (Soil sampling point) ในแต่ละหน่วยทดลอง	15
3.4	จุดเก็บตัวอย่างน้ำ (Influent-Effluent point) และพืช (Plant sampling point)	15
4.1	Temperature ของน้ำบาดาล ก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพ	20
4.2	pH ของน้ำบาดาล ก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพ	20
4.3	DO ของน้ำบาดาล ก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพ	22
4.4	EC ของน้ำบาดาล ก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพ	22
4.5	TDS ในน้ำบาดาล ก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพ	23
4.6	อัตราการรองรับและอัตราการบำบัด Mn ของระบบบึงประดิษฐ์	24
4.7	อัตราการรองรับและอัตราการบำบัด Fe ของระบบบึงประดิษฐ์	25
4.8	ความเข้มข้นของ Mn ในน้ำบาดาลที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ	26
4.9	ความเข้มข้นของ Fe ในน้ำบาดาลที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ	26
4.10	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัด Mn ของระบบบึงประดิษฐ์ที่มีระยะการเก็บเกี่ยวพืชที่แตกต่างกัน	30
4.11	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัด Fe ของระบบบึงประดิษฐ์ที่มีระยะการเก็บเกี่ยวพืชที่แตกต่างกัน	30
4.12	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของ Mn ในน้ำบาดาลที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพจากระบบบึงประดิษฐ์ที่มีระยะการเก็บเกี่ยวพืชที่แตกต่างกัน	31
4.13	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของ Fe ในน้ำบาดาลที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพจากระบบบึงประดิษฐ์ที่มีระยะการเก็บเกี่ยวพืชที่แตกต่างกัน	31
4.14	ค่าเฉลี่ยอัตราการบำบัด Mn ของระบบบึงประดิษฐ์ที่มีระยะการเก็บเกี่ยวพืชที่แตกต่างกัน	32
4.15	ค่าเฉลี่ยอัตราการบำบัด Fe ของระบบบึงประดิษฐ์ที่มีระยะการเก็บเกี่ยวพืชที่แตกต่างกัน	32
4.16	Temperature ของน้ำบาดาล ก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพ ในระยะที่ 2 ของการศึกษา	35

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ		หน้า
4.17	pH ของน้ำบาดาล ก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพ ในระยะที่ 2 ของการศึกษา	36
4.18	DO ของน้ำบาดาล ก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพ ในระยะที่ 2 ของการศึกษา	36
4.19	EC ของน้ำบาดาล ก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพ ในระยะที่ 2 ของการศึกษา	37
4.20	TDS ของน้ำบาดาล ก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพ ในระยะที่ 2 ของการศึกษา	37
4.21	ค่า Total Mn ในน้ำบาดาลก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพ ด้วยระบบบึงประดิษฐ์ ที่ทำการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะ 4 wk	38
4.22	ค่า Total Mn ในน้ำบาดาลก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพ ด้วยระบบบึงประดิษฐ์ ที่ทำการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะ 6 wk	39
4.23	ค่า Total Mn ในน้ำบาดาลก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพ ด้วยระบบบึงประดิษฐ์ ที่ทำการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะ 8 wk	39
4.24	ค่า Total Fe ในน้ำบาดาลก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพ ด้วยระบบบึงประดิษฐ์ ที่ทำการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะ 4 wk	40
4.25	ค่า Total Fe ในน้ำบาดาลก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพ ด้วยระบบบึงประดิษฐ์ ที่ทำการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะ 6 wk	40
4.26	ค่า Total Fe ในน้ำบาดาลก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพ ด้วยระบบบึงประดิษฐ์ ที่ทำการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะ 8 wk	41
4.27	ค่าเฉลี่ยอัตราการบำบัด Mn ของแต่ละองค์ประกอบภายในระบบบึงประดิษฐ์	46
4.28	เปอร์เซ็นต์ของอัตราการบำบัด Mn ของแต่ละองค์ประกอบภายในระบบบึงประดิษฐ์	46
4.29	ค่าเฉลี่ยอัตราการบำบัด Fe ของแต่ละองค์ประกอบภายในระบบบึงประดิษฐ์	48
4.30	เปอร์เซ็นต์ของอัตราการบำบัด Fe ของแต่ละองค์ประกอบภายในระบบบึงประดิษฐ์	48

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	Total iron
Total 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 เช่นในจังหวัดพิษณุโลก ขณะเดียวกัน น้ำบาดาลในพื้นที่ดังกล่าวได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในปริมาณมาก โดยเฉพาะการใช้ในกิจกรรมการเกษตร โดย ประจญยุทธ (2547) พบว่าในพื้นที่อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก นั้น มีการสูบน้ำบาดาลขึ้นมา เพื่อใช้ในการทำนาในปริมาณมาก โดยเฉพาะในช่วงฤดูแล้ง โดยมีอัตราการใช้ เท่ากับ 1,561 m^3/rai/yr ซึ่งการนำน้ำบาดาลที่มีเหล็กปนเปื้อนในปริมาณสูงมาใช้นั้น สามารถก่อให้เกิดปัญหาหลายประการด้วยกัน ดังนี้คือ เหล็กในน้ำทำให้น้ำมีสีเหลืองหรือแดง และมีกลิ่นสนิมเหล็ก อันเป็นที่น่ารังเกียจต่อการนำไปใช้ นอกจากนั้น เหล็กยังทำให้เสื้อผ้าและเครื่องสุขภัณฑ์เกิดเป็นคราบและมีสี จากสีของเหล็ก และแม้ว่าเหล็กจะเป็นธาตุอาหารที่สำคัญต่อร่างกาย และโดยปกติแล้วไม่ถือว่าเหล็กเป็นสารพิษต่อร่างกาย แต่หากร่างกายได้รับเหล็กในปริมาณมากเกินความต้องการ 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 ประจญยุทธ (2547) พบอัตราการสะสมของเหล็กในดินนาในพื้นที่อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก มีค่าเท่ากับ 10.90 kg/rai/yr โดยเป็นเหล็กที่ตกตะกอนจากน้ำบาดาลถึง 10.55 kg/rai/yr ขณะที่ ข้าวที่แช่อยู่ในน้ำที่มีเหล็กสูงมากกว่า 5-10 mg/l นั้น รากของข้าวจะปลดปล่อยก๊าซออกซิเจน เพื่อลดความเป็นพิษของเหล็ก ซึ่งจะทำให้เกิดคราบสนิมเหล็กเคลือบอยู่ที่รากของข้าว ส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับธาตุอาหารของข้าวลดลง และแม้ว่าเกษตรกรจะเพิ่มปุ๋ยลงในนา ก็ไม่สามารถเพิ่มผลผลิตได้อย่างที่ควรเป็น (กิจการ, 2546) ทั้งนี้อาการ

เหล็กเป็นพิษต่อข้าวนั้น สามารถสังเกตพบได้ที่บริเวณใบและราก โดยจะเกิดเป็นจุดสีน้ำตาลขนาดเล็กบนใบล่างของข้าว เริ่มจากปลายใบและขยายสู่ส่วนฐานของใบ จากนั้นจุดจะขยายขนาดรวมกันในเนื้อใบ ใบจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลส้มและตายในที่สุด นอกจากนั้น 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 ผลการศึกษาได้ระบุว่าการใช้น้ำบาดาลบ่อตื้นที่มีปริมาณเหล็กสูงยังก่อให้เกิดปัญหากับคุณภาพดิน โดยเกษตรกรในพื้นที่พบว่าเนื้อดินมีความเหนียวแข็งเพิ่มขึ้น และมีความร่วนเพิ่มมากขึ้น นอกจากนั้น เกษตรกรยังพบว่าข้าวเป็นโรคมากขึ้น โดยพบโรคใบไหม้ ใบเป็นสีเหลือง เป็นจุดสีน้ำตาล และโรครากดำ ซึ่งอาการคล้ายคลึงกับอาการเหล็กเป็นพิษในดิน

การปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาล ก่อนการนำมาใช้ประโยชน์ จะช่วยลดปัญหาการสะสมของเหล็กในดิน และลดปัญหาต่อเนื่องจากการสะสมนั้น ซึ่งจะทำให้การนำทรัพยากรน้ำบาดาลมาใช้สามารถก่อเกิดประโยชน์ได้อย่างสูงสุด คุ้มค่าต่อการลงทุน โดยไม่ก่อผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมข้างเคียง และเป็นแนวทางการจัดการทรัพยากรที่เหมาะสมตามหลักการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

โครงการศึกษาวิจัยนี้ เป็นการนำเสนอแนวทางในปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาล โดยการลดปริมาณเหล็กในน้ำด้วยระบบบึงประดิษฐ์ ซึ่งผลการศึกษาที่ได้จะบ่งชี้ถึงความเป็นไปได้ ประสิทธิภาพและแนวทางในการปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาลด้วยระบบบึงประดิษฐ์ ซึ่งเป็นระบบที่ง่ายในการดำเนินการ และเกษตรกรสามารถนำผลการศึกษาไปประยุกต์ใช้ได้จริง ซึ่งจะเป็นการลดปัญหาสิ่งแวดล้อม ก่อเกิดประโยชน์ต่อเกษตรกร และเป็นแนวทางที่ก่อประโยชน์ต่อประเทศ

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ระบบบึงประดิษฐ์ ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาล

1.2.2 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของระบบบึงประดิษฐ์ ในการลดปริมาณเหล็กในน้ำบาดาลที่ระยะกักพักน้ำ และระยะการเก็บเกี่ยวพืชที่แตกต่างกัน

1.2.3 เพื่อศึกษาการจัดการระบบบึงประดิษฐ์อย่างเหมาะสม เพื่อการลดปริมาณเหล็กในน้ำบาดาลอย่างมีประสิทธิภาพ

1.3 ขอบเขตการวิจัย

ขอบเขตงานวิจัยของโครงการ คือศึกษาความเป็นไปได้และประสิทธิภาพการปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาลด้วยระบบบึงประดิษฐ์ โดยการใช้ระบบบึงประดิษฐ์ในการลดปริมาณเหล็กในน้ำบาดาล พร้อมกับการศึกษาถึงการจัดการระบบและการจัดการพืชในระบบบึงประดิษฐ์อย่างเหมาะสม เพื่อให้ระบบบึงประดิษฐ์สามารถลดปริมาณเหล็กได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้เพื่อเป็นทางเลือกในการปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาลให้มีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้เพื่อการเกษตรกรรม เพื่อลดผลกระทบจากเหล็กที่ปนเปื้อนในน้ำบาดาลต่อทรัพยากรดิน พืช และผลผลิตทางการเกษตร ด้วยวิธีการบำบัดอย่างง่ายที่เกษตรกรสามารถนำไปใช้ดำเนินการได้จริง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงความเป็นไปได้และประสิทธิภาพในการปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาล (บำบัดเหล็ก) ด้วยระบบบึงประดิษฐ์

1.4.2 ทราบถึงแนวทางในการจัดการระบบบึงประดิษฐ์อย่างเหมาะสม ในการนำมาใช้ประโยชน์เพื่อการลดปริมาณเหล็กในน้ำบาดาล

1.4.3 นำผลการศึกษาที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาล ก่อนนำน้ำบาดาลนั้น มาใช้ในการเกษตรกรรม เพื่อลดผลกระทบต่อทรัพยากรดินและสิ่งแวดล้อมอื่นๆ ทั้งนี้เพื่อให้เกษตรกรได้รับผลผลิตที่คุ้มค่าต่อการลงทุน

1.4.4 ใช้ผลการศึกษาที่ได้เป็นองค์ความรู้ในการศึกษาต่อยอดในส่วนที่เกี่ยวข้องต่อไป

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 ภาคบรรยากาศ ภาคพื้นธรณี 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 (Surface runoff) ลงสู่แหล่งน้ำ น้ำส่วนที่ถูกดูดซับไว้ด้วยดินนั้นส่วนหนึ่งจะกลายเป็นความชื้นและน้ำในดิน ซึ่งเป็นองค์ประกอบหนึ่งของดินที่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืช ขณะที่บางส่วนจะเกิดการสะสมเป็นน้ำใต้ดิน (Groundwater) ซึ่งจะค่อยๆ ไหลระบายออกสู่แหล่งน้ำผิวดิน เมื่อระดับน้ำในแหล่งน้ำลดลงในช่วงฤดูแล้ง จึงทำให้พบว่าแหล่งน้ำในพื้นที่ธรรมชาติที่มีความอุดมสมบูรณ์ จะมีน้ำไหลหล่อเลี้ยงแหล่งน้ำอยู่ตลอดเวลา

2.2 น้ำบาดาล

แหล่งน้ำที่มีการนำน้ำมาใช้อยู่ในปัจจุบัน มี 2 ประเภทหลัก คือ แหล่งน้ำผิวดิน ซึ่งได้แก่ น้ำในแม่น้ำ ทะเลสาบ ลำธาร คลอง หนอง บึง รวมถึงทะเลและมหาสมุทร ส่วนแหล่งกักเก็บน้ำ ที่มีการนำน้ำมาใช้อีกประเภทหนึ่ง คือ แหล่งน้ำใต้ดิน ซึ่งเป็นแหล่งน้ำที่อยู่ใต้ผิวดิน เกิดขึ้นจากการซึมของน้ำผ่านชั้นดินลงไปกักเก็บอยู่ใต้ชั้นผิวดิน โดยสามารถแบ่งน้ำส่วนที่ถูกกักเก็บไว้ภายใต้ผิวดินได้เป็น 2 ประเภท คือ

1) น้ำบ่อตื้น เป็นน้ำฝนหรือน้ำผิวดินที่ไหลซึมผ่านชั้นดิน หิน ทราย กรวด ลงไปอยู่ในช่องว่างภายใต้ผิวดินเหนือชั้นหินดาน สามารถขุดพบได้ในระดับตื้นๆ ลึกเพียงไม่กี่เมตร ปริมาณน้ำจะมีการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล

2) น้ำบาดาล ซึ่งหมายถึง น้ำใต้ผิวดินที่อยู่ในเขตอิ่มน้ำ รวมถึงธารน้ำใต้ดิน โดยทั่วไปจะหมายถึง น้ำใต้ผิวดินทั้งหมด ยกเว้นน้ำภายในโลก ซึ่งเป็นน้ำที่อยู่ใต้ระดับเขตอิ่มน้ำ (คณะอนุกรรมการจัดทำพจนานุกรมศัพท์ธรณีวิทยา, 2530) น้ำบาดาล เป็นน้ำใต้ดินที่ซึมผ่านชั้นหินที่มีรูพรุนลงไปขังอยู่ในช่องว่างของชั้นหินเหนือชั้นหินดาน ลึกกว่าชั้นของน้ำบ่อตื้น น้ำบาดาลจะมีการเปลี่ยนแปลงและมีการไหลเช่นเดียวกับน้ำผิวดิน แต่เป็นไปอย่างช้าๆ โดยน้ำบาดาลจะไหลตามเส้นทางน้ำออกสู่แหล่งน้ำผิวดินในที่สุด น้ำบาดาลนั้นจะมีการสูญเสียจากการระเหยน้อยกว่าน้ำผิวดินเนื่องจากอยู่ใต้ผิวดิน และเป็นน้ำที่มีความใสในระดับหนึ่ง เนื่องจากสิ่งปนเปื้อนในน้ำจะถูกกรองออกในระหว่างการซึมผ่านชั้นดินและหิน

นอกจากน้ำผิวดินแล้ว น้ำใต้ดินก็เป็นแหล่งน้ำที่สำคัญแหล่งหนึ่งของประเทศ การเจาะและการพัฒนา เพื่อนำน้ำใต้ดินขึ้นมาใช้ประโยชน์ในปัจจุบันเป็นไปเพื่อวัตถุประสงค์หลัก 3 ประการ ตามลำดับดังนี้ คือ เพื่อการบริโภคอุปโภค การอุตสาหกรรม และสุดท้ายคือ การเกษตรกรรม ซึ่งเป็นการใช้น้ำในการทำนาปรัง การปลูกพืชผักสวนครัว และการเลี้ยงสัตว์ เป็นต้น สำหรับการใช้น้ำใต้ดินหรือน้ำบาดาลเพื่อการบริโภคอุปโภค โดยการเจาะบ่อน้ำบาดาลและจัดทำระบบประปาชนบท ซึ่งทั้งหมดดำเนินการโดยหน่วยงานของรัฐนั้น พบว่าในปัจจุบันมีอัตราการใช้น้ำบาดาลประมาณวันละ 50 l/d/person และคาดว่ามีปริมาณน้ำใต้ดินที่สูบขึ้นมาใช้ในการนี้ ถึงวันละไม่น้อยกว่า 10 mil. m^3 นอกจากเขตชนบทแล้ว น้ำบาดาลยังถูกสูบโดยการประปาส่วนภูมิภาคและหน่วยงานอื่นๆ เพื่อใช้ในกิจกรรมประปาในเขตเมืองอีกเป็นจำนวนมาก ขณะที่การนำน้ำบาดาลมาใช้ในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล โดยส่วนใหญ่จะดำเนินการโดยภาคเอกชน ซึ่งในปัจจุบันมีการสูบน้ำบาดาลขึ้นมาใช้ ถึงวันละประมาณ 2.3 mil. m^3 แยกเป็นน้ำเพื่อการบริโภคอุปโภควันละ 0.9 mil. m^3 ใช้เพื่อการอุตสาหกรรมวันละประมาณ 1.4 mil. m^3 และมีเพียงเล็กน้อยที่ใช้เพื่อการเกษตรกรรม ส่วนการใช้น้ำใต้ดินเพื่อการเกษตรกรรมในพื้นที่อื่นๆ ทั่วประเทศ ซึ่งดำเนินการโดยทั้งภาครัฐ ภาคเอกชน และเกษตรกรเองนั้น คาดว่ามีปริมาณการใช้สูง แต่ยังไม่สามารถประเมินปริมาณที่แน่นอนได้ (การประปาส่วนภูมิภาค, ม.ป.ป.)

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

1) คุณสมบัติทางเคมีของน้ำบาดาล เนื่องจากน้ำบาดาลไหลผ่านตัวกลางที่มีรูพรุน ทำให้น้ำบาดาลมีโอกาสในการละลายเกลือแร่ต่างๆ ออกมาปะปนอยู่ในรูปของสารละลาย ดังนั้นส่วนประกอบทางเคมีของน้ำบาดาลที่สำคัญจึงประกอบด้วย 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 แต่กลางคืนจะสูงกว่าอุณหภูมิน้ำปกติ แต่ในบางเขตพื้นที่ ซึ่งเป็นเขตที่ได้รับอิทธิพลจากภูเขาไฟ เช่น แถบภาคเหนือของไทย พบว่าน้ำบาดาลจะมีอุณหภูมิสูง เหล่านี้เป็นต้น

2.2) สี โดยทั่วไป น้ำบาดาลที่มีคุณภาพดีจะไม่มีสี หากน้ำบาดาลมีสีอาจเกิดจากการมีสิ่งเจือปน เช่นการปนเปื้อนซากพืช การปนเปื้อนแบคทีเรียหรือสาหร่าย เป็นต้น ซึ่งการปนเปื้อนนี้เกิดจากน้ำบาดาลมีการไหลผ่านแหล่งที่มีการทับถมของซากพืชหรือสัตว์ ไหลผ่านแหล่งถ่านหิน หรือไหลผ่านเขตเกษตรกรรม เป็นต้น

2.3) กลิ่นที่พบในน้ำบาดาล ส่วนใหญ่เกิดจาก H_2S ที่ได้จากการเน่าเปื่อยผุพัง 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 อินทรียวัตถุ หรือจุลินทรีย์เจือปนอยู่ในน้ำ ทั้งนี้ น้ำบาดาลที่ดีควรมีความขุ่นต่ำและปราศจากสิ่งแขวนลอยประเภทต่างๆ

3) คุณสมบัติทางชีวภาพของน้ำบาดาล น้ำบาดาลตามธรรมชาติจะปราศจาก Microorganism การวิเคราะห์คุณภาพน้ำบาดาลด้านชีวภาพ เป็นการตรวจสอบถึงการปนเปื้อนจากน้ำผิวดิน การปนเปื้อนจากแหล่งน้ำบาดาลข้างเคียง หรือการปนเปื้อนจากกิจกรรมต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ซึ่ง

สิ่งที่ทำการวิเคราะห์ ได้แก่ Coliform group ซึ่งเป็นแบคทีเรียที่พบในระบบทางเดินอาหารของคนและสัตว์และเป็นแบคทีเรียที่ง่ายต่อการตรวจสอบ

2.3 การปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาล

โดยทั่วไป น้ำบาดาลเป็นน้ำที่มีคุณภาพดีปราศจากสิ่งเจือปน แต่บางกรณีอาจพบว่าน้ำบาดาลมีการปนเปื้อนหรือมีสิ่งเจือปนบางประการอยู่สูงกว่าปกติ ดังนั้น จึงจำเป็นต้องทำการปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาลก่อนการนำไปใช้ ทั้งนี้เพื่อให้น้ำบาดาลนั้นมีความปลอดภัยต่อการอุปโภค หรือบริโภค และไม่ก่อผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาลนั้น โดยส่วนใหญ่เป็นการแก้ไขปัญหาด้วยการกำจัดสิ่งเจือปนในน้ำบาดาล การกำจัดเหล็กและแมงกานีสในน้ำบาดาล การแก้ไขปัญหาน้ำเค็ม 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 $Fe(OH)_3$ 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, 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^-, NO_3^-, $CO_3^=$ ผ่าน ส่วนอีกด้านหนึ่งให้ประจุบวก เช่น Na^+, K^-, Ca^{2+}, Mg^{2+} ผ่านและมีขั้วไฟฟ้าบวกและลบ Ion ที่เคลื่อนที่ผ่านออกไปจะจับอยู่รอบๆ Electrode และน้ำส่วนที่ Ion ต่างๆ เคลื่อนผ่านออกไปแล้ว จะกลายเป็นน้ำจืด

3.4) การทำให้น้ำเป็นน้ำแข็ง โดยทำให้น้ำแข็งตัว แล้วแยกส่วนที่เป็นก้อนน้ำแข็งออกจากเกลือ แล้วจึงละลายน้ำซึ่งเป็นน้ำจืดมาใช้

3.5) Reverse osmosis โดยบรรจุน้ำจืดและน้ำเค็มลงใน Chamber ซึ่งมี Semipermeable membrane คั่นกลาง โดยคุณสมบัติของ Membrane คือ ยอมให้น้ำจืดผ่านได้แต่ไม่ยอมให้สารหรือแร่ธาตุต่างๆ ที่มีอยู่ในน้ำเค็มผ่าน ในกระบวนการ Osmosis ธรรมดานั้น น้ำจืดจะซึมผ่าน Membrane เข้าสู่น้ำเค็ม แต่เมื่อเพิ่มความดันลงในช่องที่บรรจุน้ำเค็ม จะทำให้การไหลของน้ำกลับทิศทาง โดยเฉพาะน้ำส่วนที่จืดใน Saline chamber จะสามารถซึมผ่าน Membrane และเหลือเกลือไว้ ซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย แต่มีค่าใช้จ่ายสูง เพราะต้องทำการเปลี่ยน Membrane บ่อยๆ

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

2.4 ระบบบึงประดิษฐ์

ระบบบึงประดิษฐ์ (Constructed wetland: CW) เป็นระบบบำบัดประเภทหนึ่งที่ถูกใช้ในการบำบัดโลหะหนักจากน้ำเสีย และน้ำทิ้งหลากหลายประเภท (Mitsch and Wise, 1998; Lesage et al., 2007) บึงประดิษฐ์ เป็นระบบบำบัดที่มีราคาถูก ง่ายต่อการสร้าง ดูแลและดำเนินการ อีกทั้งยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม กระบวนการบำบัดโลหะหนักด้วยระบบบึงประดิษฐ์นั้น เป็นการทำงานร่วมกันขององค์ประกอบต่างๆ ภายในระบบ อันได้แก่ อากาศ ดิน และพืช กระบวนการในการบำบัดเป็นกระบวนการทั้งทางด้านกายภาพ เคมี และชีวภาพ การบำบัดโลหะหนักด้วยกระบวนการทางกายภาพภายในระบบบึงประดิษฐ์ เป็นการบำบัดด้วยกระบวนการกรอง (Filtration) และตกตะกอน (Sedimentation) โดยเฉพาะโลหะหนักที่อยู่ในรูปของอนุภาคสารแขวนลอย (Particulate) (Kadlec and Knight, 1996) เมื่อน้ำที่มีอนุภาคโลหะหนักปนเปื้อนอยู่ถูกระบายเข้าสู่บึงประดิษฐ์ ความเร็วของน้ำที่เข้าสู่ระบบจะลดลง ทำให้อนุภาคต่างๆ ถูกกรอง และตกตะกอน จมตัวลงสู่พื้นเบื้องล่าง ทำให้ปริมาณของโลหะหนักในน้ำลดลง (Sheoran and Sheoran, 2006) ส่วนกระบวนการทางเคมีในการลดปริมาณโลหะหนักในน้ำ ได้แก่ กระบวนการ Absorption, Oxidation and Hydrolysis และ Precipitation เป็นต้น ขณะที่ โลหะหนักอาจถูกบำบัดได้ด้วยการดึงดูดของพืช (Assimilation) ซึ่งเป็นกระบวนการบำบัดทางชีวภาพ

Muller (1988) ระบุว่า มากกว่า 50 % ของโลหะหนักสามารถถูกดูดซับ (Absorb) ได้ง่ายบนอนุภาคสารแขวนลอย และวัตถุต่างๆ ภายในบึงประดิษฐ์ แล้วจึงเกิดการตกตะกอนออกจากน้ำ และด้วยกระบวนการ Hydrolysis และ/หรือ Oxidation ในบึงประดิษฐ์ เหล็กจะสามารถเปลี่ยนไปเป็นสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำ ในรูปของ Oxides, Oxyhydroxides และ Hydroxides (Karathanasis and Thompson, 1995) ซึ่งเป็นรูปที่ง่ายต่อการกำจัดออกจากน้ำ นอกจากนั้น โลหะหนักในรูปของสารละลายยังสามารถถูกบำบัดในระบบบึงประดิษฐ์ได้ด้วยการดูดดึงของพืช (Plant uptake) Denny (1987) และ Greenway (1997) ระบุว่า พืชมีบทบาทสำคัญในการบำบัดมลสาร โดยพืชในระบบบึงประดิษฐ์สามารถลดปริมาณโลหะหนักโดยการดูดดึงผ่านรากและใบ โดยเฉพาะพืชจมน้ำและพืชลอยน้ำ รวมถึงโลหะหนักอาจถูกดูดซับติดอยู่กับพื้นผิวส่วนต่างๆ (Surface adsorption) ของพืช (Williams, 2002; ITRC, 2003; Collins et al., 2005) ซึ่งเป็นการลดปริมาณโลหะหนักในน้ำได้ทางหนึ่ง ในขณะที่รากของพืชน้ำบางประเภทสามารถปลดปล่อยออกซิเจนให้กับระบบ ซึ่งจะทำให้เกิดสภาพของ Oxidized condition และส่งเสริมให้เกิดการตกตะกอนของ Oxyhydroxides ของ Fe^{3+} (Matagi et al., 1988) ทั้งนี้อัตราการบำบัดโลหะหนักโดยพืชค่อนข้างแตกต่างกันมาก ขึ้นกับอัตราการเจริญเติบโตของพืชและความเข้มข้นของโลหะหนักในเนื้อเยื่อของพืช และพบว่าอัตราการดูดดึงโลหะหนักด้วยพืชต่อหน่วยพื้นที่ มักมีค่าสูงในพืชล้มลุกหรือไม้เนื้ออ่อน เช่น ธูปฤาษี โดยทั่วไป พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดโลหะหนักของบึงประดิษฐ์ สูงกว่าการบำบัดในพื้นที่ชุ่มน้ำธรรมชาติ (Natural wetland) เนื่องจากการ

จัดการระบบที่เหมาะสม สามารถช่วยให้องค์ประกอบต่างๆ ในระบบ สามารถทำหน้าที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

