

การกำจัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก

**NITRATE REMOVAL IN SYNTHETIC WASTEWATER BY
PHOTOCATALYTIC PROCESS**

ศุภณีย์ ขวัญยืน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การกำจัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก

สุนีย์ ขวัญยืน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์


มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การกำจัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก
Nitrate Removal in Synthetic Wastewater by Photocatalytic Process
ชื่อ - นามสกุล นางสาวสุนีย์ ขวัญยืน
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธรรมศักดิ์ โรจน์วีรุพห์, วศ.ค.
ปีการศึกษา 2561

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

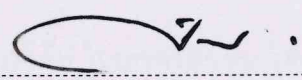

..... ประธานกรรมการ
(อาจารย์ฐนียา รังษีสริยะชัย, วศ.ค.)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์สัญญา สิริวิทยาปกรณ์, Ph.D.)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ปิติสานต์ กร้ามาตร, ปร.ค.)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธรรมศักดิ์ โรจน์วีรุพห์, วศ.ค.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์อังกูร อ่างทอง, Ph.D.)
วันที่ 29 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2561

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การกำจัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก
ชื่อ-นามสกุล	นางสาวสุนีย์ ขวัญยืน
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธรรมศักดิ์ โรจนวีรพท์, วศ.ด.
ปีการศึกษา	2561

บทคัดย่อ

งานวิจัยครั้งนี้ทำการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรตในโตรเจน (NO_3^- -N) ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่กระตุ้นร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน (Ag-TiO_2) ที่เตรียมขึ้นด้วยวิธีการ Composite colloid deposition ภายใต้สภาวะกรด โดยทำการเจือเงินในปริมาณที่แตกต่างกัน 3 ค่า ได้แก่ 0.1%, 0.5% และ 1.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

โดยทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นด้วยอุปกรณ์ X-ray fluorescence spectrometer (XRF) และ Brunauer, Emmett and Teller analyser (BET) ซึ่งสามารถระบุองค์ประกอบของธาตุในตัวเร่งปฏิกิริยาและพื้นที่ผิวเฉพาะ โดยผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาผง Ag-TiO_2 ที่เตรียมขึ้นทั้งหมดมีองค์ประกอบของ TiO_2 และ Ag เป็นไปตามที่ต้องการ

สำหรับการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรตในโตรเจนที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10, 25, 50, 75 และ 100 mg.L^{-1} as N ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่กระตุ้นร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวข้างต้นและร่วมกับแหล่งกำเนิดแสง UVA ที่ความเข้มแสง $1,000 \mu\text{W.cm}^{-2}$ พบว่า กระบวนการดังกล่าวสามารถกำจัดไนเตรตในโตรเจน โดยมีประสิทธิภาพสูงสุด เท่ากับ 97.56% ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 100 mg.L^{-1} as N ในระยะเวลา 180 min โดยเมื่อพิจารณาค่า selectivity (S) ของการเปลี่ยนรูปไนโตรเจนที่เวลา 15 min ในกระบวนการดังกล่าว พบว่าค่า Selectivity ของไนโตรเจนรูปอื่นๆ มีค่าเท่ากับ 0.00%, 2.13% และ 97.87% สำหรับ ไนไตรต์ ($\text{S}_{\text{NO}_2^-}$), แอมโมเนีย ($\text{S}_{\text{NH}_4^+}$) และ ไนโตรเจน (S_{N_2}) ตามลำดับ

คำสำคัญ : กระบวนการโฟโตรีดักชัน สารได้อป ไนเตรตรีดักชัน ไทเทเนียมไดออกไซด์ การเปลี่ยนรูปไนโตรเจน

Thesis Title	Nitrate Removal in Synthetic Wastewater by Photocatalytic Process
Name - Surname	Miss Sunee Kwanyuen
Program	Civil Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Thammasak Rojviroon, D.Eng.
Academic Year	2018

ABSTRACT

This research investigated the efficiency of nitrate nitrogen (NO_3^- -N) removal by photocatalytic reduction process and Ag doped TiO_2 (Ag-TiO_2) nanopowder catalyst. The Ag-TiO_2 was prepared by means of composite colloid deposition method under acid conditions. The TiO_2 nanopowder was doped by 3 different amounts of Ag: 0.1%, 0.5% and 1.0% of weight per volume (w/v%).

The physical characteristics of the prepared Ag-TiO_2 catalyst were inquired into by X-ray fluorescence spectrometer (XRF) and Brunauer, Emmett and Teller analyser (BET) which enabled to identify both the elements and the specific surface areas of the catalyst. The results showed that all of the Ag-TiO_2 nanopowder catalyst had the desired compounds.

Regarding to the investigation of the efficiency of photocatalytic reduction process of nitrate removal with the initial nitrate concentration ($[\text{NO}_3^-]_0$) of 10, 25, 50, 75 and 100 mg.L^{-1} as N including Ag-TiO_2 nanopowder catalyst and UVA light source of $1,000 \mu\text{W.cm}^{-2}$, it was found that this process was able to remove nitrate nitrogen and additionally revealed the highest efficiency of 97.56% with the initial nitrate concentration ($[\text{NO}_3^-]_0$) of 100 mg.L^{-1} as N within 180 minutes. When considering the selectivity (S) of nitrogen conversion in the photocatalytic reduction process within 15 minutes, the selectivity values of other nitrogen were 0.00% of nitrite ($S_{\text{NO}_2^-}$), 2.13% of ammonia ($S_{\text{NH}_4^+}$) and 97.87% of nitrogen (S_{N_2}), respectively.

Keywords : photoreduction, dopant, nitrate removal, TiO_2 , nitrogen conversion

กิตติกรรมประกาศ

ในการศึกษางานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้อย่างสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณา และความอนุเคราะห์ของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธรรมศักดิ์ โรจน์วิรุฬห์ อาจารย์ที่ปรึกษา และผู้ช่วยศาสตราจารย์ อรรวรรณ โรจน์วิรุฬห์ ที่ได้กรุณาเสียสละเวลาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และให้ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้ทำการศึกษาวิจัยขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.ฐนินยา รังษิสุริยะชัย ประธานกรรมการสอบ รวมถึงขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. สัตยญา สิริวิทยาปกรณ และ รองศาสตราจารย์ ดร. ปิติสานต์ กร้ามาตร ที่ได้ให้ความกรุณาในการแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ของงานวิจัย รวมทั้งเสียสละเวลาในการเป็นกรรมการสอบในการสอบครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ และมอบความดีทั้งหมดนี้ให้แก่ นายคำนิง ขวัญยืน (คุณพ่อ) นางเกษร ขวัญยืน (คุณแม่) และญาติพี่น้อง ที่คอยช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำวิจัยนี้ รวมถึงคณาจารย์ทุกท่านที่ให้การสนับสนุนและประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้ รวมถึงภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี รวมถึงขอขอบคุณบุคลากรเจ้าหน้าที่ของภาควิชาวิศวกรรมโยธาที่ให้ความช่วยเหลือในสิ่งต่างๆ จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยเล่มนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้ที่สนใจหากงานวิจัยในครั้งนี้ขาดตกบกพร่อง หรือไม่สมบูรณ์ประการใด ผู้วิจัยขอกราบขอภัยมา ณ โอกาสนี้ด้วย

สุนีย์ ขวัญยืน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(7)
สารบัญรูป.....	(17)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	(18)
บทที่ 1 บทนำ.....	19
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	19
1.2 วัตถุประสงค์.....	20
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	20
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	20
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	21
2.1 ไนโตรเจน (Nitrogen).....	21
2.2 กระบวนการโฟโตคะตะลิติก.....	25
2.3 คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะลิติก.....	36
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	37
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	40
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	40
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	43
3.3 การเปลี่ยนรูปของไนเตรตในปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน.....	47
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	48
4.1 ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาผง Ag-TiO ₂	48
4.2 การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรตไนโตรเจนด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชันในชุดควบคุม.....	52

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3 การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรตในโตรเจนด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม Ag-TiO ₂	52
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย การอภิปรายผลและข้อเสนอแนะ.....	63
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	63
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	64
บรรณานุกรม.....	65
ภาคผนวก.....	72
ภาคผนวก ก แสดงผลการทดลอง.....	73
ภาคผนวก ข ตารางแสดงการเปลี่ยนรูปของไนเตรตที่เวลา 15 min.....	104
ภาคผนวก ค สูตรการคำนวณ.....	107
ภาคผนวก ง เอกสารการประชุมวิชาการ.....	109
ประวัติผู้เขียน.....	130



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 มาตรฐานของไนเตรตในน้ำประเภทต่างๆ.....	25
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของ TiO_2	31
ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบคุณสมบัติลักษณะของ TiO_2 ระหว่างอนาเทส (Anatase) บรูคไคท์ (Brookite) และ รูไทล์ (Rutile).....	32
ตารางที่ 3.1 การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาผง Ag-TiO_2	43
ตารางที่ 3.2 ชุดทดลองสำหรับการศึกษาการกำจัดไนเตรตด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก รีดักชันร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาผง Ag-TiO_2	46
ตารางที่ 4.1 ปริมาณองค์ประกอบของสารประกอบต่างๆ.....	50
ตารางที่ 4.2 ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาผง Ag-TiO_2	51
ตารางที่ 4.3 การเปลี่ยนรูปของไนเตรตไปเป็นไนไตรต์ และแอมโมเนีย ที่เวลา 180 min.....	54
ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนรูปของไนเตรตกับงานวิจัยอื่น.....	60
ตารางที่ ก.1 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.1% Ag-TiO_2 ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 10 mg.L^{-1} as N ในชุดการทดลอง.....	74
ตารางที่ ก.2 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.1% Ag-TiO_2 ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 25 mg.L^{-1} as N ในชุดการทดลอง.....	74
ตารางที่ ก.3 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.1% Ag-TiO_2 ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 50 mg.L^{-1} as N ในชุดการทดลอง.....	75
ตารางที่ ก.4 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.1% Ag-TiO_2 ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 75 mg.L^{-1} as N ในชุดการทดลอง.....	75

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ ก.5 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.1%Ag-TiO ₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 100 mg.L ⁻¹ as N ในชุดการทดลอง.....	76
ตารางที่ ก.6 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.5%Ag-TiO ₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 10 mg.L ⁻¹ as N ในชุดการทดลอง.....	76
ตารางที่ ก.7 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.5%Ag-TiO ₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 25 mg.L ⁻¹ as N ในชุดการทดลอง.....	77
ตารางที่ ก.8 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.5%Ag-TiO ₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 50 mg.L ⁻¹ as N ในชุดการทดลอง.....	77
ตารางที่ ก.9 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.5%Ag-TiO ₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 75 mg.L ⁻¹ as N ในชุดการทดลอง.....	78
ตารางที่ ก.10 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.5%Ag-TiO ₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 100 mg.L ⁻¹ as N ในชุดการทดลอง.....	78
ตารางที่ ก.11 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 1.0%Ag-TiO ₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 10 mg.L ⁻¹ as N ในชุดการทดลอง.....	79
ตารางที่ ก.12 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 1.0%Ag-TiO ₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 25 mg.L ⁻¹ as N ในชุดการทดลอง.....	79

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ ก.13	การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 1.0%Ag-TiO ₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 50 mg.L ⁻¹ as N ในชุดการทดลอง.....	80
ตารางที่ ก.14	การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 1.0%Ag-TiO ₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 75 mg.L ⁻¹ as N ในชุดการทดลอง.....	80
ตารางที่ ก.15	การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 1.0%Ag-TiO ₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 100 mg.L ⁻¹ as N ในชุดการทดลอง.....	81
ตารางที่ ก.16	การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.1%Ag-TiO ₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 10 mg.L ⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 1.....	81
ตารางที่ ก.17	การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.1%Ag-TiO ₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 25 mg.L ⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 1.....	82
ตารางที่ ก.18	การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.1%Ag-TiO ₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 50 mg.L ⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 1.....	82
ตารางท ก.19	การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.1%Ag-TiO ₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 75 mg.L ⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 1.....	83
ตารางที่ ก.20	การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.1%Ag-TiO ₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 100 mg.L ⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 1.....	83

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ ก.21	การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.5%Ag-TiO ₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 10 mg.L ⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 1.....	84
ตารางที่ ก.22	การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.5%Ag-TiO ₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 25 mg.L ⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 1.....	84
ตารางที่ ก.23	การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.5%Ag-TiO ₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 50 mg.L ⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 1.....	85
ตารางที่ ก.24	การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.5%Ag-TiO ₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 75 mg.L ⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 1.....	85
ตารางที่ ก.25	การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.5%Ag-TiO ₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 100 mg.L ⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 1.....	86
ตารางที่ ก.26	การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 1.0%Ag-TiO ₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 10 mg.L ⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 1.....	86
ตารางที่ ก.27	การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 1.0%Ag-TiO ₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 25 mg.L ⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 1.....	87
ตารางที่ ก.28	การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 1.0%Ag-TiO ₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 50 mg.L ⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 1.....	87

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ ก.29	การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 1.0%Ag-TiO ₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 75 mg.L ⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 1.....	88
ตารางที่ ก.30	การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 1.0%Ag-TiO ₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 100 mg.L ⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 1.....	88
ตารางที่ ก.31	การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.1%Ag-TiO ₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 10 mg.L ⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 2.....	89
ตารางที่ ก.32	การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.1%Ag-TiO ₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 25 mg.L ⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 2.....	89
ตารางที่ ก.33	การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.1%Ag-TiO ₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 50 mg.L ⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 2.....	90
ตารางที่ ก.34	การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.1%Ag-TiO ₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 75 mg.L ⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 2.....	90
ตารางที่ ก.35	การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.1%Ag-TiO ₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 100 mg.L ⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 2.....	91
ตารางที่ ก.36	การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.5%Ag-TiO ₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 10 mg.L ⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 2.....	91

