



สำนักหอสมุด



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การฟื้นฟูคุณภาพน้ำใต้ดินด้วยระบบผสมของเฮเทอโรโทรฟิกและไฮโดรจิโนโทรฟิเคชันในตรีฟิเคชัน

Groundwater remediation by hybrid system of heterotrophic and hydrogenotrophic denitrification

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิลาวัลย์ คณิตชัยเดชา  
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยนเรศวร

ตีพิมพ์โดย มหาวิทยาลัยนเรศวร  
จำนวนหน้า 0.5 หน้า 2562  
เลขที่หนังสือ 1034636  
เลขเรียกหนังสือ ๑ TP

๑๕๒  
.5  
๑๖๑๖  
๑๕๖๒

พฤศจิกายน 2562

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การฟื้นฟูคุณภาพน้ำใต้ดินด้วยระบบผสมของเฮเทอโรโทรฟิกและ  
ไฮโดรจีโนโทรฟิกดีไนตริฟิเคชัน

Groundwater remediation by hybrid system of heterotrophic  
and hydrogenotrophic denitrification



คณะผู้วิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิลาวัลย์ คณิตชัยเดชา

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อุปลัมภ์ นาครักษ์

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

สนับสนุนโดย

งบประมาณแผ่นดิน (ปกติ) มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีงบประมาณ 2562

## Executive summary

Nitrate-nitrogen ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ) contamination in natural water resource is observed in several agricultural areas in Asian countries. The contamination is mainly from an extensive use of nitrogen fertilizer for industrial agriculture. Later, the nitrate containing in fertilizer is released through soil and eventually into rivers, canals and aquifer by natural precipitation. The groundwater is a significant drinking water source, and together with the nitrate cannot be removed by traditional treatment (such as filtration and heat treatment). The removal of nitrate from groundwater is the research approach to provide a safe drinking water and avoid the further health impact. Due to a limit of existing carbon in groundwater, a combination of biological denitrification by heterotrophic and hydrogenotrophic microorganisms is a potential solution. In this research, a bio-electrochemical system was developed using graphite plate as anode and copper wire as cathode. The system was applied various electric currents (of 10, 20 and 30 mA) and ratio of existing carbon and nitrogen (C/N of 2.0, 1.5 and 1.0). The results revealed that the heterotrophic denitrification was mostly occurred at the high C/N of 2.0; the microorganisms utilize the existing carbon to degrade the aqueous nitrate to nitrogen gas. In the meanwhile, the hydrogenotrophic denitrification was also observed at the bio-electrochemical reactor; the microorganisms utilize  $\text{CO}_2$  and  $\text{H}_2$  gases generated from electrodes for nitrate removal mechanism. The total nitrogen removal efficiency was 98% at the bio-electrochemical reactor (10 mA, C/N 1.5), while the efficiency was 80% at the bio-reactor as control (no electric current, C/N 1.5).

## บทคัดย่อ

เทคโนโลยีไฟฟ้าเคมีถือเป็นวิธีการกำจัดสารมลพิษออกจากน้ำเสียและนำกลับมาใช้ใหม่ที่มีประสิทธิภาพ โดยการเสือก๊าซที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้ามีความสำคัญอย่างมากต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารมลพิษ ในงานวิจัยนี้ แกรไฟต์และลวดทองแดงซึ่งเป็นวัสดุที่มีราคาไม่แพงถูกนำมาใช้เป็นขั้วบวกและขั้วลบในถังปฏิกรณ์ไฟฟ้าเคมีร่วมกับชีวภาพ ทั้งนี้ปฏิกิริยาทางเคมีที่ขั้วไฟฟ้าจะสร้างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนขึ้น และนำมาใช้ในการกำจัดไนเตรตด้วยจุลินทรีย์ผ่านกระบวนการไฮโดรจีโนโทรฟิเคชันในตรีฟิเคชัน นอกจากนี้การร่วมกันระหว่าง 2 กลไก ได้แก่ ไฮโดรจีโนโทรฟิเคชันในตรีฟิเคชัน และเฮเทอโรโทรฟิเคชันในตรีฟิเคชันในถังปฏิกรณ์ไฟฟ้าเคมีร่วมกับชีวภาพ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรตและไนโตรเจนทั้งหมดสูงกว่าการใช้ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบปกติ (ไม่มีขั้วไฟฟ้าและปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี) อย่างไรก็ตาม การเพิ่มกระแสไฟฟ้าสูงสุดเป็น 30 มิลลิแอมแปร์ ไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการไนเตรตได้อย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เนื่องจากเกิดตะกอน (เช่น  $MgCO_3$  และ  $CaHPO_4$ ) ปกคลุมที่ผิวของขดลวดทองแดง ทำให้ขัดขวางการใช้ประโยชน์จากไฮโดรเจนที่ถูกสร้างขึ้น นอกจากนี้การใช้แกรไฟต์เป็นขั้วไฟฟ้ามีข้อดีสำคัญ คือ ลดการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชอย่างฉับพลันจากกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน นอกจากนี้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของแกรไฟต์ มีบทบาทสำคัญในการปรับสภาพค่าพีเอชให้เป็นกลางในระหว่างการทดลองด้วย

**คำสำคัญ:** การปนเปื้อนของไนเตรต; คุณภาพของน้ำใต้ดิน; การบำบัดทางชีวภาพ; เฮเทอโรโทรฟิเคชันในตรีฟิเคชัน; ไฮโดรจีโนโทรฟิเคชันในตรีฟิเคชัน

## Abstract

The electrochemical technology is an efficient contaminant removal method for wastewater treatment and reclamation. For achieving high removal efficiency, the significant materials with excellent properties and costly were used as electrodes. In this work, low cost materials of graphite and copper wire were utilized as anode and cathode electrodes in the bio-electrochemical reactor. The chemical reactions at electrodes generated CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub> gases, which were utilized for biological nitrate (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) removal via hydrogenotrophic denitrification. The double mechanisms of hydrogenotrophic denitrification and heterotrophic denitrification in the bio-electrochemical reactor caused the increasing NO<sub>3</sub><sup>-</sup> and total N removal efficiencies rather than the ordinary bioreactor (without electrodes and electrochemical reactions). However, the increasing applied current of maximal 30 mA could not significantly enhance the bio-electrochemical performance on the contaminant removal. This is because the chemical precipitation (i.e., MgCO<sub>3</sub> and CaHPO<sub>4</sub>) at the copper wire hindered the utilization of generated H<sub>2</sub> by microorganisms. In addition, the use of graphite electrode advantaged on avoiding the sudden pH change from denitrification mechanism; the generated CO<sub>2</sub> from graphite oxidation played an important role for pH neutralization during operating.

**Key words:** Nitrate contamination; groundwater quality; biological treatment; heterotrophic denitrification; hydrogenotrophic denitrification

# สารบัญ

|                                      | หน้า |
|--------------------------------------|------|
| Executive summary                    | ก    |
| บทคัดย่อ                             | ข    |
| สารบัญ                               | ง    |
| 1. ลักษณะโครงการวิจัย                | 1    |
| 2. ที่มาและความสำคัญของโครงการวิจัย  | 1    |
| 3. วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย       | 3    |
| 4. ทฤษฎีและกรอบแนวคิดของโครงการวิจัย | 3    |
| 5. การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง     | 12   |
| 6. วิธีการดำเนินการวิจัย             | 20   |
| 7. ผลการทดลองและอภิปรายผล            | 23   |
| 8. สรุปผลโครงการวิจัย                | 28   |
| 9. เอกสารอ้างอิง                     | 29   |
| ภาคผนวก                              |      |
| ก. รูประหว่างการทดลอง                | 32   |
| ข. สัญญารับทุนอุดหนุนการวิจัย        | 38   |
| ค. ตัวชี้วัด                         | 46   |

## 1. ลักษณะโครงการวิจัย

- โครงการวิจัยใหม่
- ยุทธศาสตร์การพัฒนาประเทศตามแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ

ยุทธศาสตร์การวิจัยที่ 4: การเติบโตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเพื่อการพัฒนาอย่างยั่งยืน

- นโยบายและยุทธศาสตร์การวิจัยของชาติ

ยุทธศาสตร์การวิจัยที่ 3: ส่งเสริมกลไกและกิจกรรมการนำกระบวนการวิจัย ผลงานวิจัย องค์ความรู้ นวัตกรรม และเทคโนโลยีจากงานวิจัยไปใช้ประโยชน์อย่างเป็นรูปธรรม โดยความร่วมมือของภาคส่วนต่าง ๆ

กลยุทธ์: 3.3 ส่งเสริมการถ่ายทอดและขยายผลการใช้ประโยชน์จากองค์ความรู้ นวัตกรรม และเทคโนโลยีจากงานวิจัยอย่างทั่วถึงด้านอุตสาหกรรม/พาณิชย์ สังคม/ชุมชน วิชาการและนโยบาย

- ยุทธศาสตร์การวิจัยของชาติรายประเด็น  
ยุทธศาสตร์การวิจัยด้านสิ่งแวดล้อม
- ยุทธศาสตร์ชาติ  
การสร้างการเติบโตบนคุณภาพชีวิตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม
- นโยบาย/เป้าหมายของรัฐบาล  
โครงการทำท่ายไทย 1.2 ด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม

## 2. ที่มาและความสำคัญของโครงการวิจัย

ปัญหาการปนเปื้อนของสารมลพิษ “ไนเตรต” ในน้ำใต้ดิน จัดเป็นหนึ่งในปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญของประเทศไทยและหลายประเทศในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เช่น เวียดนาม และฟิลิปปินส์ สาเหตุหลักของการปนเปื้อนของไนเตรตในน้ำใต้ดินนี้เกิดจากการชะล้างหน้าดินในพื้นที่เกษตรกรรม โดยปุ๋ยที่เหลือจากการเกษตรถูกชะล้างและไหลผ่านชั้นดินลงสู่แหล่งน้ำใต้ดิน ซึ่งเป็นแหล่งน้ำอุปโภคบริโภคที่สำคัญของประชาชน นอกจากนี้การปนเปื้อนของไนเตรตยังเกิดจากการชะของของเสีย สิ่งสกปรกจากชุมชน และบ่อฝังกลบ จากการสูดตัวอย่างน้ำใต้ดินของประเทศไทยในพื้นที่เกษตรกรรมที่ระดับความลึกต่าง ๆ พบว่าหลายพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนของไนเตรตสูงเกิน 50 มิลลิกรัม/ลิตร [1] ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานน้ำดื่มขององค์การอนามัยโลกที่กำหนดไว้ ส่งผลให้ไม่เหมาะในการนำน้ำมาใช้ในการบริโภคและผลิตน้ำประปา อย่างไรก็ตาม เนื่องจากไนเตรตเป็นสารมลพิษที่ปราศจากกลิ่นและไม่มีสี ทำให้ประชาชนในพื้นที่ยังคงบริโภคน้ำปนเปื้อนอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพในระยะยาวได้ เช่น ทำให้เกิดโรคมะเร็งทางเดินอาหาร และมะเร็งกระเพาะ

ปัสสาวะ โดยผลกระทบจากการบริโภคน้ำปนเปื้อนจะรุนแรงมากในทารก ทำให้ทารกเป็นโรคตัวเขียว ขาดออกซิเจน (Blue baby syndrome) และอาจเสียชีวิตในที่สุด [2]

โดยปกติแล้ว ตามบ้านเรือนและชุมชนในพื้นที่ห่างไกลจะใช้น้ำจากบ่อขุดและบ่อบาดาล โดยตรงในการบริโภค และปราศจากการบำบัด ขณะที่บางส่วนจะใช้เครื่องกรองน้ำที่มีจำหน่ายทั่วไป ในการกำจัดสารมลพิษก่อนนำมาเป็นน้ำดื่ม ซึ่งเครื่องกรองน้ำทั่วไปที่นิยมใช้ในการผลิตน้ำดื่มตาม บ้านเรือนและชุมชนไม่สามารถกำจัดไนเตรตได้ วิธีการกำจัดไนเตรตที่ได้ผลดี ก็คือ การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) และการออสโมซิสย้อนกลับ (Reverse osmosis) ซึ่งเครื่องกรองน้ำที่ใช้หลักการ ดังกล่าวมีราคาค่อนข้างสูง จึงไม่สามารถนำไปใช้แก้ปัญหาเรื่องน้ำดื่มในพื้นที่ห่างไกล และชุมชนที่มี ข้อจำกัดด้านค่าใช้จ่ายได้ ทั้งนี้วิธีการกำจัดไนเตรตที่มีประสิทธิภาพสูง เป็นที่รู้จักดี และนิยมใช้กัน มาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการบำบัดน้ำเสีย ได้แก่ การใช้วิธีทางชีวภาพผ่านกระบวนการเฮเทอโร โทรฟิคดีไนตริฟิเคชัน (Heterotrophic denitrification) โดยจุลินทรีย์บางชนิดสามารถสร้าง ออกซิเจนได้เองจากไนเตรต และได้ผลผลิตเป็นก๊าซไนโตรเจนกลับคืนสู่บรรยากาศ ทั้งนี้จุลินทรีย์ ดังกล่าวต้องการสารอินทรีย์คาร์บอนเป็นแหล่งคาร์บอน ดังนั้น เมื่อความเข้มข้นของแหล่งคาร์บอนใน น้ำไม่เพียงพอ เช่น ในน้ำใต้ดิน [3] จึงจำเป็นต้องมีการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนสู่ระบบ เช่น เมธานอล ขณะเดียวกันการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนมากเกินไป อาจส่งผลเสียต่อคุณภาพของน้ำหลังบำบัดได้

นอกจากการกำจัดไนเตรตด้วยวิธีชีวภาพอีกกระบวนการหนึ่ง ได้แก่ ไฮโดรจีโนโทรฟิคดีไน ตริฟิเคชัน (Hydrogenotrophic denitrification) โดยจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องจะใช้ก๊าซไฮโดรเจน ทดแทนสารอินทรีย์คาร์บอนในการกำจัดไนเตรตจากน้ำ [3] ซึ่งวิธีนี้สามารถแก้ปัญหาการเหลืออยู่ของ สารอินทรีย์คาร์บอนในน้ำหลังบำบัดได้ แต่อย่างไรก็ตาม การนำไปประยุกต์จริงใช้ยังมีไม่มากนัก เนื่องจากข้อจำกัดที่สำคัญ ได้แก่ ก๊าซไฮโดรเจนมีราคาค่อนข้างสูง และเป็นก๊าซไวไฟ สามารถระเบิด ได้ ทำให้การใช้ก๊าซไฮโดรเจนบรรจุถังต้องระมัดระวังเป็นอย่างยิ่ง นอกจากนี้การใช้เครื่องกำเนิดก๊าซ ไฮโดรเจนจากน้ำก็เป็นอีกทางหนึ่ง แต่ราคาค่อนข้างสูง

ดังนั้น งานวิจัยนี้ต้องการพัฒนาระบบกำจัดไนเตรตออกจากน้ำใต้ดิน เพื่อใช้ในบ้านเรือนหรือ ชุมชนในพื้นที่เกษตรกรรมที่กำลังประสบปัญหาการปนเปื้อนของไนเตรตในน้ำ โดยระบบที่พัฒนาขึ้น นี้ต้องสามารถกำจัดไนเตรตได้อย่างมีประสิทธิภาพ และราคาไม่แพง นอกจากนี้สามารถใช้งานและ ซ่อมแซมระบบได้ง่ายโดยประชาชนในท้องถิ่น โดยระบบบำบัดนี้เป็นการผสมผสานระหว่างกลไกทาง ชีวภาพ (Biology) และไฟฟ้าเคมี (Electrochemistry) มุ่งเน้นการกำจัดไนเตรตผ่านกระบวนการ เฮเทอโรโทรฟิคดีไนตริฟิเคชันและไฮโดรจีโนโทรฟิคดีไนตริฟิเคชัน ซึ่งใช้ขั้วไฟฟ้าเป็นแหล่งกำเนิดก๊าซ ไฮโดรเจนของระบบ



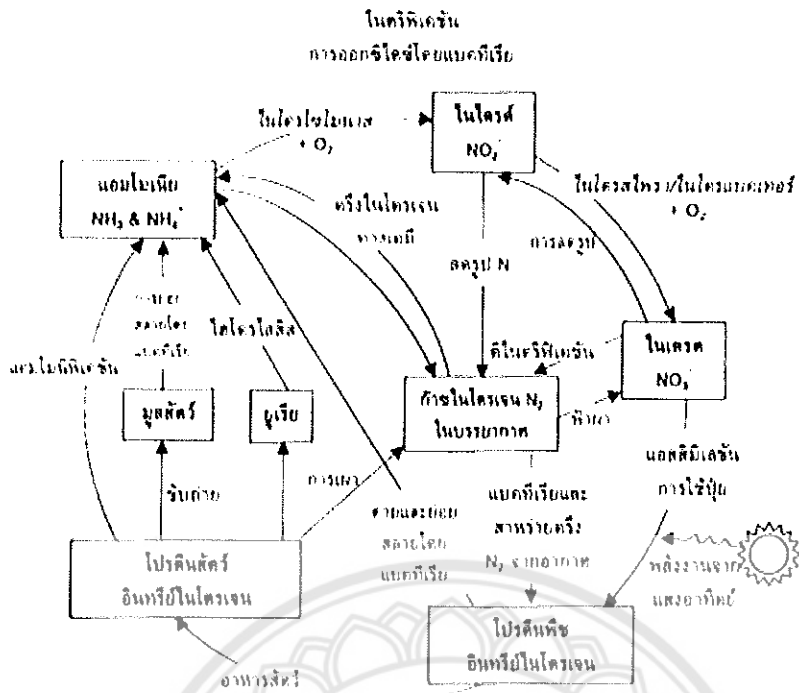
### 3. วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. พัฒนาระบบกำจัดไนเตรตออกจากน้ำที่มีสารอินทรีย์คาร์บอนต่ำด้วยกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน
2. ศึกษาประสิทธิภาพของระบบภายใต้ปัจจัยต่าง ๆ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการดำเนินระบบ
3. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระบวนการเฮเทอโรโทรฟิกและไฮโดรจีโนโทรฟิเคชันในดีไนตริฟิเคชัน ตลอดจนกลไกการกำจัดไนเตรตที่เกิดขึ้น

### 4. ทฤษฎีและกรอบแนวคิดของโครงการวิจัย

#### 4.1 วัฏจักรไนโตรเจน

ไนโตรเจนเป็นธาตุที่มีมากที่สุดในบรรยากาศถึง 78% ของมวลบรรยากาศของโลก ก๊าซไนโตรเจนไม่มีสี ไม่มีกลิ่น และไม่มีรส มีจุดเดือดต่ำ คือที่ 25 องศาเซลเซียส ไนโตรเจนมีความสำคัญต่อสภาวะแวดล้อมจะอยู่ในรูปของสารอินทรีย์ (Organic nitrogen) แอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ) ไนเตรต ( $\text{NO}_3^-$ ) และไนไตรต์ ( $\text{NO}_2^-$ ) แบคทีเรียบางชนิด เช่น ไรโซเบียม ซึ่งอาศัยอยู่ในปมของพืชจำพวกถั่ว จะสามารถจับก๊าซไนโตรเจนจากอากาศและเปลี่ยนให้เป็นไนโตรเจนในรูปของสารอินทรีย์ได้ กระบวนการนี้เรียกว่า Nitrogen fixation พืชสามารถสังเคราะห์สารประกอบอินทรีย์ที่มีไนโตรเจน สัตว์จะกินพืชเป็นอาหารและได้รับไนโตรเจนเข้าไป และขับถ่ายไนโตรเจนออกมาในรูปของสารอินทรีย์ ซึ่งจะถูจุลินทรีย์เปลี่ยนให้เป็นไนโตรเจนในรูปสารอนินทรีย์ ได้แก่ แอมโมเนีย เรียกว่า Ammonification ซึ่งเป็นปฏิกิริยาเดียวกับที่เกิดขึ้นเมื่อพืชและสัตว์ตายลง แอมโมเนียที่เกิดขึ้นนี้ส่วนหนึ่งจะถูกพืชและจุลินทรีย์ใช้เป็นอาหาร เกิดเป็นสารอินทรีย์ใหม่อีกครั้ง แอมโมเนียอีกส่วนหนึ่งจะถูกออกซิไดซ์โดยแบคทีเรียพวก Nitrosomonas และ Nitrobacter ได้เป็นไนไตรต์ และไนเตรตตามลำดับ เรียกว่ากระบวนการดีไนตริฟิเคชัน ภายใต้สภาวะที่มีอากาศ ส่วนภายใต้สภาวะไร้อากาศแบคทีเรียหลายชนิดสามารถรีดิวซ์ไนเตรตได้เป็นไนไตรต์และก๊าซไนโตรเจน ตามลำดับ ซึ่งเรียกว่ากระบวนการดีไนตริฟิเคชัน การเปลี่ยนแปลงรูปของไนโตรเจนตั้งแต่ก๊าซไนโตรเจนจากบรรยากาศสู่ดิน พืช สัตว์ และจากพืช สัตว์สู่ดิน และขึ้นสู่บรรยากาศ วนเวียนเป็นวงจรเช่นนี้ไม่สิ้นสุด เรียกว่า วัฏจักรไนโตรเจน ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 วงจรไนโตรเจน

#### 4.2 ผลของไนโตรเจนต่อสิ่งแวดล้อม

การใช้ปุ๋ยเคมีมีผลเสียอย่างรุนแรงต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะไนโตรเจน ซึ่งเป็นปัจจัยหลักในการปนเปื้อนในน้ำ และยังเป็นสาเหตุหลักที่ก่อให้เกิดการสูญพันธุ์ของสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ เนื่องจากน้ำจะเป็นตัวกลางในการลำเลียงไนโตรเจน ซึ่งเป็นสารอาหารหลัก สารอาหารนี้จะบำรุงพืชน้ำ ทำให้พืชน้ำเติบโตอย่างรวดเร็วและอุดมสมบูรณ์ เรียกว่า ยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) และเมื่อสารอาหารนี้กระจายอยู่ในน้ำมากเกินไป จะทำให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำลดลงจนทำให้สิ่งมีชีวิตตายได้ เช่น ปลาและหอย นอกจากนี้การใช้ปุ๋ยเคมียังส่งผลกระทบต่อระบบภูมิอากาศโลกด้วย โดยเฉพาะการปล่อยก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ ( $\text{N}_2\text{O}$ ) สู่บรรยากาศ ก๊าซนี้จะทำลายชั้นโอโซน ซึ่งช่วยทำหน้าที่ดูดซับและกรองคลื่นแสงอินฟราเรดเอาไว้ เมื่อชั้นโอโซนลดลง รังสีจากดวงอาทิตย์ที่แผ่มายังโลกก็จะเพิ่มขึ้น ทำให้อุณหภูมิโลกร้อนขึ้น เกิดภาวะเรือนกระจก และความผันผวนของภูมิอากาศในที่สุด



รูปที่ 2 ปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชั่นที่เขื่อนก๊วลม จังหวัดลำปาง [7]

ทั้งนี้ปริมาณไนเตรตในแหล่งน้ำอาจเกิดจากการนำเปื้อนของซากพืชซากสัตว์อุจจาระ น้ำเน่าปยุ และน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม และสารเคมีจากเกษตรกรรม เมื่อแบคทีเรียย่อยสลายอินทรีย์ไนโตรเจนเปลี่ยนไปเป็นแอมโมเนีย จากนั้นเป็นไนไตรต์ และสุดท้ายไปเป็นไนเตรต ซึ่งสามารถละลายได้ดีในน้ำ จึงไหลซึมผ่านการกรองของชั้นดินลงสู่ใต้ดิน และสู่แหล่งน้ำบาดาล แต่บางส่วนพืชใช้เป็นอาหาร เนื่องจากไนเตรตเป็นสารอาหารของพืชผักและจำป๋นต่อสิ่งมีชีวิต ดังนั้นการนำเปื้อนของสารอินทรีย์และปยุ เป็นสาเหตุหลักของการปนเปื้อนไนเตรตในแหล่งน้ำ ซึ่งอาจเพิ่มความเข้มข้นของไนเตรตในน้ำผิวดินและน้ำใต้ดินมากขึ้นจนถึงปริมาณที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตได้