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

ในรัฐ Ohio, USA บึงประดิษฐ์ขนาด 0.39 ha จำนวน 9 แปลง ได้ถูกใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งจากเหมืองแร่ ซึ่งพบว่า ความเข้มข้นของเหล็กในน้ำทิ้งได้ลดลงจาก 166 mg/l เหลือเพียง 32 mg/l และพบว่าลำต้นของธูปฤาษีภายในระบบบึงประดิษฐ์ มีปริมาณเหล็กในเนื้อเยื่อ 2.5 mg/l ความเข้มข้นของเหล็กในตะกอนดินที่ระดับ 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 และมีธูปฤาษีเป็นพืชเด่นนั้น พบว่าระบบดังกล่าวมีความสามารถในการบำบัด Total Fe ได้สูงถึง 72 % และบำบัด Dissolved Fe ได้สูงถึง 60 % ทั้งนี้ประสิทธิภาพการบำบัดจะลดลงในช่วงฤดูหนาว (Goulet et al., 2001)

บึงธรรมชาติ (Natural wetland) ในตุรกี ซึ่งเป็นแหล่งรับน้ำทิ้งและตะกอนของเสีย ซึ่งส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศในพื้นที่ ได้ถูกศึกษาถึงการบำบัดโลหะหนักขององค์ประกอบในระบบ และพบว่า ความเข้มข้นของเหล็กในรากของธูปฤาษีในพื้นที่ศึกษา มีค่าเท่ากับ 1,040.3 μg/g สูงกว่าที่พบในลำต้นและใบ และพบเหล็กในพืชมากกว่าในตะกอนและในน้ำ (Demirezen and Aksoy, 2006)

Manyin et al. (1997) ได้ศึกษาถึงผลของความเข้มข้นของเหล็กและอัตราไหลของน้ำต่อประสิทธิภาพการบำบัดเหล็กในน้ำทิ้งจากเหมืองแร่ ด้วยระบบบึงประดิษฐ์ ซึ่งพบว่าความเข้มข้นของเหล็กในน้ำที่ผ่านการบำบัดมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความเข้มข้นในน้ำก่อนการบำบัด และอัตราการไหลของน้ำในระบบ และหากต้องการให้น้ำที่ผ่านการบำบัดมีความเข้มข้นของเหล็ก เท่ากับ 3.5 mg/l ระบบควรมีขนาดในการรองรับเหล็กเท่ากับ 17.0 g/m^2/d ในขณะที่ประสิทธิภาพการบำบัดจะลดลงเมื่อภาระบรรทุกเหล็ก (Iron loading) เพิ่มขึ้น

วรชาติ (2547) ทำการศึกษาถึงการกำจัดเหล็กในน้ำบาดาลบ่อตื้นโดยใช้วัสดุเหลือใช้จากการทำนา 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

โครงการวิจัยนี้ ประกอบด้วยการศึกษาวิจัยในสองส่วน คือ การศึกษาถึงความเป็นไปได้และประสิทธิภาพในการปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาล โดยการลดปริมาณเหล็กในน้ำ ด้วยระบบบึงประดิษฐ์ และการศึกษาถึงการจัดการระบบบึงประดิษฐ์อย่างความเหมาะสม เพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพสูงสุด ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำ โดยได้ดำเนินการทดลอง เป็น 2 ระยะ คือ

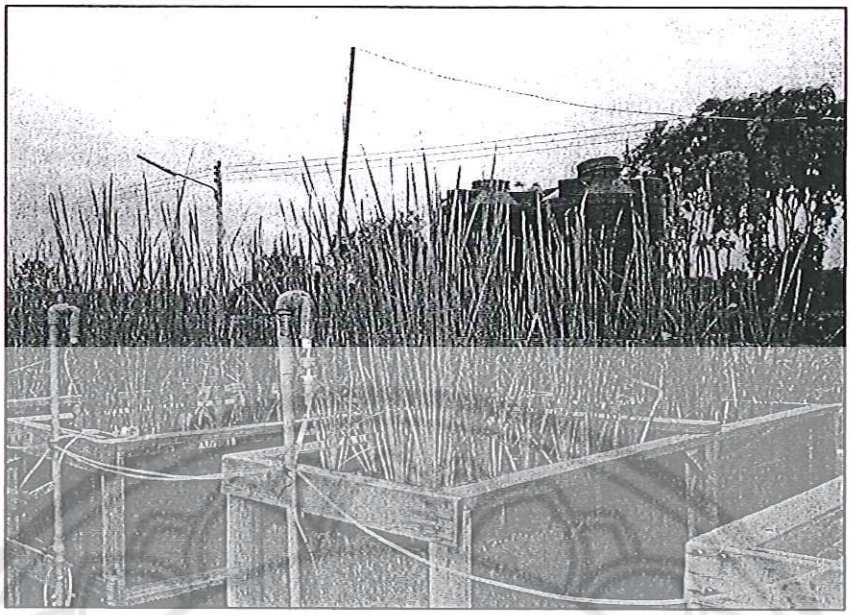
ระยะที่ 1 ศึกษาถึงผลของระยะการกักพักน้ำในระบบ (Hydraulic retention time: HRT) ต่อประสิทธิภาพการบำบัดเหล็กในน้ำ ทั้งนี้เพื่อวิเคราะห์ถึงระยะเวลาการกักพักน้ำในระบบที่เหมาะสม เพื่อนำมาใช้ในการดำเนินระบบ (System operation)

ระยะที่ 2 ศึกษาถึงผลของระยะการเก็บเกี่ยวพืช (Harvest period) ต่อประสิทธิภาพการบำบัดเหล็กของระบบ เพื่อวิเคราะห์ถึงระยะเวลาที่เหมาะสมในการตัดพืช ให้พืชได้แตกตัวใหม่ อันส่งผลต่อกระบวนการดูดดึงเหล็กของพืช (Plant uptake) เพื่อให้ระบบเกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัดเหล็ก

ทั้งนี้ ได้ทำการศึกษาภาคสนามในพื้นที่ศึกษาวิจัยของคณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร และทำการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ พืช และดิน ในห้องปฏิบัติการของภาควิชาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติ และสิ่งแวดล้อม โดยมีขั้นตอน วิธีการวิจัย 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 และเป็นตัวกลางในการบำบัดลงในแต่ละหน่วยทดลอง จนมีระดับความสูง 70 cm จากพื้นแปลง ติดตั้งทางระบายน้ำเข้า และออกจากแปลง หลังจากนั้น ทำการปลูกธูปฤาษี (*Typha angustifolia*) ลงในหน่วยทดลอง โดยทำการปลูกที่ความหนาแน่น 20 rhizomes/m^2 แล้วใช้น้ำประปาในการรด จนกระทั่งพืชสามารถปรับตัวและเติบโตได้ในระบบ (ภาพที่ 3.1)



ภาพที่ 3.1 หน่วยทดลองระบบบึงประดิษฐ์

3.2 การดำเนินระบบบำบัด

การศึกษาถึงการลดปริมาณเหล็กในน้ำบาดาลด้วยระบบบึงประดิษฐ์ในครั้งนี้ ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ระยะ โดยในแต่ละระยะที่ทำการศึกษามีการดำเนินการ ดังนี้

3.2.1 การศึกษาระยะที่ 1: การศึกษาถึงผลของระยะการกักพักน้ำในระบบต่อประสิทธิภาพการบำบัดเหล็ก

เมื่อพืชในหน่วยทดลอง สามารถปรับตัวและเจริญเติบโตได้ จนมีความสูงประมาณ 20 cm จึงทำการระบายน้ำประปาลงสู่หน่วยทดลองอย่างต่อเนื่อง โดยให้น้ำในระบบมีความสูงเท่ากับ 10 cm จากระดับผิวหน้าวัสดุปลูก (Water depth) ด้วยอัตราการไหล 200, 100 และ 50 l/d ซึ่งจะทำให้น้ำมีระยะการกักพักน้ำในระบบ (Hydraulic retention time: HRT) เท่ากับ 0.5, 1 และ 2 d ดำเนินการเป็นระยะเวลา 1-2 wk เพื่อให้พืชได้ปรับสภาพภายใต้ระบบน้ำท่วมขัง จากนั้นทำการตัดพืชให้มีความสูง 15 cm แล้วจึงระบายน้ำบาดาลที่มีเหล็กปนเปื้อนลงสู่หน่วยทดลองแทนน้ำประปา และดำเนินการในลักษณะเดียวกันอย่างต่อเนื่อง เป็นระยะเวลา 8 wk ทั้งนี้ได้ดำเนินการในลักษณะเดียวกันนี้กับหน่วยควบคุม (Control unit) ซึ่งเป็นหน่วยทดลองที่ไม่ได้ทำการปลูกพืชลงในระบบ

3.2.2 การศึกษาระยะที่ 2: การศึกษาถึงผลของระยะการเก็บเกี่ยวพืชต่อประสิทธิภาพการบำบัดเหล็กของระบบ

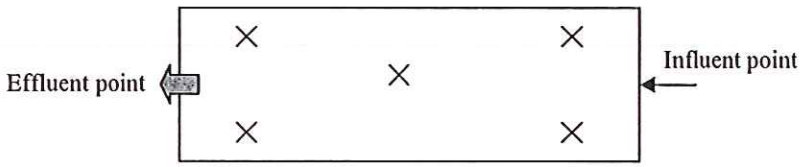
หลังเสร็จสิ้นการศึกษาในระยะที่ 1 ทำการเตรียมหน่วยทดลองใหม่ในลักษณะเดิม จากนั้นทำการดำเนินระบบด้วยระยะกักพักที่เหมาะสม (เลือกจากผลการศึกษาในระยะที่ 1) ซึ่งการศึกษาในระยะที่ 2 นี้ พืชที่ปลูกในระบบจะถูกเก็บเกี่ยวออกจากระบบ (ภาพที่ 3.2) ที่ระยะเวลาแตกต่างกัน 3 ช่วงเวลา คือที่ระยะ 4, 6 และ 8 wk และดำเนินระบบเป็นระยะเวลา 2 รอบ ของการตัดพืชในแต่ละช่วงเวลาเก็บเกี่ยวที่ทำการศึกษา

ภาพที่ 3.2 การเก็บเกี่ยวพืชในระบบ

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, Fe และ Mn ในห้องปฏิบัติการ ซึ่งการเก็บตัวอย่างดินนี้ ดำเนินการในทั้ง 2 ระยะของการศึกษา



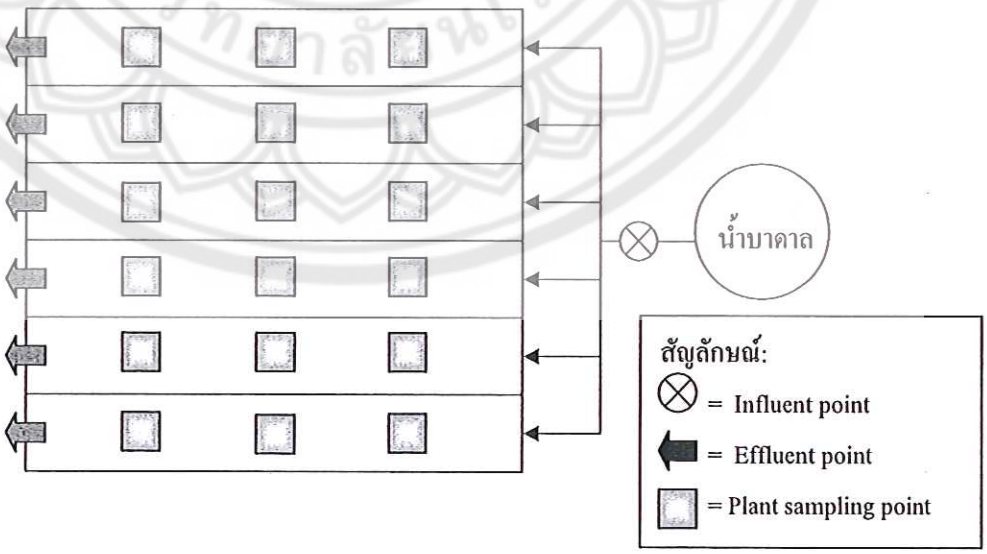
× = Soil sampling point

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 สำหรับการศึกษาในระยะที่ 1 ส่วนการศึกษาในระยะที่ 2 นั้นจะเลือกใช้ระยะกักพักที่เหมาะสมซึ่งเป็นผลจากการศึกษาของระยะที่ 1 ทั้งนี้ การเก็บตัวอย่างน้ำในทั้ง 2 ระยะของการศึกษานั้น ได้ดำเนินการเป็นประจำทุกสัปดาห์ ตลอดระยะเวลาดำเนินระบบ

นำตัวอย่างน้ำที่ได้ ไปทำการวิเคราะห์ค่าดัชนีคุณภาพน้ำตามที่ระบุในตารางที่ 3.1 โดยบางดัชนีได้ทำการตรวจวัดในภาคสนาม ณ จุดเก็บตัวอย่าง และบางดัชนีทำการตรวจวัดที่ห้องปฏิบัติการของคณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม 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

Indicators	Unit	Equipments/Analytical methods
TDS	mg/L	Multiprobe water analysis
DO	mg/L	Membrane electrode meter (DO meter)
EC	µS/cm	Conductivity meter
pH	-	Electrometric method (pH meter)
Temperature	^{o}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)

3.3.3 การเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่างพืช

ในระยะที่ 1 ของการศึกษา ได้ทำการเก็บพืชก่อนการระบายน้ำบาดาลลงสู่ระบบและภายหลังเสร็จสิ้นการดำเนินระบบ ส่วนในระยะที่ 2 ของการศึกษา ทำการเก็บเกี่ยวพืชก่อนการระบาย น้ำบาดาลลงสู่ระบบและที่ระยะเก็บเกี่ยวหรือตัดพืชออกจากระบบ ตามข้อกำหนดการศึกษา คือ ที่ระยะเก็บเกี่ยว (Harvest period) เท่ากับ 4, 6 และ 8 wk ในทั้ง 2 รอบของการตัดพืช โดยทำการตัดพืชที่ระดับ 15 cm เหนือวัสดุปลูก ภายในแปลงเก็บตัวอย่างพืช ขนาด 0.25 m^2 จำนวน 3 sampling point/plot (ภาพที่ 3.4) นำตัวอย่างพืชที่ได้มาทำการวิเคราะห์หาน้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง และปริมาณเหล็กและแมงกานีส (ตารางที่ 3.2) ในห้องปฏิบัติการ ด้วยวิธีการดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.2 ดัชนีตัวอย่างพืชที่ทำการตรวจวัด และระยะเวลาในการตรวจวัด

Indicators	Examination period
Fresh weight	<u>The first phase of study (Phase I)</u>
Dry weight	- Before releasing of groundwater into the system
Fe concentration	- At the end of system operation
Mn concentration	<u>The second phase of study (Phase II)</u>
	- Before releasing of groundwater into the system
	- At harvest period (4, 6 and 8 wk) for 2 times of plant harvest

ตารางที่ 3.3 เครื่องมือหรือวิธีการในการวิเคราะห์พืช

Indicators	Unit	Equipments/Analytical methods
Dry weight	kg	Drying method
Fe concentration	mg/kg	Atomic Absorption Spectroscopy (AAS)
Mn concentration	mg/kg	Atomic Absorption Spectroscopy (AAS)

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

3.4.1 การปรับปรุงคุณภาพน้ำ

นำผลการตรวจวัดมาทำการวิเคราะห์ถึงประสิทธิภาพของระบบในการลดปริมาณเหล็กและแมงกานีสในน้ำ โดยวิเคราะห์ในรูปร้อยละของการบำบัด (Removal) เหล็กและแมงกานีส และความเข้มข้น (Concentration) ของเหล็กและแมงกานีสในน้ำบาดาลภายหลังการบำบัด เปรียบเทียบประสิทธิภาพและความแตกต่างทางสถิติในการบำบัดเหล็กและแมงกานีสในน้ำบาดาลของแต่ละระยะกักพัก และแต่ละระยะการเก็บเกี่ยวพืชที่ทำการศึกษา

3.4.2 กระบวนการบำบัดเหล็กและแมงกานีสของระบบ

วิเคราะห์ถึงปัจจัยที่มีผลในการบำบัดเหล็กและแมงกานีสของระบบ ประสิทธิภาพในการดูดดึงเหล็กและแมงกานีสของพืช และความแตกต่างทางสถิติของการดูดดึงด้วยพืช ที่ระยะการเก็บเกี่ยวพืชที่แตกต่างกัน ซึ่งจะบ่งชี้ได้ถึงความเหมาะสมในการจัดการพืชในระบบ

บทที่ 4
ผลการทดลองและอธิปรายผล

4.1 ผลของระยะกักพักต่อประสิทธิภาพในการลดเหล็ก และแมงกานีสในน้ำบาดาล

4.1.1 ลักษณะน้ำดาลก่อนการปรับปรุงคุณภาพ

น้ำบาดาลที่ทำการศึกษา เป็นน้ำจากบ่อบาดาลที่เกษตรกรขุดขึ้นเพื่อใช้ในการเกษตรกรรม ผลการตรวจวัดคุณภาพน้ำ พบว่าน้ำบาดาลก่อนบำบัดมีค่า Temp, pH, DO, EC, TDS, Total Mn และ Total Fe เท่ากับ 25.0-30.1 ^{o}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

เมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานน้ำผิวดินในแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 3 ซึ่งจัดเป็นแหล่งน้ำที่ได้รับน้ำทิ้งจากกิจกรรมบางประเภท และสามารถใช้เป็นประโยชน์เพื่อการอุปโภคและบริโภคโดยต้องผ่านการฆ่าเชื้อโรคตามปกติและผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำทั่วไปก่อน 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 ^{o}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 ซึ่งเกิดจากกระบวนการเติมออกซิเจนเมื่อน้ำได้สัมผัสกับอากาศ ค่า EC และ TDS ของน้ำบาดาล ซึ่งแสดงถึงการมีสารที่แตกตัวให้อิออน และของแข็งละลายน้ำปะปนอยู่ในน้ำบาดาลนั้น 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 ในแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 3 และสูงกว่าเกณฑ์ที่ยอมให้มีในน้ำชลประทาน ซึ่งกำหนดให้

น้ำชลประทานไม่ควรมี 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 Fe ในน้ำบาดาลก่อนการปรับปรุงมีค่าสูงกว่าค่าที่ยอมให้มีในน้ำชลประทาน ซึ่งกำหนดให้น้ำชลประทานไม่ควรมี Total Fe สูงกว่า 5.0 mg/l เนื่องจาก Fe สามารถส่งผลทำให้ดินเป็นกรด และสูญเสียปริมาณฟอสฟอรัสและโมลิบดินัมที่เป็นประโยชน์ (Ayers and Westcot, 1994) นอกจากนั้น ความเข้มข้นของ Fe ในดินที่สูง จะส่งผลทำให้การดูดโพแทสเซียมของข้าวลดลง โดยความเป็นพิษของ Fe นี้ มักเกิดขึ้นกับข้าว ซึ่งเป็นพืชที่ปลูกในสภาพน้ำท่วมขัง (ประพาส, 2537)

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของน้ำบาดาล (ระยะที่ 1 ของการศึกษา)

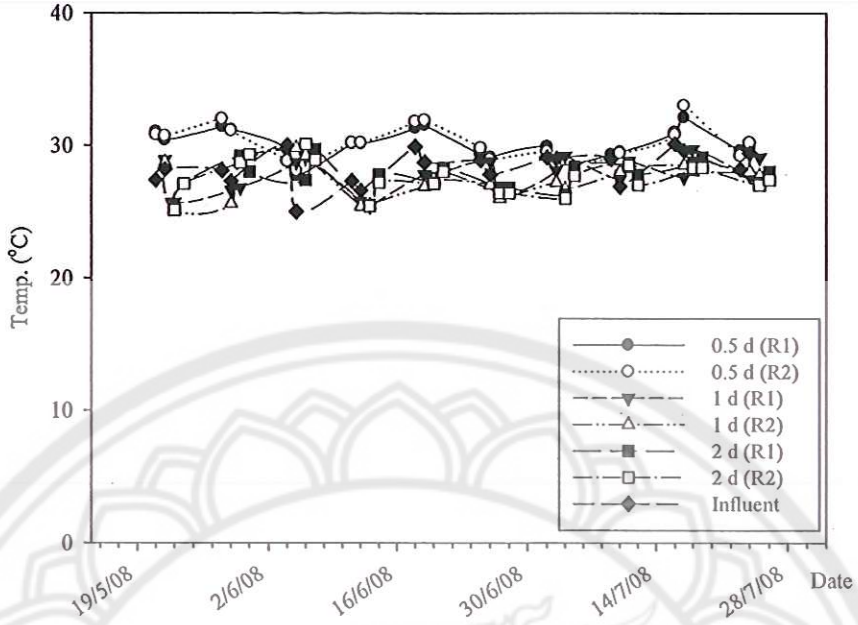
Indicators	Unit	Influent concentration[1/]
Temperature	°C	28.3±1.3 (20)
pH	-	7.40±0.7 (17)
DO	mg/l	2.97±0.4 (8)
EC	µS/cm	217.6±10.0 (20)
TDS	mg/l	108.8±4.7 (20)
Total Fe	mg/l	5.21±4.4 (40)
Dissolved Fe	mg/l	1.87±3.2 (40)
Total Mn	mg/l	3.27±1.2 (40)
Dissolved Mn	mg/l	1.73±0.7 (40)

Note: [1/] Mean±SD are shown for influent concentration and sample size (n) are in parenthesis.

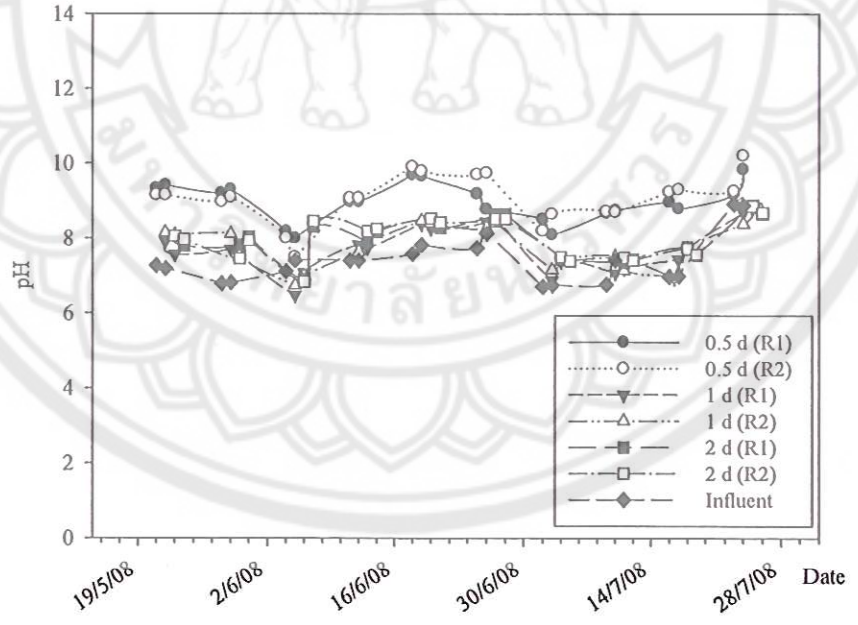
4.1.2 คุณภาพน้ำบาดาลหลังการปรับปรุง และประสิทธิภาพการบำบัดของระบบ

1) คุณภาพน้ำบาดาลหลังการปรับปรุง

ผลการตรวจวัดคุณภาพน้ำบาดาลหลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยระบบบึงประดิษฐ์ ตลอดระยะเวลาที่ทำการศึกษา พบว่า น้ำบาดาลมีอุณหภูมิ ระหว่าง 25.1-33.0°C (ภาพที่ 4.1) ทั้งนี้ อุณหภูมิของน้ำบาดาลก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพไม่แตกต่างกันนัก เนื่องจากน้ำบาดาลก่อนการปรับปรุงคุณภาพได้ถูกสูบขึ้นมาสัมผัสกับอุณหภูมิอากาศเป็นระยะเวลาหนึ่งก่อนการบำบัด ซึ่งอุณหภูมิของน้ำบาดาลทั้งก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพจะมีการผันแปรตามอุณหภูมิอากาศในพื้นที่เป็นหลัก ค่า pH ของน้ำบาดาลหลังการปรับปรุงคุณภาพ มีค่าระหว่าง 6.5-10.2 (ภาพที่ 4.2) โดยมีค่าเฉลี่ยสูงกว่า ค่า pH เฉลี่ยของน้ำบาดาลก่อนการปรับปรุงคุณภาพ (pH = 7.4) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่ง



ภาพที่ 4.1 Temperature ของน้ำบาดาล ก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพ

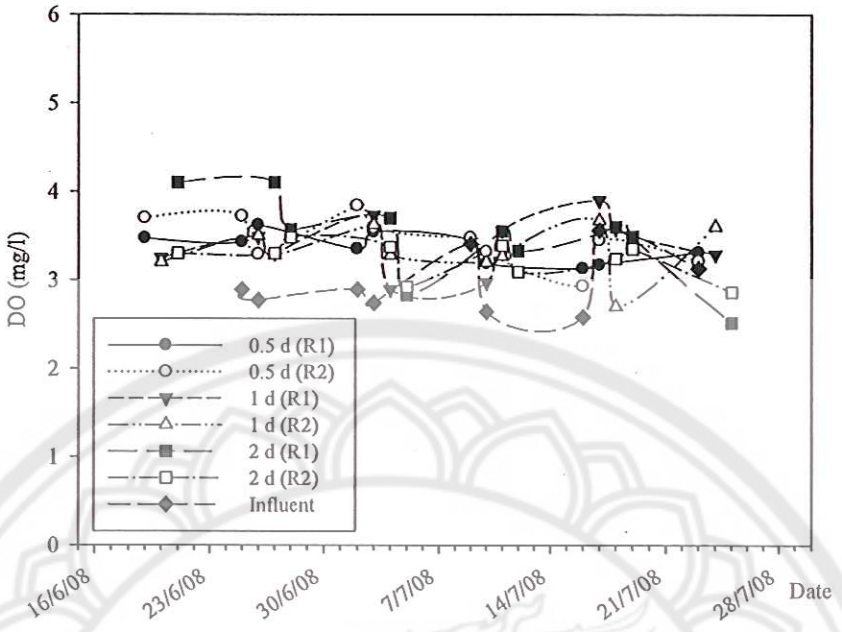


ภาพที่ 4.2 pH ของน้ำบาดาล ก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพ

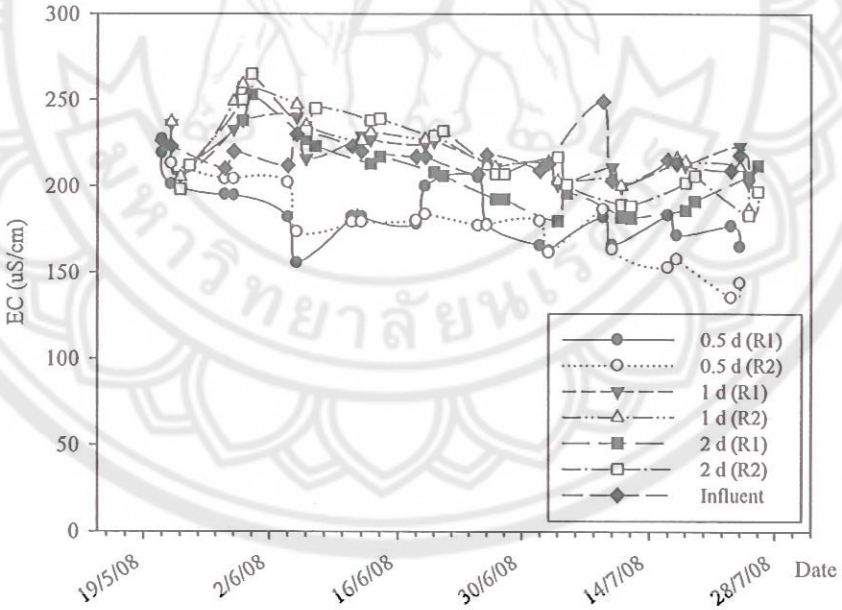
ค่าเฉลี่ยของ pH ของน้ำบาดาลหลังการปรับปรุงคุณภาพ (pH = 7.8-9.0) มีค่าอยู่ในเกณฑ์อนุโลมสูงสุดของมาตรฐานน้ำบาดาลที่ใช้บริโภค ซึ่งกำหนดให้มีค่าระหว่าง 6.5-9.2 และมีค่าใกล้เคียงกับค่า pH ของน้ำชลประทานซึ่งโดยทั่วไปมีค่าระหว่าง 6.5-8.4 (Ayers and Westcot, 1994) และยังพบว่า น้ำบาดาลหลังการปรับปรุงคุณภาพจากทุกหน่วยทดลองที่ทำการศึกษา มีค่า pH โดยส่วนใหญ่สูงกว่า ค่า pH ของน้ำบาดาลก่อนการปรับปรุงคุณภาพตลอดระยะเวลาที่ทำการศึกษา (ภาพที่ 4.2) โดยน้ำบาดาลที่ถูกกักพักในระบบที่ระยะ 0.5 d มีค่าเฉลี่ยของ pH สูงสุด (pH = 9.0) รองลงมาคือน้ำบาดาลที่ถูกกักพักในระบบที่ระยะ 2 d (pH = 8.0) และ 1 d (pH = 7.8) ตามลำดับ การเพิ่มขึ้นของค่า pH ของน้ำเป็นผลจากกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชน้ำที่เจริญเติบโตในระบบ ซึ่งทำให้ CO_2 อิสระในน้ำลดลง และส่งผลให้ค่า pH เพิ่มสูงขึ้น (ประเทือง, 2534) นอกจากนั้น การสังเคราะห์แสงของพืชน้ำยังเป็นการเพิ่มออกซิเจนให้กับน้ำ และทำให้ค่า DO ของน้ำมีค่าสูงขึ้นด้วย ซึ่งพบว่ามีความสัมพันธ์กับค่า DO ที่ตรวจวัดได้

ค่า DO ในน้ำบาดาลหลังการปรับปรุงคุณภาพ มีค่าสูงขึ้นและมีค่าแตกต่างกันทางสถิติ ($P < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยของค่า DO ในน้ำบาดาลก่อนปรับปรุงคุณภาพ โดยมีค่าระหว่าง 2.5-4.1 mg/l (ภาพที่ 4.3) ทั้งนี้ เนื่องจากน้ำได้รับออกซิเจนเพิ่มเติมจากออกซิเจนในอากาศ เมื่อน้ำมีการสัมผัสกับอากาศ นอกจากนั้น การสังเคราะห์แสงของพืชน้ำในระบบยังเป็นปัจจัยหลักในการเพิ่มออกซิเจนให้กับน้ำ ทั้งนี้ พบว่าค่าเฉลี่ยของ DO ของน้ำบาดาลที่ถูกกักพักในระบบที่ระยะ 0.5 d มีค่าสูงสุด ซึ่งมีความสัมพันธ์และเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการเพิ่มขึ้นของค่า pH ของน้ำบาดาล

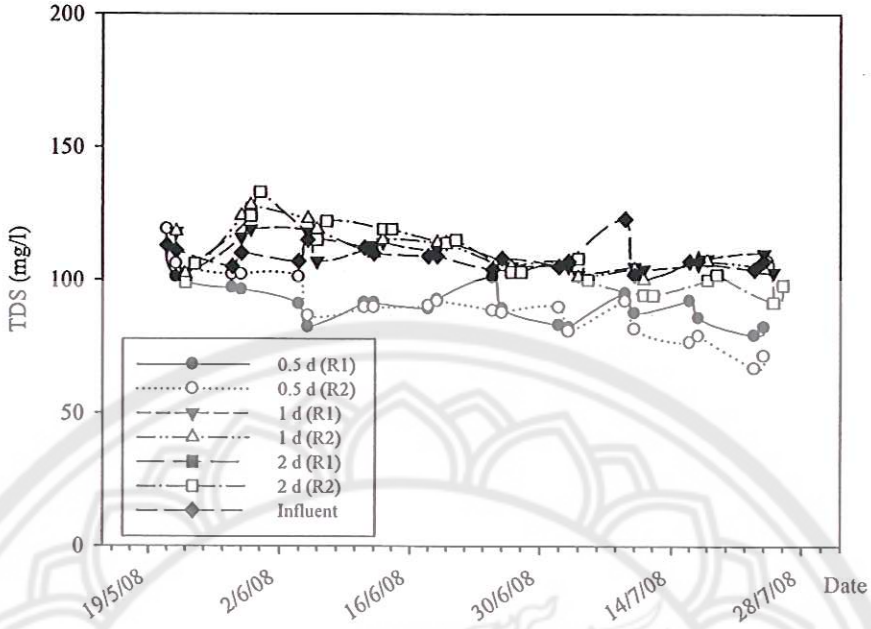
ค่า EC ของน้ำบาดาลหลังการปรับปรุงคุณภาพ มีค่าระหว่าง 135.4-265.0 µS/cm (ภาพที่ 4.4) ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่พบได้ในน้ำผิวดินทั่วไปและในน้ำสำหรับการชลประทาน ทั้งนี้หากน้ำมีค่า EC สูงกว่า 3,000 µS/cm หรือมีค่า TDS สูงกว่า 2,000 mg/l จะหมายถึงการมีสารละลายอนินทรีย์ปะปนอยู่ในน้ำในปริมาณสูง และไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้เพื่อการชลประทาน (Ayers and Westcot, 1994) ผลการศึกษา พบว่า ค่า EC ของน้ำบาดาลที่ถูกกักพักในระบบที่ระยะ 1 d มีค่าเฉลี่ยสูงสุด และไม่แตกต่างกับค่าเฉลี่ย EC ของน้ำบาดาลก่อนการปรับปรุงคุณภาพ โดย EC ของน้ำบาดาลที่ถูกกักพักในระบบที่ระยะ 0.5 d มีค่าเฉลี่ยต่ำสุดและแตกต่างกับค่า EC ของน้ำบาดาลก่อนการปรับปรุงคุณภาพ และค่า EC ของ น้ำบาดาลที่ถูกกักพักในระบบที่ระยะกักพักอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) และเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับค่าของ TDS ซึ่งพบว่ามีค่าเฉลี่ยต่ำสุดในน้ำบาดาลที่ถูกกักพักในระบบที่ระยะ 0.5 d และแตกต่างจากค่า TDS ของน้ำบาดาลก่อนการปรับปรุงคุณภาพ และค่า TDS ของน้ำบาดาลที่ถูกกักพักในระบบที่ระยะกักพักอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) โดยค่า TDS ในน้ำบาดาลหลังการปรับปรุงคุณภาพมีค่าระหว่าง 66.8-133.0 mg/l (ภาพที่ 4.5)



ภาพที่ 4.3 DO ของน้ำบาดาล ก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพ



ภาพที่ 4.4 EC ของน้ำบาดาล ก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพ

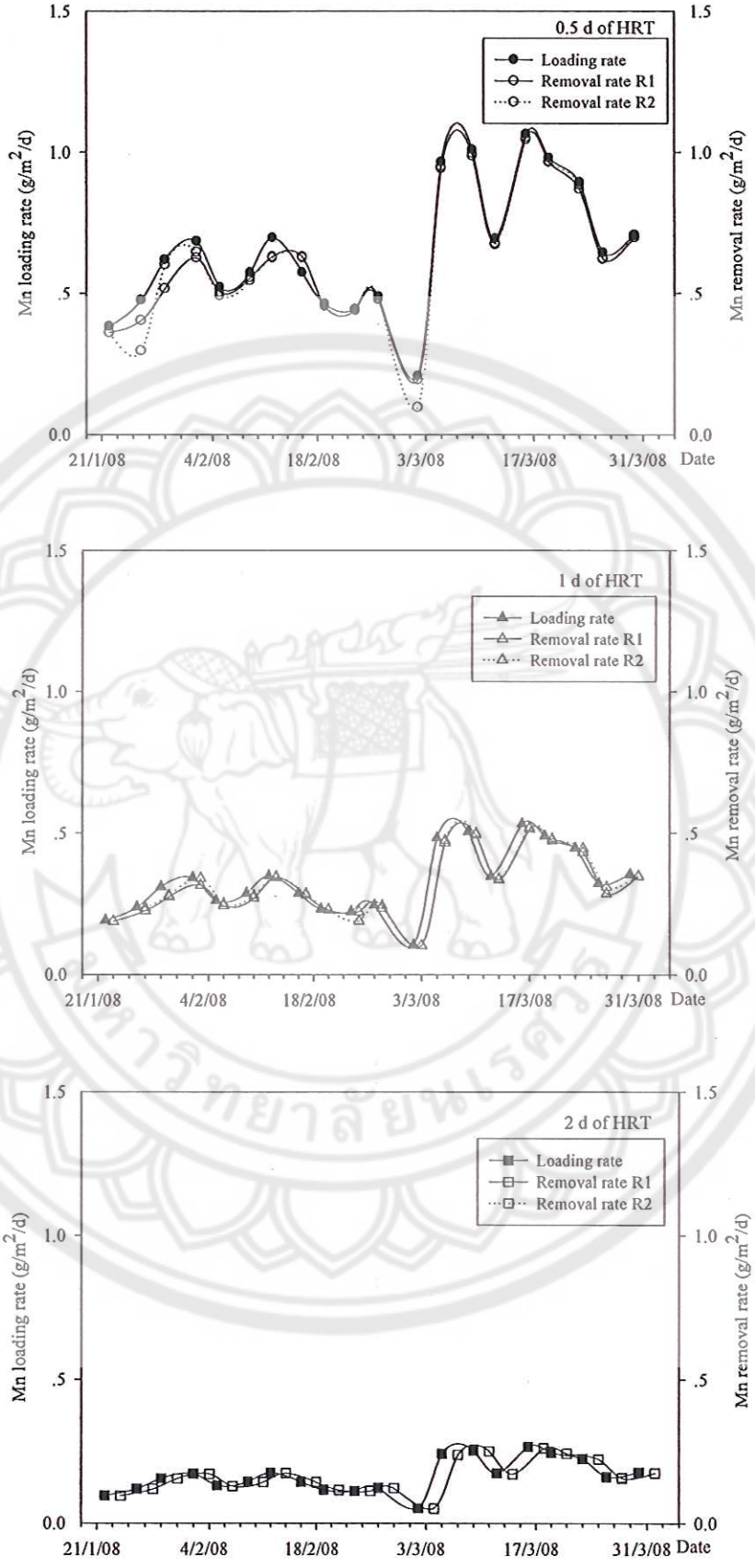


ภาพที่ 4.5 TDS ของน้ำบาดาล ก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพ

2) การบำบัดเหล็ก และแมงกานีส

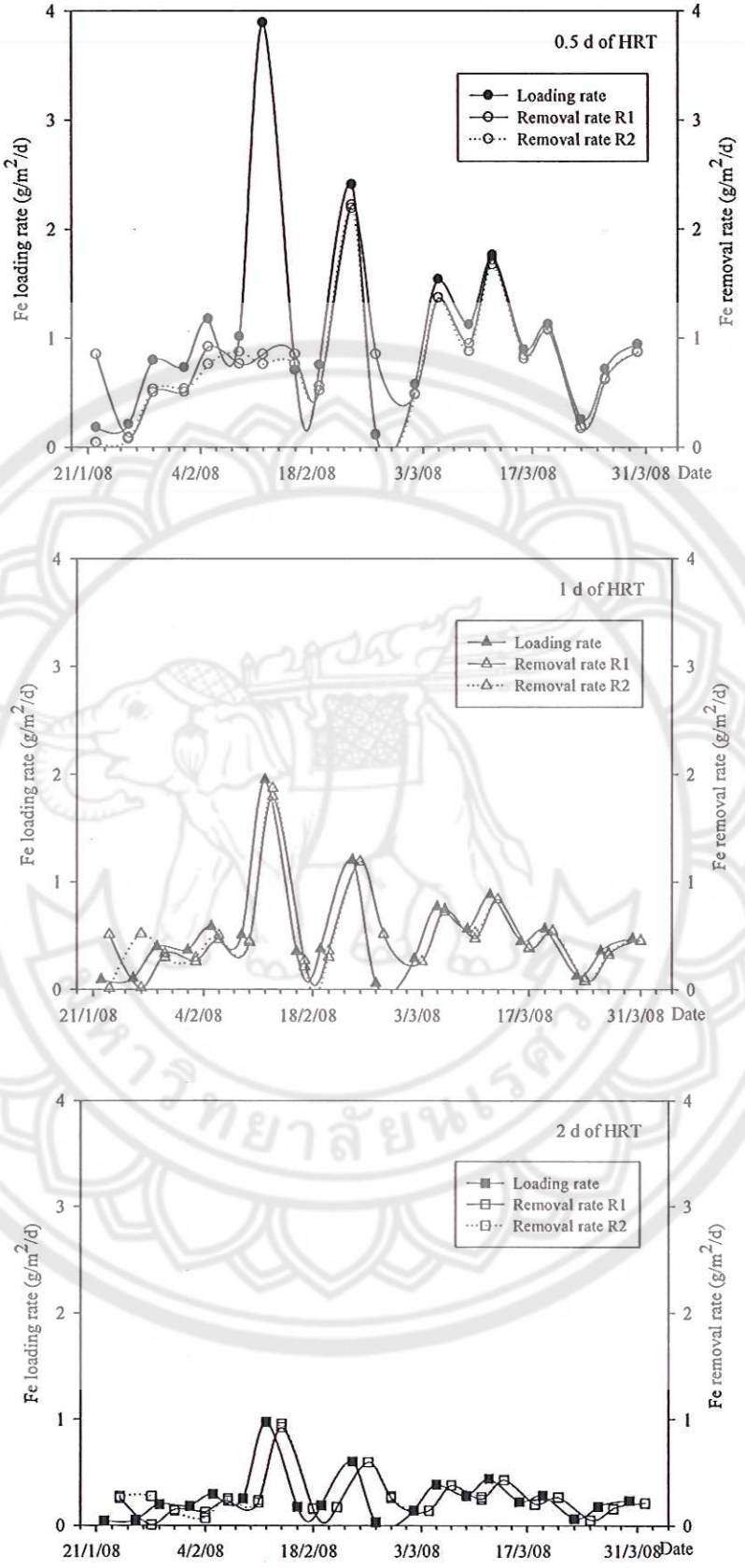
น้ำจากบ่อบาดาลซึ่งมีค่า Total Mn และ Total Fe ปนเปื้อนในน้ำ ระหว่าง 1.03-5.32 mg/l และ 0.57-19.46 mg/l (ตารางที่ 4.1) ถูกระบายลงสู่ระบบบึงประดิษฐ์ ด้วยอัตราภาระทางชลศาสตร์ (Hydraulic loading rate: HLR) เท่ากับ 200, 100 และ 50 l/d ซึ่งทำให้น้ำบาดาลมีระยะการกักพักภายในระบบ (Hydraulic retention time: HRT) เท่ากับ 0.5, 1 และ 2 d ตามลำดับ จากค่าความเข้มข้นของ Total Mn และ Total Fe และอัตราการไหลของน้ำเข้าสู่ระบบ ทำให้ระบบบึงประดิษฐ์ มีอัตราการรองรับ Total Mn และ Total Fe เท่ากับ 0.052-1.065 $g/m^2/d$ และ 0.028-3.891 $g/m^2/d$ โดยระบบบึงประดิษฐ์ที่ทำการปรับปรุงคุณภาพน้ำที่ระยะกักพัก 0.5, 1 และ 2 d มีอัตราการรองรับ Total Mn เฉลี่ยเท่ากับ 0.656, 0.331 และ 0.164 $g/m^2/d$ ตามลำดับ (ภาพที่ 4.6) และมีอัตราการรองรับ Total Fe เฉลี่ยเท่ากับ 1.043, 0.521 และ 0.261 $g/m^2/d$ 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 น้ำบาดาลที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพน้ำที่ระยะกักพัก 0.5, 1 และ 2 d มี Total Mn ปนเปื้อน เฉลี่ยเท่ากับ 0.145, 0.113 และ 0.039 mg/l ตามลำดับ (ภาพที่ 4.8) ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำผิวดินประเภทที่ 3 (Total Mn $\leq$ 1 mg/l) และอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดให้มีได้ในน้ำชลประทาน (Total Mn $\leq$ 0.2 mg/l) และมี Total Fe ปนเปื้อนเฉลี่ยเท่ากับ 0.700, 0.578 และ 0.512 mg/l ตามลำดับ (ภาพที่ 4.9) ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดให้มีได้ในน้ำชลประทาน (Total Fe $\leq$ 5.0 mg/l)

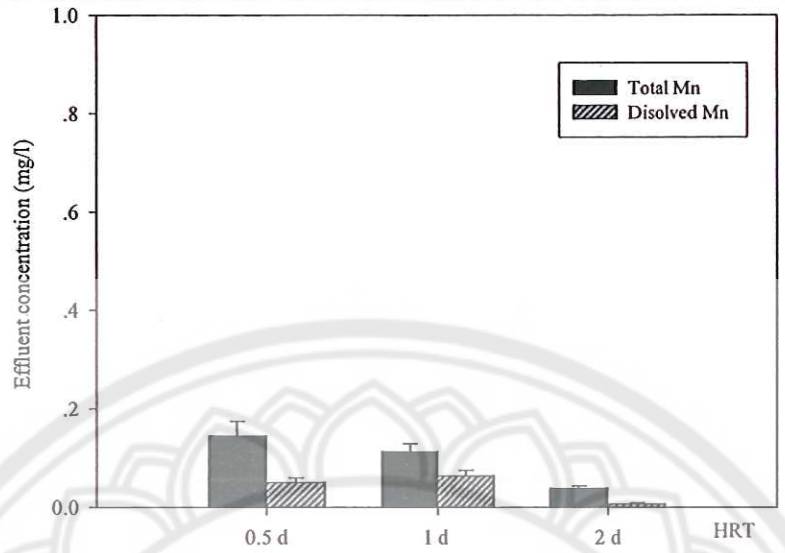


ภาพที่ 4.6 อัตราการรองรับและอัตราการบำบัด Mn ของระบบบึงประดิษฐ์

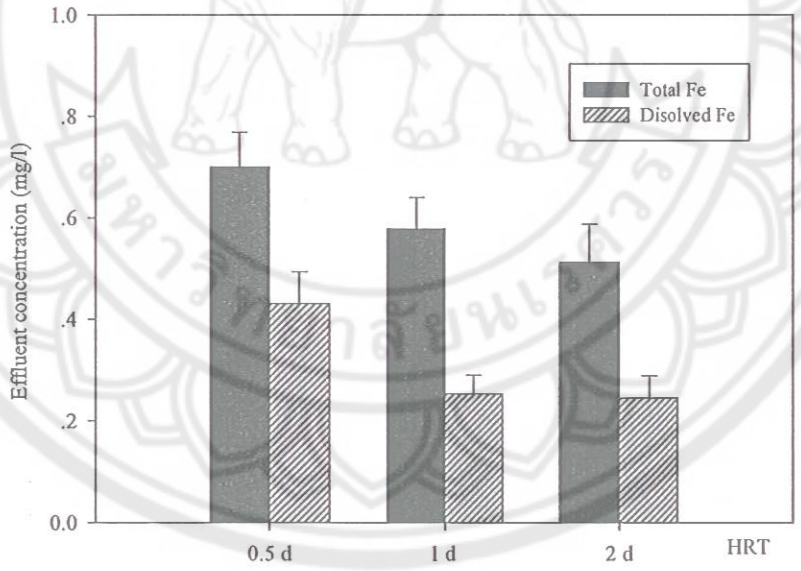
สำนักหอสมุด
29 ส.ค. 2556



ภาพที่ 4.7 อัตราการรองรับและอัตราการบำบัด Fe ของระบบบึงประดิษฐ์



ภาพที่ 4.8 ความเข้มข้นของ Mn ในน้ำบาดาลที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ



ภาพที่ 4.9 ความเข้มข้นของ Fe ในน้ำบาดาลที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ

ทั้งนี้ พบว่า ค่าความเข้มข้นของ Total Mn และ Total Fe ในน้ำหลังการปรับปรุงคุณภาพที่ระยะกักพักต่างๆ ไม่แตกต่างกันทางสถิติ อย่างไรก็ตาม เมื่อเทียบกับค่าความเข้มข้นของ Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาลก่อนการปรับปรุงคุณภาพ จะพบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

ระบบบึงประดิษฐ์ที่ทำการศึกษามีประสิทธิภาพในการลด Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาลสูงกว่าระบบควบคุม และพบว่ามีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยเฉพาะประสิทธิภาพในการลด Total Mn ในน้ำบาดาล ทั้งนี้ พบว่าบึงประดิษฐ์มีประสิทธิภาพในการลดความเข้มข้นของ Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาล เท่ากับ 46.42-99.84 และ 9.02-98.89 % ตามลำดับ (ตารางที่ 4.2) โดยการปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาลที่ระยะกักพัก 2 d มีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดความเข้มข้นของ Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาล โดยระบบมีอัตราการบำบัด Total Mn และ Total Fe เท่ากับ 0.050-1.053 $g/m^2/d$ (ภาพที่ 4.6) และ 0.008-2.219 $g/m^2/d$ (ภาพที่ 4.7) ทั้งนี้ พบว่า การกักพักน้ำที่ระยะกักพัก 0.5 d มีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดปริมาณ Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาล ต่อพื้นที่ต่อช่วงเวลาที่เท่ากัน และพบว่ามีประสิทธิภาพแตกต่างจากการบำบัดที่ระยะกักพัก 1 และ 2 d อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ดังตารางที่ 4.2 ดังนั้น การปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาลโดยการลดปริมาณ Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาล ด้วยการกักพักน้ำในระบบบึงประดิษฐ์ที่ระยะกักพักเท่ากับ 0.5 d จึงเป็นระยะกักพักที่เหมาะสมในการปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาล เนื่องจากเป็นระยะกักพักที่มีอัตราการบำบัด Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาล ต่อพื้นที่ต่อช่วงเวลาที่เท่ากัน สูงกว่าการบำบัดที่ระยะกักพัก 1 และ 2 d อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ นอกจากนั้น ยังสามารถปรับปรุงคุณภาพน้ำ ทำให้น้ำบาดาลมีปริมาณ Total Fe เหลือปนเปื้อนในน้ำ ไม่แตกต่างจากการปรับปรุงคุณภาพที่ระยะกักพักอื่นที่ใช้ระยะเวลายาวนานกว่าในการบำบัด ซึ่งระยะการกักพักที่ใช้เวลายาวนานอาจจะทำให้ได้ปริมาณน้ำหลังการปรับปรุงคุณภาพไม่เพียงพอต่อการนำไปใช้ในการทำนา ซึ่งเป็นกิจกรรมที่ต้องการน้ำในปริมาณมาก

ตารางที่ 4.2 ประสิทธิภาพของระบบบึงประดิษฐ์ในการบำบัด Fe และ Mn

Design HRT (d)	Fe removal						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 $P \geq 0.05$.

AAR = Area adjusted removal

FOR = First order kinetics removal

4.2 ผลของระยะเก็บเกี่ยวพืชต่อประสิทธิภาพในการลดเหล็ก และแมงกานีสในน้ำบาดาล (ระยะที่ 2 ของการศึกษา)

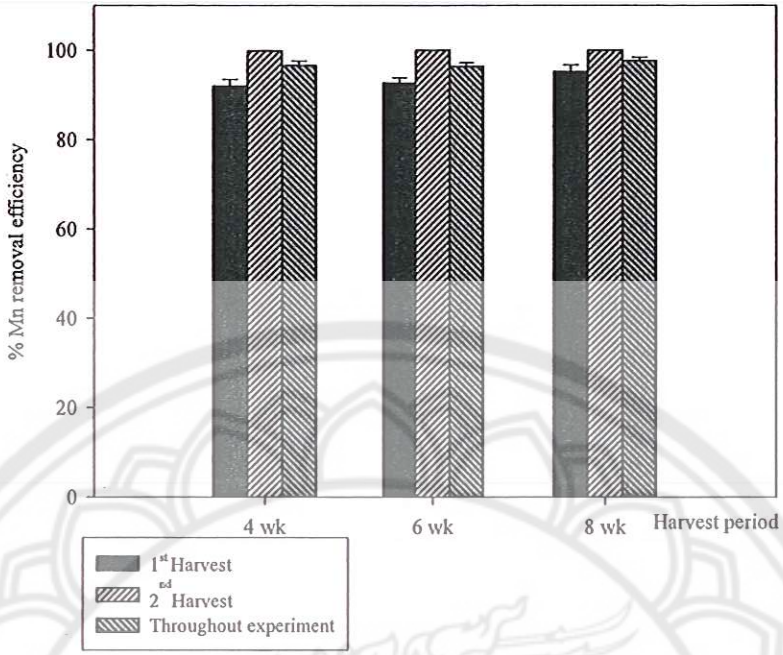
การปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาลด้วยระบบบึงประดิษฐ์ ที่ระยะกักพัก 0.5 d ซึ่งพบว่ามีประสิทธิภาพสูงในการรองรับและลดปริมาณ Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาลต่อพื้นที่ต่อช่วงเวลา ได้ถูกนำมาใช้ในการศึกษาถึงผลของระยะเวลาในการเก็บเกี่ยวพืชต่อประสิทธิภาพในการลด Fe และ Mn ในน้ำบาดาล โดยมีระยะการเก็บเกี่ยวพืชที่ทำการศึกษา คือ การเก็บเกี่ยวที่ระยะ 4, 6 และ 8 wk ซึ่งผลการศึกษามีดังนี้

4.2.1 ประสิทธิภาพในการลดเหล็ก และแมงกานีสในน้ำบาดาล

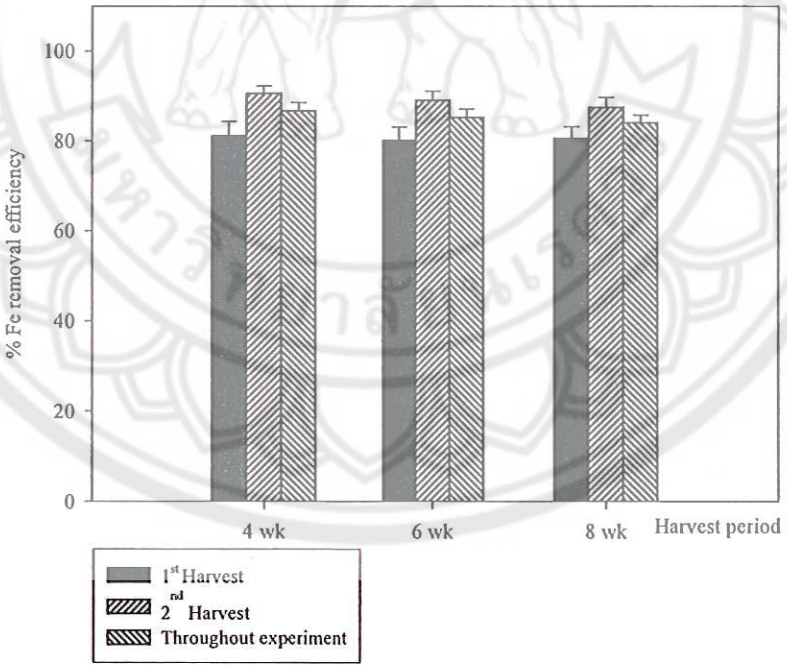
การศึกษาถึงประสิทธิภาพของระบบบึงประดิษฐ์ ที่ทำการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะ 4, 6 และ 8 wk พบว่าระบบมีประสิทธิภาพในการลดความเข้มข้นของ Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาล ระหว่าง 48.58-99.40 % และ 48.58-98.82 % (ภาพที่ 4.10 และภาพที่ 4.11) ซึ่งทำให้น้ำบาดาลที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพมีค่าความเข้มข้นของ Total Mn และ Total Fe ลดลง โดยมีค่าระหว่าง 0.000-0.106 mg/l และ 0.03-1.89 mg/l (ภาพที่ 4.12 และภาพที่ 4.13) ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำเพื่อการชลประทาน โดยระบบมีอัตราการบำบัด Total Mn และ Total Fe ระหว่าง 0.016-0.149 $g/m^2/d$ และ 0.010-0.920 $g/m^2/d$ (ภาพที่ 4.14 และภาพที่ 4.15)