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ ก.37	การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.5%Ag-TiO ₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 25 mg.L ⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 2.....	92
ตารางที่ ก.38	การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.5%Ag-TiO ₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 50 mg.L ⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 2.....	92
ตารางที่ ก.39	บำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.5%Ag-TiO ₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 75 mg.L ⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 2.....	93
ตารางที่ ก.40	การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.5%Ag-TiO ₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 100 mg.L ⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 2.....	93
ตารางที่ ก.41	การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 1.0%Ag-TiO ₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 10 mg.L ⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 2.....	94
ตารางที่ ก.42	การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 1.0%Ag-TiO ₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 25 mg.L ⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 2.....	94
ตารางที่ ก.43	การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 1.0%Ag-TiO ₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 50 mg.L ⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 2.....	95
ตารางที่ ก.44	การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 1.0%Ag-TiO ₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 75 mg.L ⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 2.....	95

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ ก.45	การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 1.0%Ag-TiO ₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 100 mg.L ⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 2.....	96
ตารางที่ ก.46	การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.1%Ag-TiO ₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 10 mg.L ⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 3.....	96
ตารางที่ ก.47	การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.1%Ag-TiO ₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 25 mg.L ⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 3.....	97
ตารางที่ ก.48	การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.1%Ag-TiO ₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 50 mg.L ⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 3.....	97
ตารางที่ ก.49	การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.1%Ag-TiO ₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 75 mg.L ⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 3.....	98
ตารางที่ ก.50	การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.1%Ag-TiO ₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 100 mg.L ⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 3.....	98
ตารางที่ ก.51	การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.5%Ag-TiO ₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 10 mg.L ⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 3.....	99
ตารางที่ ก.52	การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.5%Ag-TiO ₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 25 mg.L ⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 3.....	99

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ ก.53 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.5%Ag-TiO ₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 50 mg.L ⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 3.....	100
ตารางที่ ก.54 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.5%Ag-TiO ₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 75 mg.L ⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 3.....	100
ตารางที่ ก.55 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.5%Ag-TiO ₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 100 mg.L ⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 3.....	101
ตารางที่ ก.56 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 1.0%Ag-TiO ₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 10 mg.L ⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 3.....	101
ตารางที่ ก.57 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 1.0%Ag-TiO ₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 25 mg.L ⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 3.....	102
ตารางที่ ก.58 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 1.0%Ag-TiO ₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 50 mg.L ⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 3.....	102
ตารางที่ ก. 59 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 1.0%Ag-TiO ₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 75 mg.L ⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 3.....	103
ตารางที่ ก. 60 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 1.0%Ag-TiO ₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 100 mg.L ⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 3.....	103

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ ข.1 การเปลี่ยนรูปของไนเตรตที่เกิดขึ้นในกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชันที่เวลา 15 min 0.1%Ag-TiO ₂	105
ตารางที่ ข.2 การเปลี่ยนรูปของไนเตรตที่เกิดขึ้นในกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชันที่เวลา ที่เวลา 15 min 0.5%Ag-TiO ₂	105
ตารางที่ ข.3 การเปลี่ยนรูปของไนเตรตที่เกิดขึ้นในกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชันที่เวลา 15 min 1.0%Ag-TiO ₂	106



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 วัฏจักรไนโตรเจน.....	22
รูปที่ 2.2 กลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก.....	27
รูปที่ 2.3 โครงสร้างผลึกของ TiO_2	30
รูปที่ 3.1 การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้กระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ดักจับ.....	40
รูปที่ 3.2 วิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาผง Ag-TiO_2 ด้วยวิธีการ Composite colloid deposition	42
รูปที่ 3.3 ถังปฏิกรณ์ สำหรับกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ดักจับ.....	43
รูปที่ 3.4 ขั้นตอนในการกำจัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ดักจับ..	46
รูปที่ 4.1 ผลวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาผง Ag-TiO_2 ด้วยอุปกรณ์ Bruker model S8 tiger.....	49
รูปที่ 4.2 ความเข้มข้นของไนเตรตที่เวลาต่างๆ โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ดักจับที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผง 0.1% Ag-TiO_2	52
รูปที่ 4.3 ความเข้มข้นของไนเตรตที่เวลาต่างๆ โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ดักจับที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผง 0.5% Ag-TiO_2	53
รูปที่ 4.4 ความเข้มข้นของไนเตรตที่เวลาต่างๆ โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ดักจับที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผง 1.0% Ag-TiO_2	53
รูปที่ 4.5 ประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรตโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผง 0.1% Ag-TiO_2 ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ดักจับที่เวลาต่างๆ.....	55
รูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรตโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผง 0.5% Ag-TiO_2 ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ดักจับที่เวลาต่างๆ.....	55
รูปที่ 4.7 ประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรตโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผง 1.0% Ag-TiO_2 ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ดักจับที่เวลาต่างๆ.....	56
รูปที่ 4.8 ประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรตที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 10, 25, 50, 75 และ 100 mg.L^{-1} as N โดยใช้ตัวเร่งตัวปฏิกิริยาทั้ง 3 ชนิด.....	57
รูปที่ 4.9 การเปลี่ยนรูปของไนเตรตด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่เวลาต่างๆ (Selectivity)	59

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

Å	อังสตรอม
°C	องศาเซลเซียส
cm	เซนติเมตร
E_g	แถบพลังงาน (energy gap)
e^-	อิเล็กตรอนที่แถบการนำไฟฟ้า
eV	อิเล็กตรอนโวลต์
g	กรัม
h^+	โฮลที่แถบวาเลนซ์
hr	ชั่วโมง
L	ลิตร
m^2	ตารางเซนติเมตร
m^3	ลูกบาศก์เมตร
mg	มิลลิกรัม
min	นาที
mL	มิลลิลิตร
μm	ไมโครเมตร
μW	ไมโครวัตต์
nm	นาโนเมตร
O^\cdot	ออกไซด์ไอออนเรดิคัล (oxide ion radicals)
O_2^\cdot	ซูเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคัล (superoxide ion radicals)
$\cdot\text{OH}$	ไฮดรอกซิลเรดิคัล
$\cdot\text{OH}_2$	เปอร์ไฮดรอกซิลเรดิคัล
rms	รากที่สองของค่าความขรุขระเฉลี่ย
UV	รังสีอัลตราไวโอเลต
W	วัตต์

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

แหล่งกำเนิดของน้ำเสียที่มีผลกระทบต่อระบบนิเวศน์ทางน้ำ โดยทั่วไปแล้วสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ น้ำทิ้งจากชุมชน น้ำทิ้งจากภาคอุตสาหกรรม และน้ำทิ้งจากภาคเกษตรกรรม ทั้งนี้ปัญหาหลักของการบำบัดน้ำทิ้งอย่างหนึ่ง คือ น้ำทิ้งที่มีองค์ประกอบของสารอาหารกลุ่มไนโตรเจนและฟอสฟอรัสซึ่งบำบัดได้ค่อนข้างยาก และยังเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดสภาวะยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) ทำให้สาหร่ายในแหล่งน้ำนั้นเกิดการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้เกิดการลดลงของปริมาณออกซิเจน ในช่วงเวลากลางคืน เนื่องจากสาหร่ายและพืชน้ำมีการหายใจมีความต้องการใช้ออกซิเจนและปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่สิ่งแวดล้อม แต่ในทางกลับกันในช่วงเวลากลางวันที่มีแหล่งพลังงานจากดวงอาทิตย์เพื่อให้สาหร่ายและพืชน้ำใช้สำหรับการสังเคราะห์แสงและผลิตออกซิเจนออกสู่สิ่งแวดล้อม ทำให้ส่งผลกระทบต่อกระบวนการเปลี่ยนแปลงสภาพกรด่างในน้ำอย่างรวดเร็วช่วงเวลากลางวันและกลางคืน โดยในช่วงเวลากลางคืนคาร์บอนไดออกไซด์จะทำปฏิกิริยาในน้ำทำให้เกิดกรดคาร์บอนิกส่งผลให้แหล่งน้ำมีสภาพความเป็นกรด ส่วนในเวลากลางวันออกซิเจนจะทำปฏิกิริยา ในน้ำทำให้เกิดเป็นไฮดรอกไซด์ไอออนส่งผลให้น้ำมีสภาพความเป็นด่าง [1-6] นอกจากนี้ในช่วงเวลากลางคืนยังส่งผลกระทบต่อความต้องการของออกซิเจนในแหล่งน้ำ

ในส่วนของการกำจัดไนเตรตสามารถทำได้หลายวิธี เช่น กระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification), กระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse osmosis), กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange), ระบบเยื่อกรองเมมเบรน (Membrane technology) และ กระบวนการดูดซับ (Adsorption) ซึ่งกระบวนการดังกล่าวยังมีข้อจำกัด เช่น มีการใช้เวลาในการบำบัดค่อนข้างนานและมีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งระบบค่อนข้างสูง [7-11]

สำหรับกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน (Photocatalytic reduction process) เป็นกระบวนการหนึ่งที่มีศักยภาพในการกำจัดไนเตรตในน้ำเสีย ซึ่งกระบวนการดังกล่าวจำเป็นต้องมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแสงร่วมด้วย ทั้งนี้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ในกระบวนการดังกล่าว ได้แก่ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2), สังกะสีออกไซด์ (ZnO) และทังสเตนไดรอกไซด์ (WO_3) [12-14] ดังนั้น

ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการใช้กระบวนการดังกล่าวในการกำจัดไนเตรตไนโตรเจนโดยมีการใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน (Ag-TiO_2) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวมีคุณสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพดี ไม่ระเหย ราคาไม่แพง และยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ รวมทั้งยังมีความสามารถเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีในกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาวิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาผง Ag-TiO_2
- 1.2.2 หาประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรตไนโตรเจนในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้กระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชันร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาผง Ag-TiO_2 ที่เตรียมขึ้น

1.3 ขอบเขต

- 1.3.1 ศึกษาในถังปฏิกิริยาแบบแบทช์ (Batch Reactor) ที่เป็นระบบแบบปิด
- 1.3.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ คือ ผง Ag-TiO_2
- 1.3.3 น้ำเสียที่ใช้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์
- 1.3.4 แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ คือ หลอดอัลตราไวโอเลตชนิด UVA
- 1.3.5 ปริมาณ NO_3^- -N ในน้ำเสียสังเคราะห์ มีค่าเท่ากับ 10, 25, 50, 75 และ 100 mg.L^{-1} as N

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1.4.1 ทราบขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาผง Ag-TiO_2
- 1.4.2 ทราบถึงประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรตไนโตรเจนในน้ำเสียสังเคราะห์โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชันร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาผง Ag-TiO_2

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไนโตรเจน (Nitrogen) [15]

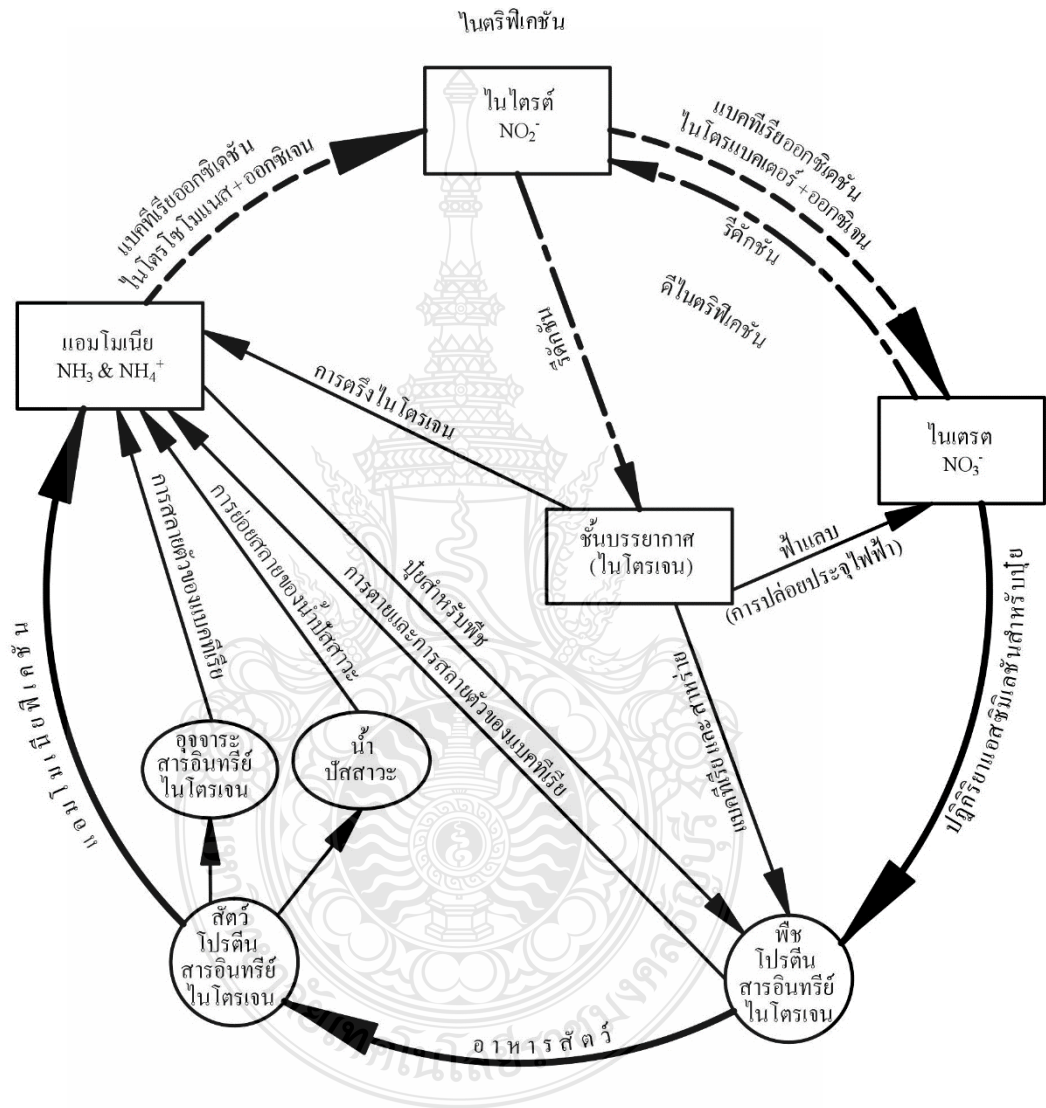
ไนโตรเจนถือเป็นแร่ธาตุสำคัญและจำเป็นสำหรับสิ่งมีชีวิตสัตว์และพืช เนื่องจากเป็นส่วนประกอบหนึ่งของอินทรีย์สารหลายชนิด เช่น เป็นส่วนประกอบของคาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมันบางชนิด ดังนั้นจึงมีความสำคัญต่อระบบนิเวศวิทยาทางแหล่งน้ำมาก ไนโตรเจนมีหลายวาเลนซ์จึงสามารถเกิดสารประกอบได้หลายอย่างในทางธรรมชาติ การเปลี่ยนรูปของสารประกอบไนโตรเจนนี้จะขึ้นอยู่กับสภาวะที่มีออกซิเจนหรือไม่มีออกซิเจน โดยทั่วไปแล้วส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นโดยสิ่งมีชีวิต ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ ได้แก่

1. สารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน (Organic nitrogen compound) คือสารประกอบของไนโตรเจนที่เป็นองค์ประกอบหรือโครงสร้างของสัตว์และพืช ซากเน่าเปื่อย สิ่งขับถ่ายที่มาจากสัตว์ และสารจากย่อยสลายซากของสิ่งมีชีวิตนั้น ได้แก่ ยูเรีย โปรตีน คลอโรฟิลล์ กรดอะมิโน และกรดยูริก เป็นต้น

2. สารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจน (Inorganic nitrogen compound) ได้แก่ แอมโมเนีย (NH_4^+), ไนไตรต์ (NO_2^-), และไนเตรต (NO_3^-) เกิดจากกระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification) เป็นการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนจากสารอินทรีย์เป็นสารอนินทรีย์สาร โดยกลุ่มแบคทีเรียในน้ำและในดินที่มีชื่อเรียกว่า Nitrifying bacteria ภายใต้ออกซิเจน (Aerobic) ซึ่งจะเป็นการเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดินและน้ำ เนื่องจากไนเตรตเป็นสารที่พืชน้ำต้องการ แต่ในทางตรงกันข้ามหากเกิดในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน (Anaerobic) จะเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) โดยแบคทีเรียที่มีชื่อเรียกว่า Denitrifying bacteria ซึ่งจะเป็นการเปลี่ยนรูปของไนเตรตไปเป็นไนไตรต์ ซึ่งอาจมีโอกาสดังกล่าวเกิดเป็นออกไซด์ของไนโตรเจนได้ คือ ไนตรัสออกไซด์ (N_2O) และ ไนตริกออกไซด์ (NO) ซึ่งในบางกรณีอาจจะส่งผลกระทบต่อสุขภาพทำให้สูญเสียไนโตรเจนในดินและในน้ำ [16]

โดยทั่วไปแล้วปริมาณสารประกอบของไนโตรเจนทั้ง 2 ประเภทนี้ จะละลายเจือปนในแหล่งน้ำผิวดินธรรมชาติที่ยังไม่มีการเน่าเสีย เช่น แอมโมเนียละลายอยู่น้อยกว่า 0.5 mg.L^{-1} as N

ส่วนปริมาณไนเตรตมีประมาณ 0.3 mg.L^{-1} as N น้ำใต้ผิวดินส่วนใหญ่จะมีปริมาณไนเตรตอยู่น้อยกว่า น้ำบาดาลหรือน้ำใต้ดิน แต่สำหรับปริมาณไนโตรเจนจะหาค่าไม่ได้เนื่องจากไนโตรเจนมีค่าไม่คงตัว



รูปที่ 2.1 วัฏจักรไนโตรเจน คัดแปลงมาจาก [6]

2.1.1 ผลกระทบของไนเตรต

การสะสมของไนเตรตพบได้แพร่หลายมากขึ้นทั้งในดินและในน้ำ หากในแหล่งน้ำมีปริมาณไนเตรตที่เพิ่มขึ้น และนำน้ำจากแหล่งน้ำนั้นไปทำการบริโภคโดยไม่ผ่านกระบวนการบำบัด ซึ่งจะทำให้เกิดความเป็นพิษต่อมนุษย์ การบริโภคน้ำจากแหล่งน้ำที่มีปริมาณไนเตรตสูง เช่น การดื่มน้ำ หรือการบริโภคเนื้อสัตว์และการบริโภคผักที่มีการเติมสารไนเตรตเพื่อให้เนื้อสัตว์และผักมีความสด อาจเกิดผลกระทบทางสุขภาพ [17]

ไนเตรตเป็นสารปนเปื้อนที่พบแพร่หลายมากในน้ำดื่ม ในการบริโภคน้ำดื่มที่มีปริมาณไนเตรตสูงจะส่งผลทำให้เด็กทารกป่วยเป็นเกี่ยวกับโรคเมธิโมโกลบิน (Methemoglobin) หรือ (Blue baby syndrome) ซึ่งมีเด็กจะมีลักษณะอาการตัวเขียว เนื่องจากไนเตรตไปทำให้ฮีโมโกลบินเป็น เมธิโมโกลบิน ซึ่งทำให้เม็ดเลือดแดงไม่สามารถไปเลี้ยงส่วนต่างๆ ของร่างกายได้ โดยในประเทศไทยได้กำหนด มาตรฐานคุณภาพน้ำทางประเศไทยกำหนดให้น้ำดื่มมีปริมาณไนเตรต (NO_3^-) ไม่ควรเกิน 4.0 mg.L^{-1} as N [18-19]

นอกจากนี้ปริมาณของไนเตรตจะยังส่งผลต่อด้านสุขภาพ แล้วยังจะพบว่าปริมาณของไนเตรตเป็นสาเหตุหลักของปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อม หากในแหล่งน้ำนั้นปริมาณไนเตรตมีค่าสูงจะทำให้กระตุ้นการเกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) ซึ่งอาจทำให้เกิดการเจริญเติบโตของสาหร่าย มีปริมาณเพิ่มมากขึ้นมากกว่าปกติทำให้ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตที่อยู่ในน้ำ ทำให้ในแหล่งน้ำนั้นมีสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจะทำให้ปริมาณออกซิเจนที่อยู่ในแหล่งน้ำลดน้อยลง อีกทั้งยังเป็นผลให้แหล่งน้ำนั้นเกิดการเน่าเสีย

2.1.2 กระบวนการบำบัดไนเตรต

โดยทั่วไปกระบวนการบำบัดไนเตรต มักทำให้เกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification process) เมื่อไนโตรเจนถูกเปลี่ยนรูปของไนเตรตแล้ว จะสามารถถูกลดรูปหรือถูกกำจัดออกจากระบบได้ทั้งสองทาง คือ

1. วิธีแอสสิมิเลชัน โดยวิธีนี้ไนเตรตจะถูกดีไนตริฟายด์และลดรูปไปเป็นแอมโมเนียมด้วยเอนไซม์ ไนเตรรีดักชันเทสหลายชนิด ก่อนที่จะถูกจุลินทรีย์นำไปใช้ในการสังเคราะห์หรือสร้างเซลล์ (เป็นโปรตีนหรือกรดนิวคลอิก) ผ่านกระบวนการที่เรียกว่าแอสสิมิเลชัน ขั้นตอนนี้จึงเรียกว่าดีไนตริฟิเคชันแบบแอสสิมิเลชัน ซึ่งมีสัดส่วนน้อยเมื่อเทียบกับวิธีที่สองหรือวิธีดีไนตริฟิเคชันแบบดิสสิมิเลชัน

2. วิธีดิสสิมิเลชัน โดยกระบวนการดีไนตริฟิเคชันแบบนี้ จุลินทรีย์ดีไนตริฟายเออร์เป็นได้ทั้งแบบ Heterotrophs และ Autotrophs เหมือนกับในขั้นตอนไนตริฟิเคชัน แต่ไม่เหมือนกันที่

ภาวะนี้ต้องเป็นแบบแอนอกซิก (anoxic) คือมีไนเตรตแต่ไม่มีออกซิเจนอิสระ และกลับกันตรงที่ในชั้นตอนนี้ Heterotrophs มีบทบาทมากกว่า Autotrophs อย่างมาก จุลินทรีย์แบบ Heterotrophs นี้ต้องการสารอินทรีย์คาร์บอนเป็นแหล่งคาร์บอนและใช้ไนเตรตเป็นตัวรับอิเล็กตรอน [6]

ในธรรมชาติโดยส่วนมากปฏิกิริยาจะเกิดเป็นแก๊สไนโตรเจนก็ต่อเมื่อมีเอนไซม์ทำการรวมกลุ่มกัน โดยลำดับแรกไนเตรตจะทำการเปลี่ยนรูปที่ละชั้นตอน โดยไนเตรตทำการรับอิเล็กตรอนในแต่ละครั้ง จะทำการเปลี่ยนรูปให้กลายเป็น ไนไตรต์ ไนตริกออกไซด์ ไนตรัสออกไซด์ และชั้นตอนสุดท้ายจะเปลี่ยนรูปไปเป็นแก๊สไนโตรเจน ปฏิกิริยาแสดงชั้นตอนดังนี้ [20]



วิธีการบำบัดไนเตรต ที่สำคัญทั้งหมดมี 3 กระบวนการหลักๆ แบ่งออกได้ดังนี้ [21]

1) กระบวนการบำบัดทางกายภาพ

กระบวนการบำบัดทางกายภาพ ที่พบเห็นโดยส่วนมาก ได้แก่ วิธีการบำบัดแบบ Reverse osmosis และ Electrodialysis เป็นต้น โดยทั่วไปแล้ววิธีการเหล่านี้ใช้กับกระบวนการผลิตน้ำดื่ม วิธีการประเภทนี้จะขึ้นอยู่กับปริมาณไนเตรตที่ไม่มีกระบวนการสลายของไอออนและปริมาณของไนเตรตที่มีการปนเปื้อนในน้ำ ดังนั้นข้อเสียเปรียบของวิธีนี้ คือ จำเป็นต้องมีการสร้างระบบบำบัดอีกชั้นตอนเพิ่มขึ้นเข้าไป เพื่อทำการควบคุมปริมาณไนโตรเจนที่เกิดขึ้นและสามารถกำจัดไนเตรตได้

2) กระบวนการบำบัดทางเคมี

กระบวนการบำบัดทางเคมี โดยส่วนใหญ่แล้วจะเป็นปฏิกิริยารีดอกซ์ สารที่ทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอนแก่สารอื่น (Reducing agent) ที่ทำการถูกนำมาใช้ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา พลังงานที่มีความจำเป็นสำหรับการเกิดปฏิกิริยาเพื่อเกิดการรีดักชันของไนเตรต เช่น พลังงานจากแสง (Photocatalysis) และ พลังงานไฟฟ้าหรือพลังงานความร้อน (Electrocatalysis)

3) กระบวนการบำบัดทางชีวภาพ

กระบวนการบำบัดทางชีวภาพ ที่พบเห็นโดยส่วนใหญ่ คือ กระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่มีความนิยมเป็นอย่างมาก วิธีการนี้เป็นเทคโนโลยีที่ใช้พวกแบคทีเรียเป็นหลัก ความหลากหลายของระบบถึงปฏิกรณ์มีการออกแบบรวมทั้งมีเงื่อนไขของการเดินระบบมีความน่าสนใจ วิธีนี้มีความสามารถใช้น้ำที่มีการปนเปื้อนจากสิ่งปฏิกูลต่างๆ โดยมีจะมีเงื่อนไขว่าเชื้อของแบคทีเรียยังคงเพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยา แต่ในทางตรงกันข้ามข้อเสียเปรียบ

ที่เกิดขึ้นของระบบนี้ คือ ปัญหาตะกอนจมน้ำดำ และปัญหาการลอยตัวของตะกอน ซึ่งจะมีผลต่อการควบคุมระบบ อันเนื่องมาจากการเจริญเติบโตของแบคทีเรียแต่ละชนิดนั้นที่เกิดขึ้นในระบบ

เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวที่กล่าวมาข้างต้น มีค่าใช้จ่ายที่สูง จึงมีการคิดค้นหากระบวนการบำบัดที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดเช่นเดียวกับการบำบัดทั่วไป และมีค่าใช้จ่ายที่น้อยลง ในปัจจุบันมีการนำเสนอกระบวนการบำบัดในเตรตที่มีประสิทธิภาพสูง และมีค่าใช้จ่ายน้อยลงมาบำบัด คือ กระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน เนื่องจากเป็นกระบวนการบำบัดขั้นสูงที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดในเตรต โดยจะทำการเปลี่ยนในเตรตเป็นแก๊สไนโตรเจน

ตารางที่ 2.1 มาตรฐานของไนเตรตในน้ำประเภทต่างๆ

ประเภทของน้ำ	ปริมาณไนเตรต (mg.L ⁻¹ as N)
1. น้ำดื่มในประเทศไทย	1. ควรมีค่าไม่เกิน 4.0
2. คุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดินในประเทศไทย	2. ควรมีค่าไม่เกิน 5.0