การมีปริมาณไนเตรตในน้ำบริโภคสูงเป็นสาเหตุให้เด็กทารกป่วยเกี่ยวกับเมธฮีโมโกลบินในเลือดได้ คือ ทำให้ทารกมีอาการตัวเขียว เนื่องจากไนเตรตไปทำให้ฮีโมโกลบินเป็นเมธฮีโมโกลบิน ซึ่งทำให้เม็ดเลือดแดงไม่สามารถนำออกซิเจนไปเลี้ยงส่วนต่าง ๆ ของร่างกายได้ ดังนั้น เพื่อการเฝ้าระวังคุณภาพของสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะคุณภาพน้ำ จึงจำเป็นต้องมีการตรวจวิเคราะห์ทางห้องปฏิบัติการหาปริมาณอินทรีย์ไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็น (Total Kjeldahl Nitrogen, TKN), แอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ), ไนเตรต ( $\text{NO}_3^-$ ) และไนไตรต์ ( $\text{NO}_2^-$ ) โดยกำหนดให้มาตรฐานคุณภาพน้ำของประเทศไทย กำหนดให้น้ำบริโภค มีปริมาณไนเตรต ( $\text{NO}_3^-$ ) ไม่เกิน 45 มิลลิกรัม/ลิตร น้ำดื่มในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิทมีไนเตรตในรูปของไนเตรต-ไนโตรเจน ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ) ไม่เกิน 4 มิลลิกรัม/ลิตร และน้ำบาดาลที่ใช้บริโภค มีไนเตรต ( $\text{NO}_3^-$ ) ไม่เกิน 45 มิลลิกรัม/ลิตร นอกจากนี้มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน กำหนดให้มีไนเตรตในรูปของไนเตรต-ไนโตรเจน ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ) ไม่เกิน 5 มิลลิกรัม/ลิตร และแอมโมเนียในรูปของแอมโมเนีย-ไนโตรเจน ( $\text{NH}_3\text{-N}$ ) ไม่เกิน 0.5 มิลลิกรัม/ลิตร และมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง กำหนดให้น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมมีไนโตรเจน ในรูปของ TKN ไม่เกิน 100 มิลลิกรัม/

ลิตร หรือแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง แต่ไม่เกิน 200 มิลลิกรัม/ลิตร ส่วนมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากอาคารบางประเภทและบางขนาด ให้มีไนโตรเจนในรูป TKN ไม่เกิน 35 และ 40 มิลลิกรัม/ลิตร ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากที่ดินจัดสรรมีไนโตรเจนในรูป TKN ไม่เกิน 35 มิลลิกรัม/ลิตร และมาตรฐานเพื่อควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร มีไนโตรเจนในรูป TKN ไม่เกิน 120 มิลลิกรัม/ลิตร หรือ 200 มิลลิกรัม/ลิตร [4]

### 4.3 การกำจัดไนโตรเจนทางชีวภาพ

การกำจัดไนโตรเจนทางชีวภาพอาศัยจุลินทรีย์หรือแบคทีเรียอยู่ 2 กลุ่ม กลุ่มแรกมีหน้าที่ออกซิไดซ์ไนโตรเจน (ในรูปรีดิวซ์) ให้เป็นไนเตรต จากนั้นแบคทีเรียอีกกลุ่มหนึ่งจะลดรูปไนโตรเจนนี้ให้กลายเป็นก๊าซไนโตรเจนจากระบบ โดยระบบจะเริ่มต้นที่กระบวนการแอมโมนิฟิเคชัน (Ammonification) ก่อนกระบวนการอื่น ๆ

#### 1. แอมโมนิฟิเคชัน (Ammonification)

กระบวนการที่เปลี่ยนรูปสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนไปอยู่ในรูปสารอินทรีย์ จึงมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าการแปลงเป็นแร่ธาตุไนโตรเจนหรือไนโตรเจนมิเนอรัลไลเซชัน (Nitrogen mineralization) มีจุลินทรีย์หลายชนิดที่มีบทบาทในขั้นตอนนี้ เช่น แบคทีเรีย ฟังไจ แอมโมเนียผลิตขึ้นได้โดย 1) ปฏิกิริยาภายนอกเซลล์ที่มีต่อซากพืช ซากสัตว์ และอุจจาระ และ 2) การหายใจแบบเอ็นโดจีนัสของเซลล์มีชีวิตและจากซากเซลล์ รวมทั้งเซลล์ที่แตกแล้ว ส่วนการไฮโดรไลซ์ของยูเรียโดยเอนไซม์ยูรีเอสก็ปล่อยแอมโมเนียม ( $\text{NH}_4^+$ ) ออกมาได้เช่นกัน ทั้งนี้สารประกอบโปรตีนจะแปรรูปเป็นแอมโมเนียมได้ จะต้องผ่านขั้นตอนแปรรูปเป็นกรดอะมิโนก่อน แล้วจึงถูกลดอะมีน (Deamination) เป็นแอมโมเนียมต่อไป แต่แอมโมเนียที่เกิดขึ้นมักไม่อยู่ในรูปของแอมโมเนียอิสระ เพราะที่ภาวะพีเอชเป็นกลางหรือกรด ซึ่งมักจะเป็นสภาวะของน้ำเสียทั่วไป แอมโมเนียจะอยู่ในรูปของเกลือของแอมโมเนียม ( $\text{NH}_4^+$ )

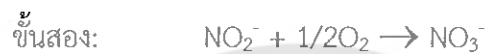
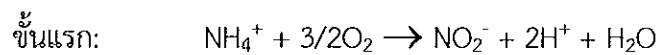
#### 2. การสังเคราะห์เซลล์

เนื่องจากไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบหลักอย่างต่อเนื่องของเซลล์จุลินทรีย์ การที่เซลล์จะเจริญเติบโตได้จึงต้องอาศัยไนโตรเจน และการระบายสลัดจ์ที่ออกจากระบบ จึงเป็นการกำจัดไนโตรเจนออกจากระบบด้วย ปริมาณไนโตรเจนที่ถูกกำจัดโดยวิธีนี้ขึ้นอยู่กับว่าระบบสามารถผลิตเซลล์ขึ้นมาต่อวันได้มากเท่าใด ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนที่ป้อนเข้ามาในระบบ และวิธีการเดินระบบ (อายุสลัดจ์)

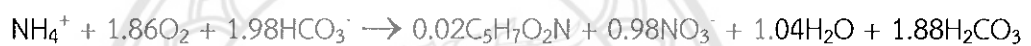
#### 3. ไนตริฟิเคชัน (Nitrification)

เมื่อสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนแปรรูปไปเป็นแอมโมเนียแล้ว จะเกิดกระบวนการสังเคราะห์หรือแอสสิมิเลชันของไนโตรเจนเอาไปสร้างเซลล์ (โปรตีน) ใหม่ ในขณะเดียวกัน ถ้า

สารอาหารชนิดคาร์บอนลดลงจนเหลือน้อยและระบบยังอยู่ในภาวะแอโรบิก จะเกิดการหายใจ (Respiration) โดยกระบวนการไนตริฟิเคชัน โดยกระบวนการนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนย่อย คือ ไนไตรต์ชัน (Nitritation) และไนเตรตชัน (Nitrataion) โดยจุลินทรีย์ชนิดออโตโทรฟ (Autotroph) มีบทบาทสำคัญ กล่าวคือ การที่ออโตโทรฟออกซิไดซ์  $\text{NH}_4^+$  ไปเป็น  $\text{NO}_2^-$  และ  $\text{NO}_3^-$  ภายใต้ภาวะแอโรบิกนั้นจะได้พลังงานออกมาด้วย ซึ่งจุลินทรีย์จะใช้พลังงานที่ได้นี้ไปดึงเอา  $\text{CO}_2$  หรือ  $\text{HCO}_3^-$  หรือ  $\text{CO}_3^{2-}$  มาเป็นแหล่งคาร์บอนต่อไป ทั้งนี้ในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันจะมีการปล่อยไฮโดรเจนไอออน ( $\text{H}^+$ ) ออกมา ซึ่งทำให้ระบบต้องมีสภาพต่างพอ ไม่เช่นนั้นจะทำให้พีเอชในถังปฏิกิริยาลดลง และทำให้ระบบเกิดวิบัติได้



ปฏิกิริยารวมทั้งหมดสำหรับการสังเคราะห์ไนตริไฟเออร์และออกซิเดชัน คือ



ผลิตภัณฑ์สุดท้ายของกระบวนการไนตริฟิเคชัน คือ ไนเตรต การที่มีไนเตรตในน้ำจะมีผลทำให้สิ่งมีชีวิตในน้ำโดยเฉพาะพืชน้ำ สาหร่าย วัชพืชน้ำ และพืชเซลล์เดียว มีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ทำให้บนผิวน้ำถูกปกคลุมด้วยพืชน้ำ พืชน้ำเหล่านี้จะบดบังแสงอาทิตย์ไม่ให้ลงสู่ใต้ผิวน้ำ ทำให้ออกซิเจนในน้ำถูกนำมาใช้และไม่มีทดแทน เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดน้ำเสียขึ้น

ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน

(1) สารอาหาร

ได้แก่ ความเข้มข้นของแอมโมเนียมในถังเดิมอากาศ

(2) อุณหภูมิ

อุณหภูมิมีผลต่อไนโตรแบคทีเรียมากกว่าไนโตรไซโมนัส อุณหภูมิที่ดีที่สุดสำหรับไนตริฟิเคชัน คือ ช่วง 30-36 °C

(3) ออกซิเจน

แบคทีเรียกลุ่มไนตริไฟเออร์มีความไวต่อออกซิเจนความเข้มข้นต่ำ ทั้งนี้ถ้าค่าดีโอเพียงเท่ากับหรือมากกว่า 1 มิลลิกรัม/ลิตร ก็จะไม่มีผลกระทบทางลบต่อไนตริฟิเคชันแล้ว หากต้องการความมั่นใจก็ต้องจัดให้มีดีโอเท่ากับ 2 มิลลิกรัม/ลิตร แต่หากเดิมอากาศจนมีดีโอมากไปก็มีข้อเสีย คือ เปลืองพลังงาน และค่าดำเนินการของระบบบำบัดตามมา

(4) พีเอช

ในกระบวนการไนตริฟิเคชันจะมีการใช้สภาพต่างไปด้วย พีเอชของถังปฏิกริยาจึงอาจลดลง โดยเฉพาะในกรณีที่น้ำเสียมีสภาพต่างต่ำ ซึ่งอาจต้องเติมโซดาไฟ หรือปูนขาว เพื่อให้ไนตริฟายอิงแบคทีเรียทั้ง 2 กลุ่ม ซึ่งไวต่อพีเอชมากและทำงานได้ดีในพีเอชค่อนข้างต่ำ หรือประมาณ 7.5-9.0 ทำหน้าที่การออกซิไดซ์ได้อย่างดีที่สุด นอกจากนี้ไนตริฟิเคชันยังเพิ่มความเข้มข้นของกรดคาร์บอนิก ( $H_2CO_3$ ) ขึ้นในถังเติมอากาศด้วย แต่จะไม่สะสมตัวในถังปฏิกริยา เพราะ  $CO_2$  จะถูกไล่ออกจากน้ำไปสู่บรรยากาศตลอดเวลา

#### (5) ความเค็ม

เช่น โซเดียมคลอไรด์ มีผลทางลบต่อไนตริฟายอิงแบคทีเรีย แต่แบคทีเรียกลุ่มนี้สามารถปรับตัวเข้ากับ ความเค็มได้ดีพอสมควร

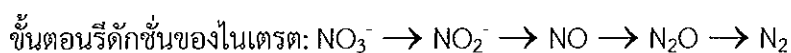
#### (6) อายุสลัดจ์

ถ้าต้องการใช้ระบบสลัดจ์ผสม อายุสลัดจ์ของกระบวนการจะต้องมากพอ เพื่อให้มีบีโอดีหรือสารอินทรีย์ในน้ำต่ำ ในอุณหภูมิต่ำแบบบ้านเรา อายุสลัดจ์เพียงแค่ 2-3 วัน ก็สามารถทำให้เกิดไนตริฟิเคชันได้แล้ว

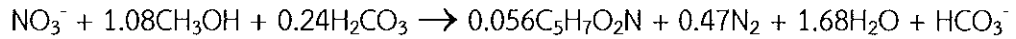
### 4. ดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification)

ดีไนตริฟิเคชัน คือ รีดักชันของไนโตรเจน ไนเตรตทำหน้าที่เป็นตัวรับไฮโดรเจนสุดท้ายสำหรับการหายใจของจุลินทรีย์ในที่ไม่มีโมเลกุลออกซิเจน เรียกว่า การหายใจแอนแอโรบิก (Anaerobic) แบคทีเรียที่ทำได้ดีไนตริฟิเคชันเป็นพวกแฟคัลเททีฟ (Facultative) และใช้ชีวเคมีเหมือนกันทั้งระหว่างการหายใจแบบแอโรบิกและแอนโรบิก ความแตกต่างที่สำคัญ คือ เอนไซม์ที่เร่งปฏิกริยาการถ่ายเทอิเล็กตรอนสุดท้าย และตำแหน่งกระทำในสายถ่ายเทอิเล็กตรอน ภายใต้แอโรบิกดีไนตริฟิเคชันแบคทีเรียใช้คาร์บอนไดออกไซด์หรือไบคาร์บอเนตเป็นแหล่งคาร์บอนแทนอินทรีย์คาร์บอน และตามธรรมชาติในระบบบำบัดน้ำเสียโดยทั่วไปก็มีแบคทีเรียกลุ่มนี้หลายชนิด ดังนั้น จึงทำให้การสร้างกลุ่มดีไนตริฟายอิงค่อนข้างง่าย

ระบบเอนไซม์ที่เกี่ยวกับรีดักชันของไนเตรตมีอยู่ 2 แบบ คือ แอสซิมิลาทอรี (Assimilatory) และดิสซิมิลาทอรี (Dissimilatory) รีดักชันของไนเตรตแบบแอสซิมิลาทอรี จะแปลงไนเตรตเป็นแอมโมเนียสำหรับการใช้โดยเซลล์ในชีวสังเคราะห์ และจะทำหน้าที่เมื่อไม่มีแอมโมเนีย มีไนเตรตเป็นรูปเดียวของไนโตรเจนที่นำไปใช้ได้ รีดักชันของไนเตรตแบบดิสซิมิลาทอรี ยังผลให้เกิดการสร้างก๊าซไนโตรเจนจากไนเตรต และเป็นตัวรับผิชอบดีไนตริฟิเคชันของน้ำเสีย ผลของออกซิเจนที่มีต่อกริยาของเอนไซม์ขึ้นอยู่กับชนิดของแบคทีเรียที่เกี่ยวข้อง อย่างไรก็ตามระดับของออกซิเจนควรเข้าใกล้ศูนย์ เพื่อให้การทำงานดีไม่เปลี่ยนแปลง



ถ้านำการสังเคราะห์เซลล์มาพิจารณาด้วย โดยมีเมทานอล คาร์บอน และไนเตรต จะได้ตั้งสมการ



ตารางที่ 1 ผลของสารอินทรีย์คาร์บอนต่ออัตราการเกิดดีไนตริฟิเคชัน [5]

| แหล่งคาร์บอน       | อุณหภูมิของน้ำในระบบ (°C) | อัตราการเกิดดีไนตริฟิเคชัน (mg NO <sub>3</sub> -N/mg MLVSS-day) |
|--------------------|---------------------------|---|
| เมทานอล            | 25                        | 0.21-0.32   |
| เมทานอล            | 20                        | 0.12-0.90   |
| น้ำเสีย            | 15-27                     | 0.03-0.11   |
| คาร์บอนเอ็นโดจีนัส | 12-20                     | 0.017-0.048   |

#### ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน

##### (1) พีเอช

ในกระบวนการดีไนตริฟิเคชันจะเกิดสภาพต่างขั้วขึ้นมาได้ พีเอชของถังแวนออกซิกจึงมีค่ามากกว่าในถังแอโรบิก พีเอชที่เหมาะสมสำหรับดีไนตริฟิเคชันแบคทีเรียคือ 6.5-8.5 กล่าวคือ พีเอชมีผลต่อดีไนตริฟิเคชันน้อยกว่าที่มีผลต่อไนตริฟิเคชัน ดังนั้น ถ้านำค่าพีเอชนี้ไปรวมกับกระบวนการไนตริฟิเคชันแล้ว พีเอชของระบบสลัดจ์ผสมควรอยู่ในช่วง 7.5-8.0 จะดีที่สุด ถ้าพีเอชลดลงต่ำ เช่น ต่ำกว่า 7 จะเกิดไนตรัสออกไซด์ (N<sub>2</sub>O) เป็นผลสุดท้ายของดีไนตริฟิเคชันแทนที่จะเป็นก๊าซไนโตรเจน ซึ่งไม่ควรให้เกิดขึ้น เพราะก๊าซไนตรัสออกไซด์เป็นภัยต่อสิ่งแวดล้อมโดยรวม แต่ถ้าพีเอชก่อนไปทางต่าง ไนตรัสออกไซด์จะถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซไนโตรเจนได้ดี ส่วนไนตริกออกไซด์ (NO) ซึ่งเป็นก๊าซพิษรุนแรง มักไม่เกิดขึ้นในระบบจริง

##### (2) ออกซิเจน

ปฏิกิริยารีดอกซ์ของสารอาหารในเซลล์เมื่อมีออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนจะให้พลังงานสูงกว่าเมื่อมีไนเตรตเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ดังนั้นหากมีดีไอคูล์กับไนเตรต แบคทีเรียจะเลือกใช้ออกซิเจนก่อนการใช้ไนเตรต ซึ่งทำให้สิ้นเปลืองคาร์บอนไปจนอาจเหลือไม่พอ สำหรับกระบวนการดีไนตริฟิเคชันที่สมบูรณ์ จึงควรระวังไม่ให้มีออกซิเจนมารบกวนในถังแวนออกซิกนี้ ค่าออกซิเจนละลายน้ำหรือดีไอ หากมีค่ามากกว่า 0.2 มิลลิกรัม/ลิตร จะสามารถยับยั้งดีไนตริฟิเคชันของซูโดโมนาส

##### (3) อุณหภูมิ

ดีไนโตรฟายเออร์มีความไวต่ออุณหภูมิ และแม้ว่าจะโตได้ดีที่อุณหภูมิในช่วง 5-25 °C แต่ก็ทำงานได้ดีกว่าเมื่ออุณหภูมิเท่ากับหรือมากกว่า 20 °C

#### (4) อายุสลัดจ์

เมื่ออายุสลัดจ์เพิ่มขึ้น การผลิตเซลล์สุทธิลดลง ดังนั้นปริมาณคาร์บอนที่ต้องการสำหรับดีไนโตรฟายปริมาณไนเตรตที่เท่ากันจะลดลง นอกจากนี้ถ้าอายุสลัดจ์ในถังแอนอกซิกเพิ่มขึ้น อัตราดีไนโตรฟิเคชันจำเพาะจะลดลงด้วย แต่ทั้งนี้ถ้ารวมเอาถังเติมอากาศที่มีไว้สำหรับไนโตรฟิเคชันด้วยแล้ว การเพิ่มอายุสลัดจ์ (รวม) จะทำให้การกำจัดไนโตรเจนโดยรวมดีขึ้น เพราะหากไม่มีการเกิดไนโตรฟิเคชันมาก่อนแล้ว กระบวนการดีไนโตรฟิเคชันก็เกิดขึ้นไม่ได้

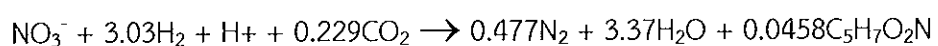
#### (5) อัตราส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจน

ในกระบวนการดีไนโตรฟิเคชัน แบคทีเรียซึ่งเป็นชนิดเฮเทอโรโทรฟเป็นส่วนใหญ่ต้องใช้คาร์บอนเป็นองค์ประกอบหรือเป็นแหล่งพลังงานในการทำงาน อัตราส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจนทางทฤษฎีจะเท่ากับ 5-10 แต่ในทางปฏิบัติแล้วอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรต-ไนโตรเจนควรเท่ากับ 3-7 เป็นอย่างน้อย

### 4.4 กระบวนการไฮโดรจีโนโทรฟิเคชันในดีไนโตรฟิเคชัน

ไฮโดรจีโนโทรฟิเคชันในดีไนโตรฟิเคชัน (Hydrogenotrophic denitrification) จัดเป็นการกระบวนการดีไนโตรฟิเคชันประเภทหนึ่ง กระบวนการดีไนโตรฟิเคชันโดยทั่วไปที่นิยมใช้สารอินทรีย์ เช่น เมทานอล เป็นแหล่งคาร์บอนและให้พลังงานแก่จุลินทรีย์ เรียกว่า เฮเทอโรโทรฟิเคชันในดีไนโตรฟิเคชัน (Heterotrophic denitrification) ส่วนไฮโดรจีโนโทรฟิเคชันในดีไนโตรฟิเคชันนี้ จุลินทรีย์จะใช้ก๊าซไฮโดรเจนเป็นแหล่งพลังงาน และใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือไบคาร์บอเนตเป็นแหล่งคาร์บอน สำหรับการกำจัดไนเตรตบนเปื้อนออกจากน้ำใต้ดินหรือน้ำดื่ม จะนิยมใช้วิธีไฮโดรจีโนโทรฟิเคชันในดีไนโตรฟิเคชันมากกว่าเฮเทอโรโทรฟิเคชันในดีไนโตรฟิเคชัน เนื่องจากเหตุผลสำคัญ ดังนี้ 1) ก๊าซไฮโดรเจนไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ และไม่คงอยู่ในน้ำหลังบำบัด ทำให้ไม่ต้องการระบบเพื่อกำจัดก๊าซไฮโดรเจนคงเหลือ 2) อัตราการเกิดสลัดจ์ของแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟิเคชันในดีไนโตรฟิเคชันต่ำ ทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดกากสลัดจ์น้อย และ 3) ค่าใช้จ่ายในการดำเนินระบบถูกกว่า เนื่องจากไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการเติมสารอินทรีย์คาร์บอน เช่น เมทานอล เข้าสู่ระบบ [3, 6]

สมการการเกิดไฮโดรจีโนโทรฟิเคชันในดีไนโตรฟิเคชัน



ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการไฮโดรจีโนโทรฟิเคชันในดีไนโตรฟิเคชัน



### (1) ความเข้มข้นของไนเตรต

Park et al. [7] ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรตที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่าง ๆ ตั้งแต่ 20-490 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่าอัตราการกำจัดไนเตรตจะเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของไนเตรตสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม จะพบไนเตรตสะสมในระบบ เมื่อความเข้มข้นของไนเตรตสูงขึ้นด้วย ขณะที่ Zhou et al. [8] พบการยับยั้งกระบวนการดีไนตริฟิเคชันเกิดขึ้น เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของไนเตรตมากกว่า 30 มิลลิกรัม/ลิตร ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการสะสมของไนเตรตที่มีอยู่ในระบบมากเกินไป

### (2) พีเอช

พีเอชที่เหมาะสมต่อดีไนตริฟิเคชันจะอยู่ในช่วง 7.6-8.6 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในระบบด้วย นอกจากนี้บางงานวิจัยระบุพีเอชที่เหมาะสม คือ 7.5-7.6 เนื่องจากจะเกิดการสะสมของไนเตรต และกระบวนการดีไนตริฟิเคชันถูกยับยั้งบางส่วนที่ค่าพีเอชสูงกว่าค่าดังกล่าว [8-9]

### (3) อุณหภูมิ

เนื่องจากอุณหภูมิมีผลต่อการทำงานของเอนไซม์ และพฤติกรรมของแบคทีเรีย โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมจะอยู่ระหว่าง 25-35 °C