ประสิทธิภาพการบำบัด Total Mn และ Total Fe ของแต่ละระยะเก็บเกี่ยว (4, 6 และ 8 wk) ไม่แตกต่างกันทางสถิติ โดยมีค่าเฉลี่ยระหว่าง 96.31-97.60 % และ 84.02-86.63 % เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดระหว่างการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 1 กับครั้งที่ 2 ของแต่ละระยะเก็บเกี่ยว พบว่าภายหลังการเก็บเกี่ยวพืชครั้งแรก ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดทั้ง Total Mn และ Total Fe สูงขึ้น และมีค่าแตกต่างกันทางสถิติ โดยในครั้งแรกของการเก็บเกี่ยว ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัด Total Mn และ Total Fe มีค่าระหว่าง 75.63-100.00 % และ 48.58-96.82 % ส่วนครั้งที่ 2 ของการเก็บเกี่ยว ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัด Total Mn และ Total Fe ระหว่าง 98.05-100.00 % และ 55.71-99.40 % ซึ่งผลการศึกษาที่พบนี้ได้สนับสนุน ข้อบ่งชี้ในการจัดการระบบบึงประดิษฐ์เพื่อคงประสิทธิภาพของระบบไว้ ด้วยการเก็บเกี่ยวพืชออกจากระบบอย่างเหมาะสม (Reddy and D'Angelo, 1990; Hosoi et al., 1998)

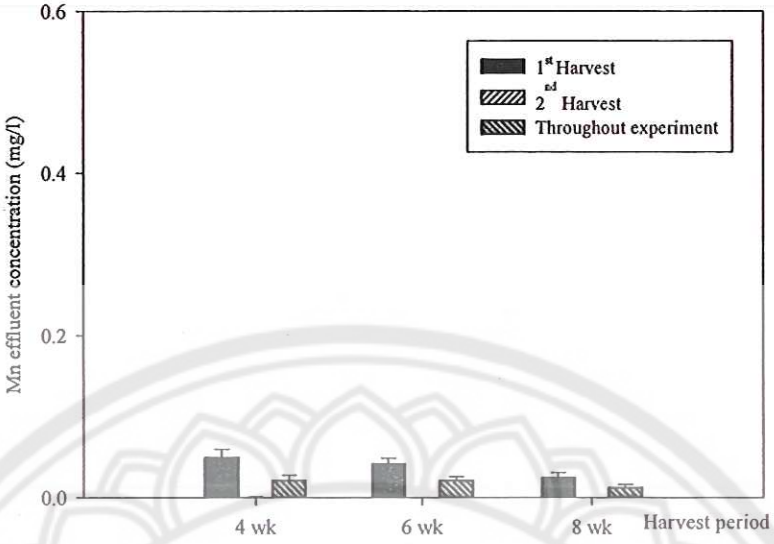
ความเข้มข้นของ Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาลหลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยระบบบึงประดิษฐ์ ที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะ 4, 6 และ 8 wk มีค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลาที่ดำเนินระบบเท่ากับ 0.0210, 0.0208 และ 0.0122 mg/l (ภาพที่ 4.12) และ 0.248, 0.278 และ 0.336 mg/l (ภาพที่ 4.13) ซึ่งพบว่าความเข้มข้นของ Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาล จากระบบที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะเวลาแตกต่างกัน มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P > 0.05$) ทั้งนี้ พบว่าความเข้มข้นของ Total Mn



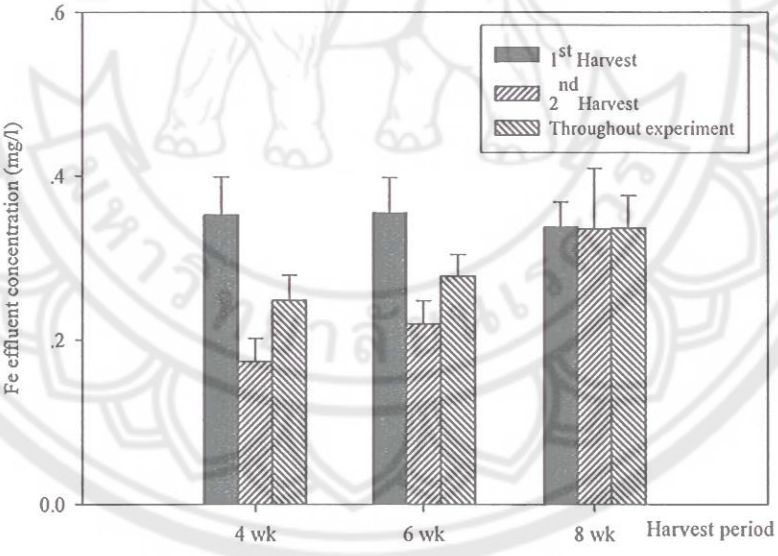
ภาพที่ 4.10 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัด Mn ของระบบบึงประดิษฐ์ที่มีระยะการเก็บเกี่ยวพืชที่แตกต่างกัน



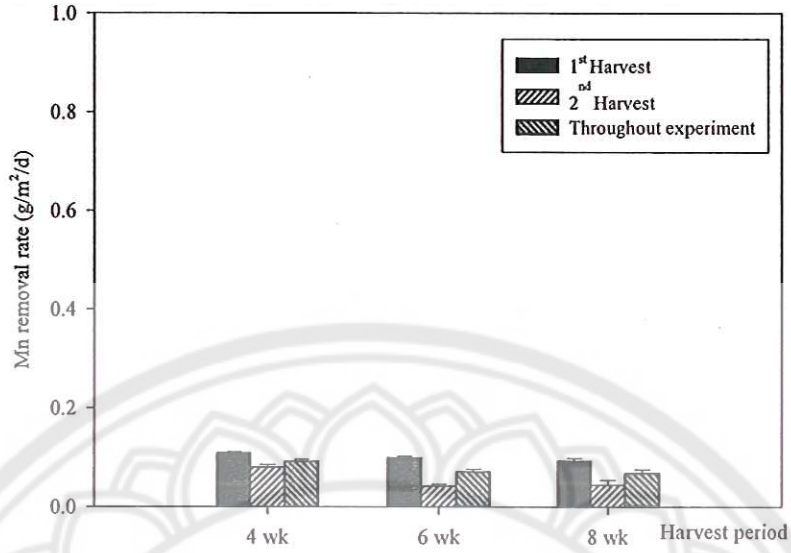
ภาพที่ 4.11 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัด Fe ของระบบบึงประดิษฐ์ที่มีระยะการเก็บเกี่ยวพืชที่แตกต่างกัน



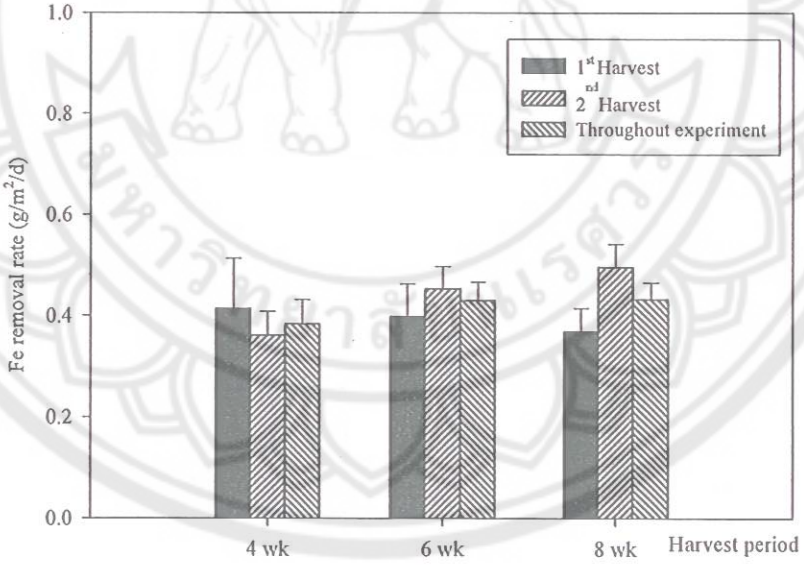
ภาพที่ 4.12 ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของ Mn ในน้ำบาดาลที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพจากระบบบึงประดิษฐ์ที่มีระยะการเก็บเกี่ยวพืชที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 4.13 ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของ Fe ในน้ำบาดาลที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพจากระบบบึงประดิษฐ์ที่มีระยะการเก็บเกี่ยวพืชที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 4.14 ค่าเฉลี่ยอัตราการบำบัด Mn ของระบบบึงประดิษฐ์ที่มีระยะการเก็บเกี่ยวพืชที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 4.15 ค่าเฉลี่ยอัตราการบำบัด Fe ของระบบบึงประดิษฐ์ที่มีระยะการเก็บเกี่ยวพืชที่แตกต่างกัน

และ Total Fe ของทั้ง 3 ระยะเก็บเกี่ยว มีค่าแตกต่างกันระหว่างการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 โดยความเข้มข้นของ Total Mn และ Total Fe ของการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 1 มีค่าระหว่าง 0.0080-0.1060 mg/l และ 0.077-0.798 mg/l และความเข้มข้นของ Total Mn และ Total Fe ภายหลังการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 1 (การเก็บเกี่ยวครั้งที่ 2) มีค่าระหว่าง 0.0000-0.1060 mg/l และ 0.028-1.890 mg/l

อัตราการบำบัด Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาลของระบบบึงประดิษฐ์ ที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะ 4, 6 และ 8 wk มีค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลาที่ดำเนินระบบเท่ากับ 0.092, 0.070 และ 0.068 $g/m^2/d$ และ 0.383, 0.429 และ 0.432 $g/m^2/d$ ซึ่งพบว่าอัตราการบำบัด Total Mn ในน้ำบาดาล ของระบบที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะเวลาแตกต่างกัน มีค่าแตกต่างกันทางสถิติ ($P < 0.05$) โดยพบอัตราการบำบัด Total Mn สูงสุด ในระบบที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ 4 wk รองลงมาคืออัตราการบำบัดของระบบที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ 6 และ 8 wk ซึ่งพบว่าอัตราการบำบัดของทั้งสองระบบนี้ ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ขณะที่อัตราการบำบัด Total Fe ในระบบที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะเวลาแตกต่างกัน ไม่แตกต่างกันทางสถิติ

อัตราการบำบัด Total Mn ของระบบมีค่าแตกต่างกันทางสถิติระหว่างการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 โดยอัตราการบำบัด Total Mn ของการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 มีค่าระหว่าง 0.042-0.128 และ 0.016-0.149 $g/m^2/d$ โดยอัตราการบำบัด Total Mn ของการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 1 มีค่าเฉลี่ยสูงกว่าอัตราการบำบัดของการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 2 ในทั้ง 3 ระยะของการเก็บเกี่ยว ส่วนอัตราการบำบัด Total Fe ของระบบที่ทำการเก็บเกี่ยวที่ระยะ 4, 6 และ 8 wk มีค่าเฉลี่ยไม่แตกต่างกันทางสถิติระหว่างการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 1 และ 2 โดยพบว่าอัตราการบำบัดของการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 1 ของระบบที่ทำการเก็บเกี่ยวที่ระยะ 4 wk มีค่าเฉลี่ยสูงกว่าอัตราการบำบัดเฉลี่ยของการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 2 เล็กน้อย ขณะที่อัตราการบำบัดของการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 2 ของระบบที่ทำการเก็บเกี่ยวที่ระยะ 6 และ 8 wk มีค่าเฉลี่ยสูงกว่าอัตราการบำบัดเฉลี่ยของการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 1 (ภาพที่ 4.15)

4.2.2 สมดุลเหล็ก และแมงกานีส

1) เหล็ก และแมงกานีสในดิน

ดินที่ใช้ปลูกพืชในหน่วยทดลองเป็นดินเหนียว มีค่าของ OM ระหว่าง 0.64-0.99 % ซึ่งจัดได้ว่ามี OM ในระดับต่ำมาก คือ มี OM น้อยกว่า 2 % (Metson, 1961 อ้างใน Landon, 1991) ดินมีค่า pH, EC และ CEC ระหว่าง 6.11-6.77, 0.040-0.049 dS/m และ 2.00-2.30 meq/100 g ธาตุอาหาร ได้แก่ Total N, available P และ K มีค่า 0.002-0.003 %, 0.956-0.993 ppm และ 224.04-246.94 ppm ตามลำดับ ส่วน Mn และ Fe ในดิน มีค่า 6.33-6.44 ppm และ 20.68-20.92 ppm

ผลการตรวจวัด Mn และ Fe ในดิน เมื่อสิ้นสุดการดำเนินระบบ พบว่าดินที่ระดับผิวดิน (0-5.5 cm) โดยส่วนใหญ่มีค่าของ Mn และ Fe สูงขึ้น โดยดินในระบบบึงประดิษฐ์ที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ 4, 6 และ 8 wk มีค่า Mn และ Fe ระหว่าง 7.10-29.57, 4.68-9.77 และ 4.70-8.71 ppm และ

18.91-58.41, 11.19-31.92 และ 12.78-71.36 ppm ตามลำดับ ค่าความเข้มข้นของ Mn ในดินมีความแตกต่างกันทางสถิติระหว่างระบบที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่แตกต่างกัน โดยระบบที่ทำการเก็บเกี่ยวพืชที่ 4 wk มีค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของ Mn ในดินสูงสุด ขณะที่ ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของ Fe ในดิน ไม่แตกต่างกันระหว่างระบบที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่แตกต่างกัน

2) เหล็ก และแมงกานีสในน้ำ

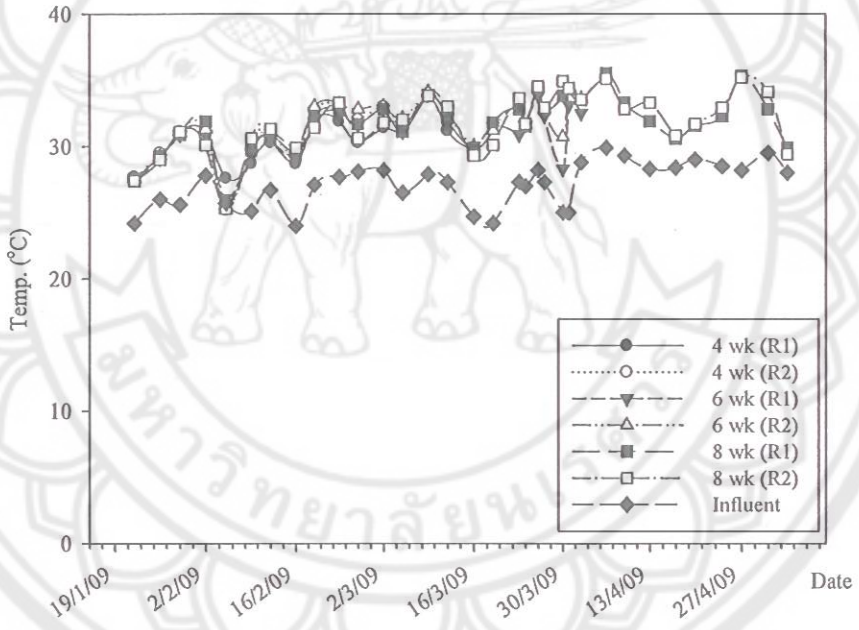
น้ำบาดาลที่ใช้ในการศึกษาถึงผลของระยะเก็บเกี่ยวพืชต่อประสิทธิภาพในการลดเหล็กในน้ำบาดาล เป็นน้ำจากบ่อบาดาลเดียวกันกับที่ใช้ในการศึกษาถึงผลของระยะกักพักต่อประสิทธิภาพในการลดเหล็กในน้ำบาดาล (การศึกษาในระยะที่ 1) ซึ่งผลการตรวจวัดคุณภาพน้ำในระยะที่ 2 ของการศึกษา พบว่าน้ำบาดาลก่อนบำบัดมีค่า Temp, pH, DO, EC และ TDS เท่ากับ 24.0-29.9 ^{o}C, 6.08-7.98, 3.20-5.93 mg/l, 104.0-198.0 µS/cm และ 55.0-101.0 mg/l ตามลำดับ (ตารางที่ 4.3) ทั้งนี้ พบว่าคุณสมบัติของน้ำบาดาลที่ใช้ในการศึกษาถึงผลของระยะเก็บเกี่ยวพืชต่อประสิทธิภาพในการลดเหล็กในน้ำบาดาล (การศึกษาในระยะที่ 2) มีลักษณะเดียวกันกับน้ำบาดาลที่ใช้ในการศึกษาถึงผลของระยะกักพักต่อประสิทธิภาพในการลดเหล็กในน้ำบาดาล (การศึกษาในระยะที่ 1) เนื่องจากเป็นน้ำจากบ่อบาดาลเดียวกัน

ผลการศึกษาในระยะที่ 2 พบว่าน้ำบาดาลหลังผ่านการปรับปรุงคุณภาพ ด้วยระบบบึงประดิษฐ์ที่ทำการเก็บเกี่ยวพืชออกจากระบบเมื่อพืชเติบโตได้ 4 wk มีค่า Temp, pH, DO, EC และ TDS เท่ากับ 25.2-33.8 ^{o}C, 7.01-9.70, 5.27-6.80 mg/l, 88.9-207.0 µS/cm และ 47.2-104.0 mg/l ตามลำดับ น้ำบาดาลหลังผ่านการปรับปรุงคุณภาพ ด้วยระบบบึงประดิษฐ์ที่ทำการเก็บเกี่ยวพืชออกจากระบบเมื่อพืชเติบโตได้ 6 wk มีค่า Temp, pH, DO, EC และ TDS เท่ากับ 25.2-34.4 ^{o}C, 7.35-9.81, 5.00-7.07 mg/l, 87.6-211.0 µS/cm และ 46.5-105.0 mg/l ตามลำดับ และน้ำบาดาลหลังผ่านการปรับปรุงคุณภาพ ด้วยระบบบึงประดิษฐ์ที่ทำการเก็บเกี่ยวพืชออกจากระบบเมื่อพืชเติบโตได้ 8 wk มีค่า Temp, pH, DO, EC และ TDS เท่ากับ 25.3-35.5 ^{o}C, 7.21-9.96, 4.40-6.47 mg/l, 54.2-207.0 µS/cm และ 28.8-104.0 mg/l ตามลำดับ (ภาพที่ 4.16 ถึงภาพที่ 4.20) ทั้งนี้ พบว่าค่าเฉลี่ยของ Temp, pH, DO, EC และ TDS ของน้ำบาดาลหลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยระบบบึงประดิษฐ์ที่มีระยะเวลาเก็บเกี่ยวพืชออกจากระบบที่แตกต่างกัน มีค่าใกล้เคียงกัน

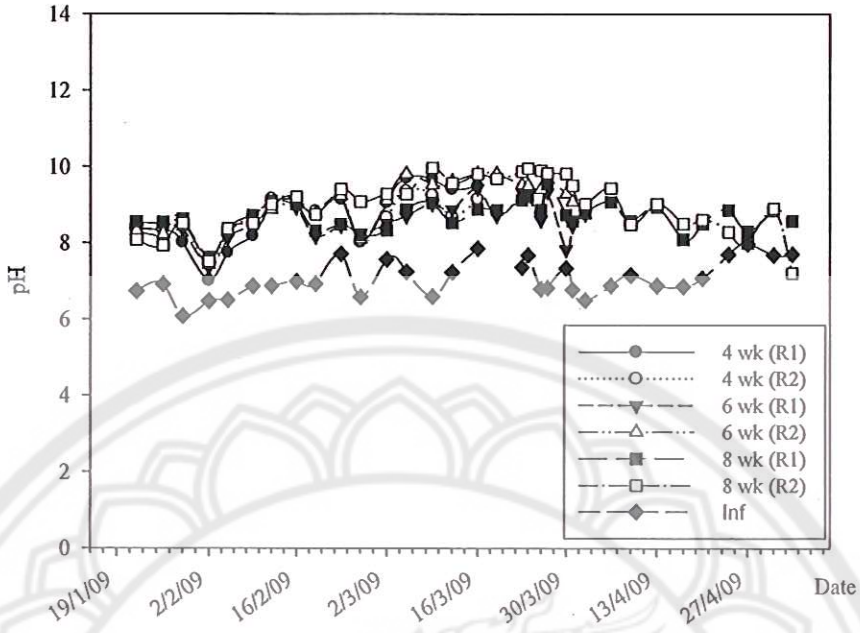
ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติของน้ำบาดาล (ระยะที่ 2 ของการศึกษา)

Indicators	Unit	Influent concentration[1/]
Temperature	°C	27.11±1.7 (33)
pH	-	7.07±0.5 (32)
DO	mg/l	5.04±0.5 (33)
EC	µS/cm	122.80±25.9 (33)
TDS	mg/l	64.82±12.5 (33)

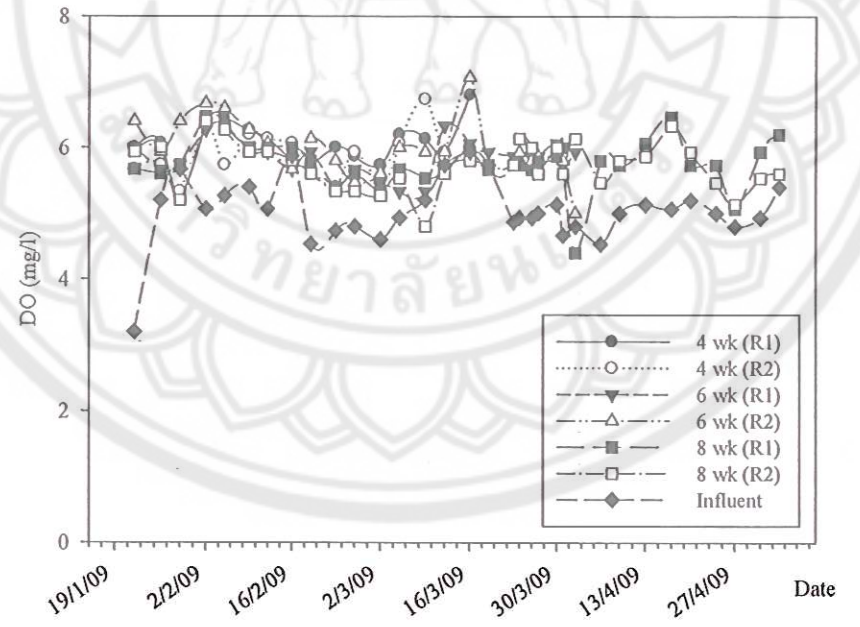
Note: [1/] Mean±SD are shown for influent concentration and sample size (n) are in parenthesis.



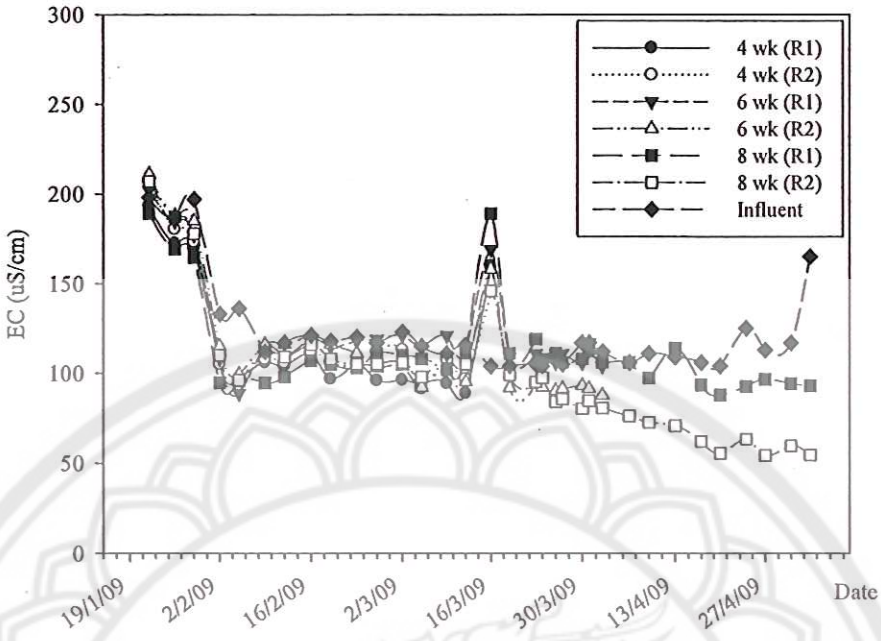
ภาพที่ 4.16 Temperature ของน้ำบาดาล ก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพ ในระยะที่ 2 ของการศึกษา



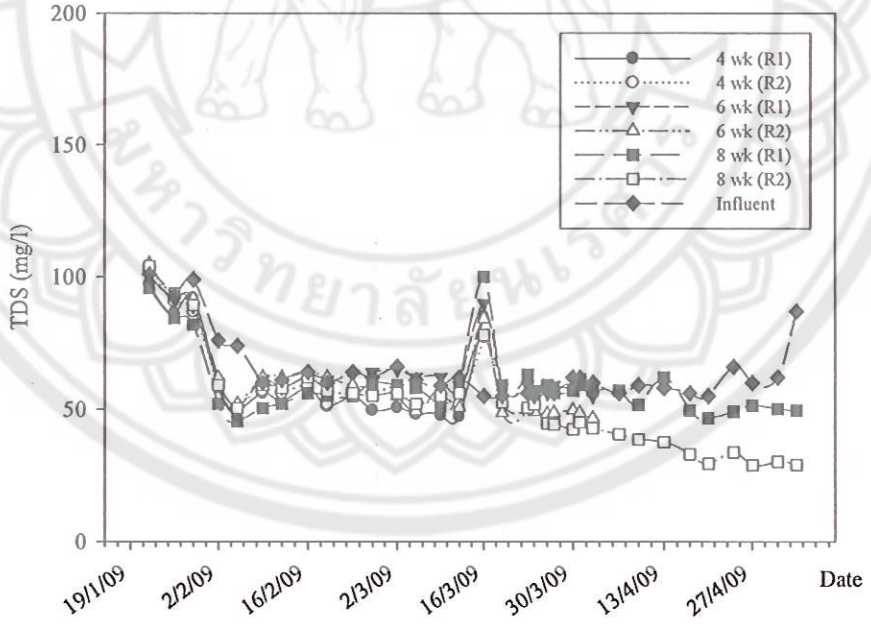
ภาพที่ 4.17 pH ของน้ำบาดาล ก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพ ในระยะที่ 2 ของการศึกษา



ภาพที่ 4.18 DO ของน้ำบาดาล ก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพ ในระยะที่ 2 ของการศึกษา



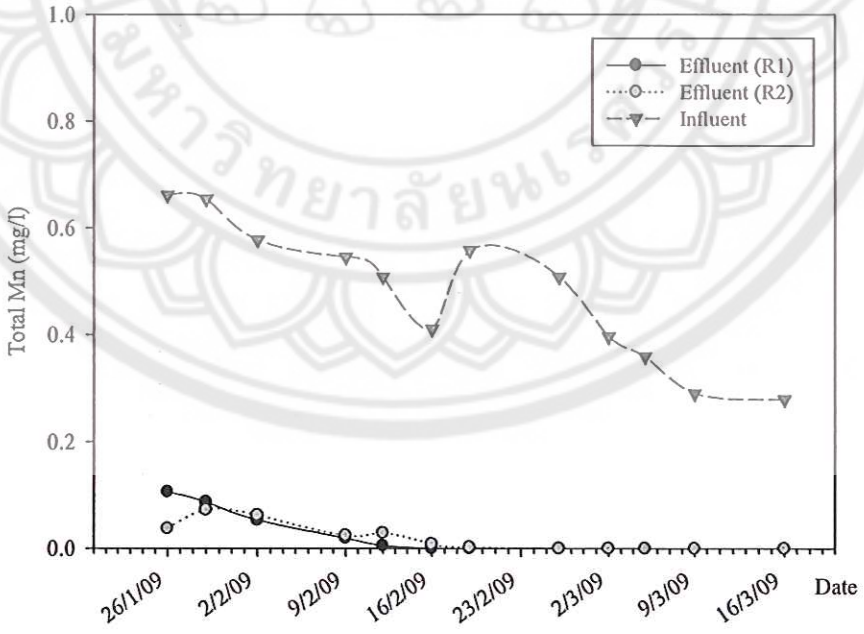
ภาพที่ 4.19 EC ของน้ำบาดาล ก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพ ในระยะที่ 2 ของการศึกษา