2.2 กระบวนการโฟโตคะตะลิติก

กระบวนการโฟโตคะตะลิติก (Photocatalytic process) เป็นกระบวนการเร่งปฏิกิริยาโดยจะทำการฉายแสงไปที่ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และรีดักชันเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว อีกทั้งยังเป็นกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง กระบวนการโฟโตคะตะลิติกสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท เมื่อจำแนกตามสถานะของตัวคะตะลิสต์ ดังนี้ [22]

1. กระบวนการโฟโตคะตะลิติกแบบสถานะต่าง (Heterogeneous photocatalysis) เป็นกระบวนการที่ใช้ตัวคะตะลิสต์ซึ่งมีสถานะต่างกับสารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัด เช่น ของเหลวกับของแข็ง เป็นต้น

2. กระบวนการโฟโตคะตะลิติกแบบสถานะเดียว (Homogeneous photocatalysis) เป็นกระบวนการที่ใช้ตัวคะตะลิสต์ซึ่งมีสถานะเดียวกับสารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัด เช่น ของเหลวกับของเหลว และของแข็งกับของแข็ง เป็นต้น

โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างของตัวกลางที่จะใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาอนุภาคของตัวกลางซึ่งจะสามารถแบ่งออกตามโครงสร้างพลังงานของอิเล็กตรอนได้ 2 แถบพลังงาน คือ แถบคอนดักชัน (Conduction band) จะเป็นแถบพลังงานที่ไม่มีพลังงานของอิเล็กตรอน และ แถบวาเลนซ์ (Valence band)

เป็นแถบพลังงานที่มีพลังงานของอิเล็กตรอนค่อนข้างสูง ซึ่งแถบพลังงานทั้ง 2 ชนิดนี้จะแบ่งแยกออกจากกันโดยจะมีแถบช่องว่างพลังงาน หรือที่เรียกว่า (Band gap) กั้นอยู่

กระบวนการโฟโตคะตะลิติกจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาได้รับพลังงานจากแสงมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับขนาดช่องว่างพลังงาน จะทำการกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี ซึ่งเรียกว่าพลังงานการกระตุ้น และสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.1-2.4

$$E = hv \quad (2.1)$$

$$v = \frac{c}{\lambda} \quad (2.2)$$

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.3)$$

$$\lambda = \frac{hc}{E} \quad (2.4)$$

โดยที่

E	=	พลังงานควอนตัมของโฟตอน (J)
C	=	ความเร็วแสง มีค่า $2.997 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$
V	=	ความถี่ของคลื่นของแสง (hertz)
λ	=	ความยาวคลื่นของแสง (m)
H	=	ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant) มีค่า $6.625 \times 10^{-34} \text{ J-sec}$

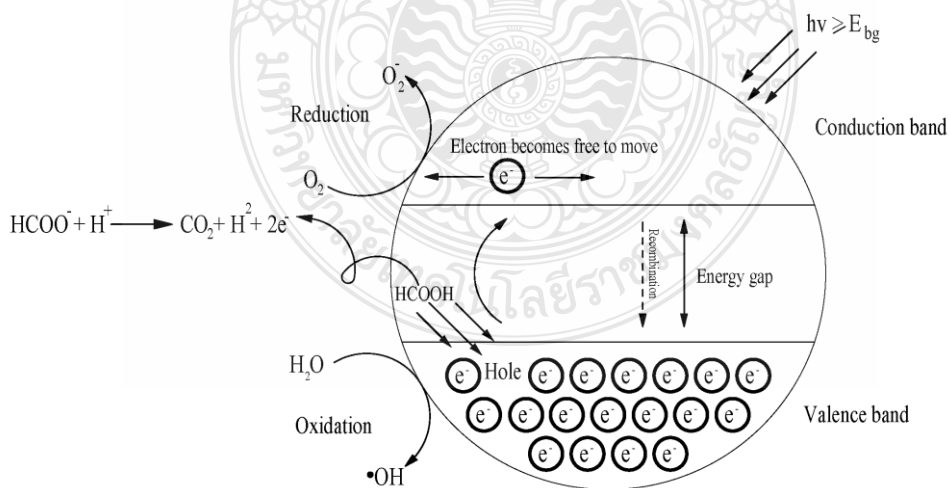
ซึ่งโดยทั่วไปสารตั้งต้นจะถูกดูดซับของตัวเร่งปฏิกิริยา แล้วปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยโมเลกุลที่ถูกดูดซับจะทำการเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนและบางพันธะของโมเลกุลจะค่อยๆ เริ่มสลายไป ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก ซึ่งประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ การฉายแสง (Irradiation process) และกระบวนการดูดซับ (Adsorption process) [23]

1) กระบวนการดูดซับ หมายถึง การที่คอลลอยด์หรือโมเลกุลซึ่ง เรียกว่า ตัวถูกดูดซับที่อยู่ในรูปแก๊สหรือของเหลวจะทำการดึงดูดให้มาจับเกาะหรือแบบติดบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นส่วนนี้เป็นการเคลื่อนย้ายจากแก๊สหรือของเหลวมายังพื้นที่ผิวของของแข็ง เรียกว่า ตัวดูดซับ การเกาะจับของโมเลกุลบนสารอาจเกิดขึ้นด้วยแรงทางเคมี และแรงทางกายภาพ

หรือทั้งสองแรงมารวมกัน ซึ่งในกระบวนการโฟโตคะตะลิติกจะมีการใช้แสงเป็นพลังงานหลักในกระบวนการ

2) การฉายแสง หมายถึง การที่ตัวเร่งปฏิกิริยาหรือสารกึ่งตัวนำได้รับพลังงานจากแสง ซึ่งต้องมีพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับขนาดช่องว่างแถบพลังงาน หรือ Band gap ของสารกึ่งตัวนำนั้นๆ ตกกระทบผิวหน้าอนุภาคสารกึ่งตัวนำ จะทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ในชั้นวาเลนซ์แบนด์ ถูกกระตุ้นให้เคลื่อนที่จากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบคอนดักชัน ทำให้เกิดสถานะขาดแคลนอิเล็กตรอน ที่แถบวาเลนซ์ หรือเกิดช่องว่าง ที่เรียกว่า โฮล (Hole : h_{vb}^+) ส่วนอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นไปยังแถบคอนดักชันแทนด้วยสัญลักษณ์ e_{cb}^- ทำให้เกิดอิเล็กตรอนและ h_{vb}^+ ว่างกระจายอยู่ที่ผิวของสารกึ่งตัวนำซึ่ง h_{vb}^+ และ e_{cb}^- จะกลับมาอยู่ในสถานะเดิมอีกได้ เรียกว่า รีคอมบิเนชัน (Recombination) ซึ่งจะเป็นปัญหาสำคัญของกระบวนการโฟโตออกซิเดชัน และที่ผิวหน้าระหว่างของเหลวและของแข็ง e_{cb}^- จะสามารถเคลื่อนที่ย้ายจากแถบคอนดักชันไปสู่ตัวรับอิเล็กตรอน (Acceptor) ในสารละลาย เรียกว่า รีดักชัน (Reduction) หรือ e_{cb}^- จากผู้ให้ (Donor) ในสารละลายไปสู่ h_{vb}^+ ในแถบวาเลนซ์ เรียกว่า ออกซิเดชัน (Oxidation) ซึ่ง h_{vb}^+ ที่เกิดขึ้นในแถบวาเลนซ์เป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่ดี (Strong oxidizing agent)

กลไกการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ ในกระบวนการโฟโตคะตะลิติก โดยมี Ag-TiO₂ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และใช้กรดฟอร์มิก (Hole scavenger) เป็นสารให้อิเล็กตรอน แสดงดังรูปที่ 2.2



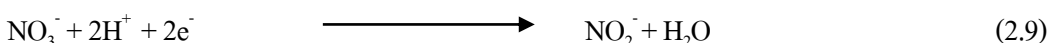
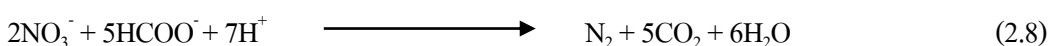
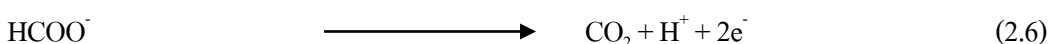
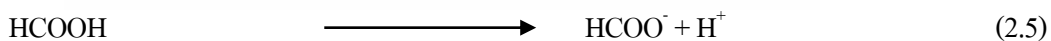
รูปที่ 2.2 กลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก คัดแปลงจาก [24]

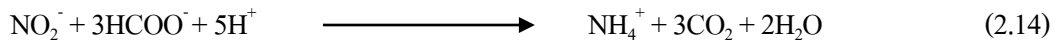
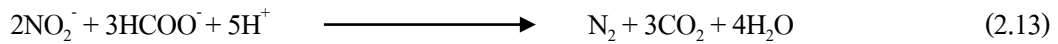
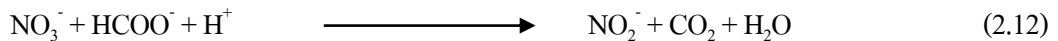
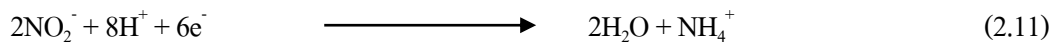
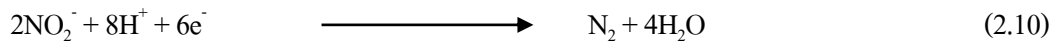
h^+ ที่แถบวาเลนซ์จะสามารถรับอิเล็กตรอนจากสารปนเปื้อนได้โดยตรง (Oxidized) หรือ Hydroxyl ion ทำให้เกิดเป็น Hydroxyl radical และทำให้โมเลกุลของน้ำเปลี่ยนไปเป็น Hydroxyl radical ได้ด้วยเช่นกัน ซึ่ง Hydroxyl radical จะเป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่รุนแรง และมีความไวในการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการ

ในส่วนของ e^- จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (O_2) กลายเป็น Oxide ion radical หรือ Oxide anion และยังสามารถทำปฏิกิริยาต่อไปได้ เป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ซึ่งไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์นั้นก็เป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่รุนแรงเช่นเดียวกัน จะมีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนแล้วทำให้เกิดไปเป็น Hydroxyl radical ได้อีกด้วย [24-25]

2.2.1 กระบวนการโฟโตคะตะไลติกรีดักชันของไนเตรต [26-27]

เมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาได้รับพลังงานจากแสง ทำให้อิเล็กตรอนที่แถบวาเลนซ์ถูกกระตุ้นเคลื่อนที่ไปยังแถบตัวนำ และเกิดเป็นช่องว่างที่เรียกว่า โฮล (Hole) ขึ้นที่แถบวาเลนซ์ ในงานวิจัยนี้ ได้ใช้สารที่ให้อิเล็กตรอนเป็นกรดฟอร์มิก ($HCOOH$) เนื่องจากเป็นสารให้อิเล็กตรอนที่ดีเมื่อทำการเทียบการสารอินทรีย์ตัวอื่นๆ เมื่อกรดฟอร์มิกแตกตัวเป็นฟอร์มेट ($HCOO^-$) ฟอร์มेटจะทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ปฏิกิริยาออกซิเดชัน ดังสมการที่ 2.5-2.6 ส่วนในกรณีของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่จากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบตัวนำจะมีตัวรับอิเล็กตรอน คือ ไนเตรต และเมื่อไนเตรตรับอิเล็กตรอนจะทำการเปลี่ยนรูปเป็นแก๊สไนโตรเจนดังสมการที่ 2.7 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น เรียกว่าปฏิกิริยารีดักชัน เมื่อปฏิกิริยาออกซิเดชัน สมการที่ 2.6 รวมกับปฏิกิริยารีดักชัน สมการที่ 2.7 จะเกิดเป็นปฏิกิริยารีดอกซ์ ดังสมการที่ 2.8 จากสมการที่ 2.8 เมื่อทำการวิเคราะห์ปฏิกิริยาย่อยในระหว่างการเปลี่ยนรูปของไนเตรตเป็นแก๊สไนโตรเจนจะมีการเกิดไนไตรต์ และแอมโมเนีย ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ 2.9 และสมการที่ 2.10 นอกจากนี้กลไกในปฏิกิริยาที่ 2.10 และ 2.6 ไนไตรต์สามารถเปลี่ยนรูปเป็นแอมโมเนีย ได้ดังสมการที่ 2.11 ดังนั้นในแต่ละขั้นตอนของสมการที่ 2.9-2.11 จึงจำเป็นต้องมีการใช้อิเล็กตรอนในการเปลี่ยนรูปไนเตรตไปเป็นไนไตรต์ ไนไตรต์ไปเป็นแก๊สไนโตรเจน และไนไตรต์ไปเป็นแอมโมเนีย ดังนั้นจึงมีการใช้ฟอร์มेटดังสมการที่ 2.12-2.14





องค์ประกอบของปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก คือ

- 1) ตัวคะตะลิสต์ เช่น สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor)
- 2) พลังงานแสง ซึ่งมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับพลังงานโฟตอนของตัวคะตะลิสต์
- 3) น้ำ
- 4) ออกซิเจน หรือ ตัวออกซิแดนท์ (Oxidants) อื่นๆ