### (4) ความกระด้าง – สภาพต่าง

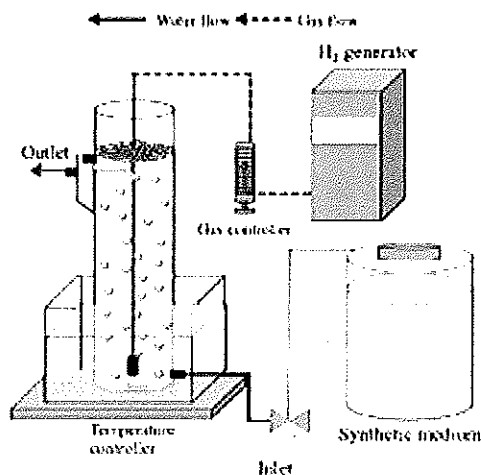
ความกระด้างและสภาพต่างมีผลเสียต่อกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน จากการศึกษาพบว่า เมื่อน้ำมีความกระด้างสูงถึง 317.5-375 มิลลิกรัม  $\text{CaCO}_3$ /ลิตร จะเกิดการตกตะกอนของ  $\text{CaCO}_3$  ซึ่งทำให้เกิดปัญหาการอุดตันของระบบตามมา [10]

### (5) ความเข้มข้นของไฮโดรเจน

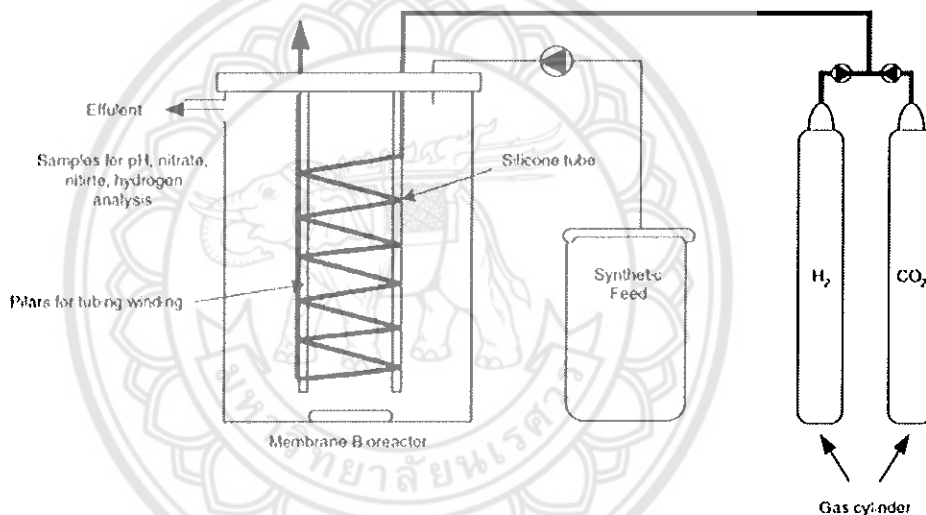
ปริมาณไฮโดรเจนต่ำสุดที่ต้องการในระบบ คือ 0.2 มิลลิกรัม/ลิตร [11] ทั้งนี้จะเกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชันได้ไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้ปริมาณไนเตรตในระบบสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า เอนไซม์ไนเตรตรีดิวเทสและไนเตรตรีดิวเทสจะถูกยับยั้ง เมื่อความเข้มข้นของไฮโดรเจนต่ำกว่า 0.2 และ 0.1 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ

### (6) แหล่งคาร์บอน

อัตราส่วนของไบคาร์เนต-คาร์บอนต่อไนเตรต-ไนโตรเจน (C/N) มีความสำคัญอย่างมาก โดยที่อัตราส่วน 2:1 เป็นค่าที่เหมาะสม [12] เพื่อให้แน่ใจว่าแหล่งคาร์บอนมีอยู่เพียงพอต่อการกำจัดไนเตรต ซึ่งสูงกว่าค่าที่ได้จากสมการไฮโดรจีโนโทรฟิเคชันดีไนตริฟิเคชัน ( $\text{C/N} = 0.21$ ) ถ้าอัตราส่วน C/N มากเกินไปจะส่งผลให้เกิดไนตรัสเป็นผลิตภัณฑ์มากกว่าก๊าซไนโตรเจน [13] และหากมีอัตราส่วน C/N น้อยเกินไป จะเกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชันได้ไม่สมบูรณ์



รูปที่ 3 การกำจัดไนเตรตจากน้ำดื่มโดยใช้เครื่องกำเนิดก๊าซไฮโดรเจน [14]



รูปที่ 4 การกำจัดไนเตรตจากน้ำดื่มโดยใช้ถังบรรจุก๊าซไฮโดรเจน [15]

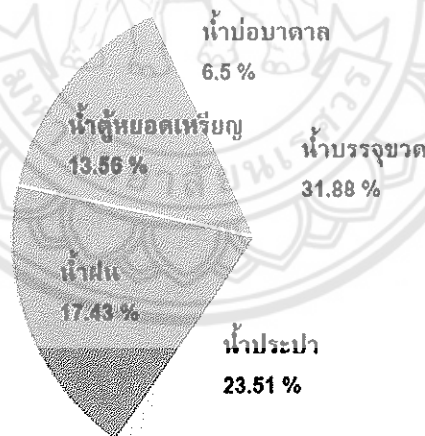
## 5. การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

### 5.1 สถานการณ์น้ำบริโภคในปัจจุบัน

น้ำเป็นสิ่งจำเป็นในการดำรงชีวิตของมนุษย์ ในแต่ละวันร่างกายต้องการน้ำประมาณ 2 ลิตร น้ำมีส่วนช่วยในการลำเลียงอาหาร ขับถ่ายของเสีย ควบคุมอุณหภูมิในร่างกาย และช่วยในการหล่อลื่นไขข้อต่าง ๆ ในร่างกายจึงมีน้ำเป็นองค์ประกอบถึง 70% ในอดีตน้ำบริโภคหรือน้ำดื่มสามารถหาได้ง่ายและสะดวก ทั้งน้ำฝน น้ำผิวดิน และน้ำบาดาล มีคุณภาพที่ดี สะอาดเพียงพอที่จะบริโภคได้ โดยไม่ต้องปรับปรุงคุณภาพใด ๆ แต่ปัจจุบันการพัฒนาประเทศ การเพิ่มขึ้นของประชากร และการแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อมที่ไม่มีประสิทธิภาพ ทำให้แหล่งน้ำเหล่านี้อยู่ในสภาพที่ไม่เหมาะต่อการบริโภค จากการสำรวจแหล่งน้ำบริโภคในชีวิตประจำวันของคนไทยในปี พ.ศ. 2556 พบว่ามาจากหลายแหล่ง ได้แก่

น้ำฝน น้ำบาดาล น้ำประปา และน้ำบรรจุขวด โดยประชาชนใช้น้ำบาดาลในการบริโภค ประมาณ 6.5% ดังรูป 5 [16] ทั้งนี้คนในชนบทส่วนใหญ่นิยมดื่มน้ำฝน และน้ำบาดาล เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์เสนอแนะคุณภาพน้ำบริโภคเพื่อการเฝ้าระวัง กรมอนามัย พ.ศ.2553 [16] จะเห็นได้ว่า ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2554-2557 คุณภาพน้ำบาดาลส่วนใหญ่ยังไม่ได้รับมาตรฐานน้ำดื่มที่พบมีทั้งการปนเปื้อนของแบคทีเรีย สารเคมี และมีคุณภาพทางกายภาพไม่ได้มาตรฐาน ทั้งนี้ปัญหาส่วนใหญ่เป็นกรปนเปื้อนด้วยสารเคมี สารเคมีที่พบ ได้แก่ เหล็ก แคลเซียม แมงกานีส ตะกั่ว สังกะสี และมีความเป็นกรด-ด่าง และความกระด้างไม่ได้มาตรฐาน [17] การมีคุณลักษณะทางกายภาพไม่ได้มาตรฐาน เช่น น้ำมีสีมาก เกิน สูดหายใจการปนเปื้อนของแบคทีเรีย ซึ่งคาดว่าน่าจะเป็นการปนเปื้อนในระหว่างการนำน้ำขึ้นมาใช้ และการกักเก็บน้ำ นอกจากน้ำบาดาลแล้ว น้ำใต้ดินยังรวมถึงน้ำบ่อขุดหรือน้ำบ่อตื้น ที่มีความลึกไม่เกิน 100 ฟุต สารเคมีที่พบปนเปื้อน ได้แก่ เหล็ก แมงกานีส แคลเซียม ตะกั่ว คลอไรด์ ไนเตรต และความเป็นกรด-ด่าง ไม่ได้มาตรฐาน ส่วนปัญหาคุณภาพน้ำด้านกายภาพที่พบ คือ มีความขุ่น และสีเกินมาตรฐาน [17]

สำหรับประเทศไทย กรมอนามัยได้กำหนดมาตรฐานเกณฑ์คุณภาพน้ำบริโภค พ.ศ. 2553 เพื่อควบคุมให้มีการเฝ้าระวังตรวจสอบคุณภาพน้ำดื่มให้ปลอดภัยต่อผู้บริโภค ดังตารางที่ 2



รูปที่ 5 สัดส่วนการใช้น้ำบริโภค

ที่มา : การสำรวจแหล่งน้ำบริโภคในครัวเรือนของสำนักสุขาภิบาลอาหารและน้ำ พ.ศ.2556

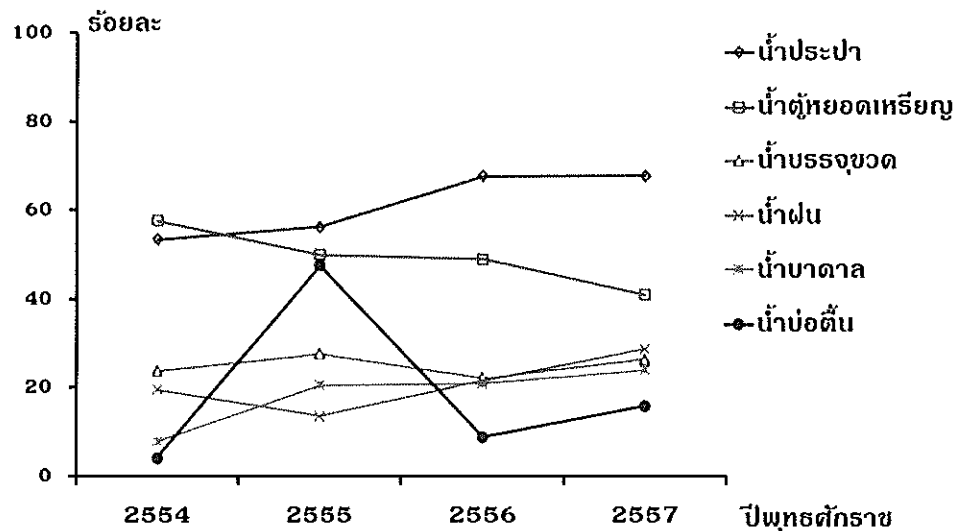
ตารางที่ 2 มาตรฐานน้ำบริโภค กรมอนามัย

| ข้อมูลการตรวจวิเคราะห์   | ค่าที่กำหนด                      | หน่วยวัด                    |
|--|----------------------------------|-----------------------------|
| <b>คุณภาพน้ำทางกายภาพ</b>  |                                  |                             |
| - ความเป็นกรด-ด่าง (pH)  | อยู่ระหว่าง 6.5-8.5 (Field test) |                             |
| - ความขุ่น (Turbidity)   | ไม่เกิน 5                        | เอ็นทียู                    |
| - สี (Color)   | ไม่เกิน 15                       | แพลตตินัมโคบอลท์            |
| <b>คุณภาพน้ำทางเคมีทั่วไป</b>  |                                  |                             |
| - สารละลายทั้งหมดที่เลือกจากการระเหย (TDS)                               | ไม่เกิน 1,000                    | มิลลิกรัม/ลิตร              |
| - ความกระด้าง (Hardness)   | ไม่เกิน 500                      | มิลลิกรัม/ลิตร              |
| - ซัลเฟต (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )                                | ไม่เกิน 250                      | มิลลิกรัม/ลิตร              |
| - คลอไรด์ (Cl <sup>-</sup> )   | ไม่เกิน 250                      | มิลลิกรัม/ลิตร              |
| - ไนเตรท (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> as NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) | ไม่เกิน 50                       | มิลลิกรัม/ลิตร              |
| - ฟลูออไรด์ (F <sup>-</sup> )  | ไม่เกิน 0.7                      | มิลลิกรัม/ลิตร              |
| <b>คุณภาพน้ำทางโลหะหนักทั่วไป</b>  |                                  |                             |
| - เหล็ก (Fe)   | ไม่เกิน 0.5                      | มิลลิกรัม/ลิตร              |
| - แมงกานีส (Mn)  | ไม่เกิน 0.3                      | มิลลิกรัม/ลิตร              |
| - ทองแดง (Cu)  | ไม่เกิน 1.0                      | มิลลิกรัม/ลิตร              |
| - สังกะสี (Zn)   | ไม่เกิน 3.0                      | มิลลิกรัม/ลิตร              |
| <b>คุณภาพน้ำทางโลหะหนัก สารเป็นพิษ</b>                                   |                                  |                             |
| - ตะกั่ว (Pb)  | ไม่เกิน 0.01                     | มิลลิกรัม/ลิตร              |
| - โครเมียม (Cr)  | ไม่เกิน 0.05                     | มิลลิกรัม/ลิตร              |
| - แคดเมียม (Cd)  | ไม่เกิน 0.003                    | มิลลิกรัม/ลิตร              |
| - สารหนู (As)  | ไม่เกิน 0.01                     | มิลลิกรัม/ลิตร              |
| - ปรอท (Hg)  | ไม่เกิน 0.001                    | มิลลิกรัม/ลิตร              |
| <b>คุณภาพน้ำทางแบคทีเรีย</b>   |                                  |                             |
| - โคลิฟอร์มแบคทีเรีย (Coliform bacteria)                                 | ต้องตรวจไม่พบ                    | เอ็มพีเอ็นต่อ 100 มิลลิลิตร |
| - ฟีคัลโคลิฟอร์มแบคทีเรีย (Faecal coliform bacteria)                     | ต้องตรวจไม่พบ                    | เอ็มพีเอ็นต่อ 100 มิลลิลิตร |

หมายเหตุ 1. น้ำบริโภค หมายถึง น้ำประปา น้ำบาดาล น้ำบ่อตื้น และน้ำฝน ที่ประชาชนใช้ดื่ม เตรียมปรุงประกอบอาหาร รวมถึงน้ำที่ใช้ล้างหน้าและแปรงฟัน

2. วิธีตรวจวิเคราะห์เป็นไปตามวิธีการในหนังสือ Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater Edition 21st 2005 APHA AWWA WEF.

3. ประกาศกรมอนามัย (13 ตุลาคม 2553)



รูปที่ 6 คุณภาพน้ำบริโภคทั่วประเทศที่ใช้ในครัวเรือนที่ผ่านมาตรฐานตามเกณฑ์ฯ กรมอนามัย  
ที่มา : สำนักสุขาภิบาลอาหารและน้ำ กรมอนามัย

## 5.2 ปัญหาไนเตรตในน้ำบาดาล

ไนเตรตเป็นรูปแบบหนึ่งของไนโตรเจนที่มีอยู่ในน้ำ ซึ่งอาจอยู่ในรูปของแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต โดยไนโตรเจนทั้งหมดจะประกอบด้วยสารไนโตรเจนที่อยู่ในรูปของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ โดยรายละเอียดค่าทางสถิติการปนเปื้อนของไนเตรตในน้ำบาดาลจากจำนวนบ่อบาดาลทั้งประเทศไทย แสดงในตารางที่ 3

### 1. แอมโมเนีย (Ammonia)

เป็นสารที่เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ไนโตรเจนด้วยแบคทีเรียจนกลายเป็นแอมโมเนีย แอมโมเนียจะเป็นตัวบ่งชี้ว่ามีสิ่งปนเปื้อนของน้ำที่มาจากห้องส้วม ดังนั้น มาตรฐานน้ำดื่มของการประปานครหลวงได้กำหนดไว้ว่า ห้ามมีแอมโมเนียในน้ำประปาเกิน 0.2 มิลลิกรัม/ลิตร เมื่อน้ำประปามีปริมาณแอมโมเนีย ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างคลอรีนที่เติมลงไปใต้น้ำประปากับแอมโมเนีย ทำให้ระบบประปาต้องเติมคลอรีนมากขึ้น เพราะส่วนหนึ่งจะไปทำปฏิกิริยากับปฏิกิริยากับแอมโมเนียได้สารประเภท Chloramines และจะมีคลอรีนส่วนเกินหลงเหลืออยู่เรียกว่า คลอรีนอิสระ โดยสาร Chloramines ก็สามารถฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาได้เช่นเดียวกับคลอรีนอิสระ แต่มีความสามารถในการฆ่าเชื้อโรคได้ต่ำกว่าคลอรีนอิสระ

### 2. ไนไตรต์ (Nitrite)

เป็นสารที่เกิดจากการย่อยสลายสารแอมโมเนีย ถ้าพบในน้ำมีไนไตรต์แสดงว่าการย่อยสลายสารอินทรีย์ไม่เสร็จสิ้นสมบูรณ์ แต่สำหรับในน้ำประปาไม่ควรพบไนไตรต์เลย เพราะไม่ควรพบสารอินทรีย์ปนเปื้อนอยู่ในน้ำประปา ตามมาตรฐานน้ำดื่มของการประปานครหลวง ซึ่งได้กำหนดให้มีความเข้มข้นไนไตรต์ไนโตรเจน ไม่เกิน 0.001 มิลลิกรัม/ลิตรของไนโตรเจน

### 3. ไนเตรต (Nitrate)

เป็นสารที่เกิดจากการย่อยสลายสารไนไตรต์ ซึ่งเกิดมาจากสารแอมโมเนีย ถ้าพบว่ามีสารไนเตรตในน้ำแสดงว่าสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำได้ถูกย่อยสลายจนเสร็จสิ้นสมบูรณ์ และโดยทั่วไปจะไม่มีผลอันตรายต่อสุขภาพ ถ้าในน้ำมีสารไนเตรตเกินกว่า 45 มิลลิกรัม/ลิตร หรือ 10 มิลลิกรัม/ลิตรของไนโตรเจนในน้ำประปาจะเป็นอันตรายต่อเด็กทารก โดยสารไนเตรตจะทำให้เกิดอาการตัวเขียวคล้ำและชัก ทำให้เสียชีวิตได้ (Blue baby หรือ Methemoglobinemia)

ตารางที่ 3 ค่าทางสถิติการปนเปื้อนของไนเตรตในน้ำบาดาล [18]

| ความเข้มข้นของไนเตรต                    | หน่วย (มิลลิกรัมต่อลิตร) |
|---|--------------------------|
| ค่าสูงสุด                               | 322                      |
| ค่าเฉลี่ย                               | 2                        |
| ค่าต่ำสุด                               | 0                        |
| ค่า Acceptable value                    | < 45                     |
| ค่าปนเปื้อนตัวแทน (ที่ 85% ของจำนวนบ่อ) | ต่ำสุด 45                |
|   | สูงสุด 3                 |

### 5.3 เทคโนโลยีของการกำจัดไนเตรตในน้ำบาดาล

#### 1. การตกผลึกทางเคมี (Chemical precipitation)

เป็นกระบวนการที่เติมสารเคมีลงไปในน้ำเพื่อให้สิ่งสกปรกที่ละลายน้ำเกิดเป็นสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำและตกตะกอนลงได้ กระบวนการในการเกิดตะกอนทางเคมี แบ่งเป็นวิธีต่าง ๆ เช่น

##### (1) Hydroxide Precipitation

เป็นการทำให้สิ่งสกปรกที่ละลายน้ำอยู่ซึ่งจะอยู่ในสภาวะอนุภาคบวกตกตะกอนออกมาในรูปเกลือไฮดรอกไซด์ โดยการปรับค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำให้สูงขึ้น โดยให้เป็นด่างสูง (คือ มีความเป็นกรด-ด่างสูงกว่า 7) สารเคมีที่นิยมใช้คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และปูนขาว ส่วนใหญ่แล้วกระบวนการ Hydroxide Precipitation มักนิยมใช้กับน้ำที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนักในรูปของไอออนหรือประจุ

##### (2) Carbonate Precipitation

เป็นการตกตะกอนอนุภาคบวกหรืออนุลบ (Cation) หรือโลหะหนักออกจากน้ำในรูปของผลึกคาร์บอเนต ซึ่งส่วนใหญ่เป็นไอออนของโลหะ โดยโลหะคาร์บอเนตเกือบทุกตัวมีค่าความสามารถในการละลายน้ำได้ต่ำ อย่างไรก็ตาม การตกตะกอนของโลหะในรูปของคาร์บอเนตจำเป็นต้องปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างให้เหมาะสมด้วย เพื่อที่จะได้เกิดการตกตะกอนที่สมบูรณ์ ซึ่งสภาพความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมของการตกตะกอนโลหะ มักจะอยู่ในสภาวะที่เป็นด่างสูง ๆ

## 2. การแลกเปลี่ยนประจุ (Ion exchange)

การบำบัดน้ำโดยการแลกเปลี่ยนไอออนเป็นการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างไอออนต่าง ๆ ในน้ำกับไอออนของเรซิน ซึ่งจะส่งผลให้ไอออนของสิ่งสกปรกที่ปนเปื้อนในน้ำถูกดูดซับลงบนผิวของเรซิน เพราะไอออนแต่ละชนิดจะถูกดูดซับหรือจับบนผิวของเรซินได้ไม่เท่ากัน จึงทำให้ต้องมีการศึกษาถึงชนิดและสมบัติของเรซินว่าเป็นอย่างไร รวมทั้งการทดสอบประสิทธิภาพของเรซินในการดูดซับสิ่งปนเปื้อนในน้ำชนิดต่าง ๆ ในสภาวะที่แตกต่างกัน

การแบ่งประเภทของเรซินสามารถแบ่งตามคุณสมบัติของเรซินในการจับหรือดูดซับสิ่งปนเปื้อน ดังนั้น เรซินที่ใช้ในการบำบัดน้ำสามารถแบ่งได้เป็น 4 ชนิด คือ

- (1) Weak acid cation resin
- (2) Strong acid cation resin
- (3) Weak base anion resin
- (4) Strong base anion resin

นอกจากเรซินชนิดต่าง ๆ ที่กล่าวมาแล้วนั้น สามารถใช้ในการดูดซับสิ่งปนเปื้อนในน้ำ การแลกเปลี่ยนไอออนยังมีสารซีโอไลต์ (Zeolite) ที่มีการนิยมนำมาใช้ในการดูดซับไอออน โดยเฉพาะไอออนโลหะหนักในน้ำ โดยซีโอไลต์จะมีอนุภาคโมเลกุล คือ Sodium aluminosilicates ที่จะทำหน้าที่ในการดูดซับโลหะหนักหรืออนุภาคบวกต่าง ๆ ไว้ได้

## 3. การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับเป็นกระบวนการที่แก๊สหรือสารละลายหรือสารแขวนลอยขนาดเล็ก ซึ่งละลายอยู่ในน้ำให้อยู่บนผิวของสารอีกชนิดหนึ่ง โดยที่สารละลายหรือสารแขวนลอยขนาดเล็กนี้ เรียกว่า Adsorbate ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของสารที่ถูกดูดซับ เรียกว่า Adsorbent การดูดซับนี้จะเป็นการดูดซับแบบระหว่างสถานะต่าง ๆ ทั้งของเหลว ก๊าซ และของแข็ง โดยในที่นี้จะพิจารณาถึงเฉพาะแบบของเหลว-ของแข็ง ในการดูดซับผิวโมเลกุลของสารละลายหรือสารแขวนลอยก็จะถูกกำจัดออกจากน้ำและไปเกาะติดอยู่บนตัวดูดซับ โมเลกุลของสารส่วนใหญ่จะเกาะจับอยู่กับผิวภายในโพรงของตัวดูดซับ และมีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่เกาะอยู่ที่ผิวนอก การถ่ายเทโมเลกุลจากน้ำไปหาตัวดูดซับเกิดขึ้นได้จนถึงสมดุลจึงหยุด ณ จุดสมดุลความเข้มข้นของโมเลกุลในน้ำจะเหลือน้อย เพราะโมเลกุลส่วนใหญ่เคลื่อนที่ไปเกาะจับอยู่กับตัวดูดซับ โดยในการเกาะติดจะมี Driving Force อยู่ 2 แบบ คือ การดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี

### (1) การดูดซับทางกายภาพ

เป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waals Forces) ซึ่งเกิดจากการรวมแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic force) การดึงดูดด้วยแรงที่อ่อนทำให้การดูดซับประเภทนี้มีพลังงาน