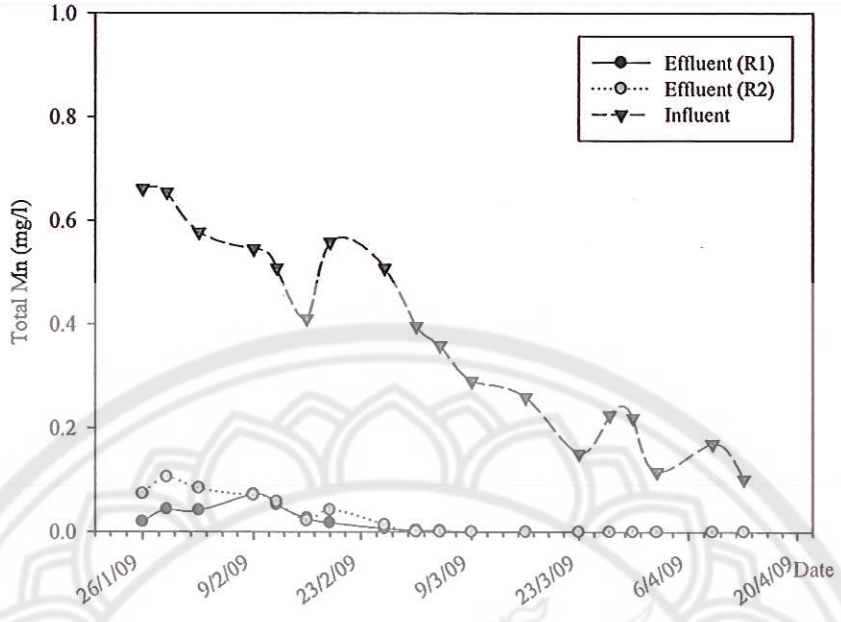
ภาพที่ 4.20 TDS ของน้ำบาดาล ก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพ ในระยะที่ 2 ของการศึกษา

ความเข้มข้นของ Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาลที่ระบายลงสู่ระบบบึงประดิษฐ์ ที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะ 4, 6 และ 8 wk มีค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลาที่ดำเนินระบบเท่ากับ 0.48, 0.38 และ 0.35 mg/l และ 2.16, 2.42 และ 2.50 mg/l ตามลำดับ ความเข้มข้นของ Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาลภายหลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยระบบบึงประดิษฐ์ ที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะ 4, 6 และ 8 wk มีค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลาที่ดำเนินระบบเท่ากับ 0.02, 0.02 และ 0.01 mg/l และ 0.25, 0.28 และ 0.34 mg/l ตามลำดับ (ภาพที่ 4.21 ถึงภาพที่ 4.26)

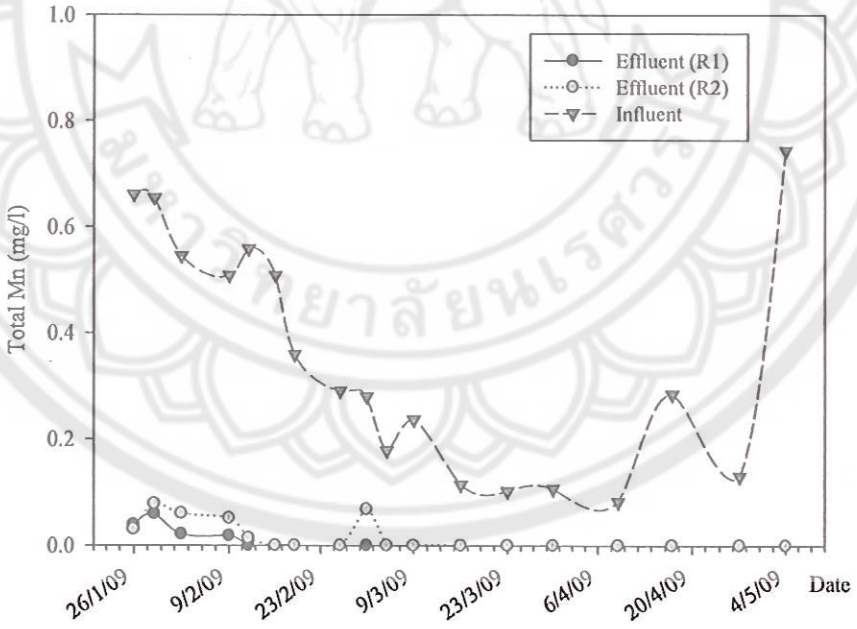
ปริมาณ Total Mn และ Total Fe ที่ระบายลงสู่ ระบบบึงประดิษฐ์ที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะ 4, 6 และ 8 wk มีค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลาที่ดำเนินระบบเท่ากับ 0.096, 0.075 และ 0.070 $g/m^2/d$ และ 0.432, 0.485 และ 0.499 $g/m^2/d$ ตามลำดับ ขณะที่ระบบบึงประดิษฐ์ ที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะ 4, 6 และ 8 wk มีอัตราการบำบัด Total Mn และ Total Fe เฉลี่ยตลอดระยะเวลาที่ดำเนินระบบเท่ากับ 0.092, 0.070 และ 0.068 $g/m^2/d$ และ 0.383, 0.056 และ 0.067 $g/m^2/d$ ตามลำดับ ซึ่งปริมาณของ Total Mn และ Total Fe ส่วนหนึ่งได้ถูกบำบัดและกักเก็บไว้ด้วยกระบวนการต่างๆ ภายในระบบบึงประดิษฐ์ ทั้งนี้ ระบบที่มีระยะเก็บเกี่ยว 4, 6 และ 8 wk มีระยะเวลาดำเนินระบบทั้งสิ้น 56, 84 และ 112 d ตามลำดับ โดยมีปริมาณ Total Mn ที่ถูกบำบัดและกักเก็บไว้ภายในระบบ เท่ากับ 0.092, 0.070 และ 0.068 g/d หรือ 5.127, 5.913 และ 7.615 g ตามลำดับ และมีปริมาณ Total Fe ที่ถูกบำบัดและกักเก็บไว้ภายในระบบ เท่ากับ 0.383, 0.429 และ 0.432 g/d หรือ 21.438, 36.076 และ 48.368 g ตามลำดับ



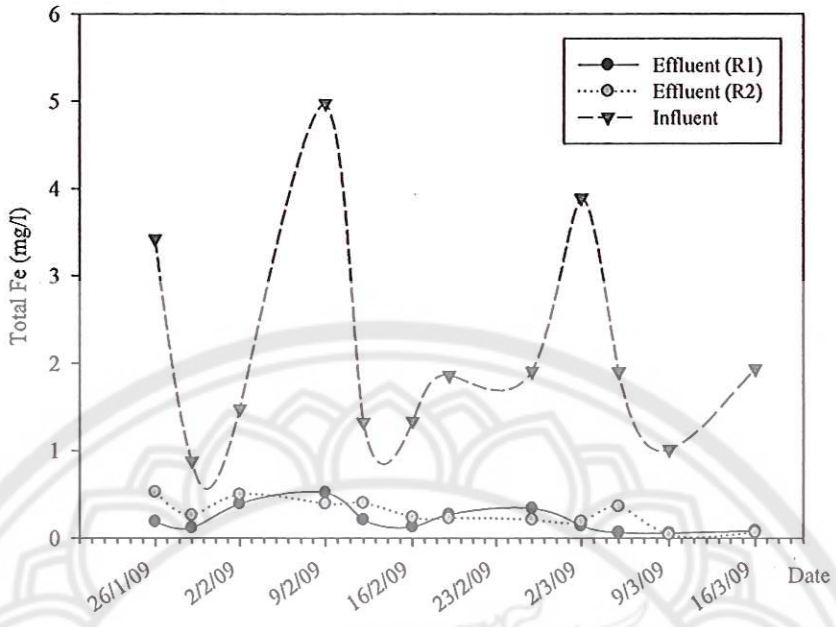
ภาพที่ 4.21 ค่า Total Mn ในน้ำบาดาลก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพ ด้วยระบบบึงประดิษฐ์ ที่ทำการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะ 4 wk



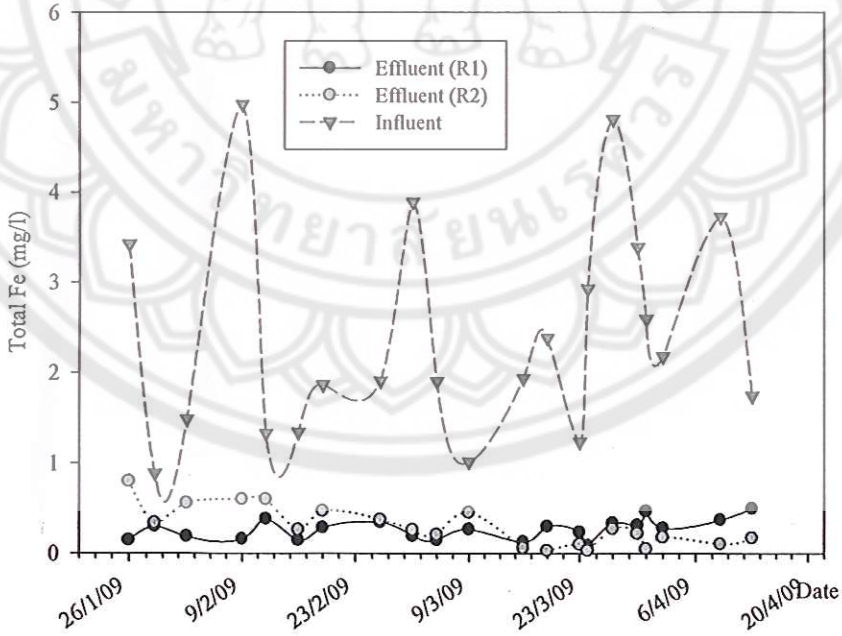
ภาพที่ 4.22 ค่า Total Mn ในน้ำบาดาลก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพ ด้วยระบบบึงประดิษฐ์ ที่ทำการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะ 6 wk



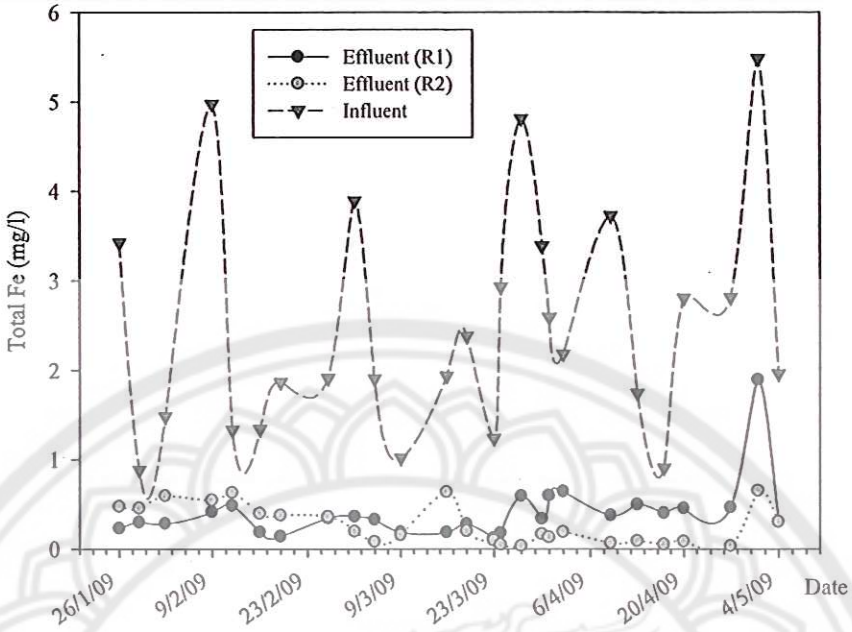
ภาพที่ 4.23 ค่า Total Mn ในน้ำบาดาลก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพ ด้วยระบบบึงประดิษฐ์ ที่ทำการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะ 8 wk



ภาพที่ 4.24 ค่า Total Fe ในน้ำบาดาลก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพ ด้วยระบบบึงประดิษฐ์ ที่ทำการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะ 4 wk



ภาพที่ 4.25 ค่า Total Fe ในน้ำบาดาลก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพ ด้วยระบบบึงประดิษฐ์ ที่ทำการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะ 6 wk



ภาพที่ 4.26 ค่า Total Fe ในน้ำบาดาลก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพ ด้วยระบบบึงประดิษฐ์ที่ทำการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะ 8 wk

3) เหล็ก และแมงกานีสในพืช

พืชที่ปลูกในหน่วยทดลอง คือ ธูปฤาษี (*Typha angustifolia*) ซึ่งเป็นพืชชายน้ำที่เจริญเติบโตได้ดีในพื้นที่น้ำท่วมขัง ผลการตรวจวัดมวลชีวภาพของธูปฤาษีส่วนเหนือดินทั้งในรูปของน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งในแต่ละระยะเก็บเกี่ยว พบว่า น้ำหนักสดของธูปฤาษีส่วนเหนือดินในระบบที่ทำการเก็บเกี่ยวที่ระยะ 4, 6 และ 8 wk ในการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 1 มีค่า 483.2-825.6, 1,776.0-3,227.0 และ 1,457.6-3,096.0 g/m^2 ตามลำดับ ในการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 2 มีค่า 1,768-5,140.8, 3,590.4-5,971.2 และ 2,377.6-4,300.8 g/m^2 ตามลำดับ ส่วนน้ำหนักสดของธูปฤาษีส่วนใต้ดินในระบบที่ทำการเก็บเกี่ยวที่ระยะ 4, 6 และ 8 wk มีค่า 3,054.4-7,025.6, 3,521.6-8,801.6 และ 3,238.4-10,022.4 g/m^2 ตามลำดับ (ตารางที่ 4.4)

น้ำหนักแห้งของธูปฤาษีส่วนเหนือดินในระบบที่ทำการเก็บเกี่ยวที่ระยะ 4, 6 และ 8 wk ในการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 1 มีค่า 158.4-307.2, 267.2-676.8 และ 216.0-536.0 g/m^2 ตามลำดับ ในการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 2 มีค่า 217.6-1,660.8, 428.8-643.2 และ 459.2-852.8 g/m^2 ตามลำดับ (ตารางที่ 4.4) ทั้งนี้พบว่าน้ำหนักแห้งของธูปฤาษีส่วนเหนือดินที่ได้จากการเก็บเกี่ยวทั้ง 2 ครั้ง มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ยกเว้นน้ำหนักแห้งของพืชที่ทำการเก็บเกี่ยวที่ระยะ 8 wk ซึ่งพบว่าธูปฤาษีส่วนเหนือดินที่ได้จากการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 2 มีน้ำหนักแห้งมากกว่าการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 1 โดยในการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 1 นั้น น้ำหนักแห้ง

ของธูปฤาษีส่วนเหนือดินที่ได้จากระบบที่ทำการเก็บเกี่ยวที่ระยะ 6 และ 8 wk มีค่าสูงกว่าน้ำหนักแห้งของพืชส่วนเหนือดินที่ได้จากระบบที่ทำการเก็บเกี่ยวที่ระยะ 4 wk ส่วนน้ำหนักแห้งของธูปฤาษีส่วนใต้ดินที่ได้จากระบบที่ทำการเก็บเกี่ยวที่ระยะ 4, 6 และ 8 wk มีค่า 600.0-1,908.8, 606.4-1,598.4 และ 475.2-2,032.0 g/m^2 ตามลำดับ ซึ่งพบว่ามีค่าเฉลี่ยไม่แตกต่างกันระหว่างระยะเก็บเกี่ยว (ตารางที่ 4.4)

ตารางที่ 4.4 น้ำหนักมวลชีวภาพและอัตราการเติบโตสัมพัทธ์ของพืช ในแต่ละระยะเก็บเกี่ยว

Parameters	Unit	Harvest period		
		Harvesting at 4 wk	Harvesting at 6 wk	Harvesting at 8 wk
Wet weight	g/m^2			
Aboveground plant				
- first harvest		645.6±138.8^{bB}	2,388.8±639.9^{aB}	2,374.7±573.1^{aB}
- second harvest		3,242.4±1,500.4^{bA}	5,157.6±877.4^{aA}	3,390.9±804.0^{bA}
Underground plant				
- second harvest		5,402.1±2,417.7	5,736.8±1,916.5	5,853.1±2,586.6
Dry weight	g/m^2			
Aboveground plant				
- first harvest		219.5±59.9^{b}	389.3±153.8^{a}	388.3±107.0^{aB}
- second harvest		581.9±554.7	530.1±80.7	687.5±164.7^{A}
Underground plant				
- second harvest		925.3±491.5	976.3±362.1	982.9±629.5
RGR	per day			
- first harvest		0.1915±0.0095^{a}	0.1442±0.0086^{bB}	0.1060±0.0055^{cB}
- second harvest		0.2167±0.0285^{a}	0.1528±0.0037^{bA}	0.1162±0.0049^{cA}

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) = 6

อัตราการเติบโตสัมพัทธ์ (Relative growth rate: RGR) ของธูปฤาษีในระบบที่ทำการเก็บเกี่ยวที่ระยะ 4, 6 และ 8 wk ในการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 1 มีค่า 0.181-0.205, 0.136-0.159 และ 0.096-0.112 per day ตามลำดับ สำหรับการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 2 มีค่า 0.192-0.265, 0.148-0.158 และ 0.109-0.121 per day ตามลำดับ ทั้งนี้ พบว่า ค่า RGR ที่ได้จากการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 2 ของธูปฤาษีในระบบที่ทำการเก็บเกี่ยวที่ระยะ 6 และ 8 wk มีค่าสูงกว่า ค่า RGR ของพืชที่ได้จากการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) และพบว่า ค่า RGR ของธูปฤาษีในระบบที่ทำการเก็บเกี่ยวที่ระยะ 4 wk ในทั้ง 2 ครั้งของการเก็บเกี่ยว มีค่าสูงกว่า ค่า RGR ของธูปฤาษีในระบบที่ทำการเก็บเกี่ยวที่ระยะ 6 และ 8 wk ตามลำดับ (ตารางที่ 4.4)

ความเข้มข้นของ Mn ในเนื้อเยื่อของธูปฤาษีส่วนเหนือดิน ซึ่งได้จากระบบที่ทำการเก็บเกี่ยวที่ระยะ 4, 6 และ 8 wk ในการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 1 มีค่า 197.04-305.47, 172.03-343.60 และ 120.26-225.36 mg/kg ตามลำดับ ส่วนในการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 2 มีค่า 112.82-238.30, 179.41-351.94 และ 182.87-314.30 mg/kg ตามลำดับ ขณะที่ความเข้มข้นของ Mn ในเนื้อเยื่อของธูปฤาษีส่วนใต้ดิน ซึ่งได้จากระบบที่ทำการเก็บเกี่ยวที่ระยะ 4, 6 และ 8 wk มีค่า 87.08-173.78, 139.23-398.31 และ 63.04-872.57 mg/kg ตามลำดับ ทั้งนี้ พบว่าเนื้อเยื่อของธูปฤาษีส่วนเหนือดิน ในระบบที่ทำการเก็บเกี่ยวที่ระยะ 6 และ 8 wk ที่ได้จากการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 2 มีค่าความเข้มข้นของ Mn สูงกว่า Mn ในเนื้อเยื่อพืชที่ได้จากการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 1 แต่ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ส่วนเนื้อเยื่อของธูปฤาษีส่วนเหนือดิน ในระบบที่ทำการเก็บเกี่ยวที่ระยะ 4 wk ซึ่งได้จากการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 1 มีค่าความเข้มข้นของ Mn สูงกว่าค่าความเข้มข้นของ Mn ในเนื้อเยื่อของธูปฤาษีที่ได้จากการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 2 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยพบว่า ในการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 1 นั้น ธูปฤาษีในระบบที่ทำการเก็บเกี่ยวที่ระยะ 4 wk มีค่าความเข้มข้นของ Mn ในเนื้อเยื่อสูงกว่า Mn ในเนื้อเยื่อธูปฤาษีส่วนเหนือดินในระบบที่ทำการเก็บเกี่ยวที่ระยะ 8 wk อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P< 0.05$) แต่ไม่แตกต่างทางสถิติเมื่อเทียบกับความเข้มข้นของ Mn ในเนื้อเยื่อของธูปฤาษีส่วนเหนือดินในระบบที่ทำการเก็บเกี่ยวที่ระยะ 6 wk ส่วนในการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 2 พบว่า ความเข้มข้นของ Mn ในเนื้อเยื่อของธูปฤาษีส่วนเหนือดิน ที่ได้จากระบบที่ทำการเก็บเกี่ยวที่ระยะ 6 และ 8 wk มีค่าสูงกว่าความเข้มข้นของ Mn ในเนื้อเยื่อพืชที่ได้จากระบบที่ทำการเก็บเกี่ยวที่ระยะ 4 wk อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P< 0.05$) ขณะที่ความเข้มข้นของ Mn ในเนื้อเยื่อของธูปฤาษีส่วนใต้ดินที่เก็บเกี่ยวจากระบบที่มีระยะการเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกัน มีค่าเฉลี่ยไม่แตกต่างกันทางสถิติ (ตารางที่ 4.5)

ความเข้มข้นของ Fe ในมวลชีวภาพของธูปฤาษีส่วนเหนือดิน ซึ่งเก็บเกี่ยวจากระบบที่ทำการเก็บเกี่ยวที่ระยะ 4, 6 และ 8 wk ในการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 1 มีค่า 63.40-100.08, 55.05-170.93 และ 43.00-102.26 mg/kg ตามลำดับ ส่วนในการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 2 มีค่า 418.16-1,230.13, 720.78-2,970.64 และ 2,188.58-4,041.73 mg/kg ตามลำดับ ขณะที่ความเข้มข้นของ Fe ในมวลชีวภาพของธูปฤาษีส่วนใต้ดินในระบบที่ทำการเก็บเกี่ยวที่ระยะ 4, 6 และ 8 wk มีค่า 13,219.50-23,756.21, 14,788.56-24,484.36 และ 19,483.82-32,087.15 mg/kg ตามลำดับ ทั้งนี้ พบว่าเนื้อเยื่อของธูปฤาษีส่วน

เหนือดิน ซึ่งได้จากการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 2 มีค่าความเข้มข้นของ Fe สูงกว่าค่าความเข้มข้นของ Fe ในเนื้อเยื่อของธูปฤาษีที่ได้จากการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 1 ในทั้ง 3 ระยะเก็บเกี่ยวที่ทำการศึกษา (4, 6 และ 8 wk) และพบว่า ในการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 1 นั้น ความเข้มข้นของ Fe ในเนื้อเยื่อของธูปฤาษีส่วนเหนือดินที่เก็บเกี่ยวจากระบบที่มีระยะการเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกัน มีค่าเฉลี่ยไม่แตกต่างกันทางสถิติ ส่วนในการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 2 พบว่า ธูปฤาษีในระบบที่ทำการเก็บเกี่ยวที่ระยะ 8 wk มีค่าความเข้มข้นของ Fe ในเนื้อเยื่อสูงกว่าความเข้มข้นของ Fe ในเนื้อเยื่อธูปฤาษีในระบบที่ทำการเก็บเกี่ยวที่ระยะ 6 และ 4 wk ตามลำดับ ขณะที่ความเข้มข้นของ Fe ในเนื้อเยื่อของธูปฤาษีส่วนใต้ดินที่เก็บเกี่ยวจากระบบที่มีระยะการเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกัน มีค่าเฉลี่ยไม่แตกต่างกันทางสถิติ (ตารางที่ 4.5)

ตารางที่ 4.5 ความเข้มข้นของ Mn และ Fe ในเนื้อเยื่อพืช ในแต่ละระยะเก็บเกี่ยว

Parameters	Unit	Harvest period		
		Harvesting at 4 wk	Harvesting at 6 wk	Harvesting at 8 wk
Mn concentration	mg/kg			
Aboveground plant				
- first harvest		265.59±40.64^{aA}	245.12±80.85^{ab}	186.76±39.30^{b}
- second harvest		165.77±42.49^{bB}	254.38±68.09^{a}	241.47±57.43^{a}
Underground plant				
- second harvest		130.16±35.84	211.39±97.03	242.55±311.15
Fe concentration	mg/kg			
Aboveground plant				
- first harvest		76.57±16.28^{B}	106.58±45.25^{B}	69.59±27.21^{B}
- second harvest		801.75±278.12^{bA}	1,600.36±763.68^{bA}	3,122.27±834.06^{aA}
Underground plant				
- second harvest		16,951.85±4,389.93	19,452.17±3,326.18	24,857.26±4,934.35

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 $P \geq 0.05$.