2.2.2 ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2

คุณสมบัติของ TiO_2 สารที่ใช้เป็นตัวคะตะลิสต์ในปฏิกิริยา Photocatalysis ได้แก่

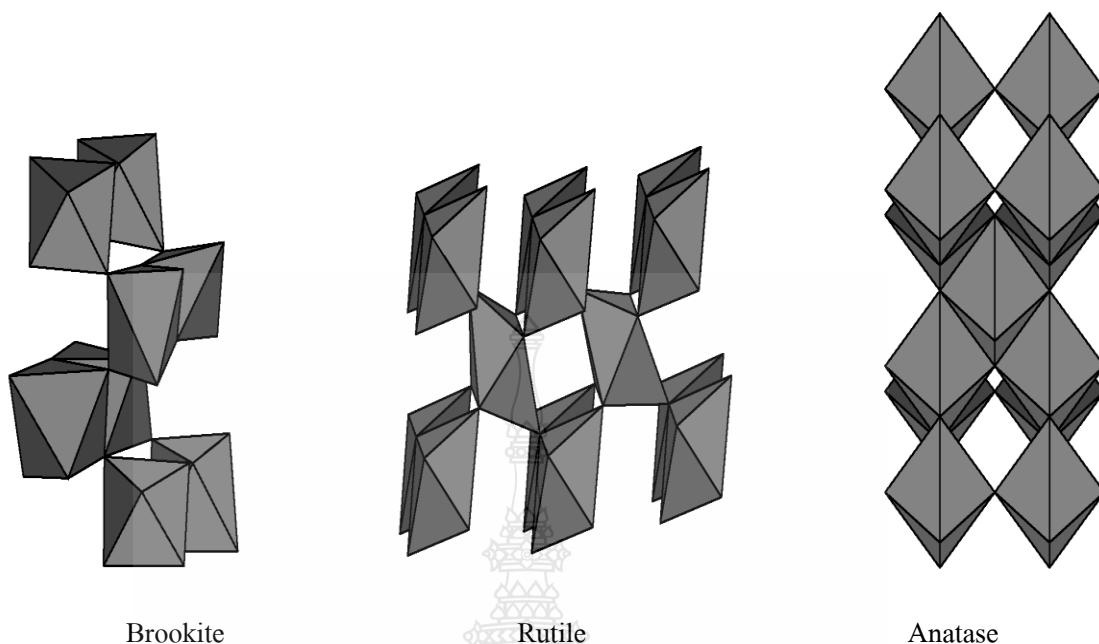
- 1) โลหะตัวนำ (Transition Metal) เช่น โครเมียม, ทองแดงและนิกเกิล เป็นต้น
- 2) สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ สังกะสีออกไซด์

ซัลไฟด์และแคดเมียม เป็นต้น [28]

เนื่องจากในโลหะทรานซิชันเมื่อได้รับพลังงานการกระตุ้นให้อยู่ในสภาวะกระตุ้น (Excited state) จะทำการกลับสู่สภาวะพื้น (Ground state) ได้ง่ายและรวดเร็วกว่าสารกึ่งตัวนำ เพราะในโลหะทรานซิชันไม่มีแถบพลังงานระหว่างระดับชั้น ดังนั้นจึงนิยมใช้สารกึ่งตัวนำเป็นตัวคะตะลิสต์ในกระบวนการโฟโตคะตะลิติก สารกึ่งตัวนำที่นิยมนำมาใช้ ได้แก่ TiO_2 เนื่องจาก TiO_2 นั้นมีราคาไม่แพง ไม่เป็นพิษ มีความสามารถในการละลายต่ำ มีความเสถียรสูง มีความทนต่อการกัดกร่อน และมีความเสถียรสูง

ไทเทเนียม (Ti) เป็นโลหะสีเทา มีมวลอะตอมเท่ากับ 47.90 ซึ่งมีความทนต่อการกัดกร่อนได้สูง ไม่เป็นสารไวไฟ มีเลขออกซิเดชันเท่ากับ +4 +3 และ +2 เป็นต้น แต่สภาพโดยทั่วไปแล้วมีค่าเท่ากับ +4 ไทเทเนียมไดออกไซด์มีลักษณะเป็นผงสีขาว มวลโมเลกุลเท่ากับ 79.90 เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำที่ดีในปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก และมีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ ได้แก่ อนาเทส (Anatase) บรูคไลท์ (Brookite) และรูไทล์ (Rutile) เป็นต้น แสดงดังรูปที่

2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างผลึกของ TiO_2 คัดแปลงมาจาก [29-30]

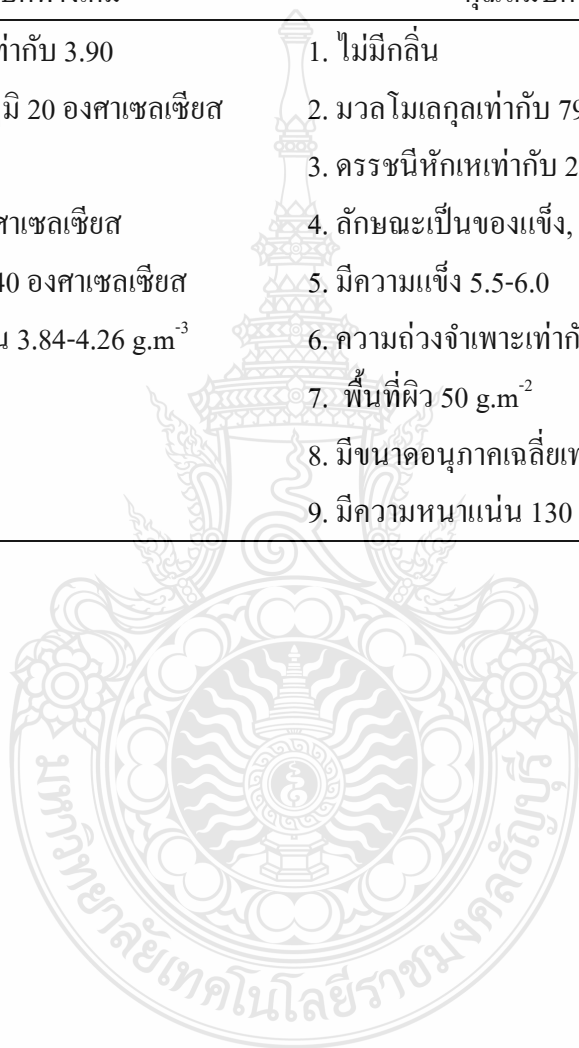
โครงสร้างผลึกที่นิยมนำมาใช้สำหรับกระบวนการการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำ คือ โครงสร้างผลึกของรูไทล์ และของอนาเทส ซึ่งจะมีการจัดเรียงตัวของอะตอม TiO_2 เป็นแบบของ Orthorhombic

TiO_2 มีโครงสร้างผลึกที่ต่างกันไป ทำให้โครงสร้างผลึกแต่ละโครงสร้างมีคุณสมบัติแตกต่างกัน เมื่อพิจารณาทางด้านเทอร์โมไดนามิกส์ พบว่าพลังงานเสรีของกิบส์ของการเกิดที่ภาวะมาตรฐาน สำหรับ TiO_2 ที่มีโครงสร้างแบบรูไทล์ที่มีค่า $-889.50 \text{ kJ.mol}^{-1}$ รวมทั้งค่าความหนาแน่นของ TiO_2 ที่มีโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสมีค่าเท่ากับ 3.89 g.cm^{-3} ในขณะที่ TiO_2 ที่มีโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 4.25 g.cm^{-3} คุณสมบัติที่ต่างกันดังกล่าวจึงทำให้ผลึกโครงสร้างแบบอนาเทสมีความกว้างของแถบพลังงานเท่ากับ 3.23 eV ในขณะที่รูไทล์มีค่าเท่ากับ 3.02 eV จึงทำให้ TiO_2 ที่มีโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาดีกว่า TiO_2 ที่มีโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ และโครงสร้างผลึกแบบบรูคไคท์ การทำให้บริสุทธิ์นั้นสามารถทำได้ค่อนข้างที่จะยาก เนื่องจากส่วนโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์จะทำการรวมตัวใหม่ของอิเล็กตรอนและโฮล ได้ง่ายขึ้น อีกทั้งยังมีความสามารถในการดูดซับต่ำกว่าโครงสร้างผลึกแบบอนาเทส

แต่ในปัจจุบันจึงนิยมใช้โครงสร้างผลึกแบบอนาเทสมากกว่าผลึกรูปแบบอื่น คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของไทเทเนียมไดออกไซด์แสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของ TiO_2 [21,31]

คุณสมบัติทางเคมี	คุณสมบัติทางกายภาพ
1. ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.90	1. ไม่มีกลิ่น
2. พีเอช 7-8 ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส	2. มวลโมเลกุลเท่ากับ 79.90
3. ไม่ละลายน้ำ	3. ครรชนหักเหเท่ากับ 2.52
4. จุดเดือด 2,500 องศาเซลเซียส	4. ลักษณะเป็นของแข็ง, สีขาว
5. จุดหลอมเหลว 1,840 องศาเซลเซียส	5. มีความแข็ง 5.5-6.0
6. มีค่าความหนาแน่น $3.84\text{-}4.26 \text{ g.m}^{-3}$	6. ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 0.70
	7. พื้นที่ผิว 50 g.m^{-2}
	8. มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 20 nm
	9. มีความหนาแน่น 130 g.L^{-1}



ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบคุณสมบัติลักษณะของ TiO₂ ระหว่าง อนาเทส (Anatase) บรูคไคท์ (Brookite) และรูไทล์ (Rutile) [30]

คุณสมบัติ	หน่วย	Anatase	Brookite	Rutile
ดัชนีหักเห	-	2.52	-	2.71
ช่องว่างของพลังงาน	eV	3.20	-	3.03
ความหนาแน่น	g.cm ⁻³	3.894	4.17	4.25
ความแข็ง	Mohs	5.50-6.0	7.0-7.50	6.0-7.0
ลักษณะของผลึก	-	เตตระโกนอล	ออร์โธโรมบิก	เตตระโกนอล
จุดหลอมเหลว	°C	เปลี่ยนเป็นผลึก Rutile @915 °C	-	1,858
พลังงานอิสระกิบส์, ΔG ^o f	Kcal.mole ⁻¹	-211.40	-	-212.60
แฉกคิกคอนสแตนท์, a	Å	3.784	9.184	4.593
แฉกคิกคอนสแตนท์, b	Å	-	5.447	-
แฉกคิกคอนสแตนท์, c	Å	9.515	5.145	2.959

2.2.3 ปัจจัยที่มีผลกระทบในกระบวนการโฟโตคะตะลิสติก

1) ความเข้มของแสง (Light intensity) การเพิ่มความเข้มแสงมากขึ้นจะเป็นการเพิ่มโฟตอนให้มีปริมาณมากขึ้นด้วย ดังนั้นจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยามากขึ้นไปด้วย ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมาสามารถระบุอัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสติกจะขึ้นอยู่กับความเข้มแสงด้วย [32]

2) ปริมาณตัวคะตะลิสต์ (Catalyst dosage) จะทำหน้าที่เป็นสารดูดซับซึ่งจะทำให้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสติกเกิดขึ้นที่ผิวของคะตะลิสต์ ดังนั้นในการเพิ่มปริมาณตัวคะตะลิสต์จะทำให้พื้นที่ผิวของการดูดซับมีปริมาณที่เพิ่มขึ้นด้วย อีกทั้งยังส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสติกเพิ่มขึ้นอีกด้วย

3) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย (Initial substrate concentration) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายที่มีผลโดยตรงต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสติก พบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารตั้งต้นมีปริมาณที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสติกลดลงด้วย แต่ทั้งนี้อาจจะสรุปได้ในหลายๆ เหตุผล คือ ขณะที่มีการเกิดปฏิกิริยาเมื่อความเข้มข้นของสารตั้งต้นเพิ่มขึ้นจะเกิดสารผลิตภัณฑ์กลาง

สำหรับปฏิกิริยา (Intermediate product) มีปริมาณเพิ่มขึ้น ซึ่งสารดังกล่าวจะสามารถยับยั้งการย่อยสลายของสารอินทรีย์ทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นน้อยลง รวมทั้งเมื่อความเข้มข้นมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นความหนาแน่นของสารภายในสารละลายก็จะเพิ่มมากขึ้นไปด้วยส่งผลทำให้การส่องผ่านของแสงไปยังสารละลายไปไม่ถึงจึงทำให้ปฏิกิริยาเกิดลดลงอีกด้วย

4) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ในการศึกษาที่ผ่านมามาพบว่าการลดลงของ pH จะมีผลโดยตรงต่อในปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกเป็นอย่างมาก และสามารถอธิบายสาเหตุนี้ได้ 3 สาเหตุคือ [33]

ก. ความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนที่มีจำนวนเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก

ข. การลดลงของไฮดรอกไซด์ไอออนเนื่องจากการทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเกิดขึ้นเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล

ค. ผลกระทบสุดท้ายของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันแต่เป็นไปได้ยากที่จะสรุปได้ว่าพีเอชมีผลต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกแต่บางสารประกอบมีผลเกิดขึ้นน้อยมาก

5) ออกซิเจนและตัวรับอิเล็กตรอนตัวอื่นๆ จะจับตัวกับอิเล็กตรอนทำให้การกลับมารวมตัวอีกครั้งของอิเล็กตรอนกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรงอีกชนิดหนึ่ง ซุปเปอร์ออกไซด์เรดิคัลนั้นอาจจะทำปฏิกิริยาต่อกับไฮโดรเจนไอออนได้เป็นเปอร์ไฮดรอกซิลเรดิคัลซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์สารอินทรีย์ที่รุนแรงอีกชนิดหนึ่ง โดยทั่วไปแล้วนั้นออกซิเจนจะมีความจำเป็นสำหรับการย่อยสลายสารอินทรีย์เป็นไปได้อย่างสมบูรณ์ และไม่ปรากฏว่าออกซิเจนจะเข้าไปแย่งพื้นที่ของสารอินทรีย์ในการดูดซับบนผิวของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา แต่ถ้าหากในกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ระดับของไนเตรตปริมาณออกซิเจนมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา จะพบว่าหากมีปริมาณออกซิเจนละลายในสารละลายทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาระดับชั้นมีอัตราการลดลงหรืออาจจะไม่มีการเกิดขึ้นของปฏิกิริยา [34]