การคายความร้อนค่อนข้างน้อย คือ ต่ำกว่า 20 กิโลจูล/โมล และสามารถเกิดการผันกลับของกระบวนการได้ง่าย ซึ่งเป็นข้อดีเพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่ายด้วย สารที่ถูกดูดซับสามารถเกาะอยู่รอบ ๆ ผิวของสารดูดซับได้หลายชั้น หรือในแต่ละชั้นของโมเลกุลสารถูกดูดซับจะติดอยู่กับชั้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับในชั้นก่อนหน้านั้น โดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสารถูกดูดซับ และจะเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลาย

#### (2) การดูดซับทางเคมี

การดูดซับประเภทนี้เกิดขึ้นเมื่อตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของตัวถูกดูดซับเดิม คือ มีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเดิม แล้วมีการจัดเรียงอะตอมไปเป็นสารประกอบใหม่ขึ้น โดยมีพันธะเคมีซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง มีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้อง ทำให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงประมาณ 50-400 กิโลจูล/โมล หมายความว่า การกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับจะทำได้ยาก คือ ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ และการดูดซับประเภทนี้จะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียวเท่านั้น

#### 4. การกรองผ่านเมมเบรน (Membrane process)

กระบวนการแผ่นเยื่อกรองมีหน้าที่หลัก คือ แยกของเสียหรือสิ่งปนเปื้อนออกจากน้ำ กระบวนการนี้เป็นกระบวนการแยกที่มีตั้งแต่การกรองทั่วไป การกรองแบบ Ultrafiltration จนถึงการกรองแบบ Reverse osmosis (RO) แผ่นกรองเป็นแผ่นกั้นขวางทางน้ำไหล ซึ่งจะยอมให้น้ำไหลผ่านให้อ่อนต่าง ๆ ผ่านได้ และยอมให้สารที่มีโมเลกุลเล็ก ๆ ผ่านได้ ระบบการกรองแบบแผ่นเยื่อกรองไม่ได้เดินระบบเหมือนกับระบบการกรองทั่วไป แต่จะให้น้ำไหลผ่านแผ่นเยื่อกรองด้วย มีทิศทางน้ำไหลขนานกับแผ่นเยื่อกรอง ไม่ควรให้น้ำไหลตั้งฉากกับแผ่นเยื่อกรอง ถ้าเป็นแบบใช้กระแสไฟฟ้ากระทำต่อระบบจะเรียกระบบนี้ว่า การแยกด้วยไฟฟ้า (Electrodialysis) ถ้าเป็นแบบใช้ความดันสูงกระทำต่อระบบ จะเรียกระบบนี้ว่า ระบบออสโมซิสผันกลับ (Reverse osmosis, RO) กลไกของการกรองด้วยกระบวนการแผ่นเยื่อกรอง และรายละเอียดของกระบวนการ แสดงดังตารางที่ 4 และ 5

ตารางที่ 4 กลไกของการกรองด้วยกระบวนการแผ่นเยื่อกรอง [18]

| ขนาดของสารปนเปื้อน (ไมโครเมตร) | ชนิดของสารปนเปื้อน   | กลไกการกรอง    |
|--------------------------------|----------------------|----------------|
| 0.001 - 0.002                  | ไอออน                | การแพร่กระจาย  |
| 0.005 - 0.20                   | สารอินทรีย์ละลาย     | การแพร่กระจาย  |
| 0.20 - 10                      | สารอินทรีย์เล็กมาก ๆ | การไหลผ่านช่อง |
| 75                             | ของแข็งเล็กมาก ๆ     | การไหลผ่านช่อง |

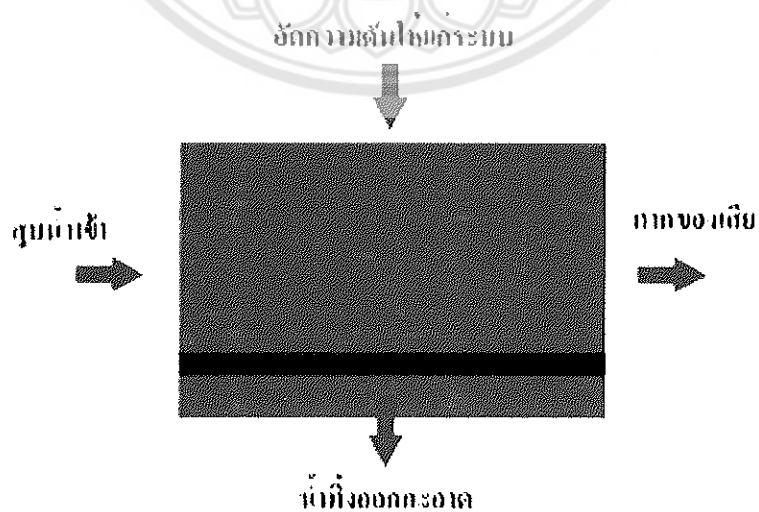


ตารางที่ 5 รายละเอียดของกระบวนการแผ่นเยื่อกรอง [18]

| ปัจจัยต่าง ๆ               | Microfiltration | Ultrafiltration | Nanofiltration | Reverse osmosis |
|----------------------------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|
| กำจัดของแข็งแขวนลอย        | ดีมาก           | ไม่เหมาะสม      | ไม่เหมาะสม     | ไม่เหมาะสม      |
| กำจัดสารอินทรีย์ละลาย      | ทำไม่ได้        | ดีมาก           | ดีมาก          | ดีมาก           |
| กำจัด VOC                  | ทำไม่ได้        | ไม่ดี           | พอใช้          | ดี              |
| กำจัดสารอนินทรีย์ละลาย     | ทำไม่ได้        | ทำไม่ได้        | ดี             | ดีมาก           |
| ผลของความดันดูดซึม         | ไม่มีใช้        | มีผลเล็กน้อย    | มีผลมาก        | มีผลมาก ๆ       |
| ความเข้มข้นที่สามารถรับได้ | ไม่เกิน 5%      | ไม่เกิน 50%     | ไม่เกิน 15%    | ไม่เกิน 15%     |
| คุณภาพของน้ำซึมผ่าน        | ดีมาก           | ดีมาก           | ดี             | ดีมาก           |
| ความต้องการพลังงาน (บาร์)  | 1-3             | 3-7             | 5-10           | 15-70           |

(1) การกรองอัลตรา (Ultrafiltration)

หน้าที่หลักของระบบกรองอัลตรา คือ ทำการแยกตัวละลายออกจากสารทำละลาย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดของโมเลกุลและรูปร่างของโมเลกุลด้วย ในการเดินระบบต้องการการให้ความดันกระทำต่อระบบกรองโดยน้ำ โดยสารปนเปื้อนที่มีขนาดโมเลกุลขนาดเล็กจะไหลผ่านแผ่นเยื่อกรองได้ ส่วนสารปนเปื้อนที่มีขนาดใหญ่กว่ารูหรือช่องน้ำไหลจะถูกดักอยู่บนผิวแผ่นเยื่อกรอง

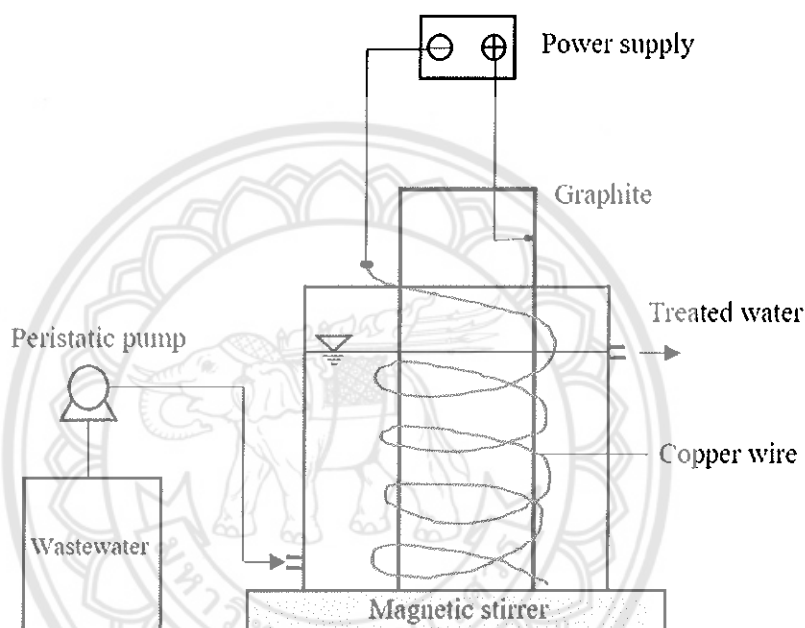


รูปที่ 7 การทำงานของระบบกรองอัลตราแบบ Cross-flow



## 6.1 การเตรียมชุดทดลองไฟฟ้าเคมีร่วมกับชีวภาพ

ชุดทดลองไฟฟ้าเคมีร่วมกับชีวภาพแสดงในรูปที่ 10 ประกอบไปด้วยถังอะคริลิกทรงกระบอก (ปริมาตรการทำงาน 1,400 มิลลิลิตร) แผ่นแกรไฟต์ (ขนาด 75x300x10 มิลลิเมตร ต่อเข้ากับขั้วบวก) ลวดทองแดง (เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ยาว 500 มิลลิเมตร ต่อเข้ากับขั้วลบ), แหล่งจ่ายไฟ กระแสตรง เครื่องกวนสารแบบแม่เหล็ก ถังน้ำเสียสังเคราะห์ และปั๊มดูดจ่ายของเหลวแบบรีดท่อ (อัตราเร็ว 175 มิลลิลิตร/ชั่วโมง ระยะเวลาพักเก็บ 8 ชั่วโมง) โดยจะพันลวดทองแดงเป็นเกลียวบนแผ่นแกรไฟต์และใส่เข้าไปในถังอะคริลิกทรงกระบอก



รูป 10 ชุดทดลองไฟฟ้าเคมีร่วมกับชีวภาพ

## 6.2 การเตรียมน้ำสังเคราะห์และจุลินทรีย์

น้ำสังเคราะห์เตรียมได้จากสารเคมีต่อไปนี้ ได้แก่  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{CH}_3\text{COONa}\cdot 3\text{H}_2\text{O}$  และ  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  (ดังตารางที่ 6) ทั้งนี้  $\text{NaNO}_3$  และ  $\text{CH}_3\text{COONa}\cdot 3\text{H}_2\text{O}$  ทำหน้าที่เป็นสารมลพิษไนเตรตและสารอินทรีย์ ในขณะที่  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  ทำหน้าที่เป็นสารอาหารสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ โดยปริมาณของ  $\text{CH}_3\text{COONa}\cdot 3\text{H}_2\text{O}$  จะแตกต่างกันเป็น 0.1134 0.1701 และ 0.2268 กรัมต่อลิตร ซึ่งตรงกับค่า C/N ที่ 1.0 1.5 และ 2.0 ตามลำดับ

จุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลอง นำมาจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงพยาบาลวังทอง จังหวัดพิษณุโลก และนำมาคัดแยกภายใต้สภาวะไร้อากาศ

ตารางที่ 6 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมน้ำสังเคราะห์ (ละลายในน้ำประปา 1 ลิตร)

| C/N ratio | NaNO <sub>3</sub> (กรัม) | CH <sub>3</sub> COONa·3H <sub>2</sub> O (กรัม) | KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> (กรัม) |
|-----------|--------------------------|--|--|
| 1.0       | 0.1214                   | 0.1134   | 0.0175                                 |
| 1.5       | 0.1214                   | 0.1701   | 0.0175                                 |
| 2.0       | 0.1214                   | 0.2268   | 0.0175                                 |

### 6.3 ขั้นตอนการทดลอง

นำจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดแยกแล้ว 200 มิลลิลิตร ใส่ลงในชุดทดลอง 2 ชุด โดยชุดแรกจะเป็นชุดควบคุม (ถังปฏิกรณ์ชีวภาพ) - ไม่มีการให้กระแสไฟฟ้า เพียงแต่ปรับค่า C/N ระหว่างการทดลอง ส่วนชุดที่ 2 (ถังปฏิกรณ์ไฟฟ้าเคมีร่วมกับชีวภาพ) - มีการให้กระแสไฟฟ้า และปรับค่า C/N ระหว่างการทดลอง (ดังตารางที่ 7) และวิเคราะห์คุณภาพน้ำก่อนและหลังบำบัดทุกวัน

ตารางที่ 7 สรุปเงื่อนไขการทดลอง

| การทดลอง | เครื่องปฏิกรณ์                   | กระแสไฟฟ้า (มิลลิแอมป์) | C/N ratio |
|----------|----------------------------------|-------------------------|-----------|
| 1        | ถังปฏิกรณ์ชีวภาพ (ชุดควบคุม)     | -                       | 2.0       |
|          |                                  | -                       | 1.5       |
|          |                                  | -                       | 1.0       |
|          | ถังปฏิกรณ์ไฟฟ้าเคมีร่วมกับชีวภาพ | 10                      | 2.0       |
|          |                                  | 10                      | 1.5       |
|          |                                  | 10                      | 1.0       |
| 2        | ถังปฏิกรณ์ไฟฟ้าเคมีร่วมกับชีวภาพ | 10                      | 1.0       |
|          |                                  | 20                      | 1.0       |
|          |                                  | 30                      | 1.0       |

### 6.4 วิธีการวิเคราะห์

คุณภาพน้ำก่อนและหลังบำบัดจะวิเคราะห์ได้จากปริมาณไนโตรเจนทั้ง 3 รูป ได้แก่ NO<sub>3</sub>-N, NO<sub>2</sub>-N และ NH<sub>4</sub>-N ด้วยวิธี ultraviolet spectrophotometric screening, colorimetric and phenate ตามลำดับ ตามวิธีการมาตรฐานสำหรับการตรวจสอบน้ำและน้ำเสีย [19] และคำนวณประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรต และไนโตรเจนทั้งหมด (total N) ได้ดังสมการที่ 1 และ 2

วิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนในน้ำหลังบำบัดด้วยเครื่อง TOC analyser (Analytikjena, multi N/C 2100s) นอกจากนี้ยังวัดค่าออกซิเจนและพีเอชในถังปฏิกรณ์ระหว่างการทดลองอย่างสม่ำเสมอด้วย DO meter และ pH meter

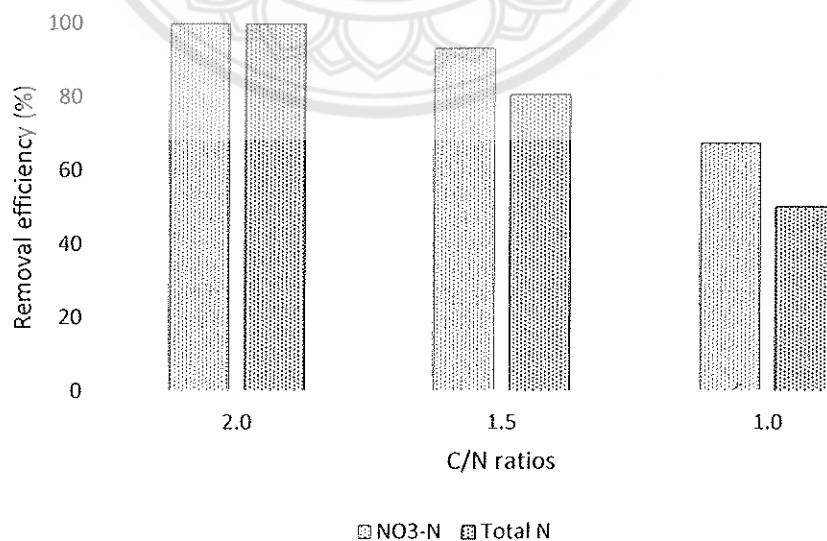
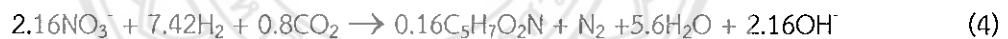
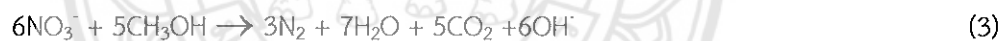
$$\text{ประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรต} = \left(1 - \frac{[\text{NO}_3^-]_{\text{out}}}{[\text{NO}_3^-]_{\text{in}}}\right) \times 100 \quad (1)$$

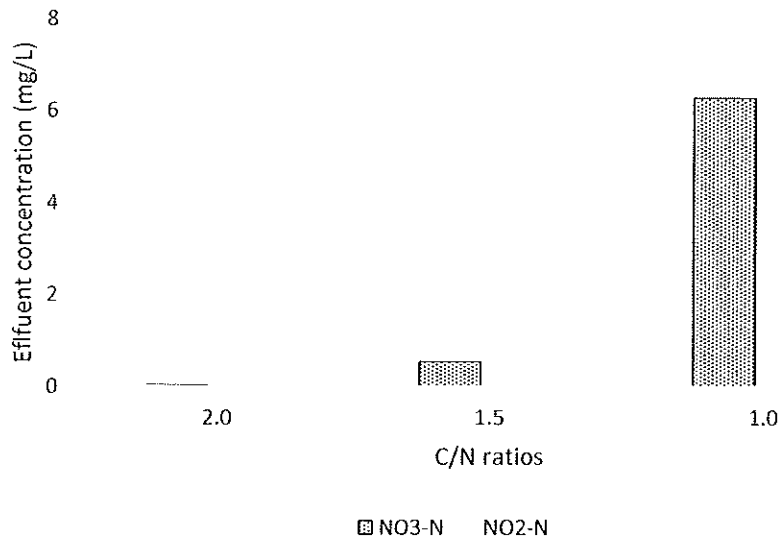
$$\text{ประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมด} = \left(1 - \frac{[\text{NO}_3^-]_{\text{out}} + [\text{NO}_2^-]_{\text{out}} + [\text{NH}_4^+]_{\text{out}}}{[\text{NO}_3^-]_{\text{in}}}\right) \times 100 \quad (2)$$

## 7. ผลการทดลองและอภิปรายผล

ประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ชีวภาพที่ไม่มีการให้กระแสไฟฟ้า และปรับค่า C/N ต่างๆ แสดงดังรูปที่ 11(ก) และ 11(ข) จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรตและไนโตรเจนทั้งหมดสูงกว่า 99% ที่ค่า C/N เท่ากับ 2.0 โดยไนเตรตจะถูกกำจัดออกอย่างสมบูรณ์ผ่านกระบวนการเฮเทอโรโทรฟิกดีไนตริฟิเคชัน (ดังสมการที่ 3 และ 4) ซึ่งแสดงถึงสภาวะที่มีสารอินทรีย์คาร์บอนมากเพียงพอ เช่น  $\text{CH}_3\text{OH}$  และ  $\text{CH}_3\text{COONa}$  เมื่อค่า C/N เท่ากับ 1.5 ประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรตและไนโตรเจนทั้งหมดลดลงเหลือ 93% และ 80% ตามลำดับ และพบไนไตรต์ในน้ำหลังบำบัดสูงขึ้น และประสิทธิภาพการบำบัดจะลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึง C/N เท่ากับ 1.0 จากผลการทดลองเป็นการยืนยันว่า ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนเป็นปัจจัยสำคัญในการประสบความสำเร็จของกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน [20] โดยปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนที่เพียงพอ คือ ค่า C/N มากกว่า 1.0

ปฏิกิริยาทางชีวภาพ:

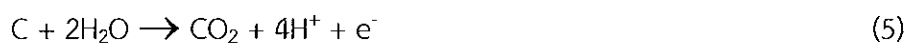




รูปที่ 11 ประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ชีวภาพ (ก) การกำจัดไนเตรตและไนโตรเจนทั้งหมด และ (ข) ปริมาณไนโตรเจนในน้ำหลังบำบัด

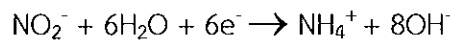
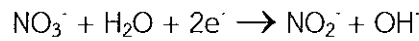
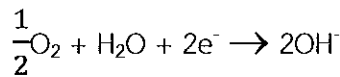
เมื่อนำแกรไฟต์มาใช้เป็นขั้วบวกในเครื่องปฏิกรณ์ไฟฟ้าเคมีร่วมกับชีวภาพ พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรตและไนโตรเจนทั้งหมดสูงกว่า 98% ที่ค่า C/N เท่ากับ 1.5 และ 2.0 (ดังรูปที่ 12(ก)) โดยคาร์บอนจะละลายจากขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) หรือไบคาร์บอเนต (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) (สมการที่ 5) ในขณะเดียวกัน ปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิสของน้ำจะเกิดขึ้นที่ลวดทองแดง เกิดเป็นฟองก๊าซไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) ขนาดเล็กตลอดความยาวลวดทองแดง (สมการที่ 8) อย่างไรก็ตาม ปฏิกิริยาเคมีอื่น ๆ ที่อาจเกิดขึ้นที่ขั้วบวกและลบ แสดงไว้ในสมการที่ 6 – 11 [21] จากปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีข้างต้น ทำให้สามารถกำจัดไนเตรตทางชีวภาพได้อีกกระบวนการหนึ่ง เรียกว่า ไฮโดรจีโนโทรฟิเคชันในตรีฟิเคชัน โดยคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนที่สร้างขึ้นนั้นจะใช้ในการกำจัดไนเตรต ดังสมการที่ 4 จะเห็นได้ว่า มี 2 กระบวนการเกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์ไฟฟ้าเคมีร่วมกับชีวภาพในการกำจัดไนเตรต คือ กระบวนการเฮเทอโรโทรฟิเคชันในตรีฟิเคชัน และไฮโดรจีโนโทรฟิเคชันในตรีฟิเคชัน ซึ่งเป็นเหตุผลสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรตได้มากกว่าถังปฏิกรณ์ชีวภาพ

ปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้า (ขั้วบวก) :



ปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้า (ขั้วลบ) :

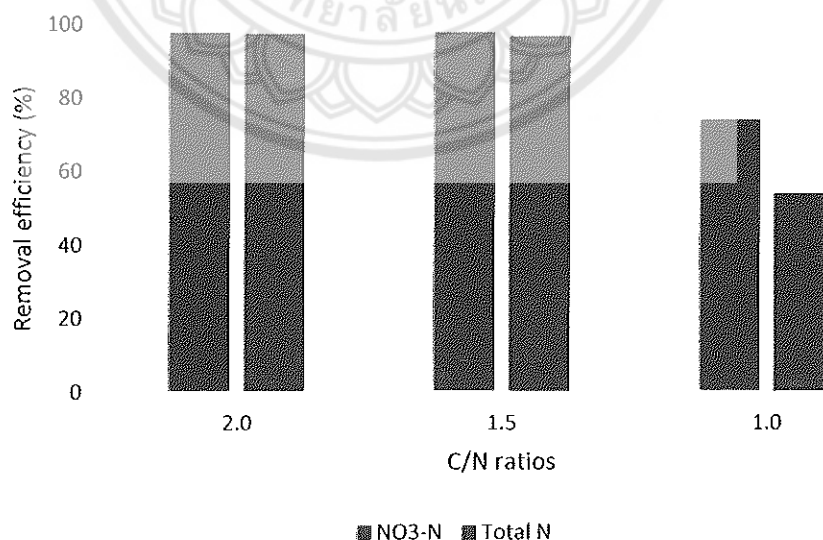


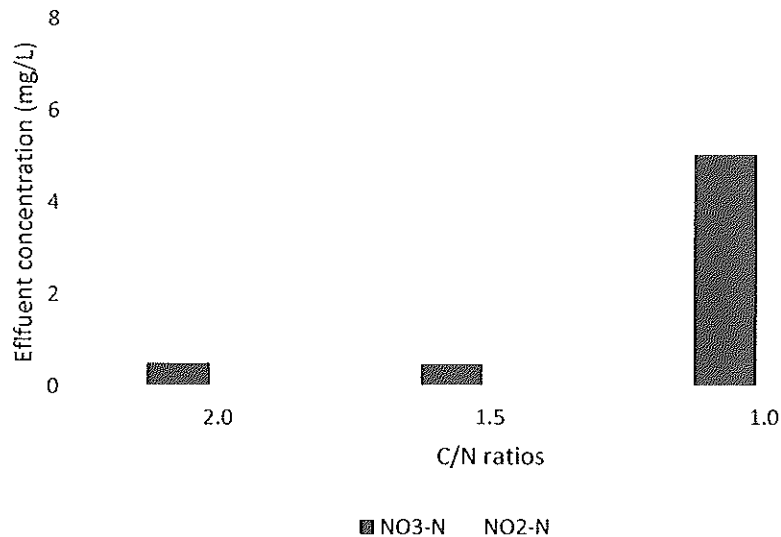


|   |       |      |
|---|-------|------|
| ๑ | 70    |      |
|   | 1๙2   | (9)  |
|   | -5    |      |
|   | ๒71๙๘ | (10) |
|   | 2562  | (11) |