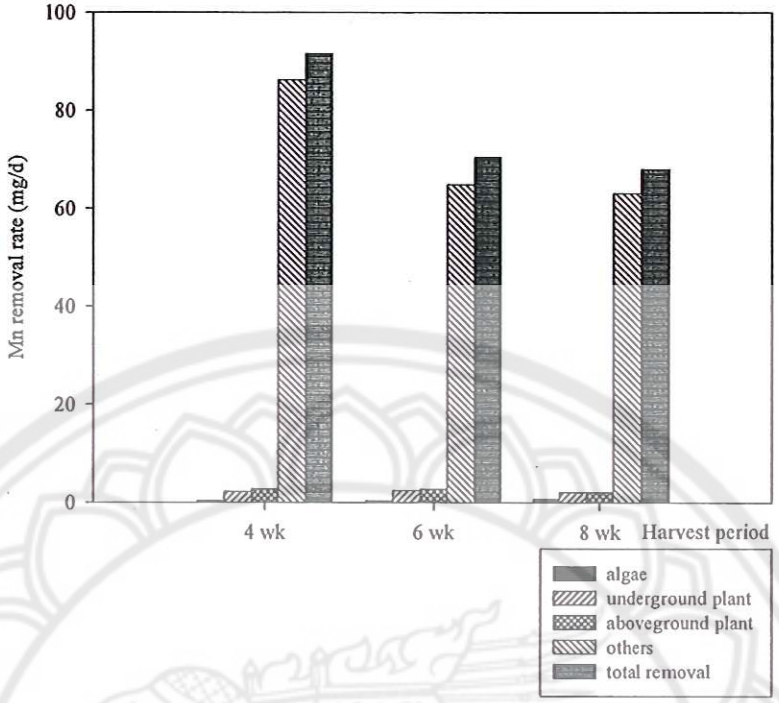
Sample size (n) = 6

4) อัตราการบำบัดแมงกานีสและเหล็ก ขององค์ประกอบในระบบ

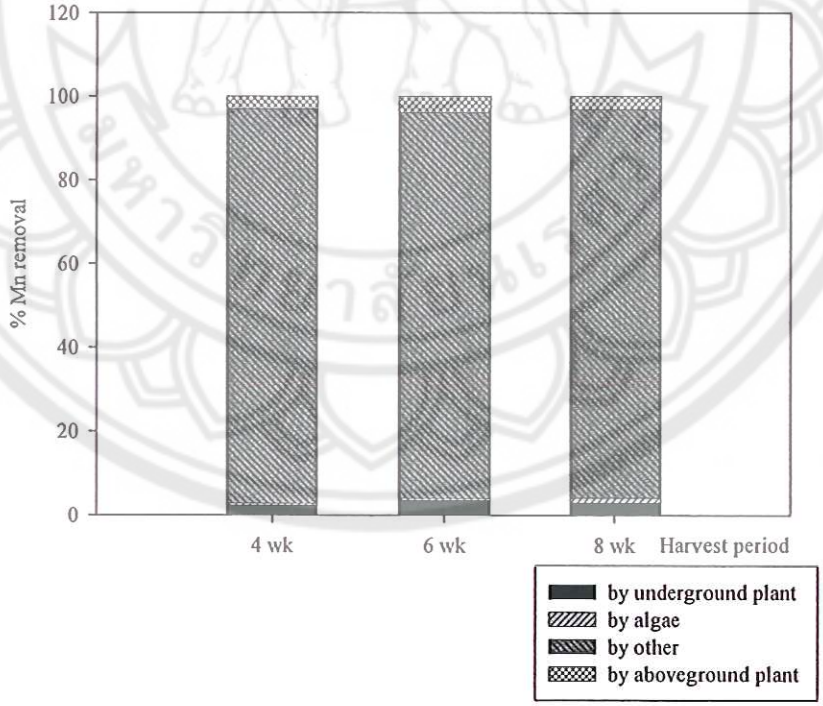
อัตราการบำบัด Total Mn ในน้ำบาดาลของระบบบึงประดิษฐ์ ที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะ 4, 6 และ 8 wk มีค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลาที่ดำเนินระบบ (2 รอบของการเก็บเกี่ยวพืช) เท่ากับ 91.5, 70.4 และ 68.0 mg/d ตามลำดับ ซึ่งพบว่าอัตราการบำบัด Total Mn ในน้ำบาดาล มีค่าลดลงเมื่อระบบมีระยะการเก็บเกี่ยวพืชและมีระยะเวลาในการบำบัดยาวนานขึ้น ขณะที่อัตราการบำบัด Total Fe ในน้ำบาดาล มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อระบบมีระยะการเก็บเกี่ยวพืชและมีระยะเวลาในการบำบัดยาวนานขึ้น โดยระบบบึงประดิษฐ์ ที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะ 4, 6 และ 8 wk มีค่าเฉลี่ยอัตราการบำบัด Total Fe ในน้ำบาดาล ตลอดระยะเวลาที่ดำเนินระบบ (2 รอบของการเก็บเกี่ยวพืช) เท่ากับ 382.8, 429.5 และ 431.9 mg/d ตามลำดับ ซึ่งการบำบัดหรือการลด Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาล ด้วยระบบบึงประดิษฐ์ที่ทำการศึกษานี้ เป็นการบำบัดด้วยการดูดซับ (Absorption) ติดไปกับวัสดุและส่วนต่างๆ ของพืช การบำบัดด้วยกระบวนการดูดดึง (Uptake) โดยพืชที่ปลูกในระบบและพืชสีเขียวขนาดเล็ก ประเภทสาหร่ายและตะไคร้น้ำที่เกิดขึ้นเองในระบบ และการบำบัดด้วยกระบวนการอื่นๆ เช่น การเกิดปฏิกิริยาทางเคมีและเกิดการตกตะกอนลงสู่พื้นท้องน้ำ (Precipitation) เป็นต้น

ผลการศึกษา ได้แสดงถึงอัตราการบำบัดด้วยกระบวนการและองค์ประกอบต่างๆ ภายในระบบที่ทำการศึกษา ดังนี้ อัตราการบำบัด Total Mn ในน้ำบาดาลของระบบบึงประดิษฐ์ ที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะ 4 wk ซึ่งมีค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลาที่ดำเนินระบบ (2 รอบของการเก็บเกี่ยวพืช) เท่ากับ 91.5 mg/d นั้น เป็นการบำบัดโดยการกักเก็บไว้ในส่วนเหนือดินของพืช 1.83-3.73 mg/d คิดเป็น 2.00-4.06 % ของอัตราการบำบัดรวม โดยการกักเก็บไว้ในส่วนใต้ดินของพืช 1.51-2.88 mg/d คิดเป็น 1.64-3.11 % ของอัตราการบำบัดรวม โดยการกักเก็บไว้ในเนื้อเยื่อของพืชสีเขียวขนาดเล็ก 0.26-0.39 mg/d คิดเป็น 0.28-0.43 % ของอัตราการบำบัดรวม และการบำบัดด้วยกระบวนการอื่น ซึ่งได้แก่การตกตะกอนลงสู่พื้นท้องน้ำ การดูดซับติดอยู่ตามขอบผนังของระบบบำบัดและวัสดุอื่นๆ เท่ากับ 86.22-86.28 mg/d คิดเป็น 93.87-94.55 % ของอัตราการบำบัดรวม (ภาพที่ 4.27 และภาพที่ 4.28)

อัตราการบำบัด Total Mn ในน้ำบาดาลของระบบบึงประดิษฐ์ ที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะ 6 wk ซึ่งมีค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลาที่ดำเนินระบบ (2 รอบของการเก็บเกี่ยวพืช) เท่ากับ 70.4 mg/d นั้น เป็นการบำบัดโดยการกักเก็บไว้ในส่วนเหนือดินของพืช 2.70-2.74 mg/d คิดเป็น 3.84-3.90 % ของอัตราการบำบัดรวม โดยการกักเก็บไว้ในส่วนใต้ดินของพืช 1.91-3.00 mg/d คิดเป็น 2.68-4.33 % ของอัตราการบำบัดรวม โดยการกักเก็บไว้ในเนื้อเยื่อของพืชสีเขียวขนาดเล็ก 0.30-0.41 mg/d คิดเป็น 0.42-0.60 % ของอัตราการบำบัดรวม และการบำบัดด้วยกระบวนการอื่นๆ เท่ากับ 63.25-66.47 mg/d คิดเป็น 91.18-93.06 % ของอัตราการบำบัดรวม (ภาพที่ 4.27 และภาพที่ 4.28)



ภาพที่ 4.27 ค่าเฉลี่ยอัตราการบำบัด Mn ของแต่ละองค์ประกอบภายในระบบบึงประดิษฐ์



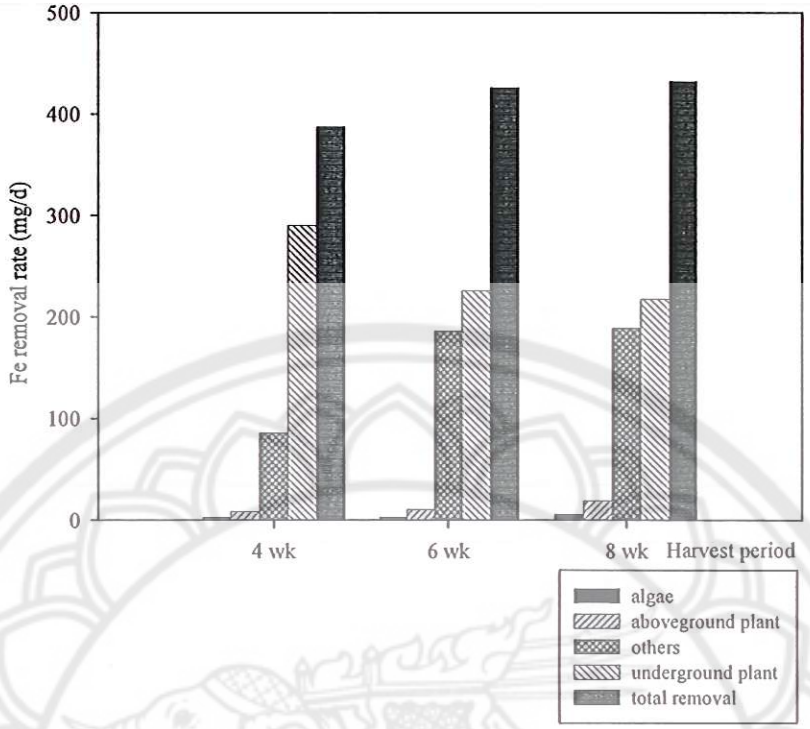
ภาพที่ 4.28 เปอร์เซ็นต์ของอัตราการบำบัด Mn ของแต่ละองค์ประกอบภายในระบบบึงประดิษฐ์

อัตราการบำบัด Total Mn ในน้ำบาดาลของระบบบึงประดิษฐ์ ที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะ 8 wk ซึ่งมีค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลาที่ดำเนินระบบ (2 รอบของการเก็บเกี่ยวพืช) เท่ากับ 68.0 mg/d นั้น เป็นการบำบัดโดยการกักเก็บไว้ในส่วนเหนือดินของพืช 2.09-2.14 mg/d คิดเป็น 3.04-3.19 % ของอัตราการบำบัดรวม โดยการกักเก็บไว้ในส่วนใต้ดินของพืช 1.05-3.03 mg/d คิดเป็น 1.57-4.40 % ของอัตราการบำบัดรวม โดยการกักเก็บไว้ในเนื้อเยื่อของพืชสีเขียวขนาดเล็ก 0.41-1.00 mg/d คิดเป็น 0.60-1.49 % ของอัตราการบำบัดรวม และการบำบัดด้วยกระบวนการอื่นๆ เท่ากับ 62.89-63.37 mg/d คิดเป็น 91.97-93.75 % ของอัตราการบำบัดรวม (ภาพที่ 4.27 และภาพที่ 4.28)

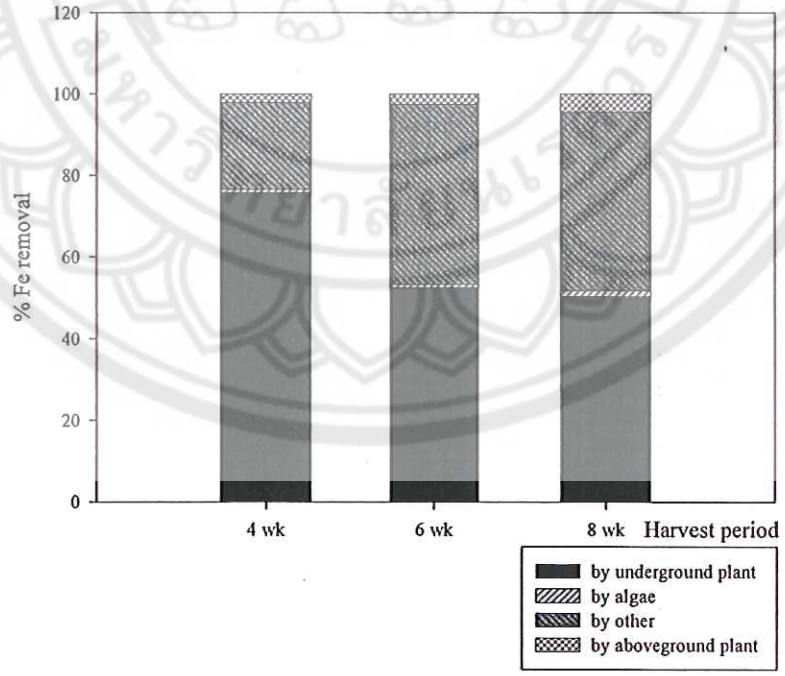
อัตราการบำบัด Total Fe ในน้ำบาดาลของระบบบึงประดิษฐ์ ที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะ 4 wk ซึ่งมีค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลาที่ดำเนินระบบ (2 รอบของการเก็บเกี่ยวพืช) เท่ากับ 382.8 mg/d นั้น เป็นการบำบัดโดยการกักเก็บไว้ในส่วนเหนือดินของพืช 5.60-11.05 mg/d คิดเป็น 1.43-2.94 % ของอัตราการบำบัดรวม โดยกักเก็บไว้ในส่วนใต้ดินของพืช 182.70-397.79 mg/d คิดเป็น 48.68-101.91 % ของอัตราการบำบัดรวม โดยการกักเก็บไว้ในเนื้อเยื่อของพืชสีเขียวขนาดเล็ก 2.39-3.17 mg/d คิดเป็น 0.61-0.85 % ของอัตราการบำบัดรวม และสามารถเกิดการบำบัดด้วยกระบวนการอื่นๆ ได้สูงถึง 178.41 mg/d ซึ่งคิดเป็น 47.53 % ของอัตราการบำบัดรวม (ภาพที่ 4.29 และภาพที่ 4.30)

อัตราการบำบัด Total Fe ในน้ำบาดาลของระบบบึงประดิษฐ์ ที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะ 6 wk ซึ่งมีค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลาที่ดำเนินระบบ (2 รอบของการเก็บเกี่ยวพืช) เท่ากับ 429.5 mg/d นั้น เป็นการบำบัดโดยการกักเก็บไว้ในส่วนเหนือดินของพืช 8.44-12.96 mg/d คิดเป็น 1.98-3.00 % ของอัตราการบำบัดรวม โดยการกักเก็บไว้ในส่วนใต้ดินของพืช 197.55-254.30 mg/d คิดเป็น 46.29-58.84 % ของอัตราการบำบัดรวม โดยการกักเก็บไว้ในเนื้อเยื่อของพืชสีเขียวขนาดเล็ก 1.68-3.62 mg/d คิดเป็น 0.39-0.85 % ของอัตราการบำบัดรวม และการบำบัดด้วยกระบวนการอื่นๆ เท่ากับ 163.21-217.18 mg/d คิดเป็น 37.77-50.89 % ของอัตราการบำบัดรวม (ภาพที่ 4.29 และภาพที่ 4.30)

อัตราการบำบัด Total Fe ในน้ำบาดาลของระบบบึงประดิษฐ์ ที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะ 8 wk ซึ่งมีค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลาที่ดำเนินระบบ (2 รอบของการเก็บเกี่ยวพืช) เท่ากับ 431.9 mg/d นั้น เป็นการบำบัดโดยการกักเก็บไว้ในส่วนเหนือดินของพืช 17.83-20.52 mg/d คิดเป็น 4.26-4.61 % ของอัตราการบำบัดรวม โดยการกักเก็บไว้ในส่วนใต้ดินของพืช 207.37-228.00 mg/d คิดเป็น 49.59-51.17 % ของอัตราการบำบัดรวม โดยการกักเก็บไว้ในเนื้อเยื่อของพืชสีเขียวขนาดเล็ก 4.50-7.32 mg/d คิดเป็น 1.08-1.64 % ของอัตราการบำบัดรวม และการบำบัดด้วยกระบวนการอื่นๆ เท่ากับ 188.46-189.71 mg/d คิดเป็น 42.58-45.07 % ของอัตราการบำบัดรวม (ภาพที่ 4.29 และภาพที่ 4.30)



ภาพที่ 4.29 ค่าเฉลี่ยอัตราการบำบัด Fe ของแต่ละองค์ประกอบภายในระบบบึงประดิษฐ์



ภาพที่ 4.30 เปอร์เซ็นต์ของอัตราการบำบัด Fe ของแต่ละองค์ประกอบภายในระบบบึงประดิษฐ์

ทั้งนี้พบว่า การบำบัด Total Mn และ Total Fe ขององค์ประกอบภายในบึงประดิษฐ์แต่ละระบบ ที่มีระยะเวลาเก็บเกี่ยวพืชที่แตกต่างกัน (4, 6 และ 8 wk) นั้น มีสัดส่วนในการบำบัดของแต่ละกระบวนการหรือแต่ละองค์ประกอบของระบบเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ดังนี้คือ ในการบำบัด Total Mn นั้น พบว่าการบำบัดด้วยกระบวนการทางกายภาพและเคมีมีสัดส่วนของการบำบัดที่สูง รองลงมาเป็นการบำบัดโดยธูปฤาษีที่ปลูกภายในระบบ ซึ่งมีการกักเก็บ Mn ไว้ในเนื้อเยื่อของธูปฤาษีส่วนเหนือดินและส่วนใต้ดินในสัดส่วนที่ใกล้เคียงกัน และมีการกักเก็บไว้ในเนื้อเยื่อของพืชสีเขียวขนาดเล็กในสัดส่วนที่ต่ำรองลงมา ขณะที่ การบำบัด Total Fe ซึ่งในแต่ละระบบการเก็บเกี่ยวพืชมีสัดส่วนการบำบัดของแต่ละองค์ประกอบเป็นไปในทิศทางเดียวกัน เช่นเดียวกันกับที่พบในการบำบัด Total Mn นั้น กลับพบว่าการบำบัดโดยส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากการกักเก็บ Fe ไว้ในเนื้อเยื่อของพืชส่วนใต้ดิน รองลงมาเป็นการบำบัดด้วยกระบวนการทางกายภาพและเคมี และการกักเก็บไว้ในเนื้อเยื่อของพืชส่วนเหนือดิน และการกักเก็บไว้ในเนื้อเยื่อของพืชสีเขียวขนาดเล็กที่เกิดขึ้นเองภายในระบบด้วยสัดส่วนที่ต่ำรองลงมาตามลำดับ

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 ผลของระยะกักพักต่อประสิทธิภาพในการลดเหล็ก และแมงกานีสในน้ำบาดาล

การตรวจวัดคุณภาพน้ำจากบ่อบาดาลในพื้นที่ศึกษาซึ่งเกษตรกรขุดขึ้นเพื่อใช้ในการเกษตรกรรม พบว่า น้ำบาดาลก่อนการปรับปรุงคุณภาพมีค่า Temp เป็นไปตามสภาพธรรมชาติ มีค่า pH อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำผิวดินที่สามารถใช้ในการเกษตรกรรม ซึ่งกำหนดให้มีค่า pH ระหว่าง 5-9 และมีค่าใกล้เคียงกับค่า pH ในน้ำชลประทานที่พบโดยทั่วไป ซึ่งมีค่าระหว่าง 6.5-8.4 (Ayers and Westcot, 1994) น้ำบาดาลก่อนการปรับปรุงมีค่า EC และ TDSในปริมาณใกล้เคียงกับค่า EC และ TDS ที่พบในน้ำผิวดิน ซึ่งมีค่าระหว่าง 150-300 μS/cm และ 100-200 mg/l ตามลำดับ (ประเทือง, 2534) และอยู่ในเกณฑ์ปกติที่พบในน้ำชลประทาน ซึ่งจะมีค่าของ EC และ TDS ระหว่าง 0-3,000 μS/cm และ 0-2,000 mg/l ตามลำดับ (Ayers and Westcot, 1994)

น้ำบาดาลก่อนปรับปรุงคุณภาพ มีค่าของ Total Mn สูงกว่าค่าสูงสุดของ Total Mn ในแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 3 และสูงกว่าเกณฑ์ที่ยอมให้มีในน้ำชลประทาน ซึ่งกำหนดให้น้ำชลประทานไม่ควรมี Total Mn สูงกว่า 0.2 mg/l ซึ่ง Total Mn อาจเป็นพิษต่อพืชได้โดยเฉพาะในพื้นที่ที่เป็นดินกรด (Ayers and Westcot, 1994) ในกรณีของข้าวนั้น หากข้าวได้รับแมงกานีสมากเกินไป ใบแก่จะเกิดจุดสีน้ำตาล ปลายใบแห้ง เมล็ดลีบ และเจริญเติบโตไม่ดีเท่าที่ควร (ประพาส, 2537) ปริมาณ Fe ในน้ำบาดาลก่อนการปรับปรุงมีค่าสูงกว่าค่าที่ยอมให้มีในน้ำชลประทาน ซึ่งกำหนดให้น้ำชลประทานไม่ควรมี Total Fe สูงกว่า 5.0 mg/l ซึ่ง Total Fe สามารถส่งผลทำให้ดินเป็นกรด และสูญเสียปริมาณฟอสฟอรัสและโมลิบดินัมที่เป็นประโยชน์ (Ayers and Westcot, 1994) นอกจากนั้น ความเข้มข้นของเหล็กในสารละลายดินที่สูง จะส่งผลทำให้การดูดโพแทสเซียมของข้าวลดลง โดยความเป็นพิษของธาตุเหล็ก มักเกิดขึ้นกับข้าว ซึ่งปลูกในสภาพน้ำท่วมขัง (ประพาส, 2537)

น้ำจากบ่อบาดาล ซึ่งมี Total Mn และ Total Fe ปนเปื้อนในน้ำ ระหว่าง 1.03-5.32 mg/l และ 0.57-19.46 mg/l ถูกระบายลงสู่ ระบบบึงประดิษฐ์ด้วยอัตราการไหล เท่ากับ 200, 100 และ 50 l/d ซึ่งทำให้น้ำมีระยะการกักพักภายในระบบ เท่ากับ 0.5, 1 และ 2 d ตามลำดับ และทำให้ระบบบึงประดิษฐ์ที่ทำการปรับปรุงคุณภาพน้ำที่ระยะกักพัก 0.5, 1 และ 2 d มีอัตราการรองรับ Total Mn เฉลี่ยเท่ากับ 0.656, 0.331 และ 0.164 $g/m^2/d$ ตามลำดับ และมีอัตราการรองรับ Total Fe เฉลี่ยเท่ากับ 1.043, 0.521 และ 0.261 $g/m^2/d$ ตามลำดับ ภายหลังการปรับปรุงคุณภาพ น้ำมีปริมาณการปนเปื้อน Total Mn และ Total Fe ลดลง โดยน้ำบาดาลที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพที่ระยะกักพัก 0.5, 1 และ 2 d มี Total Mn ปนเปื้อน เฉลี่ยเท่ากับ 0.145, 0.113 และ 0.039 mg/l ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

น้ำผิวดินประเภทที่ 3 (Total Mn $\leq$ 1 mg/l) และอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดให้มีได้ในน้ำชลประทาน (Total Mn $\leq$ 0.2 mg/l) และมี Total Fe ปนเปื้อน เฉลี่ยเท่ากับ 0.700, 0.578 และ 0.512 mg/l ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดให้มีได้ในน้ำชลประทาน (Total Fe $\leq$ 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 % ตามลำดับ การปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาลที่ระยะกักพัก 2 d มีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดความเข้มข้นของ Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาล โดยระบบมีอัตราการบำบัด Total Mn และ Total Fe เท่ากับ 0.050-1.053 $g/m^2/d$ และ 0.008-2.219 $g/m^2/d$ ทั้งนี้ พบว่า การกักพักน้ำที่ระยะกักพัก 0.5 d มีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดปริมาณ Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาล ต่อพื้นที่ต่อช่วงเวลาที่เท่ากัน และพบว่ามีประสิทธิภาพแตกต่างจากการบำบัดที่ระยะกักพัก 1 และ 2 d อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ดังนั้น การปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาลโดยการลดปริมาณ Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาล ด้วยการกักพักน้ำในระบบบึงประดิษฐ์ที่ระยะกักพักเท่ากับ 0.5 d จึงเป็นระยะกักพักที่เหมาะสมในการปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาล เนื่องจากเป็นระยะกักพักที่มีอัตราการบำบัด Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาล ต่อพื้นที่ต่อช่วงเวลาที่เท่ากัน สูงกว่าการบำบัดที่ระยะกักพัก 1 และ 2 d อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ นอกจากนั้น ยังสามารถปรับปรุงคุณภาพน้ำ ทำให้น้ำบาดาลหลังการบำบัดมี Total Fe ปนเปื้อนอยู่ในปริมาณที่ไม่แตกต่างจากการปรับปรุงคุณภาพที่ระยะกักพักอื่น ที่ใช้ระยะเวลายาวนานกว่าในการบำบัด ซึ่งอาจทำให้น้ำที่ได้ภายหลังการปรับปรุงคุณภาพมีปริมาณไม่เพียงพอต่อการนำไปใช้ในการทำนา ซึ่งเป็นกิจกรรมที่ต้องการน้ำในปริมาณมาก

5.1.2 ผลของระยะเก็บเกี่ยวพืชต่อประสิทธิภาพในการลดเหล็ก และแมงกานีสในน้ำบาดาล

1) ประสิทธิภาพในการลดเหล็ก และแมงกานีสในน้ำบาดาล

ประสิทธิภาพของระบบบึงประดิษฐ์ ที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะ 4, 6 และ 8 wk ในการลดความเข้มข้นของ Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาล มีค่าระหว่าง 48.58-99.40 % และ 48.58-98.82 % ทำให้น้ำบาดาลที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพมีค่าความเข้มข้นของ Total Mn และ Total Fe ลดลง โดยมีค่าระหว่าง 0.000-0.106 mg/l และ 0.03-1.89 mg/l ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำเพื่อการชลประทาน โดยระบบมีอัตราการบำบัด Total Mn และ Total Fe ระหว่าง 0.016-0.149 $g/m^2/d$ และ 0.010-0.920 $g/m^2/d$

ประสิทธิภาพการบำบัด Total Mn และ Total Fe ของแต่ละระยะเก็บเกี่ยวไม่แตกต่างกันทางสถิติ โดยมีค่าเฉลี่ยระหว่าง 96.31-97.60 % และ 84.02-86.63 % เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดระหว่างการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 1 กับครั้งที่ 2 ของแต่ละระยะเก็บเกี่ยว พบว่าภายหลังการเก็บเกี่ยวพืชครั้งแรก ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดทั้ง Total Mn และ Total Fe สูงขึ้น และมีค่าแตกต่างกันทางสถิติ โดยในครั้งแรกของการเก็บเกี่ยวระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัด Total Mn และ Total Fe ระหว่าง 75.63-100.00 % และ 48.58-96.82 % ส่วนครั้งที่ 2 ของการเก็บเกี่ยว ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัด Total Mn และ Total Fe ระหว่าง 98.05-100.00 % และ 55.71-99.40 % ซึ่งผลการศึกษาที่พบนี้ได้สนับสนุน ข้อบ่งชี้ในการจัดการระบบบึงประดิษฐ์เพื่อคงประสิทธิภาพของระบบไว้ด้วยการเก็บเกี่ยวพืชออกจากระบบอย่างเหมาะสม

ความเข้มข้นของ Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาลหลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยระบบบึงประดิษฐ์ ที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะ 4, 6 และ 8 wk มีค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลาที่ดำเนินระบบเท่ากับ 0.0210, 0.0208 และ 0.0122 mg/l และ 0.248, 0.278 และ 0.336 mg/l ซึ่งพบว่าความเข้มข้นของ Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาล จากระบบที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะเวลาแตกต่างกัน มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P > 0.05$) ทั้งนี้ พบว่าความเข้มข้นของ Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาลหลังการปรับปรุงคุณภาพ จากทั้ง 3 ระยะเก็บเกี่ยว มีค่าแตกต่างกันระหว่างการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 โดยความเข้มข้นของ Total Mn และ Total Fe ของการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 1 มีค่าระหว่าง 0.1060-0.0080 mg/l และ 0.077-0.798 mg/l และความเข้มข้นของ Total Mn และ Total Fe หลังการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 1 (การเก็บเกี่ยวครั้งที่ 2) มีค่าระหว่าง 0.0000-0.1060 mg/l และ 0.028-1.890 mg/l

อัตราการบำบัด Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาลของระบบบึงประดิษฐ์ ที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะ 4, 6 และ 8 wk มีค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลาที่ดำเนินระบบเท่ากับ 0.092, 0.070 และ 0.068 $g/m^2/d$ และ 0.383, 0.429 และ 0.432 $g/m^2/d$ ซึ่งพบว่าอัตราการบำบัด Total Mn ในน้ำบาดาล ของระบบที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะเวลาแตกต่างกัน มีค่าแตกต่างกันทางสถิติ ($P < 0.05$) โดยพบอัตราการบำบัด Total Mn สูงสุด ในระบบที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ 4 wk รองลงมาคืออัตราการบำบัดของระบบที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ 6 และ 8 wk ซึ่งพบว่าอัตราการบำบัดของทั้งสองระบบนี้ ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ขณะที่อัตราการบำบัด Total Fe ในระบบที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะเวลาแตกต่างกัน ไม่แตกต่างกันทางสถิติ

อัตราการบำบัด Total Mn ของระบบมีค่าแตกต่างกันทางสถิติระหว่างการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 โดยอัตราการบำบัด Total Mn ของการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 มีค่าระหว่าง 0.042-0.128 $g/m^2/d$ และ 0.016-0.149 $g/m^2/d$ โดยอัตราการบำบัด Total Mn ของการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 1 มีค่าสูงกว่าอัตราการบำบัดของการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 2 ในทั้ง 3 ระยะของการเก็บเกี่ยว ส่วนอัตราการบำบัด Total Fe ของระบบที่ทำการเก็บเกี่ยวที่ระยะ 4, 6 และ 8 wk มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติระหว่างการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 1 และ 2 โดยพบว่าอัตราการบำบัดของการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 1 ของระบบที่ทำการเก็บเกี่ยวที่

ระยะ 4 wk มีค่าเฉลี่ยสูงกว่าอัตราการบำบัดเฉลี่ยของการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 2 เล็กน้อย ขณะที่อัตราการบำบัดของการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 2 ของระบบที่ทำการเก็บเกี่ยวที่ระยะ 6 และ 8 wk มีค่าเฉลี่ยสูงกว่าอัตราการบำบัดเฉลี่ยของการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 1