6) ตัวเร่งปฏิกิริยา จะต้องมีความสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำหรือโลหะตัวนำ ที่สามารถตอบสนองต่อแหล่งกำเนิดแสง ทำให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกในการบำบัดมลพิษชนิดนั้นๆ ได้โดยจะต้องมีพื้นที่เพียงพอ เนื่องจากต้องทำหน้าที่เป็นสารดูดซับมลพิษไว้บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งเป็นอีกหนึ่งในขั้นตอนที่สำคัญก่อนที่จะเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกในการบำบัดมลพิษ

ในขั้นตอนต่อไป ดังนั้นในการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยามากขึ้นจะทำให้มีพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้นด้วย และส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกเพิ่มขึ้นไปอีกด้วย [35]

7) อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) นอกจากสารประกอบอินทรีย์แล้วไอออนของสารบางชนิดอาจถูกดูดซับบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ ในทำนองเดียวกันไอออนเหล่านี้ ก็ถือว่าเป็นตัวยับยั้งปฏิกิริยา ดังนั้น ไอออนเหล่านี้จึงมีอิทธิพลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาและจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก [27]

8) ดัชนีการกัดกร่อน เป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างมากในกระบวนการ โฟโตคะตะลิติก ซึ่งในการเลือกใช้ชนิดของวัสดุที่เหมาะสมจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงความสามารถในการทำงานร่วมกับแสง UV และมลพิษที่ใช้ในการบำบัดเพื่อป้องกันการเกิดสารยับยั้งการเกิดปฏิกิริยา วัสดุที่นิยมแนะนำและนำมาใช้สร้างถึงปฏิกรณ์ในกระบวนการดังกล่าว ได้แก่ สแตนเลสสตีล (Stainless steel) และแก้ว (Glass) เป็นต้น

9) อุณหภูมิก็ถือว่าเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่ง การเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกเมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่มากขึ้น จะทำให้อัตราการทำปฏิกิริยาของ h^+_{vb} และ e^-_{cb} กับสารปนเปื้อนในสารละลายที่มีค่ามากกว่าอัตราการกลับมารวมตัวกันใหม่ของ h^+_{vb} และ e^-_{cb} เนื่องจากความถี่ในการชนกันของโมเลกุลมีจำนวนมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น [36]

2.2.4 จลนพลศาสตร์ของโฟโตคะตะลิติก (Kinetics of photocatalysis) [37]

กระบวนการโฟโตคะตะลิติกมีกลไกในเกิดปฏิกิริยา ในการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์แบ่งออกเป็น 5 วิธี ดังนี้

- 1) การเคลื่อนย้ายมวลของสารประกอบอินทรีย์จากอากาศสู่พื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา
- 2) การดูดซับของสารประกอบอินทรีย์ที่พื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาอัตราการดูดซับของโมเลกุลของสารอินทรีย์บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยานี้สามารถอธิบายได้โดยสมการ Langmuir isotherm แสดงดังสมการที่ 2.15

$$\theta = \frac{K[C]}{1 + K[C]} \quad (2.15)$$

โดยที่

θ = อัตราส่วนสารอินทรีย์ที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ($mg \cdot mg^{-1}$)

K = ค่าคงที่ของการดูดซับ ($L \cdot mg^{-1}$)

$[C]$ = ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่จุดสมดุลของการดูดซับ ($mg \cdot L^{-1}$)

3) การเกิดปฏิกิริยาเคมีเนื่องจากการใช้แสงร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา (Photochemistry) หลังจากการดูดซับของสารอินทรีย์บนพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาแล้ว จะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นเมื่อทำการฉายแสงอัลตราไวโอเลต ถ้าอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันเนื่องมาจากการสลายตัวของสารอินทรีย์ ซึ่งเป็นไปตามปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่ง (First order reaction) จะมีรูปแบบดังนี้

$$r = \frac{dc}{dt} = k_{1st}C \quad (2.16)$$

โดยที่

r = อัตราการย่อยสลายโฟโตคะตะลิติก ($\text{mg.L}^{-1}.\text{min}$)

k_1 = ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่ง (min^{-1})

C = ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่เวลาใดๆ (mg.L^{-1})

อัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก สำหรับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารอินทรีย์ชนิดต่างๆ จะหาได้จากความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายไปแล้วต่อเวลา และสามารถจัดรูปใหม่สมการได้เป็นดังสมการที่ 2.15 โดยเมื่อเขียนกราฟเส้นตรงที่มีความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(C_0/C)$ กับเวลา ซึ่งสามารถหา ค่า k_1 โดยจะสามารถหาได้จากความชันของเส้นกราฟเส้นตรงดังกล่าว

$$\ln\left(\frac{C_0}{C}\right) = k_1 t \quad (2.17)$$

โดยที่

C_0 = ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารอินทรีย์ (mg.L^{-1})

C = ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่เวลาใดๆ (mg.L^{-1})

k_1 = ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่ง (min^{-1})

t = เวลา (min)

เนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกดูดซับอยู่บนตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งเป็นไปตาม Langmuir - Hinshelwood Model (L-H Model) ดังนั้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นไปตามดังสมการดังนี้

$$r = \theta k = \frac{kKC}{1 + KC} \quad (2.18)$$

โดยที่

r = อัตราการเกิดปฏิกิริยา, $\text{mol.L}^{-1}\cdot\text{min}$

k = ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา, min^{-1}

K = ค่าคงที่ของการดูดซับ, $\text{L}\cdot\text{mg}^{-1}$

C = ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่จุดสมดุลของการดูดซับ, mol.L^{-1}

จัดรูปแบบสมการใหม่เป็นดังสมการที่ 2.17 และเมื่อพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/r$ และ $1/C$ จะได้กราฟเส้นตรงโดยที่จุดตัดแกน y คือ $1/k$ และความชันของเส้นกราฟ คือ $1/kK$

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{k} + \frac{1}{kKC} \quad (2.19)$$

จากสมการ 2.16 สามารถจัดรูปได้หลายแบบขึ้นอยู่กับค่า k , K และ C และเมื่อความเข้มข้นของสารอินทรีย์มีค่าต่ำ จนทำให้ $KC \ll 1$ อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเข้าใกล้รูปแบบปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่ง แสดงดังสมการที่ 2.20

$$r = k_1 KC = k_1' C \quad (2.20)$$

ในช่วงเดียวกันเมื่อความเข้มข้นของสารอินทรีย์มากๆ จนทำให้ $KC \gg 1$ จะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเข้าใกล้รูปแบบของปฏิกิริยาลำดับที่ศูนย์ (Zero order reaction) แสดงดังสมการที่ 2.21

$$r = k_0 \quad (2.21)$$

- 4) การเคลื่อนย้ายของมวลในผลิตภัณฑ์จากพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา
- 5) การหลุดออกของผลิตภัณฑ์จากพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา

2.3 คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะลิติก

2.3.1 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวเฉพาะ และปริมาตรของรูพรุนด้วยวิธีการ Brunauer-Emmett-Teller method : BET surface area [38]

การวัดพื้นที่ผิวภายในวัสดุที่มีความพรุนของอนุภาคในหน่วยของพื้นที่ต่อน้ำหนัก ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$) โดยเทคนิคการวิเคราะห์มี 2 วิธี คือวิธีที่หนึ่ง คือ การซึมผ่านด้วยแก๊ส (Gas permeability) โดยใช้วิธี BET surface area ซึ่งจะทำการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาผงโดยใช้อุปกรณ์ Surface area analyzer วิธีที่สอง คือ ทำได้โดยการศึกษาคัดดูดซับของแก๊ส (Gas adsorption) ที่มีขนาดเล็ก ได้แก่ แก๊สอาร์กอน (Ar) และแก๊สไนโตรเจน (N_2) เป็นต้น

โดยทั่วไปแล้วของการตรวจสอบความเหมาะสมและความถูกต้องในการใช้ทฤษฎีของ BET surface area กับสารตัวอย่างสามารถดูได้ที่ตัวบ่งชี้ที่ได้จากการทดสอบ ดังนี้

1. ค่าคงที่ของ C (C – Values) โดยปกติจะอยู่ระหว่าง 50-300 ซึ่งค่าคงที่ C ที่ค่าน้อยกว่า 50 แสดงว่าแก๊สเกิดการดึงดูดกันเองด้วย นอกจากจะไปดูดซับบนพื้นผิวของของแข็ง ตามสมมติฐานเบื้องต้นของทฤษฎีของ BET surface area ส่วนในกรณีที่ค่าคงที่ C มีค่ามากกว่า 300 แสดงว่าการดูดซับของแก๊สบนพื้นผิวของของแข็งเกิดขึ้นได้ดีหรือมีบางจุดบนพื้นผิวที่ดูดซับได้ดีกว่าบริเวณส่วนอื่นๆ
2. ค่า Coefficient of correlation ของเส้นกราฟ อย่างน้อยต้องมีค่าเท่ากับ 0.999
3. ลักษณะของเส้นกราฟที่จะเป็นเป็นเส้นตรง

2.3.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบและปริมาณของสารประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาผง Ag-TiO_2

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ธาตุ โดยสามารถวิเคราะห์ทั้งในเชิงปริมาณ และเชิงคุณภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาผง Ag-TiO_2 ชนิดต่างๆ โดยอาศัยหลักการของรังสีเอ็กซ์ของตัวอย่าง จะทำการยิงรังสีเอ็กซ์เข้าไปในผง Ag-TiO_2 ที่อยู่ในตัวอย่างจะดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ แล้วคายพลังงานออกมา โดยพลังงานที่คาย หรือ Fluorescence ออกมานั้น จะมีค่าพลังงานขึ้นกับชนิดของสารประกอบที่อยู่ในตัวอย่างนั้นๆ ทำให้เราสามารถแยกได้ว่าในตัวอย่างที่ทดสอบนั้นมีสารประกอบใดเป็นองค์ประกอบ โดยใช้ Detector วัดค่าพลังงานที่ออกมา จากการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาผง Ag-TiO_2 ด้วยวิธีการ Composite colloid deposition โดยวิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์ Bruker model S8 tiger [39]

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Mehdi และ คณะ [40] งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพิจารณาประสิทธิภาพของ Ag-doped TiO₂ ที่เตรียมขึ้นด้วยวิธี Photodeposition ภายใต้การฉายแสง UV เพื่อกำจัดไนเตรต จากนั้นนำตัวเร่งปฏิกิริยา (Ag-TiO₂ = 0.1 at %) นำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM-EDX, TEM, XRD, และ BET และใช้ในปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1, 0.4, 0.8, และ 1.2 g.L⁻¹ โดยทำการวิเคราะห์ไนเตรตทั้งหมด 3 ค่า คือ 20, 50 และ 100 mg.L⁻¹ ในช่วง pH 5-9 ผลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ag-TiO₂ ทั้งในที่มืดและด้วยการฉายแสง โดยพบว่าไนเตรตและแอมโมเนียเป็นสารมัธยันต์ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการโฟโตคะตะลิติกในการย่อยสลายของไนเตรตตรวจพบโดยวิธี spectrophotometric นอกจากนี้ยังทำการศึกษาผลกระทบการเปลี่ยนแปลงร้อยละของการเจือเงินลงไปบนผงไทเทเนียมไดออกไซด์ภายใต้การฉายแสง UV เพื่อทำการกำจัดไนเตรต ผลการทดลองพบว่าที่ตัวเร่งปฏิกิริยา Ag-TiO₂ 0.1 at % สามารถกำจัดไนเตรตได้เท่ากับ 95.5% pH เท่ากับ 5 ที่อุณหภูมิ 400 °C และปริมาณเงินที่เหมาะสมในการเจือบนผงไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 1%

ศิวิมล [41] ได้ทำการศึกษาการกำจัดไนเตรตที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 25, 50, 75 และ 100 mg.N.L⁻¹ โดยใช้กระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ระดับน้ำร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1%Ag-TiO₂ ที่ถูกเตรียมขึ้นด้วยวิธี Sol-gel และทำการเคลือบลงบนแผ่นสแตนเลสชนิด 304 โดยนำตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวไปทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ จากผลการทดลองพบว่าผลวิเคราะห์ด้วย XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ มีลักษณะโครงสร้างแบบอนาเทส Band gap ของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์มีค่าเท่ากับ 3.27 eV ภาพถ่าย 2 มิติ และ 3 มิติ ด้วยอุปกรณ์ AFM ขนาดอนุภาคประมาณ 20-150 nm ค่ารากที่สองของความขรุขระเฉลี่ย (rms) มีค่าเท่ากับ 26.68 nm และตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์มีสมบัติไม่ชอบน้ำ เพิ่มขึ้นจากตัวกลางแผ่นสแตนเลสที่ไม่ถูกเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยา โดยประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ระดับน้ำสามารถกำจัดไนเตรตได้ดีที่สุดที่ความเข้มข้นของไนเตรตเริ่มต้น 25 mg.L⁻¹ as N มีประสิทธิภาพเท่ากับ 29.2% ในระยะเวลาที่ 60 min และในผลการทดลองนี้ยังไม่พบสารมัธยันต์คือไนไตรต์และแอมโมเนีย