ข้อดีอีกอย่างของการใช้แกรไฟต์เป็นขั้วไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์ไฟฟ้าเคมีร่วมกับชีวภาพ ก็คือความสามารถในการควบคุมค่าพีเอช โดยค่าพีเอชเพิ่มขึ้นจาก 7.7 ถึงค่าสูงสุด 8.9 ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ ในขณะที่ค่าพีเอชลดลงเล็กน้อยเป็น 7.3 ในถังปฏิกรณ์ไฟฟ้าเคมีร่วมกับชีวภาพ ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากขั้วแกรไฟต์ ทำหน้าที่เป็นกรดอ่อนในการปรับสภาพพีเอชให้เป็นกลางในระหว่างการทดลอง

จากรูปที่ 12(ข) พบไนไตรต์เหลือในน้ำหลังบำบัดในถังปฏิกรณ์ไฟฟ้าเคมีร่วมกับชีวภาพที่ค่า C/N เท่ากับ 2.0 ซึ่งต่างจากถังปฏิกรณ์ชีวภาพ (รูปที่ 11(ข)) ทั้งนี้การสะสมของไนไตรต์แสดงถึงการเกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชันไม่สมบูรณ์ ซึ่งมักเกิดขึ้นในสถานะที่มีสารอินทรีย์ต่ำ [22, 23] หรือปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีแคโทดิก ดังสมการที่ 10 นอกจากนี้ในงานวิจัยอื่น [24] ตรวจพบแอมโมเนียมไอออนในน้ำหลังบำบัด ซึ่งมาจากการรีดักชันของไนไตรต์ ดังสมการที่ 11 โดยใช้สแตนเลสเป็นขั้วไฟฟ้าบวกและลบ ทั้งนี้แอมโมเนียมไอออนที่เกิดขึ้นจำเป็นต้องกำจัดต่อไป อย่างไรก็ตาม ในการทดลองนี้ ไม่พบแอมโมเนียมไอออนเกิดขึ้น ซึ่งแสดงถึงข้อดีของการใช้แกรไฟต์และลวดทองแดงเป็นขั้วไฟฟ้า และมีผลอย่างมากต่อปฏิกิริยาแคโทดิกภายในถังปฏิกรณ์

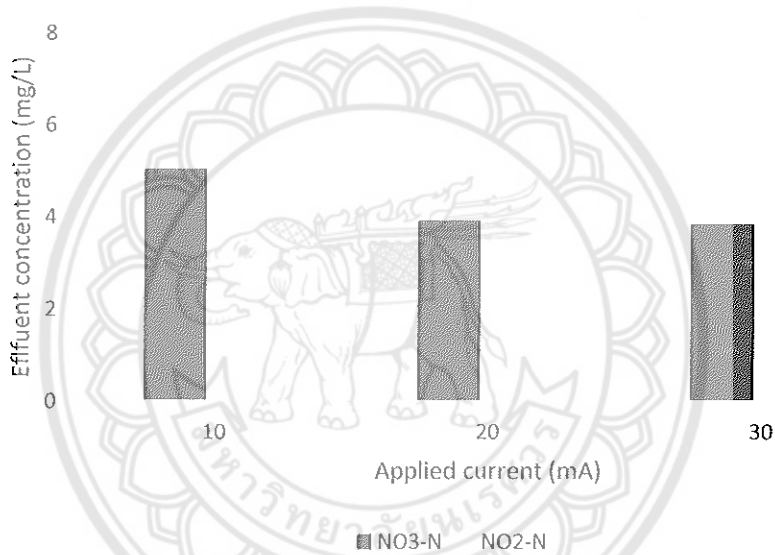
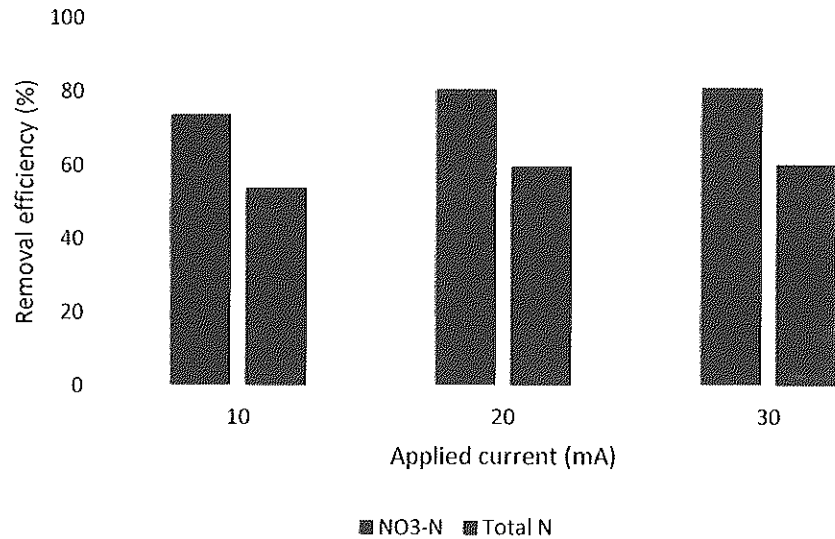




รูปที่ 12 ประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ไฟฟ้าเคมีร่วมกับชีวภาพ (ก) การกำจัดไนเตรตและไนโตรเจนทั้งหมด และ (ข) ปริมาณไนโตรเจนในน้ำหลังบำบัด

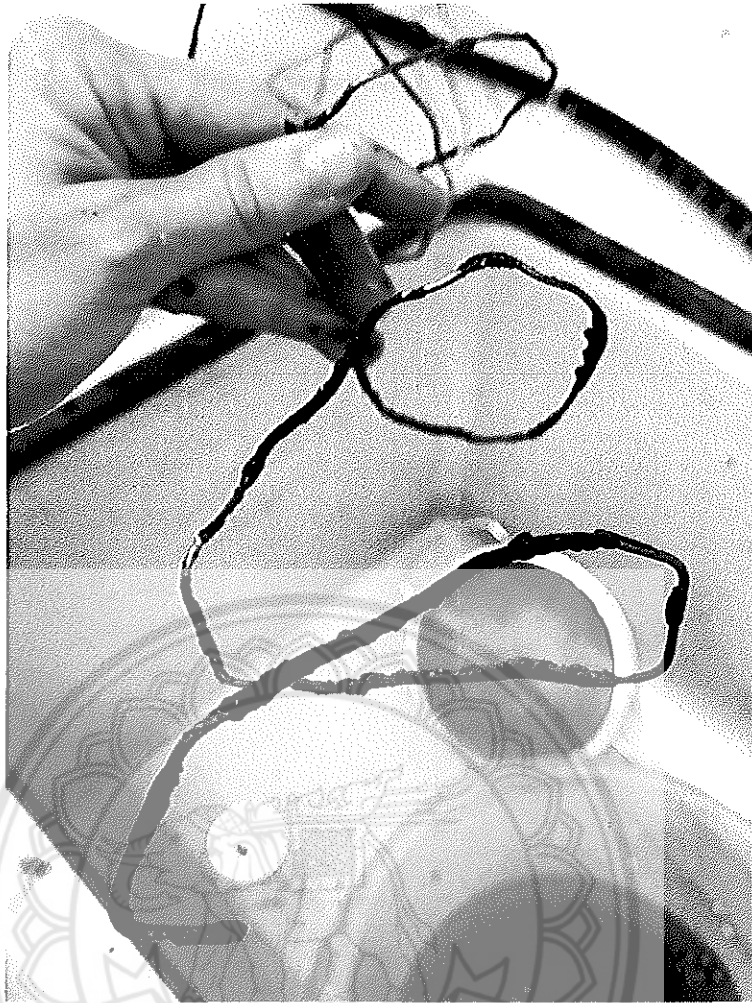
ในการทดลองที่ 2 เมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าจาก 10 เป็น 20 และ 30 มิลลิแอมป์ ในเครื่องปฏิกรณ์ไฟฟ้าเคมีร่วมกับชีวภาพ พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรตและไนโตรเจนทั้งหมดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเป็น 80% และ 60% ตามลำดับ (ดังรูปที่ 13) โดยกระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้นส่งผลให้ปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่ไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการไฮโดรจีโนโทรฟิเคชันไนตริฟิเคชันได้ เหตุผลสำคัญ ก็คือ ไฮโดรเจนที่ถูกสร้างขึ้นไม่สามารถนำใช้ประโยชน์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจาก  $Mg^{2+}$  และ  $Ca^{2+}$  อีออนที่มีอยู่ในน้ำประปา (ในรูปของความกระด้าง 100 มิลลิกรัม/ลิตร) ทำปฏิกิริยากับ  $HCO_3^-$  และ  $PO_4^{3-}$  ที่มีอยู่ในถังปฏิกรณ์เกิดเป็นตะกอนของ  $MgCO_3$ ,  $CaCO_3$  และ  $CaHPO_4$  ปกคลุมผิวหน้าของลวดทองแดง [25] (ดังรูปที่ 14) ในขณะที่เดียวกัน เมื่อกระแสไฟฟ้าสูงขึ้นส่งผลให้การสลายตัวของขั้วแกรไฟต์สูงขึ้น เกิดขึ้นผงคาร์บอนสีดำแขวนลอยภายในถังปฏิกรณ์ และปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำหลังบำบัดก็เพิ่มสูงขึ้น





รูปที่ 13 ประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ไฟฟ้าเคมีร่วมกับชีวภาพ (ก) การกำจัดไนเตรตและไนโตรเจนทั้งหมด และ (ข) ปริมาณไนโตรเจนในน้ำหลังบำบัด

จากผลการทดลองทั้งหมดแสดงให้เห็นว่า ถังปฏิกรณ์ไฟฟ้าเคมีร่วมกับชีวภาพให้ประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรตสูงกว่าถังปฏิกรณ์ชีวภาพ ทั้งนี้เนื่องจากการทำงานร่วมกันระหว่างกระบวนการไฮโดรจีโนโทรฟิเคชันไนตริฟิเคชันและเฮเทอโรโทรฟิเคชันไนตริฟิเคชัน นอกจากนี้การใช้แกรไฟต์และลวดทองแดงเป็นขั้วไฟฟ้า ซึ่งเป็นวัสดุที่มีราคาไม่แพง สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ไฟฟ้าเคมีร่วมกับชีวภาพ และมีศักยภาพที่จะใช้เป็นทางเลือกในการบำบัดน้ำเสียและการปรับปรุงคุณภาพน้ำต่อไป



รูปที่ 14 ตะกรันที่ปกคลุมผิวหนังของลวดทองแดง

#### 8. สรุปผลโครงการวิจัย

การบูรณาการระหว่างความรู้ทางไฟฟ้าเคมีและชีวภาพได้รับการพัฒนาในงานวิจัยนี้ เพื่อใช้ในบำบัดน้ำที่มีไนเตรตและปรับปรุงคุณภาพน้ำให้ดียิ่งขึ้น วัสดุที่นำมาใช้เป็นขั้วบวกและลบ ได้แก่ แกรไฟต์ และลวดทองแดง โดยจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้นที่ขั้วแกรไฟต์ได้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในขณะที่จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันของน้ำได้เป็นก๊าซไฮโดรเจนที่ขั้วของขดลวดทองแดง ซึ่งทั้งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนจะใช้เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการกำจัดไนเตรตด้วยจุลินทรีย์ ที่เรียกว่า ไฮโดรจีโนโทรฟิเคชันไนตริฟิเคชัน ทั้งนี้ค่า C/N ที่มีอยู่ในน้ำและกระแสไฟฟ้าที่ใช้มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรตและไนโตรเจนทั้งหมด จากผลการทดลองเมื่อค่า C/N ต่ำ เช่น 1.5 และ 1.0 จะทำให้เกิดกระบวนการเฮเทอโรโทรฟิเคชันไนตริฟิเคชันอย่างไม่มีประสิทธิภาพ (เกิดการสะสม  $\text{NO}_2^-$  และ  $\text{NO}_3^-$ ) อย่างไรก็ตาม ปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีจากขั้วแกรไฟต์และลวดทองแดงจะช่วยให้เกิดกระบวนการไฮโดรจีโนโทรฟิเคชันไนตริฟิเคชันร่วมกับเฮเทอโรโทรฟิเคชันไนตริฟิเคชัน ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรตและไนโตรเจนทั้งหมดเพิ่มขึ้นที่ค่า C/N ต่ำ

อย่างไรก็ตาม จากการทดลองนี้พบว่า น้ำที่มีความกระด้างสูง เช่น น้ำประปา จะยับยั้งกระบวนการไฮโดรจีโนโทรฟิเคชันในไตรฟิเคชันจากการเกิดตะกอนบนผิวขดลวดทองแดง และส่งผลให้จุลินทรีย์ไม่สามารถใช้ก๊าซไฮโดรเจนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## 9. เอกสารอ้างอิง

- [1] Greenpeace Thailand. พฤศจิกายน 2550 <http://www.greenpeace.org>
- [2] Agency for Toxic Substances and Disease Registry. September 2015 Public health statement for nitrate and nitrite. <https://www.atsdr.cdc.gov>.
- [3] W. Khanitchaidecha, F. Kazama 2012 Hydrogenotrophic denitrification in an attached growth reactor under various operating conditions. *Water Sci. Technol.* 12, 72-81.
- [4] กรมควบคุมมลพิษ 2560 <http://www.pcd.go.th>.
- [5] เกียรติศักดิ์ อุดมสินโรจน์ 2543 วิศวกรรมกรกำจัดน้ำเสีย เล่มที่ 4 กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยรังสิต
- [6] K.A. Karanasios, I.A. Vasiliadou, S. Pavlou, D.V. Vayenas 2010 Hydrogenotrophic denitrification of potable water : A review. *J. Hazard. Mat.* 180, 20-37.
- [7] H.I. Park, D.K. Kim, Y. Choi, D. Pak 2005 Nitrate reduction using an electrode as direct electron donor in a biofilm-electrode reactor, *Process Biochem.* 40, 3383–3388.
- [8] M. Zhou, W. Fu, H. Gu, L. Lei 2007 Nitrate removal from groundwater by a novel three-dimensional electrode biofilm reactor, *Electrochim. Acta* 52, 6052–6059.
- [9] J.H. Shin, B.I. Sang, Y.C. Chung, Y.K. Choung 2005 The removal of nitrogen using an autotrophic hybrid hollow-fiber membrane biofilm reactor, *Desalination* 183, 447–454.
- [10] D. Dries, J. Liessens, W. Verstraete, P. Stevens, P. de Vos, J. de Ley 1988 Nitrate removal from drinking water by means of hydrogenotrophic denitrifiers in polyurethane carrier reactor, *Water Suppl.* 6, 181–192.

- [11] C.C. Chang, S.K. Tseng, H.K. Huang 1999 Hydrogenotrophic denitrification with immobilized *Alcaligenes eutrophus* for drinking water treatment, *Bioresour. Technol.* 69, 53–58.
- [12] C. Visvanathan, N.Q. Hung, V. Jegatheesan 2008 Hydrogenotrophic denitrification of synthetic aquaculture wastewater using membrane bioreactor, *Process Biochem.* 43, 673–682.
- [13] Y.C. Chiu, M.S. Chung 2003 Determination of optimal COD/nitrate ratio for biological denitrification, *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 51, 43–49.
- [14] R. Eamrat, Y. Tsutsumi, T. Kamei., W. Khanitchaidecha, Y. Tanaka, F. Kazama 2017 Optimization of hydrogenotrophic denitrification behaviour using continuous and intermittent hydrogen gas supply, *J. Water Environ. Technol.* 15, 65-75.
- [15] C.M. Ho, S.K. Tseng, Y.J. Chang 2001 Autotrophic denitrification via a novel membrane-attached biofilm reactor, *Lett. Appl. Micro.* 33, 201-205.
- [16] สมัชชาสุขภาพ 2560 น้ำดื่มที่ปลอดภัย <https://www.samatcha.org>.
- [17] ชัชวาลย์ จันทรวิจิตร 2543 สถานการณ์คุณภาพน้ำบริโภคและความเสี่ยงสุขภาพวารสารวิชาการสาธารณสุข ปีที่ 9 ฉบับที่ 4 หน้า 441-449.
- [18] บริษัท ดีไว พลัส จำกัด 2555 รายงานฉบับสุดท้าย โครงการศึกษาเพิ่มประสิทธิภาพของระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาล กรมทรัพยากรน้ำบาดาล กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม
- [19] Rice E.W., Baird R.B., Eaton A.D.: *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 23rd edition, American Public Health Association. (2017).
- [20] Zhao Y., Feng C., Wang Q., Yang Y., Zhang Z., Sugiura N.: Nitrate removal from groundwater by cooperating heterotrophic with autotrophic denitrification in a biofilm-electrode reactor. *J. Hazard. Mat.* 192, 1033-1039 (2011).
- [21] Feleke Z., Arake K., Sakakibara Y., Watanabe T., Kurado M.: Selective reduction of nitrate to nitrogen gas in a biofilm-electrode reactor. *Wat. Res.* 32, 2728-2734 (1998).

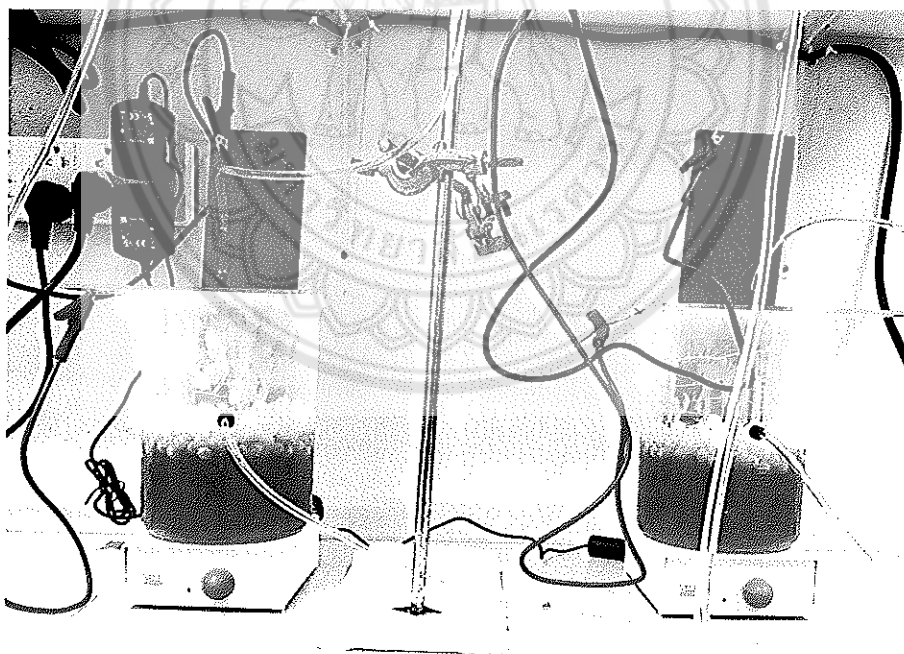
- [22] Chen D., Chen X., Huang X., He S., Huang J., Zhou W.: Controlling denitrification accompanied with nitrite accumulation at the sediment-water interface. *Ecol. Eng.* 100, 194-198 (2017).
- [23] Cao S., Li B., Du R., Ren N., Peng Y.: Nitrite production in a partial denitrifying upflow sludge bed (USB) reactor equipped with gas automatic circulation (GAC). *Water Research* 90, 309-316 (2016).
- [24] Tong S., Zhang B., Feng C., Zhao Y., Chen N., Hao C., Pu J., Zhao L.: Characteristics of heterotrophic/biofilm-electrode autotrophic denitrification for nitrate removal from groundwater. *Bioresource Technol.* 148, 121-127 (2013).
- [25] Zhao Y., Feng C., Wang Q., Yang Y., Zhang Z., Sugiura N.: Nitrate removal from groundwater by cooperating heterotrophic with autotrophic denitrification in a biofilm-electrode reactor. *J. Hazard. Mat.* 192, 1033-1039 (2011).







รูปที่ ก1 การเก็บสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบเติมอากาศของโรงพยาบาลวังทอง จังหวัดพิษณุโลก

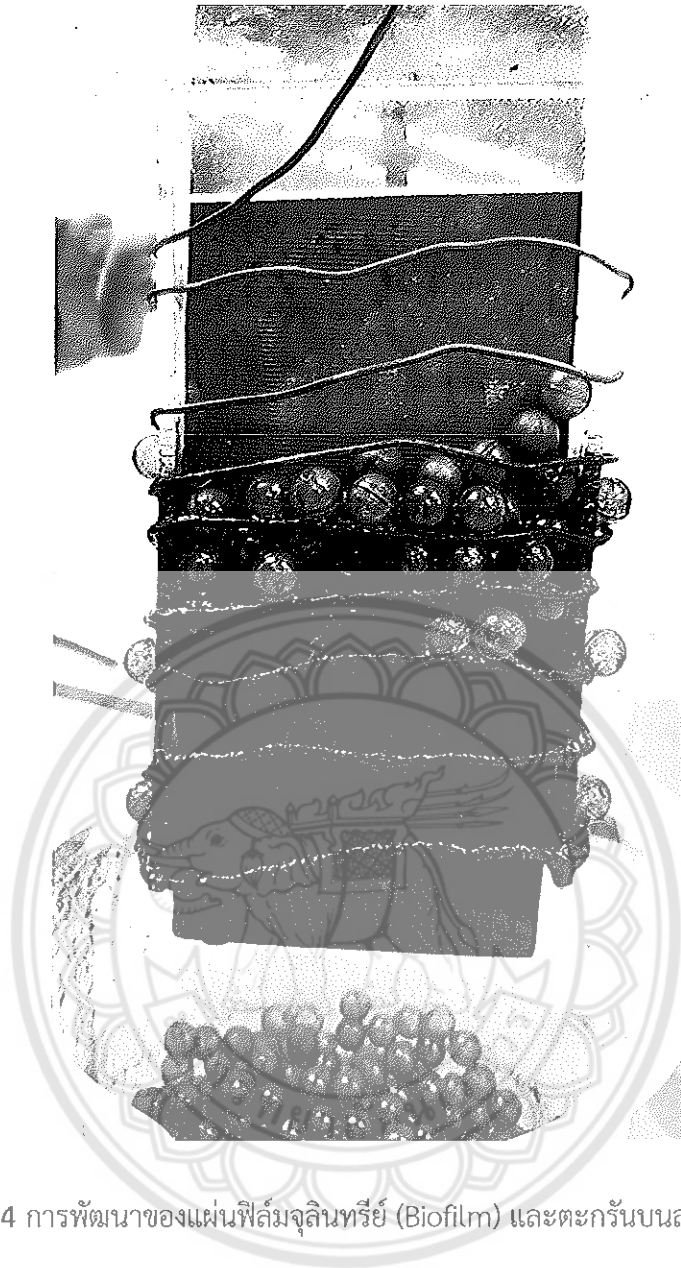


รูปที่ ก2 ชุดทดลองไฟฟ้าเคมีร่วมกับชีวภาพ



รูปที่ ก3 การติดตั้งระบบระหว่างการทดลอง





รูปที่ ก4 การพัฒนาของแผ่นฟิล์มจุลินทรีย์ (Biofilm) และตะกอนบนลวดทองแดง



รูปที่ ก5 การสลายตัวของข้าวเกร็ดฟูสูงขึ้นไปกระแสไฟฟ้าสูง 30 มิลลิแอมแปร์



รูปที่ ก6 การนำเสนอผลงานในงานประชุมวิชาการ ณ ประเทศศรีลังกา





### สัญญารับทุนอุดหนุนการวิจัย

จากงบประมาณแผ่นดิน (บูรณาการวิจัยและนวัตกรรม) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2562  
เป้าหมายที่ 2