2) อัตราการบำบัดแมงกานีสและเหล็ก ขององค์ประกอบในระบบ

อัตราการบำบัด Total Mn ในน้ำบาดาลของระบบบึงประดิษฐ์ ที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะ 4, 6 และ 8 wk มีค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลาที่ดำเนินระบบ (2 รอบของการเก็บเกี่ยวพืช) เท่ากับ 91.5, 70.4 และ 68.0 mg/d ตามลำดับ ซึ่งพบว่าอัตราการบำบัด Total Mn ในน้ำบาดาล มีค่าลดลง เมื่อระบบมีระยะการเก็บเกี่ยวพืชและมีระยะเวลาในการบำบัดยาวนานขึ้น ขณะที่อัตราการบำบัด Total Fe ในน้ำบาดาล มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระบบมีระยะการเก็บเกี่ยวพืชและมีระยะเวลาในการบำบัดยาวนานขึ้น โดยระบบบึงประดิษฐ์ ที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะ 4, 6 และ 8 wk มีค่าเฉลี่ยอัตราการบำบัด Total Fe ในน้ำบาดาล ตลอดระยะเวลาที่ดำเนินระบบ (2 รอบของการเก็บเกี่ยวพืช) เท่ากับ 382.8, 429.5 และ 431.9 mg/d ตามลำดับ

อัตราการบำบัด Total Mn ในน้ำบาดาลของระบบบึงประดิษฐ์ ที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะ 4 wk ซึ่งมีค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลาที่ดำเนินระบบ (2 รอบของการเก็บเกี่ยวพืช) เท่ากับ 91.5 mg/d นั้น เป็นการบำบัดโดยการกักเก็บไว้ในส่วนเหนือดินของพืช 1.83-3.73 mg/d คิดเป็น 2.00-4.06 % ของอัตราการบำบัดรวม โดยการกักเก็บไว้ในส่วนใต้ดินของพืช 1.51-2.88 mg/d คิดเป็น 1.64-3.11 % ของอัตราการบำบัดรวม โดยการกักเก็บไว้ในเนื้อเยื่อของพืชสีเขียวขนาดเล็ก 0.26-0.39 mg/d คิดเป็น 0.28-0.43 % ของอัตราการบำบัดรวม และการบำบัดด้วยกระบวนการอื่น ซึ่งได้แก่การตกตะกอนลงสู่พื้นท้องน้ำ ถูกดูดซับติดอยู่ตามขอบผนังของระบบบำบัด และวัสดุอื่นๆ เท่ากับ 86.22-86.28 mg/d คิดเป็น 93.87-94.55 % ของอัตราการบำบัดรวม

อัตราการบำบัด Total Mn ในน้ำบาดาลของระบบบึงประดิษฐ์ ที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะ 6 wk ซึ่งมีค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลาที่ดำเนินระบบ (2 รอบของการเก็บเกี่ยวพืช) เท่ากับ 70.4 mg/d นั้น เป็นการบำบัดโดยการกักเก็บไว้ในส่วนเหนือดินของพืช 2.70-2.74 mg/d คิดเป็น 3.84-3.90 % ของอัตราการบำบัดรวม โดยการกักเก็บไว้ในส่วนใต้ดินของพืช 1.91-3.00 mg/d คิดเป็น 2.68-4.33 % ของอัตราการบำบัดรวม โดยการกักเก็บไว้ในเนื้อเยื่อของพืชสีเขียวขนาดเล็ก 0.30-0.41 mg/d คิดเป็น 0.42-0.60 % ของอัตราการบำบัดรวม และการบำบัดด้วยกระบวนการอื่นๆ เท่ากับ 63.25-66.47 mg/d คิดเป็น 91.18-93.06 % ของอัตราการบำบัดรวม

อัตราการบำบัด Total Mn ในน้ำบาดาลของระบบบึงประดิษฐ์ ที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะ 8 wk ซึ่งมีค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลาที่ดำเนินระบบ (2 รอบของการเก็บเกี่ยวพืช) เท่ากับ 68.0 mg/d นั้น เป็นการบำบัดโดยการกักเก็บไว้ในส่วนเหนือดินของพืช 2.09-2.14 mg/d คิดเป็น 3.04-3.19 % ของอัตราการบำบัดรวม โดยการกักเก็บไว้ในส่วนใต้ดินของพืช 1.05-3.03 mg/d คิดเป็น 1.57-4.40 % ของอัตราการบำบัดรวม โดยการกักเก็บไว้ในเนื้อเยื่อของพืชสีเขียวขนาดเล็ก 0.41-1.00 mg/d คิดเป็น

0.60-1.49 % ของอัตราการบำบัดรวม และการบำบัดด้วยกระบวนการอื่นๆ เท่ากับ 62.89-63.37 mg/d คิดเป็น 91.97-93.75 % ของอัตราการบำบัดรวม

อัตราการบำบัด Total Fe ในน้ำบาดาลของระบบบึงประดิษฐ์ ที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะ 4 wk ซึ่งมีค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลาที่ดำเนินระบบ (2 รอบของการเก็บเกี่ยวพืช) เท่ากับ 382.8 mg/d นั้น เป็นการบำบัดโดยการกักเก็บไว้ในส่วนเหนือดินของพืช 5.60-11.05 mg/d คิดเป็น 1.43-2.94 % ของอัตราการบำบัดรวม โดยการกักเก็บไว้ในส่วนใต้ดินของพืช 182.70-397.79 mg/d คิดเป็น 48.68-101.91 % ของอัตราการบำบัดรวม โดยการกักเก็บไว้ในเนื้อเยื่อของพืชสีเขียวขนาดเล็ก 2.39-3.17 mg/d คิดเป็น 0.61-0.85 % ของอัตราการบำบัดรวม และสามารถเกิดการบำบัดด้วยกระบวนการอื่นๆ ได้สูงถึง 178.41 mg/d ซึ่งคิดเป็น 47.53 % ของอัตราการบำบัดรวม

อัตราการบำบัด Total Fe ในน้ำบาดาลของระบบบึงประดิษฐ์ ที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะ 6 wk ซึ่งมีค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลาที่ดำเนินระบบ (2 รอบของการเก็บเกี่ยวพืช) เท่ากับ 429.5 mg/d นั้น เป็นการบำบัดโดยการกักเก็บไว้ในส่วนเหนือดินของพืช 8.44-12.96 mg/d คิดเป็น 1.98-3.00 % ของอัตราการบำบัดรวม โดยการกักเก็บไว้ในส่วนใต้ดินของพืช 197.55-254.30 mg/d คิดเป็น 46.29-58.84 % ของอัตราการบำบัดรวม โดยการกักเก็บไว้ในเนื้อเยื่อของพืชสีเขียวขนาดเล็ก 1.68-3.62 mg/d คิดเป็น 0.39-0.85 % ของอัตราการบำบัดรวม และการบำบัดด้วยกระบวนการอื่นๆ เท่ากับ 163.21-217.18 mg/d คิดเป็น 37.77-50.89 % ของอัตราการบำบัดรวม

อัตราการบำบัด Total Fe ในน้ำบาดาลของระบบบึงประดิษฐ์ ที่มีการเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะ 8 wk ซึ่งมีค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลาที่ดำเนินระบบ (2 รอบของการเก็บเกี่ยวพืช) เท่ากับ 431.9 mg/d นั้น เป็นการบำบัดโดยการกักเก็บไว้ในส่วนเหนือดินของพืช 17.83-20.52 mg/d คิดเป็น 4.26-4.61 % ของอัตราการบำบัดรวม โดยการกักเก็บไว้ในส่วนใต้ดินของพืช 207.37-228.00 mg/d คิดเป็น 49.59-51.17 % ของอัตราการบำบัดรวม โดยการกักเก็บไว้ในเนื้อเยื่อของพืชสีเขียวขนาดเล็ก 4.50-7.32 mg/d คิดเป็น 1.08-1.64 % ของอัตราการบำบัดรวม และการบำบัดด้วยกระบวนการอื่นๆ เท่ากับ 188.46-189.71 mg/d คิดเป็น 42.58-45.07 % ของอัตราการบำบัดรวม

ทั้งนี้พบว่า การบำบัด Total Mn และ Total Fe ขององค์ประกอบภายในบึงประดิษฐ์ แต่ละระบบที่มีระยะเวลาเก็บเกี่ยวพืชที่แตกต่างกัน (4, 6 และ 8 wk) นั้น มีสัดส่วนในการบำบัดของแต่ละกระบวนการหรือแต่ละองค์ประกอบของระบบเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ดังนี้คือ ในการบำบัด Total Mn นั้น พบว่าการบำบัดด้วยกระบวนการทางกายภาพและเคมีมีสัดส่วนของการบำบัดที่สูง รองลงมาเป็นการบำบัดโดยฐปฤาษีที่ปลูกภายในระบบ ซึ่งมีการกักเก็บ Mn ไว้ในเนื้อเยื่อของฐปฤาษีส่วนเหนือดินและส่วนใต้ดินในสัดส่วนที่ใกล้เคียงกัน และมีการกักเก็บไว้ในเนื้อเยื่อของพืชสีเขียวขนาดเล็กในสัดส่วนที่ต่ำรองลงมา ขณะที่ การบำบัด Total Fe ซึ่งในแต่ละระบบการเก็บเกี่ยวพืชมีสัดส่วนการบำบัดของแต่ละองค์ประกอบเป็นไปในทิศทางเดียวกัน เช่นเดียวกันกับที่พบในการบำบัด Total Mn นั้น กลับพบว่าการบำบัดโดยส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากการกักเก็บ Fe ไว้ในเนื้อเยื่อของพืชส่วน

ใต้ดิน รองลงมาเป็นการบำบัดด้วยกระบวนการทางกายภาพและเคมี และการกักเก็บไว้ในเนื้อเยื่อของพืชส่วนเหนือดิน และการกักเก็บไว้ในเนื้อเยื่อของพืชสีเขียวขนาดเล็กที่เกิดขึ้นเองภายในระบบด้วยสัดส่วนที่ต่ำรองลงมาตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

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

5.2.2 ควรทำการศึกษาเพิ่มเติมถึงการใช้ระบบบึงประดิษฐ์ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาลในพื้นที่จริง และศึกษาถึงการนำน้ำที่ผ่านการปรับปรุงไปใช้ประโยชน์ในการทำนาในพื้นที่จริง เพื่อการนำไปประยุกต์ใช้อย่างเหมาะสมต่อไป

5.2.3 ควรศึกษาถึงประสิทธิภาพของระบบและข้อจำกัดของระบบ ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาล หากมีการใช้ระบบอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลายาวนาน

บรรณานุกรม

กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม. 2547. พระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. ๒๕๓๕ และกฎกระทรวง ประกาศกฎกระทรวง ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ออกตามความในพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. ๒๕๓๕ เล่มที่ ๑ (พ.ศ. ๒๕๓๕ - พ.ศ. ๒๕๔๑). กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์ดอกเบี้ย. 41-44.

การประปาภูมิภาค. (ม.ป.ป.). การใช้น้ำบาดาล. สืบค้น28 มิถุนายน 2547, จาก http://www.pwa.co.th/index.html

กิจการ พรหมมา, อมรลักษณ์ ปรีชาหาญ, จรัสดาว คงเมือง, จรัญธร บุญญานุภาพ และวิภา หอมหวล. 2545. ผลกระทบของการใช้น้ำบาดาลบ่อตื้นก่อนและหลังการบำบัดคุณภาพน้ำ ที่มีต่อสภาพแวดล้อมในนาข้าวและชุมชนใกล้เคียง ในเขตจังหวัดพิษณุโลก. คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติ และสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร

กิจการ พรหมมา. 2546. น้ำบาดาลระดับตื้น. คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติ และสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร

คณะอนุกรรมการจัดทำพจนานุกรมธรณีวิทยา. 2530. พจนานุกรมศัพท์ธรณีวิทยาอังกฤษ-ไทย. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ทัศนีย์ อัตตะนันท์. 2543. ดินที่ใช้ปลูกข้าว. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ประจญยุทธ ยิ้มแพร. 2547. การสะสมของเหล็กและแมงกานีสจากน้ำบาดาลเข้าสู่ดินนาและข้าว. วิทยานิพนธ์ สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยนเรศวร

ประเทือง เชาว์วันกลาง. 2534. คุณภาพน้ำทางการประมง. กรุงเทพฯ: หจก. สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซ็นเตอร์.

ประพาส วีระแพทย์. 2537. ปัญหาในนาข้าว. กรุงเทพฯ: ไทยวัฒนาพานิช.

วรชาติ พวงเงิน. 2547. การกำจัดเหล็กในน้ำบาดาลบ่อตื้นโดยใช้วัสดุเหลือใช้จากการทำนา. 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.

Collins, B.S., Sharitz, R.R., Coughlin, D.P. (2005). Elemental composition of native wetland plants in constructed mesocosm treatment wetlands. *Bioresource Technology*, **96**, pp. 937-948.

Demirezen, D. and Aksoy, A. (2006). Common hydrophytes as bioindicators of iron and manganese pollutions. *Ecological Indicators*, **6**, pp. 388-393.

Denny, P. (1987). Mineral cycling by wetland plants-a review. *Archiv fur Hydrobiologie Beih.* **27**, pp. 1-25.

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.

Greenway, M. (1997). Nutrient content of wetland plants in constructed wetlands receiving municipal effluent in tropical Australia. *Water Science and Technology*, **35**, pp. 135-142.

Hosoi, Y., Kido, Y., Miki, M. and Sumida M. (1998). Field examination on reed growth, harvest and regeneration for nutrient removal. *Water Science and Technology*. **38**, pp. 351-359.

ITRC. (2003). *Technical and Regulatory Guidance Document for Constructed Treatment Wetlands.* The Interstate Technology and Regulatory Council Wetland Team.

Kadlec, R.H. and Knight, R.L. (1996). *Treatment Wetlands*. Lewis Publishers, Florida.

Karathanasis, A.D and Thompson, Y.L. (1995). Mineralogy of iron precipitation in a constructed acid mine drainage wetland. *American Journal of Soil Science*, **59**, pp. 1773-1781.

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.

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. (1988). A review of heavy metal removal mechanisms in wetlands. *African Journal for Tropical Hydrobiology and Fisheries*. **8**, pp. 23-35.

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.

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.

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.

Williams, J.B. (2002). Phytoremediation in wetland ecosystems: progress, problem, and potential. *Critical Reviews in Plant Sciences*. **21**, pp. 607-635.

Output ที่ได้จากโครงการ

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

พันธ์ทิพย์ กล่อมเจ๊ก. (2553). การประยุกต์ใช้ระบบบึงประดิษฐ์ในการลดเหล็กและแมงกานีสในน้ำบาดาล. วิทยาศาสตร์ มข., 38, *In Press*.

ภาคผนวก

Manuscript บทความวิจัยที่เผยแพร่ในวารสารวิชาการระดับชาติ

วารสารวิทยาศาสตร์ มข.
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น 40002
KKU SCIENCE JOURNAL
FACULTY OF SCIENCE, KHON KAEN UNIVERSITY, KHON KAEN 40002, THAILAND
โทรศัพท์ 0 4320 2372 โทรสาร 0 4320 2371 E-mail : kku_scijournal@kku.ac.th

ที่ ศธ 0514.2.1/วสว. 989 วันที่ 17 มีนาคม 2553

เรื่อง รับรองการตีพิมพ์ในวารสารวิทยาศาสตร์ มข.

เรียน อ.ดร.พันธ์ทิพย์ กล่อมเจ๊ก

กองบรรณาธิการวารสารวิทยาศาสตร์ มข. ขอรับรองว่า บทความทางวิชาการ เรื่อง "การประยุกต์ใช้ระบบบึงประดิษฐ์ในการลดเหล็กและแมงกานีสในน้ำบาดาล (Applications of constructed wetland for removal of iron and manganese in groundwater)" โดย อ.ดร.พันธ์ทิพย์ กล่อมเจ๊ก ได้ผ่านขั้นตอนการตรวจสอบจากผู้ทรงคุณวุฒิแล้ว และจะได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิทยาศาสตร์ มข. ฉบับที่ 2 ปีที่ 38 ซึ่งมีกำหนดออกภายในเดือนมิถุนายน ปี พ.ศ. 2553

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ

ขอแสดงความนับถือ

(รองศาสตราจารย์สมปอง ธรรมศิริรักษ์)
บรรณาธิการวารสารวิทยาศาสตร์ มข.

การประยุกต์ใช้ระบบบึงประดิษฐ์ในการลดเหล็กและแมงกานีสในน้ำบาดาล

Applications of constructed wetland for removal of iron and manganese in groundwater

พันธ์ทิพย์ กล่อมเจ๊ก

บทคัดย่อ

ระบบบำบัดแบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ธูปฤาษีเป็นพืชในการบำบัดถูกสร้างขึ้น เพื่อศึกษาถึงผลของระยะการกักพักน้ำต่อประสิทธิภาพในการบำบัดเหล็กและแมงกานีสในน้ำบาดาล โดยน้ำบาดาลถูกระบายลงสู่ระบบที่อัตรา 200 100 และ 50 l/d ทำให้น้ำบาดาลมีระยะการกักพักอยู่ในระบบ 0.5 1 และ 2 วัน ตามลำดับ น้ำบาดาลก่อนการบำบัด มีค่า pH 6.7-8.9 ค่า DO 2.6-3.6 mg/l ค่า EC 203.0-249.0 µS/cm ค่า TDS 102.0-123.0 mg/l มี Fe และ Mn เท่ากับ 0.57-19.46 และ 1.03-5.32 mg/l ตามลำดับ ซึ่งทำให้ระบบบำบัดมีอัตราการรองรับ Fe และ Mn เท่ากับ 0.028-3.891 และ 0.052-1.065 $g/m^2/d$ ตามลำดับ ความเข้มข้นของ Fe และ Mn ในน้ำบาดาลภายหลังการบำบัด มีค่า 0.027-2.236 และ 0.005-0.897 mg/l ตามลำดับ ทั้งนี้ ระบบมีประสิทธิภาพในการลดความเข้มข้นของ Fe และ Mn ในน้ำบาดาล โดยเฉลี่ย 79.2-86.4 และ 94.0-98.8 % ตามลำดับ โดยระบบที่ทำการบำบัดด้วยระยะกักพัก 2 วัน มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการลดความเข้มข้นของ Fe และ Mn แต่ไม่แตกต่างทางสถิติกับการบำบัดที่ระยะกักพักอื่น ข้อมูลจากการศึกษาได้นำมาใช้สร้างสมการทางคณิตศาสตร์ในการอธิบายประสิทธิภาพของระบบในการบำบัด Fe และ Mn ในรูปของสมการสหสัมพันธ์ถดถอย (Regression) และสมการปฏิกิริยาลำดับหนึ่ง (First-order kinetics) ทั้งนี้ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Pearson correlation) ระหว่างอัตราการบำบัด Fe และ Mn ที่ตรวจวัดได้และอัตราการบำบัดที่คำนวณด้วยสมการ Regression มีค่าเท่ากับ 0.994 และ 0.996 ตามลำดับ ส่วนค่า Pearson correlation ระหว่างอัตราการบำบัด Fe และ Mn ที่ตรวจวัดได้และอัตราการบำบัดที่คำนวณด้วยสมการ First-order kinetics มีค่าเท่ากับ 0.993 และ 0.996 ตามลำดับ การทดสอบด้วยสถิติ Paired t-test พบว่าอัตราการบำบัดที่ได้จากการตรวจวัดและอัตราการบำบัดที่ได้จากการคาดการณ์ด้วยสมการทั้งสองรูปแบบ มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ

คำสำคัญ: การบำบัดเหล็ก การบำบัดแมงกานีส น้ำบาดาล บึงประดิษฐ์ แบบจำลองในการคาดการณ์

ภาควิชาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติ และสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร อ. เมือง จ. พิษณุโลก 65000

Abstract

Constructed wetlands planted with cattails (*Typha angustifolia*) were conducted to evaluate the effect of hydraulic retention time (HRT) on the efficiency of iron (Fe) and manganese (Mn) removal from groundwater. The groundwater was fed into the system at 200, 100, and 50 l/d resulting in the HRT of 0.5, 1, and 2 days, respectively. The characteristics of untreated groundwater were: 6.7-8.9 for pH, 2.6-3.6 mg/l for DO, 203.0-249.0 µS/cm for EC, 102.0-123.0 mg/l for TDS, and 0.57-19.46 and 1.03-5.32 mg/l of total Fe and total Mn, respectively. Fe and Mn loading rates were 0.028-3.891 and 0.052-1.065 $g/m^2/d$, respectively. Fe and Mn concentrations in the effluent were 0.027-2.236 and 0.005-0.897 mg/l, respectively. Average efficiencies of the system for reduction of Fe and Mn in term of concentrations were 79.2-86.4 and 94.0-98.8 %, respectively. The system operated at 2 days of HRT showed the highest efficiency for reduction of Fe and Mn concentrations. However, this was not significant differences between HRT variations. Experimental data were used to establish regression and first-order kinetics model in order to describe the effectiveness of the system for Fe and Mn elimination. The Pearson correlation between observed rate and calculated rate for Fe and Mn removal obtained from the regression model were found to be 0.994 and 0.996, respectively. Similarly, the Pearson correlation between observed rate and calculated rate for Fe and Mn removal achieved from the first-order kinetics model were 0.994 and 0.996, respectively. Paired t-test analysis showed no significant differences between observed removal rates and predicted removal rates.

Key words: Iron removal, Manganese removal, Groundwater, Constructed wetland, Prediction model

บทนำ

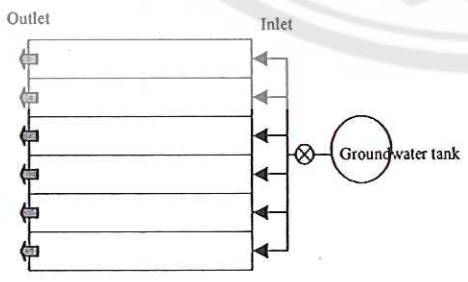
น้ำเป็นปัจจัยพื้นฐานในการดำรงชีวิต และถูกใช้ในกระบวนการผลิตทั้งทางด้านการเกษตรและอุตสาหกรรม ดังนั้นความต้องการใช้น้ำจึงมีมากและมีอย่างต่อเนื่อง ปัญหาการขาดแคลนน้ำที่พบในบางพื้นที่และบางช่วงเวลา ทำให้มีการเสาะหาทรัพยากรน้ำจากแหล่งต่างๆ มาใช้ รวมถึงน้ำบาดาล ซึ่งเป็นน้ำตามธรรมชาติที่ถูกกักเก็บไว้ใต้ดิน โดยทั่วไปน้ำบาดาลมักมีสิ่งเจือปนในปริมาณน้อย เนื่องจากได้ผ่านการกรองด้วยชั้นดินและหินตามธรรมชาติ อย่างไรก็ตาม พบว่าน้ำบาดาลในบางพื้นที่ มีการปนเปื้อนโลหะหนักบางประเภทในปริมาณสูง โดยเฉพาะการปนเปื้อนเหล็ก ซึ่งพบในพื้นที่ที่ดินมีเหล็กปริมาณสูงเป็นองค์ประกอบอยู่ เช่น น้ำบาดาลในพื้นที่ภาคเหนือตอนล่างของประเทศ เช่นในจังหวัดพิษณุโลก (ชัยวัฒน์ สุขดี, 2544; กิจการ พรหมมา และคณะ, 2545) ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีการใช้น้ำบาดาลในการทำนาในปริมาณสูงโดยเฉพาะในช่วงฤดูแล้ง ซึ่งการนำน้ำบาดาลที่มีเหล็กปนเปื้อนสูงมาใช้นั้น จะทำให้เหล็กเกิดการตกตะกอนและสะสมอยู่ในพื้นที่นา ทำให้ดินนาเสื่อมคุณภาพ ทั้งนี้ ประจญยุทธ ยิ้มแพร (2547) พบว่าอัตราการสะสมของเหล็กในดินนา ในพื้นที่อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก มีค่าเท่ากับ 10.90 kg/rai/yr โดยเป็นเหล็กที่ตกตะกอนจากน้ำบาดาลถึง 10.55 kg/rai/yr ขณะที่พบว่า ข้าวที่แช่อยู่ในน้ำที่มีเหล็กสูงมากกว่า 5-10 mg/l นั้น รากของข้าวจะปลดปล่อยก๊าซออกซิเจนเพื่อลดความเป็นพิษของเหล็ก ซึ่งจะทำให้เกิดคราบสนิมเหล็กเคลือบอยู่ที่รากของข้าว ส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับธาตุอาหารของข้าวลดลง และแม้เกษตรกรจะเพิ่มปุ๋ยลงในนา ก็ไม่สามารถเพิ่มผลผลิตได้อย่างที่ควรเป็น (กิจการ พรหมมา, 2546) ทั้งนี้อาการเหล็กเป็นพิษต่อข้าวนั้น จะสังเกตได้จากการเกิดจุดสีน้ำตาลขนาดเล็กบนใบล่างของ

ข้าว เริ่มจากปลายใบและขยายสู่ส่วนฐานของใบ จากนั้นจุดจะขยายขนาดรวมกันในเนื้อใบ ใบจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลส้ม และตายในที่สุด นอกจากนั้น อาจพบว่าใบข้าวมีขนาดแคบกว่าปกติ รากข้าวอาจเปลี่ยนสีและตาย เนื่องจากมีออกไซด์ของเหล็กซึ่งมีสีน้ำตาลเข้มหรือสีดำจับที่ผิวราก ต้นข้าวหยุดชะงักการเจริญเติบโตและแตกกอลดลง (ทัศนีย์ อัตตะนันทน์, 2543 อ้างใน กิจการ พรหมมา และคณะ, 2545) ส่งผลให้ผลผลิตข้าวลดลง และไม่คุ้มค่าต่อการลงทุน ทั้งนี้ กิจการ พรหมมา และคณะ (2545) ระบุว่า การใช้น้ำบาดาลบ่อตื้นที่มีปริมาณเหล็กสูง ยังอาจก่อให้เกิดปัญหากับคุณภาพดิน โดยเกษตรกรในพื้นที่ที่มีการใช้น้ำดังกล่าว พบว่าเนื้อดินมีความเหนียวแข็ง และมีความร่วนเพิ่มมากขึ้น และยังพบว่าข้าวเป็นโรคเพิ่มมากขึ้น โดยพบโรคใบไหม้ ใบเป็นสีเหลือง เป็นจุดสีน้ำตาล และโรครากดำ ซึ่งอาการคล้ายคลึงกับอาการเหล็กเป็นพิษในดิน ในขณะที่ แมงกานีสที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมในปริมาณสูงสามารถส่งผลต่อข้าวได้เช่นกัน โดยจะทำให้เกิดจุดสีน้ำตาลเหลืองที่ใบข้าว ข้าวมีอาการแคระแกร็น มีการแตกกอและให้ผลผลิตลดลง (International Rice Research Institute, 2003)

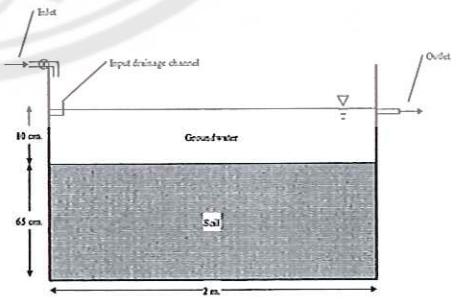
การปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาลก่อนนำมาใช้ประโยชน์ จะช่วยลดปัญหาการสะสมเหล็กและโลหะหนักอื่นที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำบาดาลของดิน ช่วยลดปัญหาต่อเนื่องที่เกิดจากการสะสมนั้น และทำให้การนำน้ำบาดาลมาใช้สามารถก่อเกิดประโยชน์อย่างสูงสุด คุ้มค่าต่อการลงทุน โดยไม่ก่อผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมข้างเคียง ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอแนวทางในปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาล โดยการลดปริมาณเหล็กและแมงกานีสในน้ำบาดาลด้วยระบบบึงประดิษฐ์ ซึ่งเป็นระบบที่ดำเนินการได้ง่าย และเกษตรกรสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริง เป็นแนวทางที่ก่อประโยชน์ให้กับเกษตรกรและช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อม