Krisana และ คณะ [26] งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพของ TiO_2 และ Ag-TiO_2 แบบฟิล์มบาง โดยวิธี Sol-gel และทำการเคลือบลงบนพื้นผิวของแผ่นเหล็กสแตนเลส 304 ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ระดับอินทรีย์ในเตรต โดยนำตัวเร่งปฏิกิริยา Ag-TiO_2 แบบฟิล์มบางที่มีการเจือเงินเป็นสารมลทินมีอัตราส่วนเท่ากับ 0.1% โดยน้ำหนักของเงินต่อปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ จากผลการตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพ ผลการทดสอบ XRD แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างผลึก TiO_2 ลงบน Ag-TiO_2 แบบฟิล์มบาง คือ อนาเทส ผลการวิเคราะห์ Band gaps ของ TiO_2 และ 0.1% Ag-TiO_2 แบบฟิล์มบางมีค่าเท่ากับ 3.27 และ 2.70 eV ตามลำดับ แต่ในขณะที่พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้น ผลการวิเคราะห์ Contact angle ของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำ คือ 94.8° และ 118.5° สำหรับ TiO_2 และ 0.1% Ag-TiO_2 แบบฟิล์มบาง ผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรตด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ระดับอินทรีย์ของ TiO_2 และ Ag-TiO_2 มีค่าเท่ากับ 41.4% และ 70.0% ตามลำดับ ในการเจือเงินลงไปมีผลต่อประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา แต่ไม่มีผลต่อปริมาณมวลสารสัมพันธระหว่างปริมาณฟอร์เมตที่ใช้ไปกับปริมาณไนเตรตที่หายไป อัตราส่วนมวลสารสัมพันธสุทธิของปริมาณฟอร์เมตที่ใช้ต่อปริมาณไนเตรตที่กำจัดได้ของทุกการทดลองคือ 2.8 ต่อ 1.0 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าตามทฤษฎี คือ 2.5 ต่อ 1.0

ธนิตกานต์ [42] ทำการศึกษากระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ระดับอินทรีย์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบฟิล์มบาง ที่เพิ่มประสิทธิภาพด้วยการเจือเงินที่เตรียมขึ้นด้วยวิธีโซล-เจล และเคลือบลงบนแผ่นแก้ว ตัวเร่งปฏิกิริยามีอัตราส่วนของเงินกับไทเทเนียมไดออกไซด์คือ 0.1% โดยมวล และนำไปตรวจวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพพบว่า TiO_2 ที่เตรียมได้มีรูปแบบผลึกอนาเทส และมี Band gap เท่ากับ 3.27 eV มีลักษณะพื้นผิวแบบไม่ชอบน้ำมากขึ้น หลังเคลือบ การประยุกต์ใช้ในกระบวนการโฟโตรีดักชันของไนเตรตและไนไตรต์ที่ระดับความเข้มข้นเริ่มต้น 25, 50, 75 และ 100 mg.L^{-1} as N โดยจากผลการทดลองในถังปฏิกิริยาแบบแท่งที่มีแผ่นแก้วที่ถูกเคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแบบฟิล์มบางเป็นโบริกอน ใช้แหล่งกำเนิดแสงจากหลอด UV black-light และใช้กรดฟอร์มิค (Hole scavenger) ซึ่งมีประสิทธิภาพของการใช้กระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ระดับอินทรีย์ในการกำจัดไนเตรตและไนไตรต์ ในการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรตมีประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ 14.52% ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นไนเตรต 100 mg.L^{-1} as N ที่ระยะเวลา 60 นาที และไนไตรต์มีประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ 65.69% ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นไนเตรต 50 mg.L^{-1} as N ในระยะเวลาที่ 60 นาที

กฤษณะ [21] งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการกำจัดในเตรตด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีการเจือเหล็ก (Fe) และเงิน (Ag) เป็นสารมลทินลงบนแผ่นสแตนเลส ด้วยวิธี Sol-gel โดยทำการเจือ Fe และ Ag ในอัตราส่วน 0.1% โดยน้ำหนักของโลหะต่อ TiO_2 จากนั้นนำตัวเร่งปฏิกิริยาไปทำการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ พบว่า ผลการทดสอบ XRD มีลักษณะผลึกของ TiO_2 เป็นแบบอนาเทส รวมทั้งวิเคราะห์ลักษณะพื้นที่ผิวไม่ชอบน้ำ ซึ่งผลการวิเคราะห์พบว่า มีคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ในการทดลอง สำหรับการศึกษาระสิทธิภาพในการกำจัดในเตรตของปฏิกิริยาในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์ โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงหลอด UV black-light และใช้กรดฟอร์มิก (Hole scavenger) เป็นสารให้อิเล็กตรอน ผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดในเตรตด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 , Fe- TiO_2 , Ag- TiO_2 มีค่าเท่ากับ 41.4%, 66.0% และ 70.0% ตามลำดับ ที่ระยะเวลา 360 นาที

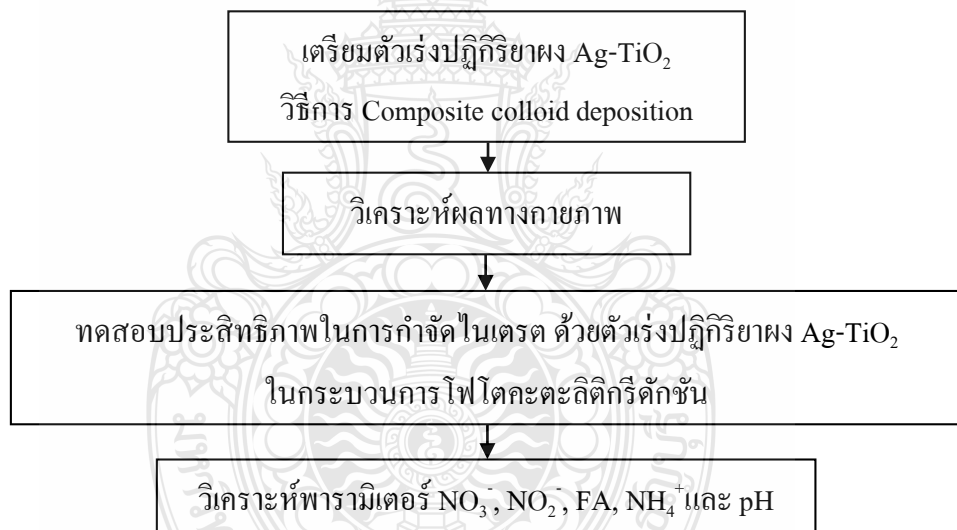


บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ในการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้กระบวนการโฟโตคะตะลิติกส์ขั้นต้นมีขั้นตอนการดำเนินการขั้นแรกคือการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาผง Ag-TiO₂ ด้วยวิธีการ Composite colloid deposition ภายใต้สภาวะกรดและอุณหภูมิต่ำ จากนั้นทำการทดสอบข้อมูลทางกายภาพและศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรตด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกส์ขั้นต้น หลังจากนั้นนำผลการทดลองที่ได้มาทำการวิเคราะห์ผล แสดงดังรูปที่ 3.1

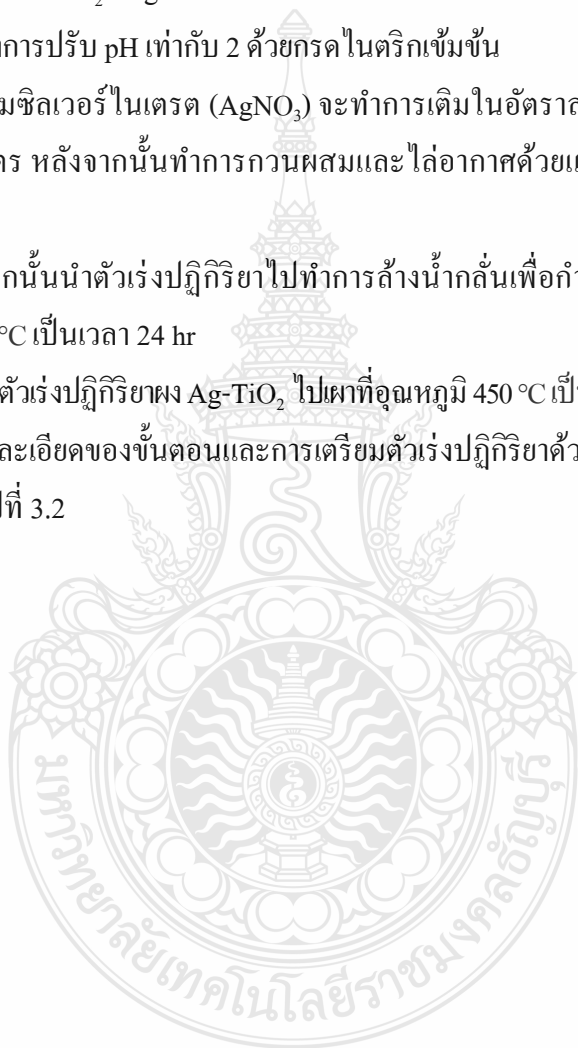


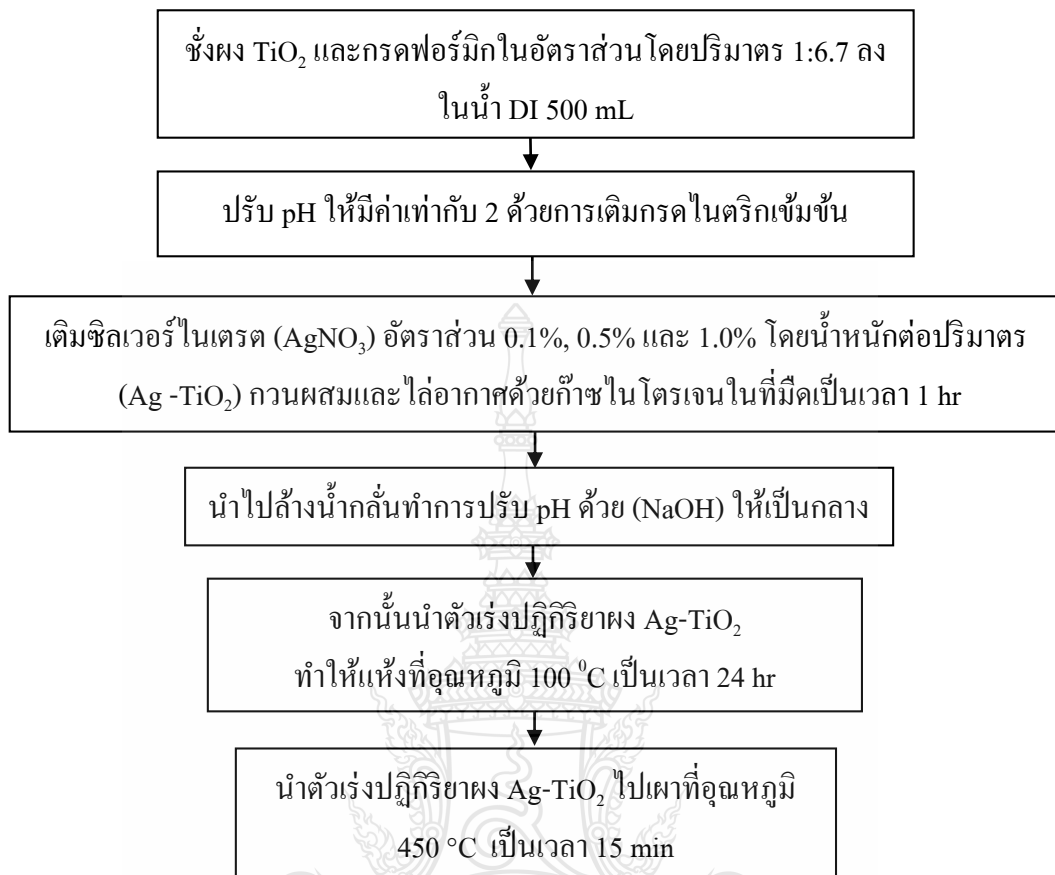
รูปที่ 3.1 การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้กระบวนการโฟโตคะตะลิติกส์ขั้นต้น

3.1.1 การเตรียมสารละลายตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์เงิน แบบวิธี

Composite colloid deposition

- 1) เติมน้ำกลั่นปราศจากไอออน (Deionized water, DI) ปริมาณ 500 mL ในขวดเก็บสารขนาด 1,000 mL ทำการไล่อากาศด้วยก๊าซไนโตรเจนเป็นเวลา 15 min
 - 2) จากนั้นทำการเติมสารละลายกรดฟอร์มิก (Formic acid) ปริมาณ 80 mL
 - 3) เติมหง TiO_2 12 g ลงในสารละลายที่เตรียมไว้
 - 4) ทำการปรับ pH เท่ากับ 2 ด้วยกรดไนตริกเข้มข้น
 - 5) เติมหิลเวอร์ไนเตรต (AgNO_3) จะทำการเติมในอัตราส่วน 0.1%, 0.5% และ 1.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร หลังจากนั้นทำการกวนผสมและไล่อากาศด้วยแก๊สไนโตรเจนในที่มืดเป็นเวลา 1 hr
 - 6) จากนั้นนำตัวเร่งปฏิกิริยาไปทำการล้างน้ำกลั่นเพื่อกำจัดสารส่วนเกินและนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 24 hr
 - 7) นำตัวเร่งปฏิกิริยาผง Ag-TiO_2 ไปเผาที่อุณหภูมิ 450°C เป็นเวลา 15 min
- สำหรับรายละเอียดของขั้นตอนและการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการ Composite colloid deposition แสดงดังรูปที่ 3.2