โครงการ : การฟื้นฟูคุณภาพน้ำใต้ดินด้วยระบบผสมของเยื่อโรโทรฟิกและไฮโดรจีโนโทรฟิเคชันในตริทิเคชั่น

สัญญานี้ทำขึ้น ณ มหาวิทยาลัยนเรศวร ตั้งอยู่ เลขที่ 99 หมู่ 9 ตำบลท่าโพธิ์ อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก เมื่อวันที่ 1 ตุลาคม 2561 ระหว่างมหาวิทยาลัยนเรศวร โดย นางสาวพวงรัตน์ ขจิตวิทยานุกุล ผู้อำนวยการลงนามผูกพันในนามมหาวิทยาลัย ตามคำสั่งมหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ 05795/2561 เรื่อง มอบอำนาจให้รองอธิการบดีมหาวิทยาลัยนเรศวรปฏิบัติราชการแทน อธิการบดีมหาวิทยาลัยนเรศวร ลงวันที่ 1 ตุลาคม 2561 ซึ่งต่อไปในสัญญานี้เรียกว่า “ผู้ให้ทุน” ฝ่ายหนึ่ง กับ นางสาววิลาวัลย์ คณิตชัยเดชา ซึ่งต่อไปในสัญญานี้เรียกว่า “ผู้รับทุน” อีกฝ่ายหนึ่ง ทั้งสองฝ่ายตกลงกันมีข้อความดังต่อไปนี้

#### การให้และรับทุน

ข้อ 1 ผู้ให้ทุนตกลงให้ทุนอุดหนุนวิจัยแก่ผู้รับทุนเพื่อการวิจัย เรื่อง การฟื้นฟูคุณภาพน้ำใต้ดินด้วยระบบผสมของเยื่อโรโทรฟิกและไฮโดรจีโนโทรฟิเคชันในตริทิเคชั่น ซึ่งต่อไป ในสัญญานี้จะเรียกว่า “โครงการวิจัย” หรือ “โครงการ” ตามเอกสารแนบหมายเลข -4 ในวงเงิน 257,000 บาท (สองแสนห้าหมื่นเจ็ดพันบาทถ้วน) โดยมีระยะเวลาดำเนินการของโครงการวิจัย ไม่เกิน 12 เดือน นับตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม 2561 ถึงวันที่ 30 กันยายน 2562

ข้อ 2 ผู้ให้ทุนจะจ่ายเงินตามสัญญา ให้กับผู้รับทุนเป็นงวดๆ ตามกำหนดเวลา และเงื่อนไขตามเอกสารแนบหมายเลข 1 และตามระเบียบต่างๆ ของผู้ให้ทุน

ผู้รับทุนจะต้องใช้เงินทุนที่ได้รับตามสัญญา เพื่อดำเนินการให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ของโครงการตามสัญญานี้ เท่านั้น และจะต้องใช้อย่างประหยัด และเหมาะสม ตามระเบียบการเงินฯ ของผู้ให้ทุน ตลอดจนจัดเตรียมหลักฐานการรับเงิน และการจ่ายเงินให้ถูกต้องครบถ้วน เพื่อให้ผู้ให้ทุนตรวจสอบได้ และในกรณีที่เกิดปัญหาซึ่งต้องพิจารณาว่าการใช้เงินเพื่อดำเนินการของผู้รับทุนเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของโครงการหรือไม่ ทั้งสองฝ่ายตกลงให้ผู้ให้ทุนเป็นผู้วินิจฉัยชี้ขาด

ผู้ให้ทุนจะไม่หักเงินทุนอุดหนุนโครงการนี้ เป็นค่าใช้จ่ายทางอ้อมใดๆ (Indirect or overhead cost) ทั้งสิ้น หากมีรายได้ หรือผลประโยชน์ใดๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินการวิจัย ผู้รับทุนจะต้องรายงานให้ผู้ให้ทุนทราบเป็นหนังสือโดยเร็ว ตลอดจนบันทึกการรับดังกล่าวในรายงานการเงินที่เสนอต่อผู้ให้ทุน

หากมีเงินเหลือเมื่อสิ้นสุดโครงการแล้ว ผู้รับทุนจะต้องคืนเงินที่เหลือพร้อมดอกเบี้ยที่เกิดขึ้นให้แก่ผู้ให้ทุน ภายใน 60 (หกสิบ) วัน นอกจากจะมีหลักฐานเป็นหนังสือว่าได้มีการตกลงกันเป็นอย่างอื่น

#### ข้อ 3 การเบิกจ่ายเงินของผู้รับทุน

3.1 งวดแรก จำนวนร้อยละ 40 เมื่อส่งแบบคำขออนุมัติเบิกเงิน พร้อมสัญญาซึ่งผ่านความเห็นชอบจากคณะกรรมการวิจัยคณะ ไปยังกองส่งเสริมการวิจัย และส่งต่อไปยังกองคลัง

3.2 งวดที่สอง จำนวนร้อยละ 40 เมื่อส่งแบบคำขออนุมัติเบิกเงิน พร้อมกับส่งรายงานความก้าวหน้า ครั้งที่ 1 และรายงานค่าใช้จ่ายเงินในงวดแรก ซึ่งผ่านความเห็นชอบจากคณะกรรมการวิจัยคณะ ไปยังกองส่งเสริมการวิจัย และส่งต่อไปยังกองคลัง

3.3 งวดที่สาม จำนวนร้อยละ 20 เมื่อส่งแบบคำขออนุมัติเบิกเงิน พร้อมกับส่งรายงานผลการดำเนินงานฉบับสมบูรณ์ และสำเนาต้นฉบับ (Reprint) ผลการดำเนินโครงการตามตัวชี้วัดที่ระบุไว้ในสัญญาและรายงานค่าใช้จ่ายเงินทั้งหมดของโครงการไปยังกองส่งเสริมการวิจัย และส่งต่อไปยังกองคลัง

# ต้นฉบับ

เอกสารปกปิด ห้ามเผยแพร่ก่อนได้รับอนุญาต

โครงการที่ไม่สามารถนำส่งรายงานผลการดำเนินงานฉบับสมบูรณ์ และสำเนาต้นฉบับ (Reprint) ผลการดำเนินงานโครงการตามตัวชี้วัดที่ระบุไว้ในสัญญา จะไม่รับการพิจารณาการเบิกจ่ายเงินในงวดที่ 3 จนกว่าสามารถดำเนินการในส่วนดังกล่าวให้แล้วเสร็จ หลังจากจากสิ้นสุดระยะเวลาดำเนินโครงการ

เอกสารหรือหลักฐานแนวทางการเงินต่างๆ ให้ผู้รับทุนเป็นผู้รับผิดชอบในการเก็บหลักฐานดังกล่าว และพร้อมสำหรับการเรียกตรวจสอบหากมีการร้องขอ

## การดำเนินงาน

ข้อ 4 ผู้รับทุนจะต้องทำงานวิจัยตามโครงการนี้ด้วยความวิริยะอุตสาหะ และรับรองว่าจะไม่ทำงานตามโครงการวิจัยบางส่วน หรือทั้งหมดไปให้ผู้อื่นรับช่วง เว้นแต่จะได้รับความยินยอมจากผู้ให้ทุนเป็นลายลักษณ์อักษรก่อน

ข้อ 5 ผู้รับทุนต้องดำเนินการตามโครงการในพื้นที่ นับแต่วันลงนามในสัญญา ถ้าหากผู้รับทุนมิได้เริ่มดำเนินการภายใน 30 (สามสิบ) วัน นับจากวันดังกล่าว ผู้ให้ทุนมีสิทธิออกเลิกสัญญา

ผู้รับทุนต้องดำเนินงานตามวิธีการที่เสนอไว้ตามเอกสารหมายเลข 2 และเอกสารหมายเลข 3 ให้ครบถ้วนสมบูรณ์ หากเกิดอุปสรรคไม่สามารถดำเนินการวิจัยได้ หรือมีความจำเป็นจะต้องแก้ไขเปลี่ยนแปลงแผนงานหรือวิธีการใดๆ ผู้รับทุนจะต้องแจ้งให้ผู้ให้ทุนทราบเป็นหนังสือภายในกำหนด 30 (สามสิบ) วัน ทั้งนี้ผู้ให้ทุนมีสิทธิที่จะยุติการสนับสนุนทุนวิจัย หรือให้ความเห็นเกี่ยวกับการแก้ไขเปลี่ยนแปลงโครงการได้ตามความเหมาะสม

กรณีไม่สามารถทำการวิจัยตามโครงการให้แล้วเสร็จได้ภายในกำหนดเวลาตามข้อ 4 ผู้รับทุนต้องแจ้งเหตุผลให้ผู้ให้ทุนทราบเป็นลายลักษณ์อักษร และขออนุมัติขยายเวลาก่อสร้างสิ้นสุดสัญญาไม่超过约 15 (สิบห้า) วัน ทั้งนี้ผู้ให้ทุนมีสิทธิที่จะพิจารณาอนุมัติให้ขยายเวลาหรือไม่ได้ โครงการที่ได้รับอนุมัติให้ขยายเวลาได้จะถือเอาวันสุดท้ายของการขยายเวลานั้นเป็นวันกำหนดส่งผลงาน หากพ้นกำหนดวันส่งผลงานนั้นให้ถือว่าผู้รับทุนส่งผลงานล่าช้า

ข้อ 6 ผู้รับทุนต้องรับผิดชอบการดำเนินการวิจัยโดยคำนึงถึงความปลอดภัยของผู้เกี่ยวข้อง ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง และสิ่งแวดล้อม ทั้งนี้ให้เป็นไปตามจริยธรรมการวิจัย

ข้อ 7 ผู้รับทุนต้องอำนวยความสะดวกให้ผู้ให้ทุน หรือผู้ที่ได้รับมอบหมายเข้าไปในสถานที่ทำการของผู้รับทุน หรือสถานที่ที่ทำการวิจัย เพื่อประโยชน์ในการติดตาม และประเมินผลการวิจัยตามโครงการได้

## ผลงาน

ข้อ 8 ผู้ให้ทุน ผู้รับทุน ตลอดจนร่วมกันที่จะให้มีการประเมินคุณภาพผลงานวิจัยตาม วิธีการที่ผู้ให้ทุนกำหนดทั้งระหว่างดำเนินการตามโครงการ และ/หรือเมื่องานวิจัยเสร็จสิ้น และผู้รับทุนต้องปรับปรุงแก้ไขผลงานวิจัยตามที่ผู้ให้ทุนร้องขอ

ในการประเมินผลงานเพื่อการอนุมัติค่าใช้จ่ายในงวดที่ 3 ผู้วิจัยมีหน้าที่ให้ผู้ให้ทุนประเมินผลงานตามตัวชี้วัดที่ระบุไว้ในรายงานสรุปการเงิน

ข้อ 9 ผู้รับทุนต้องนำส่งผลงาน ซึ่งมีรูปแบบและเนื้อหาตามที่ผู้ให้ทุนกำหนด โดยนำส่งแก่ผู้ให้ทุนหรือผู้ให้ทุนมอบหมายภายใน 60 วัน นับตั้งแต่วันสิ้นสุดโครงการ

กรณีที่ผู้รับทุนไม่สามารถนำส่งรายงานผลการวิจัยฉบับสมบูรณ์ และสำเนาต้นฉบับ (Reprint) ผลการดำเนินงานโครงการตามตัวชี้วัดที่ระบุไว้ในสัญญา ภายในหลังเสร็จสิ้นระยะเวลาดำเนินโครงการตามที่ระบุในสัญญา (ไม่นับรวมขยายเวลา) ผู้รับทุนยินยอมให้ผู้ให้ทุนระงับค่าใช้จ่ายในงวดที่ 3 ที่ยังคงค้างอยู่ตามตัวชี้วัดที่ระบุไว้ในสัญญา และมีสิทธิออกยกเลิกสัญญาได้

## สิทธิและการยกเลิกสัญญา

ข้อ 10 สิทธิในทรัพย์สินทางปัญญาใดๆ ที่เกิดขึ้นจากโครงการวิจัยตามสัญญานี้เป็นสิทธิของผู้ให้ทุน โดยให้ผู้ให้ทุนเป็นผู้ทำนิติกรรมใดๆ ที่เกี่ยวข้องกับผลประโยชน์ในผลงานวิจัยแต่ผู้เดียว

หากผู้รับทุนต้องการนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์ใดๆ จะต้องทำความเข้าใจเป็นลายลักษณ์อักษรกับผู้ให้ทุนก่อน

ข้อ 11 ผู้รับทุน จะต้องรับผิดชอบ และชดใช้ค่าเสียหายใดๆ อันเกิดขึ้นจากการละเมิดบทบัญญัติแห่งกฎหมาย หรือละเมิดสิทธิใดๆ ในสิทธิบัตร หรือลิขสิทธิ์ของบุคคลที่สาม ซึ่งผู้รับทุน และผู้ที่รับมอบหมายนำมาใช้ในการปฏิบัติงานตามสัญญานี้

# สัญญา

เอกสารปกปิด ห้ามเผยแพร่ก่อนได้รับอนุญาต

ข้อ 12 อุปกรณ์ หรือครุภัณฑ์ใดๆ ที่ผู้รับทุนได้จัดซื้อโดยเงินทุนตามสัญญานี้ ให้ตกเป็นของผู้ให้ทุน

การใช้อุปกรณ์ หรือครุภัณฑ์การวิจัยที่ผู้รับทุนได้จัดซื้อดังกล่าว ผู้รับทุนจะต้องใช้ และบำรุงรักษาอุปกรณ์ หรือครุภัณฑ์การวิจัยดังกล่าวให้อยู่ในสภาพที่ใช้การได้ดีเสมอ และผู้รับทุนยินยอมให้ผู้ให้ทุน หรือผู้ที่ได้รับมอบหมายเข้าตรวจสอบอุปกรณ์ หรือครุภัณฑ์ได้ตลอดเวลา ผู้รับทุนจะต้องจัดทำบัญชีแสดงรายการอุปกรณ์ หรือครุภัณฑ์การวิจัยมอบให้ผู้ให้ทุน พร้อมกับรายงานการวิจัยที่เสร็จสมบูรณ์แล้ว หรือเมื่อสัญญาสิ้นสุดลง

กรณีอุปกรณ์ หรือครุภัณฑ์การวิจัยเสียหาย โดยเหตุที่ผู้รับทุนต้องรับผิดชอบ ผู้รับทุนต้องจัดการซ่อมแซมให้อยู่ในสภาพใช้งานได้ดังเดิมด้วยค่าใช้จ่ายของตนเอง แต่หากเกิดเหตุไม่จัดการซ่อมแซมอุปกรณ์ หรือครุภัณฑ์ดังกล่าว ผู้ให้ทุนมีสิทธิซ่อมแซมเอง และเรียกให้ผู้รับทุนชดใช้ค่าใช้จ่ายตามจำนวนที่ผู้ให้ทุนออกค่าใช้จ่ายไป

เมื่อเสร็จสิ้นการวิจัยตามสัญญานี้แล้ว ผู้รับทุนจะต้องส่งอุปกรณ์ หรือครุภัณฑ์ที่เหลือจากการวิจัยให้แก่ผู้ให้ทุน เจ้าของอุปกรณ์ หรือครุภัณฑ์ทันที

ข้อ 13 กรณีผู้รับทุนมีได้รายงานความก้าวหน้า ร่างรายงานฉบับสมบูรณ์ และรายงานฉบับสมบูรณ์ ตามเงื่อนไขของมหาวิทยาลัยให้ถือว่าผู้รับทุนผิดเงื่อนไข ผู้รับทุนยินยอมให้หักเงินเดือนที่ผู้รับทุนจะได้รับ และยินยอมให้ผู้ให้ทุนดำเนินการทางวินัยตามสมควรแก่กรณี

ข้อ 14. การระงับงานชั่วคราวและการบอกเลิกสัญญา

14.1 ผู้ให้ทุนมีสิทธิระงับงานทั้งหมด หรือบางส่วน หรือบอกเลิกสัญญานี้ได้ ถ้าผู้ให้ทุนเห็นว่าผู้รับทุนมิได้ปฏิบัติงานด้วยความชำนาญ หรือด้วยความเอาใจใส่ในวิชาชีพเท่าที่พึงคาดหมายได้จากบุคคลในระดับเดียวกัน หรือมิได้ปฏิบัติตามหนังสือสัญญาข้อใดข้อหนึ่ง หรือเมื่อ ผู้ให้ทุนเห็นว่าควรจะยุติโครงการวิจัยตามสัญญา ในกรณีเช่นนี้ ผู้ให้ทุนต้องมีลายลักษณ์อักษรแจ้งให้ผู้รับทุนทราบล่วงหน้าอย่างน้อย 60 (หกสิบ) วัน

14.2 กรณีที่ผู้รับทุนเห็นว่าผู้ให้ทุนมิได้ปฏิบัติตามสัญญานี้ ในกรณีเช่นนี้ผู้รับทุนจะต้องมีลายลักษณ์อักษรถึงผู้ให้ทุน ระบุรายละเอียดถึงสาเหตุ และเหตุผล ถ้าผู้ให้ทุนมิได้ดำเนินการแก้ไขให้ถูกต้องตามสัญญาภายในระยะเวลา 30 (สามสิบ) วัน นับแต่วันที่ได้รับหนังสือบอกกล่าวนั้น ผู้รับทุนมีสิทธิบอกเลิกสัญญาได้

14.3 เมื่อมีการบอกเลิกสัญญาดำเนินข้อ 14.1 หรือ 14.2 ผู้ให้ทุนจะจ่ายเงินให้แก่ผู้รับทุน ตามสัดส่วนที่เป็นธรรม และเหมาะสมเฉพาะตามที่กำหนด และผู้รับทุนจะต้องคืนเงินที่เหลือ ณ วันสัญญาสิ้นสุดลง พร้อมทั้งส่งมอบเครื่องมือเครื่องใช้ และวัสดุอุปกรณ์ที่ผู้รับทุนได้จัดซื้อด้วยทุนทรัพย์ของผู้ให้ทุนให้แก่ผู้ให้ทุนทั้งหมดภายใน 30 (สามสิบ) วัน หลังจากวันบอกเลิกสัญญา

14.4 ในกรณีที่มิเหตุสุดวิสัยหรือเหตุใดๆ อันเนื่องมาจากความผิด หรือความบกพร่องของผู้ให้ทุน หรือพฤติการณ์อันหนึ่งอันใดที่คู่สัญญาไม่ต้องรับผิดชอบตามกฎหมาย ทำให้ผู้รับทุนไม่สามารถทำการวิจัยให้แล้วเสร็จภายในกำหนดเวลาแห่งสัญญานี้ ผู้ให้ทุนมีสิทธิระงับงานตามโครงการชั่วคราว และผู้รับทุนมีสิทธิได้รับการขยายเวลาตามสัญญาข้อ 5 วรรคสาม โดยให้อยู่ในดุลพินิจของผู้ให้ทุนที่จะพิจารณาตามที่เห็นสมควร

ข้อ 15 ผู้รับทุนรับรองว่าไม่เคยรับทุนอุดหนุนการวิจัยเรื่องเดียวกันนี้จากแหล่งอื่นอยู่ก่อน และรับรองว่าจะไม่นำโครงการวิจัยที่ได้รับทุนนี้ไปขอทุนจากแหล่งอื่นๆ เพิ่มเติม โดยไม่ได้รับความเห็นชอบจากผู้ให้ทุน

ข้อ 16 เอกสารแนบท้ายสัญญาให้ถือเป็นส่วนหนึ่งของสัญญานี้ ในกรณีที่ข้อความในเอกสารแนบท้ายสัญญาขัดแย้งกับข้อความในสัญญานี้ ให้ถือตามข้อความในสัญญา และในกรณีที่เอกสารแนบท้ายสัญญานี้ขัดหรือแย้งกันเอง หรือมิได้กล่าวไว้ ให้ถือปฏิบัติตามคำวินิจฉัยของผู้ให้ทุน

ข้อ 17 หากมีคำภาษาือการ ค่าใช้จ่ายอื่นที่เกิดขึ้นจากการได้รับเงินอุดหนุนการวิจัยตามโครงการแห่งสัญญานี้ ให้เป็นความรับผิดชอบของผู้รับทุนเอง และไม่ถือว่าเป็นค่าใช้จ่ายที่อยู่ในข่ายได้รับการสนับสนุนเงินอุดหนุนภายใต้สัญญานี้

# ต้นฉบับ

เอกสารปกปิด ห้ามเผยแพร่ก่อนได้รับอนุญาต

ข้อ 18 ระยะเวลาดำเนินการวิจัย นับตามปีงบประมาณแผ่นดิน ระยะเวลาตั้งแต่ 1 ตุลาคมของปีหนึ่ง ถึงวันที่ 30 กันยายนของปีถัดไป กรณีมีการจัดสรรทุนวิจัยเป็นไตรมาส วันที่เริ่มต้นทำสัญญานับตั้งแต่วันที่ได้รับการอนุมัติทุนวิจัย พร้อมทำแผนแจกแจงรายละเอียดการเบิกจ่ายเงินงวดโดยระบุว่าปีงบประมาณนี้เบิกงวดใดบ้าง และงวดที่เหลือผูกพันไปตั้งใหม่ในปีงบประมาณถัดไป กรณีโครงการวิจัยไม่แล้วเสร็จภายในระยะเวลาที่กำหนด ผู้ให้ทุนอาจพิจารณาให้เบิกจ่ายข้ามปีงบประมาณได้ โดยผู้รับทุนต้องแสดงเหตุผลประกอบการพิจารณา

ข้อ 19 มาตรการควบคุมการวิจัยสำหรับโครงการวิจัยที่ไม่แล้วเสร็จภายในระยะเวลาที่กำหนดไม่เกิน 2 ปี ตามสัญญาเงินทุน

มาตรการที่ 1 ให้คณะดีสอบสวนหาข้อเท็จจริงเพื่อพิจารณาเห็นควรอนุมัติปิดโครงการได้

มาตรการที่ 2 หากเหตุผลตามมาตรการที่ 1 ไม่เพียงพอให้ตั้งคณะกรรมการสอบสวนตามวินัย พร้อมกำหนดบทลงโทษตามที่ระบุไว้ในสัญญา

มาตรการที่ 3 ให้กองส่งเสริมการวิจัย จัดทำบัญชีรายชื่อนักวิจัย (Blacklist) ที่ดำเนินโครงการวิจัยไม่แล้วเสร็จสืบเนื่องจากมาตรการที่ 2 โดยไม่สามารถขอรับทุนอุดหนุนการวิจัยของมหาวิทยาลัยได้อีกภายในระยะเวลา 2 ปี นับตั้งแต่ปีที่ผลสอบสวนสิ้นสุด (กรณีนักวิจัย ที่ถูกขี้นบัญชีรายชื่อ (Blacklist) มีความประสงค์จะขอรับทุนอุดหนุนการวิจัยทั้งงบประมาณรายได้นี้และงบประมาณแผ่นดิน จะถูกจัดลำดับความสำคัญไว้ท้ายสุด)

สัญญานี้ทำขึ้น 3 ฉบับ มีข้อความถูกต้องตรงกัน คู่สัญญาทุกฝ่ายได้อ่านและเข้าใจข้อความโดยตลอดแล้ว จึงได้ลงลายมือชื่อไว้เป็นสำคัญต่อหน้าพยาน และต่างเก็บไว้ฝ่ายละฉบับ

ลงชื่อ ..... ผู้ให้ทุน  
(นางสาววิลาวัลย์ คณิตชัยเดช)  
หัวหน้าโครงการวิจัย

ลงชื่อ ..... ผู้รับทุน  
(นางสาววิลาวัลย์ คณิตชัยเดช)  
หัวหน้าโครงการวิจัย

ลงชื่อ ..... พยานที่ 1  
(นายสุชาติ แยมเม่น)  
คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

ลงชื่อ ..... พยานที่ 2  
(นางสาวสิริกร ชูแก้ว)  
ผู้อำนวยการกองส่งเสริมการวิจัย

ลงชื่อ ..... พยานที่ 3  
(นางสาวลลิตาวัลย์ ชูสาย)  
ผู้อำนวยการกองกฎหมาย



# ฉบับนี้

เอกสารปกปิด ห้ามเผยแพร่ก่อนได้รับอนุญาต

เอกสารแนบหมายเลข 1

สัญญาเลขที่ R2562B017

โครงการ การฟื้นฟูคุณภาพน้ำใต้ดินด้วยระบบผสมของเฮเทอร์โอโทรฟิกลงและไฮโดรจิโนโทรฟิกลงในตริฟิเคชั่น