วิธีดำเนินงาน

จัดทำหน่วยทดลองระบบบึงประดิษฐ์ (Constructed wetland) ขนาด 0.50 x 2 x 0.8 ม. บรรจุดิน ซึ่งใช้เป็นตัวกลางในการปลูกพืชและการบำบัด ลงในแต่ละหน่วยทดลอง จนสูง 65 ซม. จากก้นแปลง ติดตั้งทางระบายน้ำเข้าและออกจากแปลง (ภาพที่ 1) จากนั้น ปลูกธูปฤาษี (*Typha angustifolia*) ลงในหน่วยทดลอง ที่ความหนาแน่น 20 ต้น/ตร.ม. รดด้วยน้ำประปา จนพืชสามารถปรับตัวและเจริญเติบโตจนมีความสูงประมาณ 20 ซม. จึงระบายน้ำประปาลงสู่หน่วยทดลองอย่างต่อเนื่อง โดยให้น้ำในระบบมีความสูง 10 ซม. จากผิวหน้าวัสดุปลูก (Water depth) และมีระยะการกักพักในระบบ (Hydraulic retention time: HRT) เท่ากับ 0.5 1 และ 2 วัน โดยศึกษาที่ระยะกักพักละ 2 หน่วยทดลอง (ซ้ำ) เมื่อพืชสามารถปรับสภาพและเจริญเติบโตได้ จึงตัดพืชให้มีความสูงเท่ากันที่ 15 ซม. แล้วจึงระบายน้ำบาดาลที่มีเหล็กปนเปื้อนลงสู่หน่วยทดลองแทนน้ำประปา และดำเนินการในลักษณะเดียวกันอย่างต่อเนื่อง ทำการตรวจสอบและควบคุมอัตราการไหลของน้ำในระบบด้วยการตวงวัดปริมาตรน้ำเข้าออกต่อช่วงเวลาเป็นประจำทุกวัน



a) ภาพด้านบนของระบบบึงประดิษฐ์



b) ภาพด้านข้างของระบบบึงประดิษฐ์

ภาพที่ 1 ระบบบึงประดิษฐ์

เก็บตัวอย่างน้ำบาดาลที่ระบายเข้าสู่ระบบ (Influent) และตัวอย่างน้ำที่ผ่านระบบ (Effluent) ภายหลังจากน้ำบาดาลได้ถูกบำบัดในระบบที่ระยะการกักพักตามข้อกำหนดการศึกษา คือ 0.5 1 และ 2 วัน โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำทุกสัปดาห์ ตลอดระยะเวลาดำเนินระบบ ทำการวิเคราะห์ค่าเหล็ก (Total Fe) ค่าแมงกานีส (Total Mn) ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer วิเคราะห์ค่าของแข็งละลาย (TDS) และค่าความนำไฟฟ้า (EC) ด้วยเครื่อง Conductivity meter ตรวจวัดค่าออกซิเจนละลาย (DO) ด้วย Membrane electrode meter (DO meter) ตรวจวัดค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) ของตัวอย่างน้ำด้วย Electrometric method (pH meter) โดยใช้วิธีการในการเก็บตัวอย่าง รักษาตัวอย่าง และวิธีการหรือเครื่องมือในการวิเคราะห์ตัวอย่างตามที่กำหนดไว้ใน Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA, WPCF, 1992)

วิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบในการลดปริมาณเหล็กและแมงกานีสในน้ำบาดาล ในรูปร้อยละของการบำบัด และความเข้มข้นของเหล็กในน้ำบาดาลภายหลังการบำบัด เปรียบเทียบประสิทธิภาพและความแตกต่างทางสถิติในการบำบัดเหล็กและแมงกานีสของแต่ละระยะกักพัก ด้วย DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 นำผลการศึกษาสร้างสมการในการคาดการณ์ประสิทธิภาพของระบบและเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างอัตราการบำบัดที่ได้จากการตรวจวัดและอัตราการบำบัดที่ได้จากสมการคาดการณ์ ด้วยสถิติ Pair t-test

ผลการวิเคราะห์

1. ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบบึงประดิษฐ์

น้ำบาดาลที่ทำการศึกษา เป็นน้ำจากบ่อบาดาลที่เกษตรกรขุดขึ้นเพื่อใช้ในการเกษตรกรรม ผลการตรวจวัดคุณภาพน้ำ พบว่าน้ำบาดาลก่อนบำบัดมีค่า pH, DO, EC, TDS, Total Mn และ Total Fe เท่ากับ 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 1)

น้ำบาดาลที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพน้ำด้วยระบบบึงประดิษฐ์ที่มีอัตราการรองรับ Total Mn และ Total Fe เท่ากับ 0.052-1.065 และ 0.028-3.891 $g/m^2/d$ มีปริมาณของ Total Mn และ Total Fe ปนเปื้อนลดลง โดยพบ Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาลภายหลังการบำบัดเท่ากับ 0.005-0.897 และ 0.027-2.236 mg/l ตามลำดับ (ตารางที่ 1) ระบบมีประสิทธิภาพในการลดความเข้มข้นของ Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาล เท่ากับ 46.42-99.84 และ 9.02-98.89 % ตามลำดับ ทั้งนี้พบว่า การบำบัดที่ระยะกักพัก 2 วัน มีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดความเข้มข้นของ Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาล แต่ไม่แตกต่างทางสถิติเมื่อเทียบกับการบำบัดที่ระยะกักพักอื่น โดยระบบบึงประดิษฐ์มีอัตราการบำบัด Total Mn และ Total Fe เท่ากับ 0.050-1.053 และ 0.008-2.219 $g/m^2/d$ ตามลำดับ ทั้งนี้ พบว่า การบำบัดที่ระยะกักพัก 0.5 วัน มีประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัดหรือลดปริมาณ Total Mn และ Total Fe ในน้ำบาดาล และมีค่าแตกต่างจากการบำบัดที่ระยะกักพัก 1 และ 2 วัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 2) การลดลงของ Total Mn และ Total Fe สัมพันธ์กับค่า EC และ TDS ซึ่งมีค่าลดลงในน้ำที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ ขณะที่ DO และ pH ในน้ำที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ ออกซิเจนในน้ำจะส่งผลทำให้ Mn และ Fe ตกตะกอนได้ดี (กรรณิการ์ สิริสิงห, 2549) และจะตกตะกอนได้ดี เมื่อ pH ในน้ำมีค่าเป็นด่าง (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2539)

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของน้ำบาดาลก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยระบบบึงประดิษฐ์

ดัชนี	หน่วย	น้ำบาดาลก่อนการปรับปรุงคุณภาพ	น้ำบาดาลหลังการปรับปรุงคุณภาพ		
			ระยะกักพัก 0.5 วัน	ระยะกักพัก 1 วัน	ระยะกักพัก 2 วัน
pH	-	7.40±0.7c (17)	9.02±0.6a (36)	7.76±0.6b (40)	7.98±0.5b (40)
DO	mg/l	2.97±0.4b (8)	3.41±0.2a (20)	3.36±0.3a (20)	3.35±0.4a (20)
EC	µS/cm	217.6±10.0a (20)	180.6±20.9c (36)	219.8±15.6a (40)	205.6±33.4b (40)
TDS	mg/l	108.8±4.7a (20)	90.5±11.3b (36)	112.6±20.0a (40)	107.5±18.1a (40)
Total Fe	mg/l	5.21±4.3a (40)	0.70±0.4b (33)	0.58±0.4b (36)	0.51±0.5b (35)
Total Mn	mg/l	3.27±1.1a (40)	0.15±0.2b (36)	0.11±0.1b (39)	0.04±0.0b (38)

หมายเหตุ: ตัวเลขในตารางคือ ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าในวงเล็บคือจำนวนตัวอย่าง ค่าเฉลี่ยในแต่ละแถวที่ตามด้วยอักษรภาษาอังกฤษที่เหมือนกัน ไม่แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ เท่ากับ 0.05

ตารางที่ 2 ประสิทธิภาพในการบำบัด Total Fe และ Total Mn ของระบบบึงประดิษฐ์

ระยะกักพักที่กำหนด (d)	ระยะกักพักจริง (d)	การบำบัด Total Fe				การบำบัด Total Mn			
		ประสิทธิภาพการบำบัด (%)	AAR ($g/m^2/d$)	FOR (m/d)	จำนวนตัวอย่าง	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)	AAR ($g/m^2/d$)	FOR (m/d)	จำนวนตัวอย่าง
0.5	0.44	79.21	0.801a	0.381a	33	93.98b	0.628a	0.695a	36
1	0.77	83.18	0.513b	0.229b	36	96.44ab	0.320b	0.373b	39
2	1.43	86.37	0.267c	0.128c	35	98.82a	0.165c	0.234c	38
P-value		0.284	0.000	0.000		0.005	0.000	0.000	

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยในแต่ละคอลัมน์ที่ตามด้วยอักษรภาษาอังกฤษที่เหมือนกัน ไม่แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ เท่ากับ 0.05

AAR = Area adjusted removal (อัตราการบำบัด)

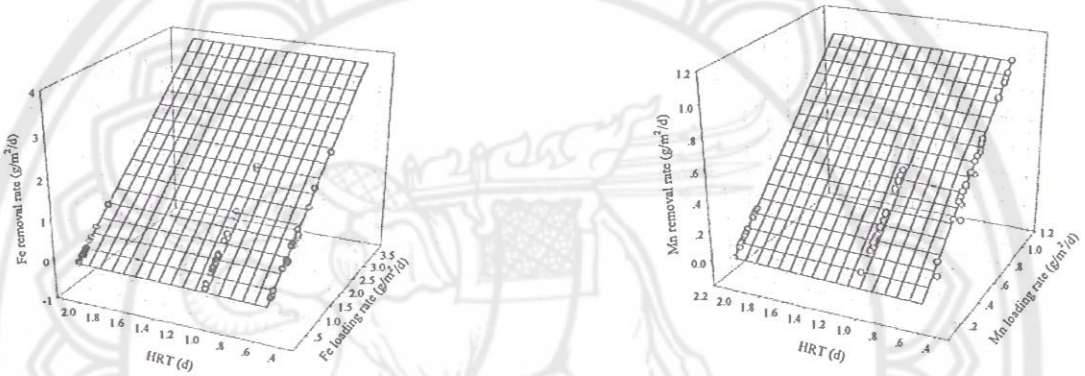
FOR = First order kinetics removal (อัตราการบำบัดของปฏิกิริยาลำดับหนึ่ง)

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการคาดการณ์ประสิทธิภาพการบำบัด

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

2.1 Regression model

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



a) การบำบัด Fe b) การบำบัด Mn

ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการรองรับ ระยะกักพัก และอัตราการบำบัด

$y = 0.9714X_1 + 0.0575X_0 - 0.1238$, for Fe removal $R^2 = 0.9871$ _____(สมการที่ 1)

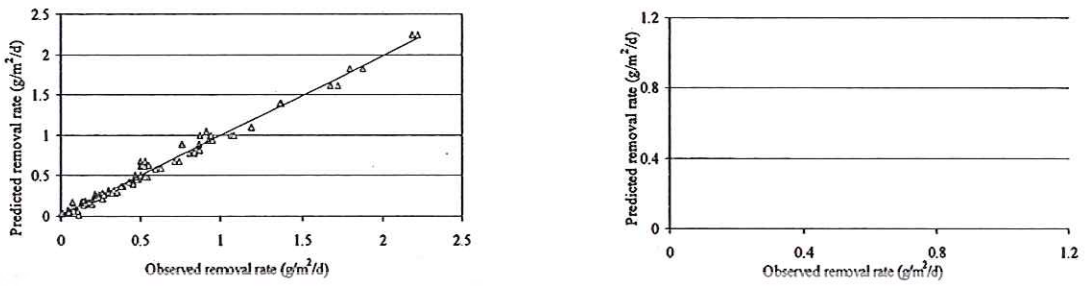
$y = 1.0105X1 + 0.0198X_0 - 0.0411$, for Mn removal $R^2 = 0.9930$ _____(สมการที่ 2)

เมื่อ y = Removal rate (g/m^2/d)

X_1 = Loading rate (g/m^2/d)

X_0 = Hydraulic retention time (d)

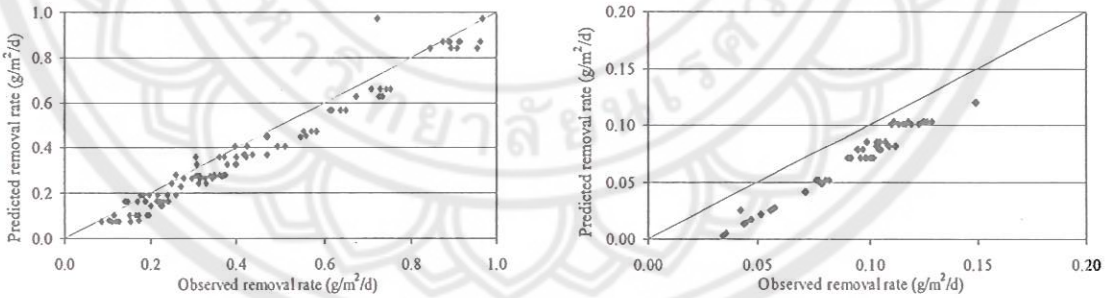
ทั้งนี้ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Pearson correlation) ระหว่างอัตราการบำบัดที่ตรวจวัดได้ซึ่งเป็นชุดข้อมูลที่ใช้ในการกำหนดสมการ กับอัตราการบำบัด Fe และ Mn ที่คำนวณจากสมการที่ 1 และ 2 (ภาพที่ 3) มีค่าเท่ากับ 0.994 และ 0.996 ตามลำดับ โดยอัตราการบำบัดจากการตรวจวัดมีค่าเฉลี่ยสูงกว่าอัตราการบำบัด Fe และ Mn ที่ได้จากสมการ เท่ากับ 1.6×10^{-5} และ 2.0×10^{-5} g/m^2/d ตามลำดับ การทดสอบ Pair t-test ระหว่างอัตราการบำบัดที่ตรวจวัดได้และอัตราการบำบัดจากการคำนวณ ทั้งการบำบัด Fe และ Mn พบว่าไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05



a) การบำบัด Fe b) การบำบัด Mn

ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการบำบัดจากการตรวจวัด และอัตราการบำบัดจากการคำนวณด้วยสมการสหสัมพันธ์

ข้อมูลจากการศึกษาการบำบัด Fe และ Mn ในน้ำบาดาลด้วยระบบบำบัดประเภทเดียวกันนี้ ซึ่งเป็นการศึกษาในประเด็นอื่น ได้นำมาใช้ทดสอบประสิทธิภาพของสมการที่ 1 และ 2 ในการคาดการณ์อัตราการบำบัด (Model validation) ซึ่งผลการศึกษาพบว่าอัตราการบำบัด Fe และ Mn ที่ได้จากการคำนวณ โดยส่วนใหญ่มีค่าต่ำกว่าค่าจากการตรวจวัด (ภาพที่ 4) และแตกต่างกันทางสถิติ โดยค่าเฉลี่ยของอัตราการบำบัด Fe และ Mn ที่ได้จากการคำนวณ มีค่าต่ำกว่าค่าเฉลี่ยของอัตราการบำบัดที่ได้จากการตรวจวัดจริง 0.0486 และ 0.0269 $g/m^2/d$ ตามลำดับ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Pearson correlation) ระหว่างอัตราการบำบัดที่ตรวจวัดจริงและอัตราการบำบัดจากการคำนวณ สำหรับการบำบัด Fe และ Mn มีค่าเท่ากับ 0.982 และ 0.992 ตามลำดับ ส่วนค่า R-Squared ระหว่างอัตราการบำบัดที่ตรวจวัดจริงและอัตราการบำบัดจากการคำนวณ สำหรับการบำบัด Fe และ Mn มีค่าเท่ากับ 0.965 และ 0.984 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบเป็นข้อมูลจากระบบบึงประดิษฐ์ที่ทำการบำบัดน้ำที่ระยะกักพักเท่ากับ 0.5 วัน เท่านั้น



a) การบำบัด Fe b) การบำบัด Mn

ภาพที่ 4 การทดสอบประสิทธิภาพของสมการสหสัมพันธ์ ในการคาดการณ์อัตราการบำบัด

2.2 First order kinetics model

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 Fe และ Mn ในน้ำบาดาลของระบบ สร้างเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $ln\frac{C_e}{C}$ และ t (HRT) ดังแสดงในภาพที่ 5 จึงได้สมการความสัมพันธ์ที่ 5 ถึง 6 และสมการที่ 7 ถึง 8 สำหรับการบำบัด Fe และ Mn ตามลำดับ ซึ่งพบว่าค่า K_T ของการบำบัด Fe มีค่าเท่ากับ 0.4186 ต่อวัน ดังแสดงในสมการที่ 5 และค่า K_T ของการบำบัด Mn มีค่าเท่ากับ 0.8235 ต่อวัน ดังแสดงในสมการที่ 7

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

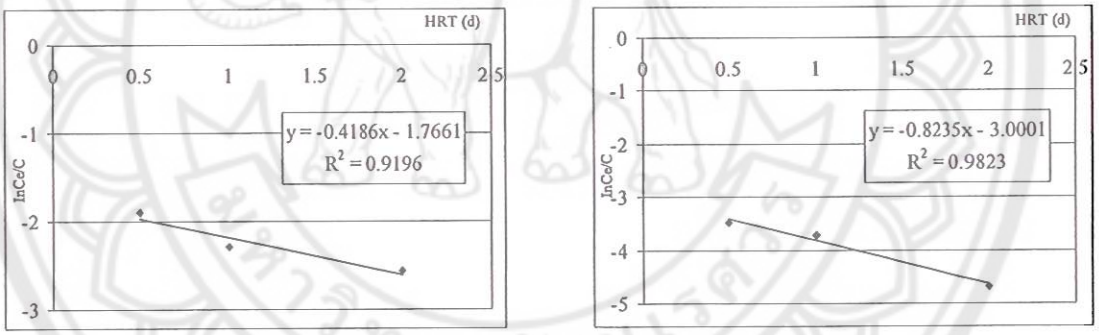
หรือ $$ln\frac{C_e}{C} = -K_T t \quad \text{(สมการที่ 4)}$$

เมื่อ C = Influent concentration, g/m^3

C_e = Effluent concentration, g/m^3

t = Hydraulic retention time, d

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



a) การบำบัด Fe b) การบำบัด Mn

ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่าง $ln\frac{C_e}{C}$ และ t (HRT)

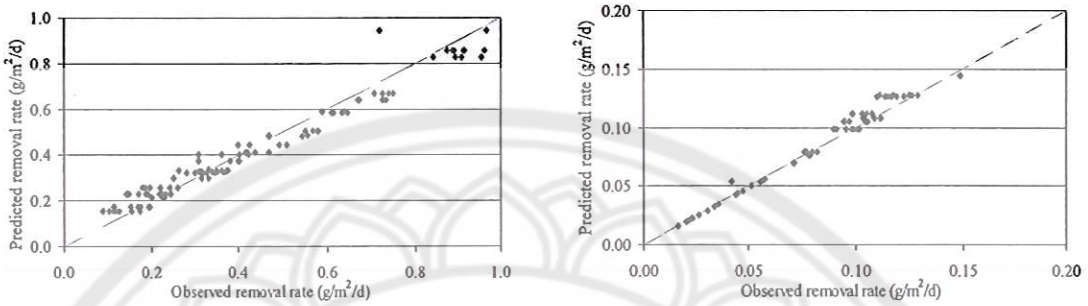
$$ln\frac{C_e}{C} = -0.4186\,t - 1.7661, \text{ for Fe removal} \quad \text{(สมการที่ 5)}$$

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

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

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

บำบัด Fe และ Mn มีค่าเท่ากับ 0.982 และ 0.992 ตามลำดับ และการทดสอบ Pair t-test ระหว่างอัตราการบำบัด พบว่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ อย่างไรก็ตาม ข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบเป็นข้อมูลจากระบบบึงประดิษฐ์ที่ทำการบำบัดน้ำที่ระยะกักพักเท่ากับ 0.5 วัน เท่านั้น



a) การบำบัด Fe b) การบำบัด Mn

ภาพที่ 7 การทดสอบประสิทธิภาพของสมการปฏิกิริยาลำดับหนึ่ง ในการคาดการณ์อัตราการบำบัด

สรุปและวิจารณ์

ระบบบึงประดิษฐ์ที่ศึกษามีประสิทธิภาพในการบำบัด Fe และ Mn ในน้ำบาดาล เนื่องจากระบบมีลักษณะที่เอื้อต่อการเกิดกระบวนการบำบัด ซึ่งเกิดขึ้นได้ทั้งในรูปของกระบวนการทางกายภาพ ได้แก่ การกรองในระบบ (Filtration) การตกตะกอนของของแข็ง (Sedimentation) การบำบัดด้วยกระบวนการทางเคมี ได้แก่ การทำปฏิกิริยาทางเคมีของ Fe และ Mn กับธาตุอื่น โดยเฉพาะออกซิเจน แล้วเกิดการเปลี่ยนรูปจากสารละลายเป็นของแข็งแล้วตกตะกอนออกจากน้ำ (Chemical precipitation) ซึ่งพบว่าเป็นกระบวนการหลักในการบำบัด Fe และ Mn ออกจากน้ำ (Kadlec and Knight, 1996; Wieder, 1993) และกระบวนการบำบัดทางชีวภาพ ซึ่งเป็นการลดปริมาณของ Fe และ Mn โดยการดูดซึมของสิ่งมีชีวิตโดยเฉพาะพืชที่ปลูกภายในระบบ (Plant uptake) และแม้ว่าการลด Fe และ Mn ในน้ำบาดาลด้วยระบบบึงประดิษฐ์ จะเป็นวิธีการที่ต้องการพื้นที่มากในการสร้างระบบเมื่อเทียบกับวิธีการอื่น แต่เป็นวิธีการที่มีต้นทุนในการก่อสร้างและดำเนินระบบต่ำ และเป็นวิธีที่ง่ายในการดำเนินการ จึงมีความเป็นไปได้และเหมาะสมต่อการนำไปใช้จริงของเกษตรกร

การศึกษาพบว่าการบำบัดที่ระยะกักพัก 2 วัน มีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดความเข้มข้นของ Fe และ Mn ในน้ำบาดาล แต่ไม่แตกต่างกันทางสถิติเมื่อเทียบกับการบำบัดที่ระยะกักพักอื่น ขณะที่ การกักพักที่ระยะ 0.5 วัน ซึ่งเป็นระยะกักพักที่ระบบบำบัดมีปริมาณการรองรับน้ำสูง สามารถลดปริมาณเหล็กในน้ำต่อพื้นที่ต่อช่วงเวลาได้สูงที่สุด และแตกต่างจากการบำบัดที่ระยะกักพักอื่น โดยน้ำบาดาลหลังการบำบัดที่ระยะกักพัก 0.5 วัน มีค่าความเข้มข้นของ Fe และ Mn ลดลงและอยู่ในเกณฑ์ที่ไม่ส่งผลกระทบเมื่อมีการนำน้ำนั้นไปใช้ จึงทำให้การบำบัดที่ระยะกักพัก 0.5 วัน สามารถตอบสนองความต้องการ ในการใช้น้ำบาดาลที่ผ่านการบำบัดในปริมาณสูง เช่นความต้องการน้ำในการปลูกข้าวได้เป็นอย่างดี

สมการ Regression และสมการ First order kinetics ที่กำหนดขึ้นจากผลจากศึกษา สามารถนำไปใช้ในการคาดการณ์อัตราการบำบัด Fe และ Mn ในน้ำบาดาลได้ใกล้เคียงกับอัตราการบำบัดที่ได้จากการตรวจวัด และพบว่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ขณะที่ ผลการทดสอบการใช้สมการ Regression และสมการ First order kinetics ที่สร้างขึ้นในการ

คาดการณ์ (Model validation) พบว่าอัตราการบำบัด Fe และ Mn ที่คำนวณได้จากสมการ Regression โดยส่วนใหญ่มีค่าต่ำกว่าค่าจากการตรวจวัดจริง ขณะที่อัตราการบำบัดที่คำนวณได้จากสมการ First-order kinetics มีค่าใกล้เคียงกับค่าจากการตรวจวัด เช่นเดียวกับผลการศึกษาของ Nitisoravut and Klomjek (2005) ซึ่งพบว่า สมการ First order kinetics สามารถประยุกต์ใช้ในการคาดการณ์ประสิทธิภาพของระบบบึงประดิษฐ์ในการลดค่า BOD_5 ในน้ำเสียที่มีค่าความเค็มสูงกว่าปกติได้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้ศึกษา ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา (สกอ.) สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และมหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ให้การสนับสนุนด้านงบประมาณ และขอขอบคุณ ภาควิชาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม และคณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติ และสิ่งแวดล้อม ที่เอื้อเฟื้อให้การสนับสนุนพื้นที่ศึกษาวิจัย ห้องปฏิบัติการ และอำนวยความสะดวกอื่นๆ จนทำให้การศึกษาวิจัยนี้ สามารถดำเนินการจนสำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

กรรณิการ์ สิริสิงห. (2549). เคมีของน้ำ น้ำโสโครก และการวิเคราะห์. กรุงเทพฯ: วิศาลการพิมพ์. 223-237.

กิจการ พรหมมา, อมรลักษณ์ ปรีชาหาญ, จรัสดาว คงเมือง, จรัญธร บุญญานุภาพ และวิภา หอมหวล. (2545). ผลกระทบของการใช้น้ำบาดาลบ่อตื้นก่อนและหลังการบำบัดคุณภาพน้ำ ที่มีต่อสภาพแวดล้อมในนาข้าวและชุมชนใกล้เคียง ในเขตจังหวัดพิษณุโลก. คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร. 4-45.

กิจการ พรหมมา. (2546). น้ำบาดาลระดับตื้น. คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร

เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. (2539). การบำบัดน้ำเสีย. กรุงเทพฯ: มิตรนราการพิมพ์. 121-126.

ชัยวัฒน์ สุขดี. (2544). การศึกษาและวิเคราะห์คุณภาพน้ำบาดาล เพื่อเปรียบเทียบกับน้ำดื่มชนิดฝาปิดสนิทในจังหวัดพิษณุโลก. รายงานผลการวิจัยภายใต้โครงการพัฒนาการเรียนการสอนวิทยาศาสตร์และวิทยาศาสตร์ประยุกต์ในสถาบันราชภัฏ (พวส.) พ.ศ. 2540-2544. กรุงเทพฯ: สำนักงานสภาสถาบันราชภัฏ

ประจญยุทธ ยิ้มแพร. (2547). การสะสมของเหล็กและแมงกานีสจากน้ำบาดาลเข้าสู่ดินนาและข้าว. วิทยานิพนธ์สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยนเรศวร

APHA, AWWA, WPCF. (1992). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 18th edition. American Public Health Association Inc., Washington D.C, USA.

International Rice Research Institute. (2003). **Manganese** toxicity. Retrived October 10, 2009, from http://zj.shuidao.cn/IRRI/RiceDoctor/Fact_Sheets/DeficienciesToxicities/Manganese_Toxicity.htm

Kadlec, R.H. and Knight, R.L. (1996). Treatment Wetlands. Florida: Lewis Publishers. 456-457.

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(1): 1-8.

Mitchell, C. and McNevin, D. (2001). Alternative analysis of BOD removal in subsurface flow constructed wetlands employing Monod kinetic. Water Research. 35(5): 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 Maunal. Department of Land and Water Conservation, NSW, Sydney.

Nitisoravut, S and Klomjek, P. (2005). Inhibition kinetics of salt-affected wetland for municipal wastewater treatment. Water Research. 39(18): 4413-4419.

Tarutis, W.J., Stark, L.R. and Williams, F.M. (1999). Sizing and performance estimation of coal mine drainage wetland. Ecological Engineering. 12(3-4): 353-372.

Wieder, R.K. (1993). Ion input/output budgets for five wetlands constructed for acid coal mine drainage treatment. Water Air Soil Pollution. 71(3-4): 231-270.