## การจ่ายเงิน

|                         |   |
|-------------------------|---|
| งบประมาณรวม             | ในวงเงิน 257,000 บาท (สองแสนห้าหมื่นเจ็ดพันบาทถ้วน)   |
| งวดที่ 1<br>(ร้อยละ 40) | จำนวน 102,800 บาท (หนึ่งแสนสองพันแปดร้อยบาทถ้วน)<br>จ่ายภายใน 30 (สามสิบ) วัน หลังจากวันลงนามในสัญญา  |
| งวดที่ 2<br>(ร้อยละ 40) | จำนวน 102,800 บาท (หนึ่งแสนสองพันแปดร้อยบาทถ้วน)<br>จ่ายภายใน 30 (สามสิบ) วัน หลังจากผู้ให้ทุนเห็นชอบรับรายงาน<br>ความก้าวหน้ารอบ 6 เดือน และรายงานการเงินงวดที่ 1  |
| งวดที่ 3<br>(ร้อยละ 20) | จำนวน 51,400 บาท (ห้าหมื่นหนึ่งพันสี่ร้อยบาทถ้วน)<br>จ่ายเมื่อผู้ให้ทุนได้รับรายงานผลการดำเนินงานฉบับสมบูรณ์ และสำเนา<br>ต้นฉบับ (Reprint) ผลการดำเนินโครงการตามตัวชี้วัดที่ระบุไว้ในสัญญาและ<br>รายงานค่าใช้จ่ายทั้งหมดของโครงการ ไปยังกองส่งเสริมการวิจัย<br>หมายเหตุ: ไม่เกินวันที่ 30 กันยายน 2563 (เริ่มนับจากปีงบประมาณที่<br>ดำเนินโครงการ จนครบ 2 ปีงบประมาณ) |

# ต้นฉบับ

เอกสารปกปิด ห้ามเผยแพร่ก่อนได้รับอนุญาต

สัญญาเลขที่ R2562B017

โครงการ การฟื้นฟูคุณภาพน้ำใต้ดินด้วยระบบผสมของเฮเทอร์โอโทรฟิกและไฮโดรจิโนโทรฟิกดีโนทริฟิเคชั่น

## งบประมาณ

| ประเภทงบประมาณ          | รายละเอียด   | งบประมาณ (บาท) |
|-------------------------|--|----------------|
| งบดำเนินการ : ค่าตอบแทน | ปฏิบัติงานนอกเวลาราชการ  | 34,000         |
| งบดำเนินการ : ค่าใช้สอย | ค่าใช้จ่ายในการเดินทางไปราชการ   | 30,000         |
|                         | - ค่าจ้างเหมาบริการ ได้แก่ ค่าประกอบชุดทดลองและชุดควบคุมไฟฟ้า              | 25,000         |
|                         | ค่าจ้างวิเคราะห์การปนเปื้อนของจุลินทรีย์                                   | 25,000         |
|                         | ค่าจ้างทดสอบวิจัย เช่น TOC PCR FISH  | 30,000         |
|                         | - ค่าจ้างเหมากำจัดของเสีย  | 10,000         |
| งบดำเนินการ : ค่าวัสดุ  | - วัสดุสำนักงาน  | 6,400          |
|                         | - วัสดุวิทยาศาสตร์ ได้แก่ เครื่องแก้ว และขวดเก็บตัวอย่าง สารเคมี           | 51,600         |
|                         | วัสดุชุดทดลอง เช่น แผงอะคริลิก วัสดุตัวกรอง ขั้วไฟฟ้า สายยาง และวาล์วต่างๆ | 30,000         |
|                         | วัสดุชุดควบคุมกระแสไฟฟ้า   | 15,000         |
|                         | <b>รวม</b>   | <b>257,000</b> |

### หมายเหตุ

- 1) ถ้าเฉลี่ยจ่ายทุกรายการ
- 2) การสั่งซื้อจัดจ้างวัสดุ จ้างเหมาบริการต่างๆ ได้รับการยกเว้นไม่ต้องปฏิบัติตามพระราชบัญญัติการจัดซื้อจัดจ้างและการบริหารพัสดุภาครัฐ พ.ศ. 2560 ตามหนังสือแจ้งเวียน หนังสือกรมบัญชีกลาง ด่วนที่สุด ที่ กค. ล้ง 122 ว/0405.2 (กวจ) มีนาคม 9 วันที่ 2561
- 3) กรณีได้รับอนุมัติให้จัดซื้อจัดจ้างครุภัณฑ์ ที่ยังดำเนินการตามกระบวนการของ พระราชบัญญัติการจัดซื้อจัดจ้างและการบริหารพัสดุภาครัฐ พ.ศ. 2560 แต่ระเบียบที่มหาวิทยาลัยนเรศวรประยุกต์ใช้ อ่างเครื่องจักร

สัญญาเลขที่ R2562B017

โครงการ การฟื้นฟูคุณภาพน้ำใต้ดินด้วยระบบผสมของเยื่อโรโทรฟิกและไฮโดรจิโนโรโทรฟิกส์ในครีฟเคชั่น

แนวทางการปฏิบัติทางการเงิน บัญชี และพัสดุ : การเปิดบัญชีโครงการ

ชื่อบัญชี R2562B017-วิลาวัลย์ คณิตชัยเดชา  
 เลขที่บัญชี .....  
 ธนาคาร ธนาคารกรุงไทย  
 ผู้มีอำนาจสั่งจ่าย 1.....  
 2.....  
 3.....



*Wilawan U*

ลงนาม.....

นางสาววิลาวัลย์ คณิตชัยเดชา  
หัวหน้าโครงการ

หมายเหตุ : ขอให้ผู้รับทุนเปิด บัญชีออมทรัพย์ (ธนาคารกรุงไทย) ซึ่งจะได้ดอกเบี้ยเงินฝาก และแนบสำเนาหน้าสมุดบัญชีธนาคาร ซึ่งถือเป็นส่วนหนึ่งของเอกสารสัญญา

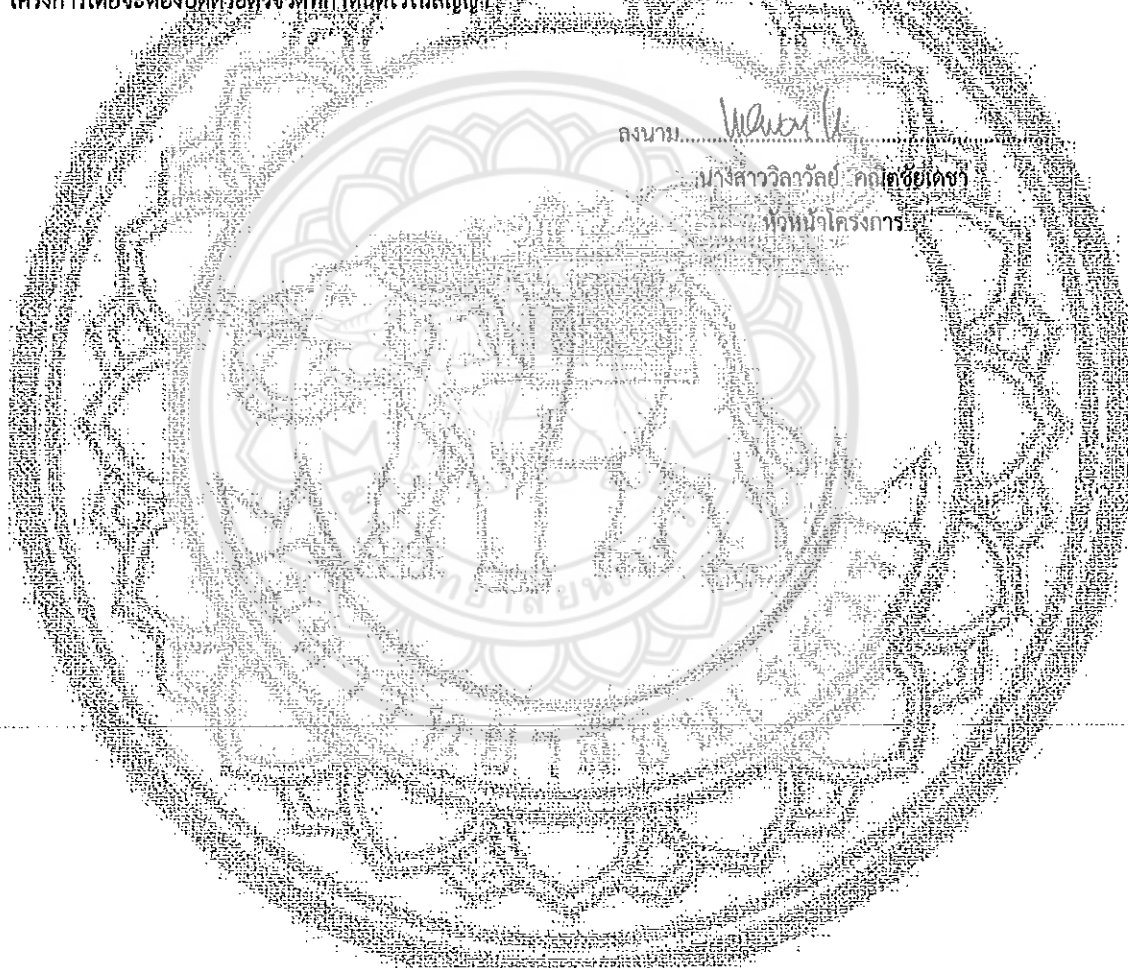
สัญญาเลขที่ R2562B017

โครงการ การฟื้นฟูคุณภาพน้ำใต้ดินด้วยระบบผสมของเฮเทอร์โรโทรฟิคและไฮโดรจิโนโทรฟิคดีในครีพีเคชั่น

ตัวชี้วัดเพื่อการประเมินผลสำเร็จของโครงการ

| ผลงานที่จะได้รับ | รายละเอียด   | จำนวน | หน่วยนับ |
|------------------|--|-------|----------|
| บทความทางวิชาการ | วารสารระดับนานาชาติที่มีค่า Impact factor ที่อยู่ในฐานข้อมูล Web of Science (ISI เดิม) หรือ Scopus | 1     | เรื่อง   |

ข้าพเจ้ายินดีให้ผู้ให้ทุนประเมินผลการดำเนินโครงการตามตัวชี้วัดที่กำหนดไว้ข้างต้นนี้ และยอมรับเงื่อนไขการปิดโครงการโดยจะต้องปิดด้วยตัวชี้วัดที่กำหนดไว้ในสัญญา



ลงนาม.....

นางสาววิลาวัลย์ คณิตชัยเดชา  
หัวหน้าโครงการ





## Invitation Letter

03<sup>rd</sup> September 2019

Dear WILAWAN KHANITCHAIDECHA,

Thank you for your abstract submission for the 7<sup>th</sup> SURF Workshop, September 20-22, 2019 in Galle, Sri Lanka.

We are glad to inform you that, your abstract titled "Development of Heterotrophic and Hydrogenotrophic Denitrification System for Nitrate Removal from Groundwater " has been selected for an oral presentation at the 7<sup>th</sup> SURF Workshop.

We look forward to welcoming you to Sri Lanka.

Thank you,

Sincerely yours,

On behalf of the 7<sup>th</sup> SURF Organizing Committee,

Dr. Thushara Wickramaarachchi  
Chief Secretary - 7<sup>th</sup> SURF  
Tel: +94 77 7366299  
Email: thushara@cee.ruh.ac.lk

-----  
7<sup>th</sup> SURF Organizing Committee  
University of Yamanashi  
Graduate Faculty of Interdisciplinary Research  
Interdisciplinary Centre for River Basin Environment  
4-3-11 Takeda, Kofu Yamanashi 400-8511 Japan  
<http://iyrw.org/>; <http://www.icre.yamanashi.ac.jp>



## Development of Heterotrophic and Hydrogenotrophic Denitrification System for Nitrate Removal from Groundwater

PRARUNCHAYA PEUNGTIM<sup>1,2</sup>, WILAWAN KHANITCHAIDECHA<sup>1,2\*</sup>, AUPPATHAM NAKARUK<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Naresuan University, Phitsanulok, Thailand

<sup>2</sup> Centre of Excellence for Innovation and Technology for Water Treatment, Faculty of Engineering, Naresuan University, Phitsanulok, Thailand

<sup>3</sup> Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Naresuan University, Phitsanulok, Thailand

\* Corresponding E-mail: wilawank1@gmail.com

### ABSTRACT

Nitrate-nitrogen ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ) contamination in natural water resource is observed in several agricultural areas in Asian countries. The contamination is mainly from an extensive use of nitrogen fertilizer for industrial agriculture. Later, the nitrate containing in fertilizer is released through soil and eventually into rivers, canals and aquifer by natural precipitation. The groundwater is a significant drinking water source, and together with the nitrate cannot be removed by traditional treatment (such as filtration and heat treatment). The removal of nitrate from groundwater is the research approach to provide a safe drinking water and avoid the further health impact. Due to a limit of existing carbon in groundwater, a combination of biological denitrification by heterotrophic and hydrogenotrophic microorganisms is a potential solution. In this research, a bio-electrochemical system was developed using graphite plate as anode and stainless steel wire as cathode. The system was applied various electric currents (of 5, 10 and 20 mA) and ratio of existing carbon and nitrogen (C/N of 2, 1.5 and 1). The results revealed that the heterotrophic denitrification was mostly occurred at the high C/N of 2; the microorganisms utilize the existing carbon to degrade the aqueous nitrate to nitrogen gas. In the meanwhile, the hydrogenotrophic denitrification was occurred at the increasing electric current of 10 and 20 mA; the microorganisms utilize  $\text{CO}_2$  and  $\text{H}_2$  gases generated from electrodes for nitrate removal mechanism. However, the heterotrophic denitrification was also required to complete nitrate removal. At the last phase of experiment, the nitrate was partial degraded to nitrite as intermediate, and further degraded to nitrogen gas. The highest efficiency of 80% and 58% was achieved for nitrate and total nitrogen removal respectively.



Wilawan Khanitchaidecha &lt;wilawank1@gmail.com&gt;

---

**Your Submission ACSJ-D-19-00218R1**

2 messages

---

**ACSJ Editorial Office** <em@editorialmanager.com>  
Reply-To: ACSJ Editorial Office <genesis.obero@springer.com>  
To: Wilawank Khanitchaidecha <wilawank1@gmail.com>

8 November 2019 at 08:52

Dear Dr. Khanitchaidecha,

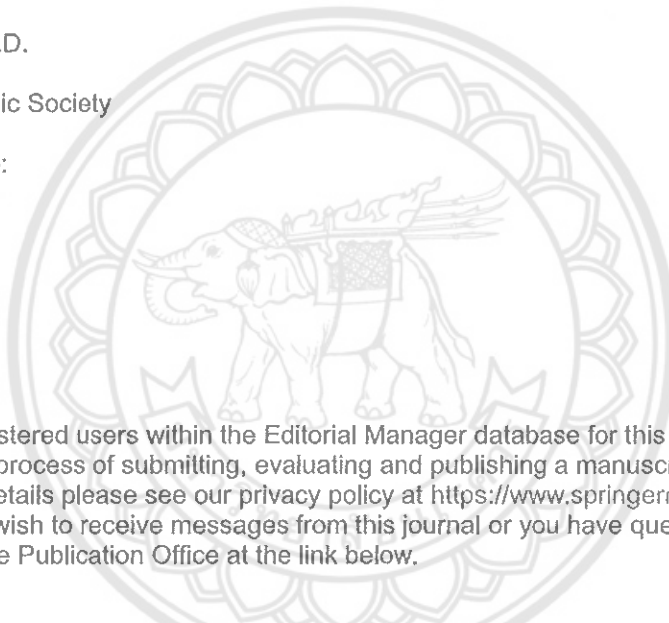
We are pleased to inform you that your manuscript, "Bio-electrochemical reactor using low cost electrodes materials for aqueous contaminant removal", has been accepted for publication in Journal of the Australian Ceramic Society.

You will receive an e-mail in due course regarding the production process.

Please remember to quote the manuscript number, ACSJ-D-19-00218R1, whenever inquiring about your manuscript.

With kind regards,  
Charles Christopher Sorrell, Ph.D.  
Editor in Chief  
Journal of the Australian Ceramic Society

Comments to the author (if any):



Recipients of this email are registered users within the Editorial Manager database for this journal. We will keep your information on file to use in the process of submitting, evaluating and publishing a manuscript. For more information on how we use your personal details please see our privacy policy at <https://www.springernature.com/production-privacy-policy>. If you no longer wish to receive messages from this journal or you have questions regarding database management, please contact the Publication Office at the link below.

In compliance with data protection regulations, you may request that we remove your personal registration details at any time. (Use the following URL: <https://www.editorialmanager.com/acsj/login.asp?a=r>). Please contact the publication office if you have any questions.

---

**Wilawan Khanitchaidecha** <wilawank1@gmail.com>  
To: Prarunchaya Peungtim <praruncha.pe@gmail.com>

11 November 2019 at 09:11

[Quoted text hidden]

---

Wilawan Khanitchaidecha, Ph.D.  
Assistant Professor

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering, Naresuan University

Phitsanulok, 65000, Thailand

Tel: +66-(055)-964-224

Fax: +66-(055)-964-002



**Journal of the Australian Ceramic Society**  
**Bio-electrochemical reactor using low cost electrodes materials for aqueous  
contaminant removal**  
--Manuscript Draft--

**Manuscript Number:** ACSJ-D-19-00218R1

**Full Title:** Bio-electrochemical reactor using low cost electrodes materials for aqueous contaminant removal

**Article Type:** Research

**Funding Information:**

**Abstract:** The electrochemical technology is an efficient contaminant removal method for wastewater treatment and reclamation. For achieving high removal efficiency, the significant materials with excellent properties and costly were used as electrodes. In this work, low cost materials of graphite plate and copper wire were utilized as anode and cathode electrodes in the bio-electrochemical reactor. The chemical reaction at electrodes generated CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub> gases, which were utilized for biological nitrate (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) removal via autotrophic denitrification. The traditional heterotrophic denitrification was also observed as cooperating mechanisms in the reactor. At the lowest C/N ratio of 1, the NO<sub>3</sub><sup>-</sup> removal efficiency was decreased to 72% due to insufficient substrates for effective denitrification. However, the increasing electric current of maximal 30 mA could not enhance the autotrophic denitrification performance. This is because the chemical precipitation (i.e., MgCO<sub>3</sub> and CaHPO<sub>4</sub>) at the cathode hindered the utilization of generated CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub> by microorganisms. However, bio-electrochemical reactor using the combination of electrochemical and biological processes provided the better performance than ordinary bioreactor.

**Corresponding Author:** Wilawank Khanitchaidecha  
Naresuan University  
THAILAND

**Corresponding Author Secondary Information:**

**Corresponding Author's Institution:** Naresuan University

**Corresponding Author's Secondary Institution:**

**First Author:** Prarunchaya Peungtim

**First Author Secondary Information:**

**Order of Authors Secondary Information:**

**Order of Authors:** Prarunchaya Peungtim  
Wilawank Khanitchaidecha  
Auppatham Nakaruk, Ph.D.

**Author Comments:**

**Response to Reviewers:** There are many corrections in accordance with your comments, as following;  
1. In the introduction, a full paragraph is added to give details of graphite, and some sentences are explained to clarify the reason for selecting graphite and copper wire as electrodes.  
2. In the results and discussion, all contents are rewritten to explain clearly on role of graphite in the process, graphite characterisation and relevancy of this article to the journal.  
3. Table 2, Fig. 2 and Fig. 3 are revised.  
4. The abstract and conclusion are revised according to the rewritten content.  
5. Some references [13-15, 22] are added.

Click here to view linked References

## Bio-electrochemical reactor using low cost electrodes materials for aqueous contaminant removal

Prarunchaya Peungtim<sup>1,2</sup>, Wilawan Khanitchaidecha<sup>1,2,\*</sup>, Auppatham Nakaruk<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering,

Naresuan University, Phitsanulok, Thailand

<sup>2</sup>Centre of Excellence for Innovation and Technology for Water Treatment,

Faculty of Engineering, Naresuan University, Phitsanulok, Thailand

<sup>3</sup>Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering,

Naresuan University, Phitsanulok, Thailand

\*Corresponding contact: wilawank1@gmail.com, +66-85-952-4842

### Abstract

The electrochemical technology is an efficient contaminant removal method for wastewater treatment and reclamation. For achieving high removal efficiency, the significant materials with excellent properties and costly were used as electrodes. In this work, low cost materials of graphite and copper wire were utilized as anode and cathode electrodes in the bio-electrochemical reactor. The chemical reactions at electrodes generated CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub> gases, which were utilized for biological nitrate (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) removal via hydrogenotrophic denitrification. The double mechanisms of hydrogenotrophic denitrification and heterotrophic denitrification in the bio-electrochemical reactor caused the increasing NO<sub>3</sub><sup>-</sup> and total N removal efficiencies rather than the ordinary bioreactor (without electrodes and electrochemical reactions). However, the increasing applied current of maximal 30 mA could not significantly enhance the bio-electrochemical performance on the contaminant removal. This is because the chemical precipitation (i.e., MgCO<sub>3</sub> and CaHPO<sub>4</sub>) at the copper wire hindered the utilization of generated H<sub>2</sub> by microorganisms. In addition, the use of graphite electrode advantaged on avoiding the sudden pH change from denitrification mechanism; the generated CO<sub>2</sub> from graphite oxidation played an important role for pH neutralization during operating.

**Key words:** Bio-electrochemical reactor; low cost electrodes; copper wire; graphite; wastewater treatment

### Introduction

Water scarcity is one of this century's concerning environmental issues, due to an increase in water demand for domestic, industrial and agricultural sectors and climate change [1, 2]. The wastewater treatment and reclamation are becoming an important for migrating severe water scarcity. Generally, the wastewater contains various contaminants and concentrations, relating to the wastewater source; the domestic and agricultural wastewater contains high nitrate and phosphate from household surfactants and fertilizers uses [3]. In the meanwhile, the toxic chemicals such as dye-pigments and phenolic compounds are observed in industrial textile and petrochemical industries, respectively [4, 5]. When the untreated wastewater is discharge to natural water resource, it can affect human health and water quality. Therefore, World Health Organization (WHO) announces the maximal limits of several contaminants for drinking and consumable water [6], in addition the guideline for industrial effluent can be found in United States Environmental Protection Agency [7].

The electrochemical technology including, electrochemical oxidation, electrochemical coagulation and electrochemical floatation, has received increasing attention, because it is more

50 sufficient than other advanced methods [8]. The electrochemical oxidation is one of the most  
51 efficient contaminants degradation; the contaminants are absorbed on the anode surface and  
52 then degraded by electron transfer in the direct oxidation, whereas the strong oxidants (such as  
53  $\text{Cl}_2$ ,  $\text{O}_3$  and  $\text{H}_2\text{O}_2$ ) are generated and the contaminants are destroyed by the oxidants in the  
54 indirect oxidation [9]. Various materials have been used as electrodes for efficient wastewater  
55 treatment and reclamation; for examples, 1) the platinum anode is a well-known electrode  
56 material for organics oxidation [10], 2) the boron-doped nanocrystalline diamond was anode  
57 electrode for decolorization of acid yellow azo dye [11], and 3) the three-dimensional  
58 RVC/ $\text{PbO}_2$  anode was suggested as electrode material for degradation of glyphosate and phenol  
59 [12]. The above materials provide good conductivity, high decolorization after several times of  
60 reuse, and excellent oxidation kinetic. However, they are very costly and not capable electrode  
61 materials at the site.

62  
63 Graphite is a crystalline and low density of carbon. The most important graphite properties of  
64 high thermal resistance, high electrical conductivity and high thermal conductivity cause many  
65 applications of graphite in various research fields. The graphite is used as artificial solid  
66 electrolyte interphase (SEI) in lithium-ion-battery [13], electrodes for carbon nanotube (CNT)  
67 composite synthesis by arc discharge method [14] and electrodes for electric arc furnaces [15].  
68 Therefore, there is a potential for applying graphite as electrodes in electrochemical wastewater  
69 technology. In addition, the integration of above electrochemical technology and ordinary  
70 wastewater treatment (i.e., biological process) could be enhancing contaminants removal  
71 efficiency and achieving the water reclamation standards.

72  
73 Biological treatment, as named activated sludge system, is a common onsite wastewater  
74 treatment system for either household or industry. Recently, the combination of biological  
75 treatment system and other technologies have been widely applied for actual water reclamation.  
76 The membrane bioreactor was developed for rejecting micropollutants from various  
77 wastewater sources; the synergic effect of sorption, biodegradation and membrane separation  
78 in the system enhanced the efficiency and also improved the water quality [16]. Furthermore,  
79 the integrated system of biological and advanced treatments was established as full-scale of  
80 coking wastewater reclamation plant; the multiple aromatic compounds in the wastewater were  
81 continuously removed, and BTEXs and humic-like substances were observed in the last  
82 treatment stage [17]. Significantly, the biological treatment is more efficient for water-soluble  
83 contaminants and suitable for destroying many contaminants such as organic and nitrogen [18,  
84 19].

85  
86 The aim of this work was to develop an integrated system of biological and electrochemical  
87 technologies (as named bio-electrochemical reactor) to treat the wastewater. The nitrate-  
88 nitrogen ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ), which are an aqueous form of nitrogen contaminant and commonly found  
89 in domestic and agricultural wastewater, was the selected contaminant. The graphite material  
90 was used as anode electrode, while the another corrosion-resistant metal of copper wire was  
91 used as a cathode material. Its durable metal, lightweight and less expensive rather than steel  
92 cause that the copper wire is a potential electrode for this developing bio-electrochemical  
93 reactor. The system was continuously operated for over 60 days in this study to find out the  
94 opportunity to be alternative onsite system for wastewater treatment and reclamation in the  
95 future.

## 96 97 **Methodology**

### 98 **Experimental apparatus**

A schematic diagram of bio-electrochemical reactor is illustrated in Fig. 1. The main reactor compartments consisted of closed acrylic cylinder (working volume 1,400 mL), graphite (75×300×10 mm) as anode, copper wire (diameter 1 mm and length 500 mm) as cathode, DC power supply, magnetic stirrer, wastewater tank and peristaltic pump (175 mL/h). The copper wire was spirally covered on the graphite plate and both were inserted in the cylinder reactor.

### Wastewater and microorganisms

The synthetic wastewater was prepared by dissolving NaNO<sub>3</sub>, CH<sub>3</sub>COONa and KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> in tap water. From Table 1, NaNO<sub>3</sub> and CH<sub>3</sub>COONa were playing roles as nitrate and organic contaminants, whereas the KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> was represented a nutrient for microbial growth. Amount of CH<sub>3</sub>COONa was varied from 0.1134 to 0.2268 g/L, referring to a C/N ratio of 1.0 to 2.0.

The mixed microorganisms were collected from wastewater treatment plant of Wang Tong Hospital (Phitsanulok, Thailand), and cultivated under anaerobic condition. The cultivated microorganisms were transferred to the bio-electrochemical reactor for running the experiment.

**Table 1** Chemicals used in preparing the wastewater

| C/N ratio | NaNO <sub>3</sub> (g/L) | CH <sub>3</sub> COONa·3H <sub>2</sub> O (g/L) | KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> (g/L) |
|-----------|-------------------------|---|---------------------------------------|
| 1.0       | 0.1214                  | 0.1134  | 0.0175                                |
| 1.5       | 0.1214                  | 0.1701  | 0.0175                                |
| 2.0       | 0.1214                  | 0.2268  | 0.0175                                |

### Experimental procedure

200 mL of cultivated microorganisms was added into the reactor. In Phase 1, the reactor was applied with the constant current at 10 mA, while the C/N ratio in wastewater was varied from 2.0 to 1.5 and 1.0. During Phase 2, the applied current was stepwise increased from 10 to 20 and 30 mA, however the C/N ratio in wastewater was controlled at 1.0 (as shown in Table 2). The treated water was collected every day for water quality analysis. Furthermore, another reactor was set-up as ordinary bioreactor.

### Analytical methods

Three forms of nitrogen including NO<sub>3</sub>-N, NO<sub>2</sub>-N and NH<sub>4</sub>-N were determined by ultraviolet spectrophotometric screening, colorimetric and phenate methods, respectively in accordance with the standard methods for the examination of water and wastewater [20]. The organic was determined by total organic carbon (TOC) analyser (Analytikjena, multi N/C 2100s). The reactor performance was indicated by NO<sub>3</sub><sup>-</sup> removal efficiency and total nitrogen (N) removal efficiency, which both were calculated in Eqs. (1) and (2).

$$\text{Nitrate removal efficiency} = \left(1 - \frac{[\text{NO}_3^-]_{\text{out}}}{[\text{NO}_3^-]_{\text{in}}}\right) \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Total nitrogen removal efficiency} = \left(1 - \frac{[\text{NO}_3^-]_{\text{out}} + [\text{NO}_2^-]_{\text{out}} + [\text{NH}_4^+]_{\text{out}}}{[\text{NO}_3^-]_{\text{in}}}\right) \times 100 \quad (2)$$

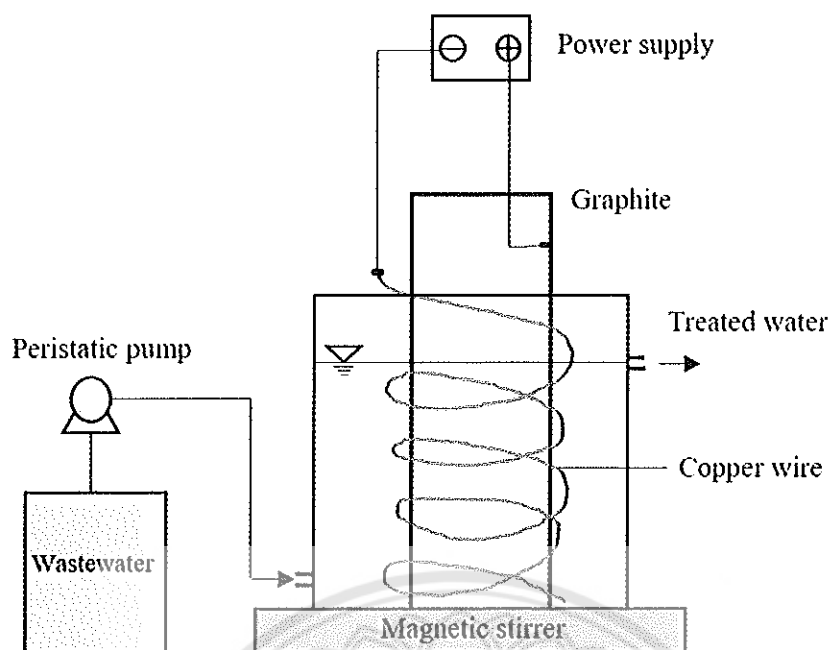


Fig. 1 Schematic diagram of bio-electrochemical system

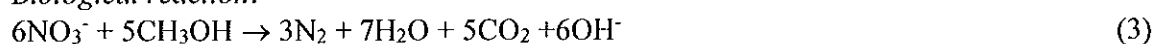
Table 2 Experimental conditions

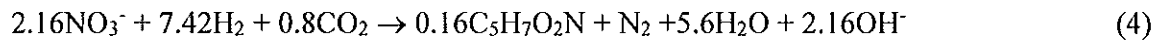
| Reactor                               | Applied current (mA) | C/N ratio |
|---------------------------------------|----------------------|-----------|
| Bioreactor (control)                  | -                    | 2.0       |
|                                       | -                    | 1.5       |
|                                       | -                    | 1.0       |
| Bio-electrochemical reactor – Phase 1 | 10                   | 2.0       |
|                                       | 10                   | 1.5       |
|                                       | 10                   | 1.0       |
| Bio-electrochemical reactor – Phase 2 | 10                   | 1.0       |
|                                       | 20                   | 1.0       |
|                                       | 30                   | 1.0       |

## Results and Discussion

The ordinary bioreactor was operating at various C/N ratios and no applied current, and the results are shown in Figs 2a and 2b. The high  $\text{NO}_3^-$  and total N removal efficiencies of greater than 99% were achieved at 2.0 C/N ratio. The  $\text{NO}_3^-$  was completely removed by biological heterotrophic denitrification during exceeding organic substrate (i.e,  $\text{CH}_3\text{OH}$ ,  $\text{CH}_3\text{COONa}$ ). The reaction of heterotrophic denitrification is briefed in Eq. (3). At lower C/N ratio of 1.5, both efficiencies decreased 93% and 80% with a high effluent  $\text{NO}_2^-$  (reduced form of  $\text{NO}_3^-$ ). The continuous decrease in efficiencies were observed at the lowest C/N ratio of 1.0. The results strongly agreed that the organic content was significant factor for successful treatment of  $\text{NO}_3^-$  contaminant. As suggested in a literature [21], the heterotrophic denitrification was dominant mechanisms, when the organic was adequate at greater than 1.0 C/N ratio.

### Biological reaction:



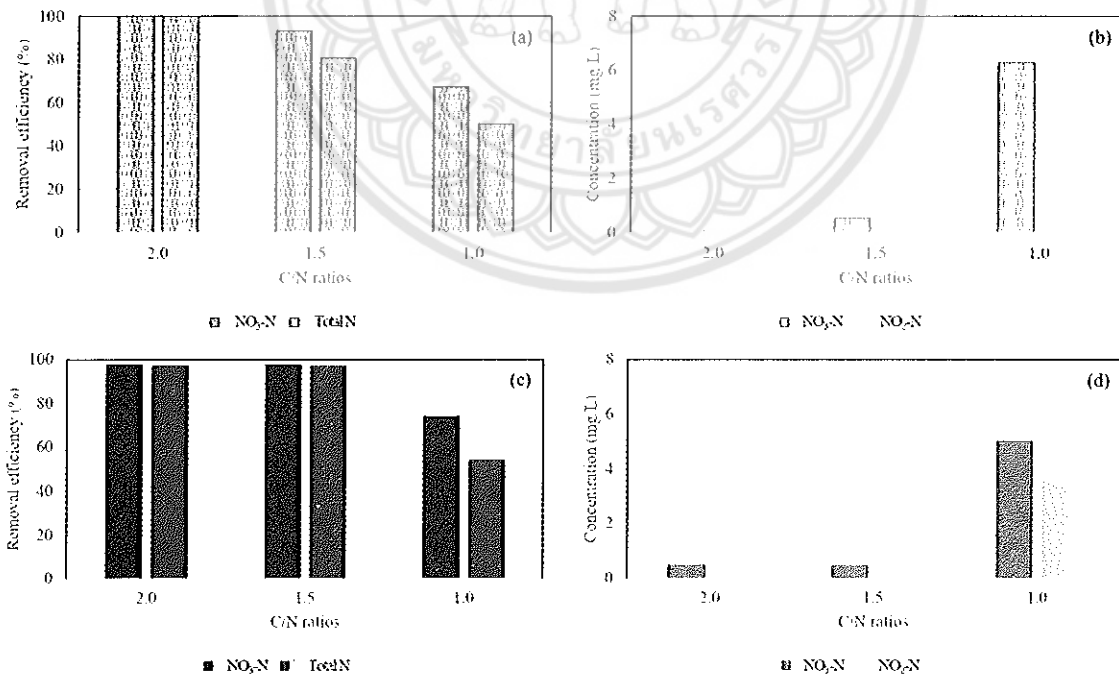


When the graphite was applied as anode in the bio-electrochemical reactor. The  $\text{NO}_3^-$  and total N removal efficiencies were still over 98% at 1.5-2.0 C/N ratios, as seen in Fig. 2c. The carbon was dissolved from the graphite electrode and formed as aqueous  $\text{CO}_2$  and/or  $\text{HCO}_3^-$  (in Eq. (5)). In the meantime, the water electrolysis was occurred at the cathode of copper wire; small bubbles of hydrogen gas ( $\text{H}_2$ ) was observed along the copper wire length (in Eq. (8)). However, the other possible reactions occurred at the anode and cathode are listed in Eqs. (6)-(11) [22]. According the above electrochemical reactions, the another biological  $\text{NO}_3^-$  removal was happened, namely hydrogenotrophic denitrification; the generated  $\text{CO}_2$  and  $\text{H}_2$  were utilized for removing  $\text{NO}_3^-$  contaminant (see in Eq. (4)). The double biological mechanisms in the bio-electrochemical reactor using graphite electrode was a significant reason for enhancing the contaminant removal efficiency rather than the ordination bioreactor.

*Electrochemical reaction (anode):*



*Electrochemical reaction (cathode):*



**Fig. 2** Removal efficiency of (a) bioreactor (c) bio-electrochemical reactor - phase 1, and effluent concentration of (b) bioreactor and (d) bio-electrochemical reactor - phase 1.

The another advantage of using graphite as electrode in the bio-electrochemical reactor was the pH control ability; the pH was increased from 7.7 to the maximal value of 8.9 in the ordinary bioreactor, whereas the pH was slightly reduced to 7.3 in the bio-electrochemical reactor. This is because the CO<sub>2</sub> generated from graphite electrode acted as a weak acid for pH neutralization in accordance with the biological NO<sub>3</sub><sup>-</sup> removal process.

Some NO<sub>2</sub><sup>-</sup> was detected after finishing the bio-electrochemical treatment (Fig. 2d). This NO<sub>2</sub><sup>-</sup> accumulation was from a partial denitrification that commonly occurred at a low organic condition [23, 24] and/or an electrochemical cathodic reaction in Eq. (10). However, no NH<sub>4</sub><sup>+</sup> from cathodic NO<sub>2</sub><sup>-</sup> reduction was occurred in this experiment. In the literature [25], the NH<sub>4</sub><sup>+</sup> was observed and required a further treatment, when the stainless steel was used as both anode and cathode. It is possible that the use of graphite and copper wire and together with an electrode potential of the systems had impacts on the cathodic reaction occurrence.

Later, the applied current was increased from 10 mA to 20 and 30 mA in the bio-electrochemical reactor. From Fig. 3a, the efficiencies were slightly increased to 80% for NO<sub>3</sub><sup>-</sup> removal and 60% for total N removal at the higher currents. At the high currents, the amount of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub> from electrochemical reaction was increased, however it could not enhance the contaminant removal efficiency via hydrogenotrophic denitrification. The key reason was that the generated H<sub>2</sub> could not be effectively utilized by microorganisms. The Mg<sup>2+</sup> and Ca<sup>2+</sup> ions existing in the tap water (as presented in hardness) induced to the precipitation of MgCO<sub>3</sub>, CaCO<sub>3</sub> and CaHPO<sub>4</sub> on the copper wire [26], resulting an ineffectiveness of H<sub>2</sub> utilization. On the other hand, the degradation of graphite electrode was observed at the highest current; small carbon was suspended in the bio-electrochemical reactor, and the organic concentration was increased in the treated water.

From all results, the bio-electrochemical reactor achieved the higher performance of NO<sub>3</sub><sup>-</sup> contaminant removal rather than the ordinary bioreactor from cooperating hydrogenotrophic denitrification and heterotrophic denitrification. Furthermore, the low cost material of graphite and copper wire can be used as effective electrodes for bio-electrochemical, and this reactor is possible to be alternative onsite wastewater treatment and reclamation system.

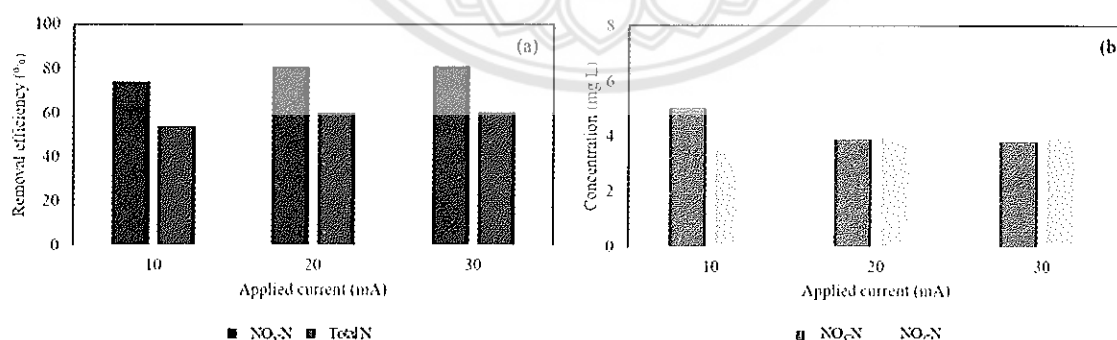


Fig. 3 (a) Removal efficiency and (b) effluent concentration of bio-electrochemical reactor - phase 2.

## Conclusion

The integration of electrochemical and biological processes in a single reactor was developed in this study for a potential onsite wastewater treatment and reclamation. The low cost of graphite and copper wire was introduced as anode and cathode materials. The electrochemical

mechanisms of graphite oxidation and water electrolysis were occurred; the generated CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub> were utilized as substrates for biological hydrogenotrophic denitrification to remove the NO<sub>3</sub><sup>-</sup> contaminant from the wastewater. Both the C/N existing in the wastewater and the applied current to the bio-electrochemical reactor were effected on the NO<sub>3</sub><sup>-</sup> and total N removal efficiencies. The decrease in C/N ratio caused the ineffective heterotrophic denitrification (NO<sub>2</sub><sup>-</sup> and NO<sub>3</sub><sup>-</sup> accumulation eventually). However, the electrochemical reactions from graphite and copper wire electrodes encouraged the double mechanism of hydrogenotrophic denitrification and heterotrophic denitrification, resulting the enhancement of NO<sub>3</sub><sup>-</sup> and total N removal efficiencies. The increase in applied current could not much improve the efficiencies in this study, because the chemical precipitation occurred on the copper wire reduced the effective biological H<sub>2</sub> consumption.

## References

- [1] Distefano T., Kelly S.: Are we in deep water? Water scarcity and its limits to economic growth. *Ecol. Econ.* 142, 130-147 (2017).
- [2] Xu Z., Chen X., Wu S.R., Gong M., Du Y., Wang J., Li Y., Liu J.: Spatial-temporal assessment of water footprint, water scarcity and crop water productivity in a major crop production region. *J. Clean. Prod.* 224, 375-383 (2019).
- [3] Pitakwinai P., Khanitchaidecha W., Nakaruk A.: Spatial and seasonal variation in surface water quality of Nan river, Thailand. *NUEJ* 14, 1-10 (2019).
- [4] Nunez J., Yeber M., Cisternas N., Thibaut R., Medina P., Carrasco C.: Application of electrocoagulation for the efficient pollutants removal to reuse the treated wastewater in the dyeing process of the textile industry. *J. Hazard. Mater.* 371, 705-711 (2019).
- [5] Sierra J.D.M., Oosterkamp M.J., Wang W., Spanjers H., van Lier J.B.: Comparative performance of upflow anaerobic sludge blanket reactor and anaerobic membrane bioreactor treating phenolic wastewater: Overcoming high salinity. *Chem. Eng. J.* 336, 480-490 (2019).
- [6] WHO: Guidelines for drinking water quality. 4<sup>th</sup> edition, incorporating the 1<sup>st</sup> addendum. (2017).
- [7] US-EPA. (2019). Industrial effluent guidelines. <https://www.epa.gov>.
- [8] Tang J., Zhang C., Shi X., Sun J., Cunningham J.A.: Municipal wastewater treatment plants coupled with electrochemical, biological and bio-electrochemical technologies: Opportunities and challenge toward energy self-sufficiency. *J. Environ.l Manage.* 234, 396-403 (2019).
- [9] Martinez-Huitle C.A., Panizza M.: Electrochemical oxidation of organic pollutants for wastewater treatment. *Curr. Opin. Electrochem.* 11, 62-71 (2018).
- [10] Feng Y., Yang L., Liu J., Logan B.E.: Electrochemical technologies for wastewater treatment and resource reclamation. *Environ. Sci. Water Research Technol.* 2, 800-831 (2016).
- [11] Chen C., Nurhayati E., Juang Y., Huang C.: Electrochemical decolorization of dye wastewater by surface-activated boron-doped nanocrystalline diamond electrode. *J. Environ. Sci.* 45, 100-107. (2016).
- [12] Farinos R.M., Ruotolo L.A.M.: Comparison of the electrooxidation performance of three-dimensional RVC/PbO<sub>2</sub> and boron-doped diamond electrodes. *Electrochimica Acta* 224, 32-39 (2017).
- [13] An S.J., Li J., Daniel C., Mohanty D., Nagpure S., Wood D.L.: The state of understanding of the lithium-ion-battery graphite solid electrolyte interphase (SEI) and its relationship to formation cycling. *Carbon* 105, 52-76 (2016).



- 278 [14] Li Z., Wang L., Li Y., Feng Y., Feng W.: Carbon-based functional nanomaterials:  
279 Preparation, properties and applications. *Compos. Sci. Technol.* 179, 10-40 (2019).
- 280 [15] Reinhorn G., Dragan O.: Determining quality of graphite electrodes for electric arc  
281 furnaces by measuring ultrasonic velocity. *Ultrasonics* 21, 167-170 (1983).
- 282 [16] Ma J., Dai R., Chen M., Khan S.J., Wang Z.: Applications of membrane bioreactors for  
283 water reclamation: Micropollutant removal, mechanisms and perspectives. *Bioresource  
284 Technol.* 269, 532-543 (2018).
- 285 [17] Ren J., Li J., Li J., Chen Z., Cheng F.: Tracking multiple aromatic compounds in a full-  
286 scale coking wastewater reclamation plant: Interaction with biological and advanced  
287 treatments. *Chemosphere* 222, 431-439 (2019).
- 288 [18] Fellingham L.R.: Environmental remediation and restoration technologies in nuclear  
289 decommissioning projects. *Nuclear Decommission: Planning, Execution and International  
290 Experience*, Woodhead Publishing Series in Energy, 416-447,  
291 <https://doi.org/10.1533/9780857095336.2.416>. (2012).
- 292 [19] Khanitchaidecha W., Nakaruk A., Ratananikom K., Eamrat R., Kazama F.: Heterotrophic  
293 nitrification and aerobic denitrification using pure-culture bacteria for wastewater  
294 treatment. *J. Water Reuse Desal.* 9, 10-17 (2019).
- 295 [20] Rice E.W., Baird R.B., Eaton A.D.: Standard Methods for the Examination of Water and  
296 Wastewater. 23<sup>rd</sup> edition, American Public Health Association. (2017).
- 297 [21] Zhao Y., Feng C., Wang Q., Yang Y., Zhang Z., Sugiura N.: Nitrate removal from  
298 groundwater by cooperating heterotrophic with autotrophic denitrification in a biofilm-  
299 electrode reactor. *J. Hazard. Mat.* 192, 1033-1039 (2011).
- 300 [22] Feleke Z., Arake K., Sakakibara Y., Watanabe T., Kurado M.: Selective reduction of  
301 nitrate to nitrogen gas in a biofilm-electrode reactor. *Wat. Res.* 32, 2728-2734 (1998).
- 302 [23] Chen D., Chen X., Huang X., He S., Huang J., Zhou W.: Controlling denitrification  
303 accompanied with nitrite accumulation at the sediment-water interface. *Ecol. Eng.* 100,  
304 194-198 (2017).
- 305 [24] Cao S., Li B., Du R., Ren N., Peng Y.: Nitrite production in a partial denitrifying upflow  
306 sludge bed (USB) reactor equipped with gas automatic circulation (GAC). *Water Research*  
307 90, 309-316 (2016).
- 308 [25] Tong S., Zhang B., Feng C., Zhao Y., Chen N., Hao C., Pu J., Zhao L.: Characteristics of  
309 heterotrophic/biofilm-electrode autotrophic denitrification for nitrate removal from  
310 groundwater. *Bioresource Technol.* 148, 121-127 (2013).
- 311 [26] Zhao Y., Feng C., Wang Q., Yang Y., Zhang Z., Sugiura N.: Nitrate removal from  
312 groundwater by cooperating heterotrophic with autotrophic denitrification in a biofilm-  
313 electrode reactor. *J. Hazard. Mat.* 192, 1033-1039 (2011).