รูปที่ 3.2 วิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Ag-TiO₂ ด้วยวิธีการ Composite colloid deposition

3.1.2 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา Ag-TiO₂

1) การวิเคราะห์องค์ประกอบและปริมาณของสารประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา Ag-TiO₂ เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สารประกอบ ของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1%Ag-TiO₂, 0.5%Ag-TiO₂ และ 1.0%Ag-TiO₂ ชนิดต่างๆ จากการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Ag-TiO₂ ด้วยวิธีการ Composite colloid deposition โดยอุปกรณ์ Bruker model S8 tiger

2) การวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา Ag-TiO₂

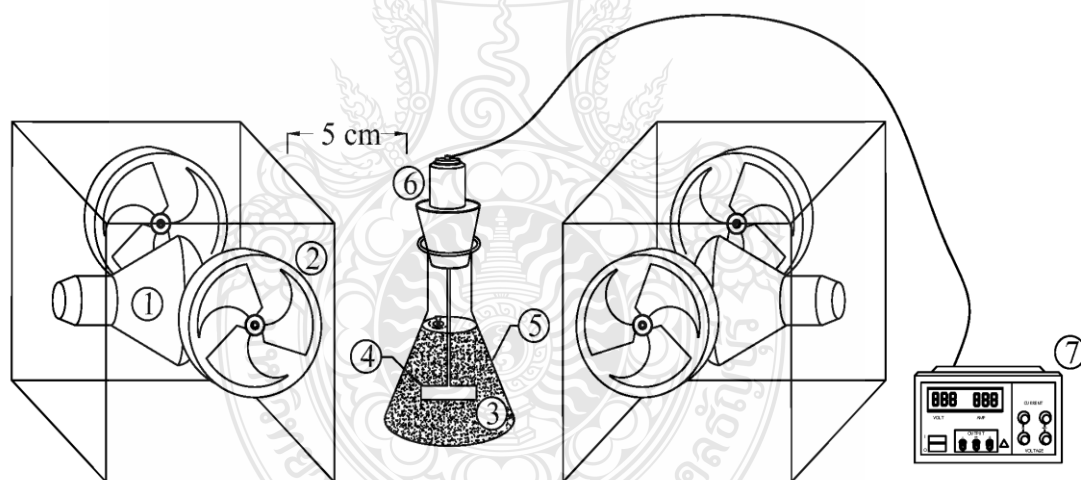
การวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ และปริมาตรรูพรุนในตัวเร่งปฏิกิริยา Ag-TiO₂ ที่ใช้ วิธีการ Composite colloid deposition โดยทำการนำไปวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิวด้วยเครื่อง Autosorb IQC-Brunauer Emmett and Teller (BET)

ตารางที่ 3.1 การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา Ag-TiO₂

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์	อุปกรณ์
องค์ประกอบและปริมาณของสารประกอบ	X-ray Fluorescence Spectroscopy (XRF)	Bruker model S8 tiger
พื้นที่ผิวเฉพาะ และปริมาตรรูพรุน	Brunauer Emmett and Teller (BET)	Autosorb IQC-(BET)

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 ชุดทดลอง Photoreactor สำหรับศึกษาการกำจัดไนเตรตในโตรเจนด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน แสดงดังรูปที่ 3.3



1. แหล่งกำเนิดแสง
2. พัดลมระบายความร้อน
3. ตัวเร่งปฏิกิริยา Ag-TiO₂
4. ไบอแกน
5. ขวดรูปชมพู่ขนาด 100 mL
6. มอเตอร์
7. แหล่งจ่ายไฟ

รูปที่ 3.3 ถังปฏิกรณ์ สำหรับกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน

3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 1) เครื่องชั่งสารเคมี
- 2) ถ้วยกระเบื้อง
- 3) บีกเกอร์ขนาด 50 mL และ 1,000 mL
- 4) ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask) ขนาด 100 mL
- 5) ปิเปตอัตโนมัติ
- 6) กระจกตวงขนาด 100 mL, 500 mL และ 1,000 mL
- 7) ตู้อบลมร้อนควบคุมอุณหภูมิที่ 105 °C
- 8) เตาเผาอุณหภูมิสูง
- 9) เครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic stirrer)
- 10) ตู้ดูดความชื้น
- 11) เครื่องชั่งน้ำหนัก ทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- 12) นาฬิกาจับเวลา
- 13) หลอดอัลตราไวโอเลตชนิด UVA
- 14) เครื่องวิเคราะห์ไอออน ยี่ห้อ Metrohm รุ่น 882 compact IC plus

3.2.3 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 1) ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ TiO_2 Nanopowder (anatase 99+% ขนาดผง 10-25 nm ผลิตโดยบริษัท US Research Nanomaterials, Inc
- 2) กรดฟอร์มิก Formic acid: (FA) 98% ผลิตโดยบริษัท VWR chemicals prolabo.
- 3) กรดไนตริก ความเข้มข้น 65% AR Grade ผลิตโดยบริษัท QREC Chemical CO., Ltd.
- 4) แก๊สไนโตรเจน N_2 99.99%
- 5) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ผลิตโดยบริษัท European Distribution Center, Belgium
- 6) โพแทสเซียมไนเตรต (KNO_3) ผลิตโดยบริษัท Ajax Finechem.
- 7) ซิลเวอร์ไนเตรต (AgNO_3) ผลิตโดยบริษัท Avantor Performance Materials Poland S.A.

3.2.4 การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรต ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้กระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชันร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาผง Ag-TiO₂

1) เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น เท่ากับ 10, 25, 50, 75 และ 100 mg.L⁻¹ as N

2) ทำการชั่ง ผง Ag-TiO₂ ปริมาณ 1 g ในขวดรูปชมพู่ปริมาณ 100 mL

3) เติมน้ำเสียสังเคราะห์ในข้อที่ 1) ในปริมาณ 100 mL ลงในขวดรูปชมพู่ที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาผง Ag-TiO₂ ที่เตรียมขึ้น

4) ใช้แผ่น Parafilm ปิดครอบฝาขวด

5) สำหรับชุดทดลองทำการทดลองขวดรูปชมพู่ไปวางระหว่างแหล่งกำเนิดแสง แล้วเก็บตัวอย่างที่เวลา 0, 15, 30, 45, 60, 90, 120 และ 180 min เพื่อศึกษาการลดลงของไนเตรตและศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรต โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.1

$$NO_3^- = \frac{[NO_3^-]_0 - [NO_3^-]_t}{[NO_3^-]_0} \times 100\% \quad (3.1)$$

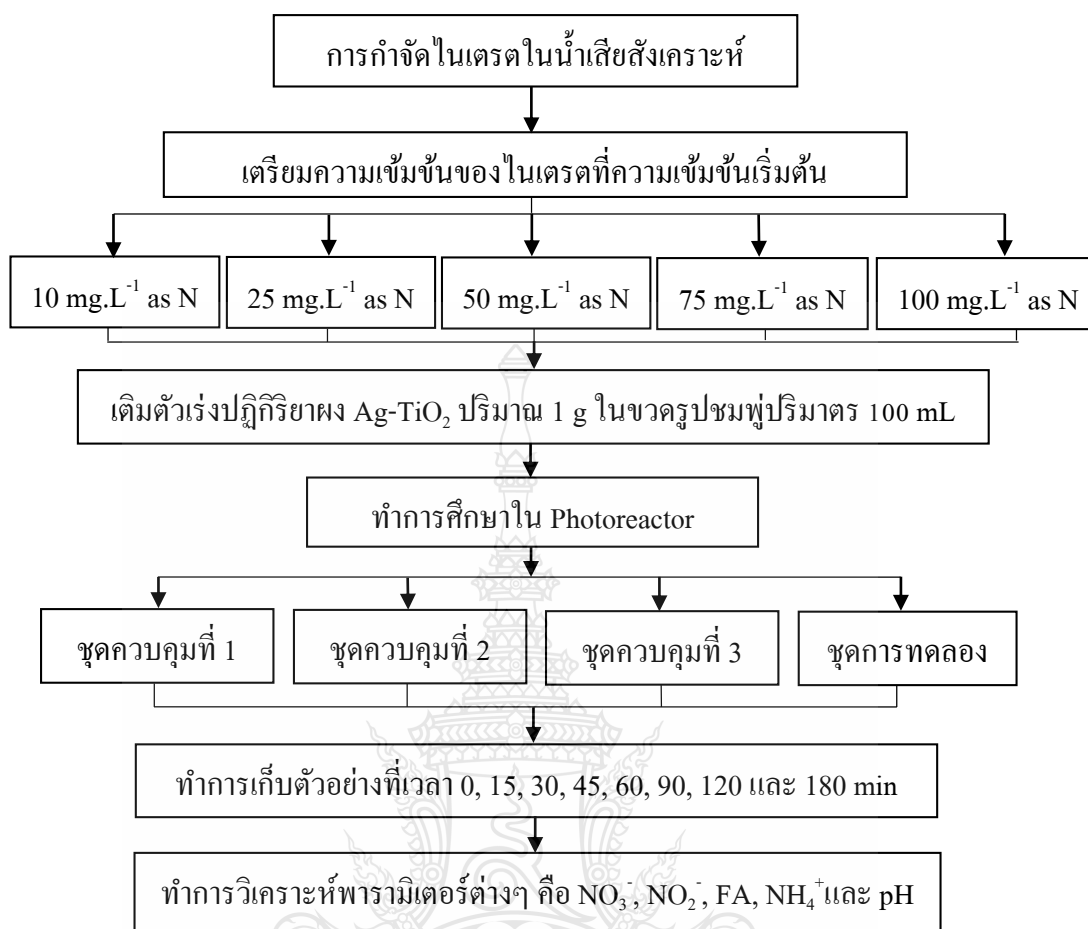
โดยที่

[NO₃⁻]₀ = ความเข้มข้นของ NO₃⁻ ที่เวลาเริ่มต้น (mg.L⁻¹ as N)

[NO₃⁻]_t = ความเข้มข้นของ NO₃⁻ ที่เวลาใด (mg.L⁻¹ as N)

6) สำหรับชุดควบคุมที่ 1, 2 และ 3 ทำการทดลองซ้ำจากข้อที่ 1) ถึง 6) โดยชุดควบคุมที่ 1 ทำการทดลองในสถานะที่มีการเติมฟอร์มิคมีแหล่งกำเนิดแสง แต่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา ชุดควบคุมที่ 2 ทำการทดลองในสถานะที่มีการเติมกรดฟอร์มิค และมีตัวเร่งปฏิกิริยา แต่ไม่มีแหล่งกำเนิดแสง ชุดควบคุมที่ 3 ทำการทดลองในสถานะที่ไม่มีฟอร์มิคแต่มีแหล่งกำเนิดแสง และมีตัวเร่งปฏิกิริยา

สำหรับรายละเอียดของขั้นตอนการดำเนินการทดลองกำจัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน แสดงดังรูป 3.4



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนในการกำจัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน

ตารางที่ 3.2 ชุดทดลองสำหรับการศึกษาการกำจัดไนเตรตด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชันร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาผง Ag-TiO₂

ชุดควบคุม	แหล่งกำเนิดแสง	ตัวเร่งปฏิกิริยา	กรดฟอร์มิก
ชุดควบคุมที่ 1	✓	-	✓
ชุดควบคุมที่ 2	-	✓	✓
ชุดควบคุมที่ 3	✓	✓	-
ชุดการทดลอง	✓	✓	✓

3.3 การเปลี่ยนรูปของไนเตรตในปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน

สำหรับการศึกษาการเปลี่ยนรูปของไนเตรตทำได้โดยการติดตามการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไนเตรตที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นไนโตรเจนรูปต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน ได้แก่ ไนไตรต์ แอมโมเนียและแก๊สไนโตรเจนสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.2-3.4

$$S_{NO_2} = \frac{[NO_2^-]_t}{[NO_3^-]_0 - [NO_3^-]_t} \times 100 \quad (3.2)$$

$$S_{NH_4^+} = \frac{[NO_4^+]_t}{[NO_3^-]_0 - [NO_3^-]_t} \times 100 \quad (3.3)$$

$$S_{N_2} = \frac{[NO_3^-]_0 - [NO_3^-]_t - [NO_2^-]_t - [NH_4^+]_t}{[NO_3^-]_0 - [NO_3^-]_t} \times 100 \quad (3.4)$$

โดยที่

- S_{NO_2} = การเปลี่ยนรูปของ NO_3^- ไปเป็น NO_2^- (%)
- $S_{NH_4^+}$ = การเปลี่ยนรูปของ NO_3^- ไปเป็น NH_4^+ (%)
- S_{N_2} = การเปลี่ยนรูปของ NO_3^- ไปเป็น N_2 (%)
- $[NO_3^-]_0$ = ความเข้มข้นของ NO_3^- ที่เวลาเริ่มต้น ($mg.L^{-1}$ as N)
- $[NO_2^-]_0$ = ความเข้มข้นของ NO_2^- ที่เวลาเริ่มต้น ($mg.L^{-1}$ as N)
- $[NH_4^+]_0$ = ความเข้มข้นของ NH_4^+ ที่เวลาเริ่มต้น ($mg.L^{-1}$ as N)
- $[NO_3^-]_t$ = ความเข้มข้นของ NO_3^- ที่เวลาใดๆ ($mg.L^{-1}$ as N)
- $[NO_2^-]_t$ = ความเข้มข้นของ NO_2^- ที่เวลาใดๆ ($mg.L^{-1}$ as N)
- $[NH_4^+]_t$ = ความเข้มข้นของ NH_4^+ ที่เวลาใดๆ ($mg.L^{-1}$ as N)

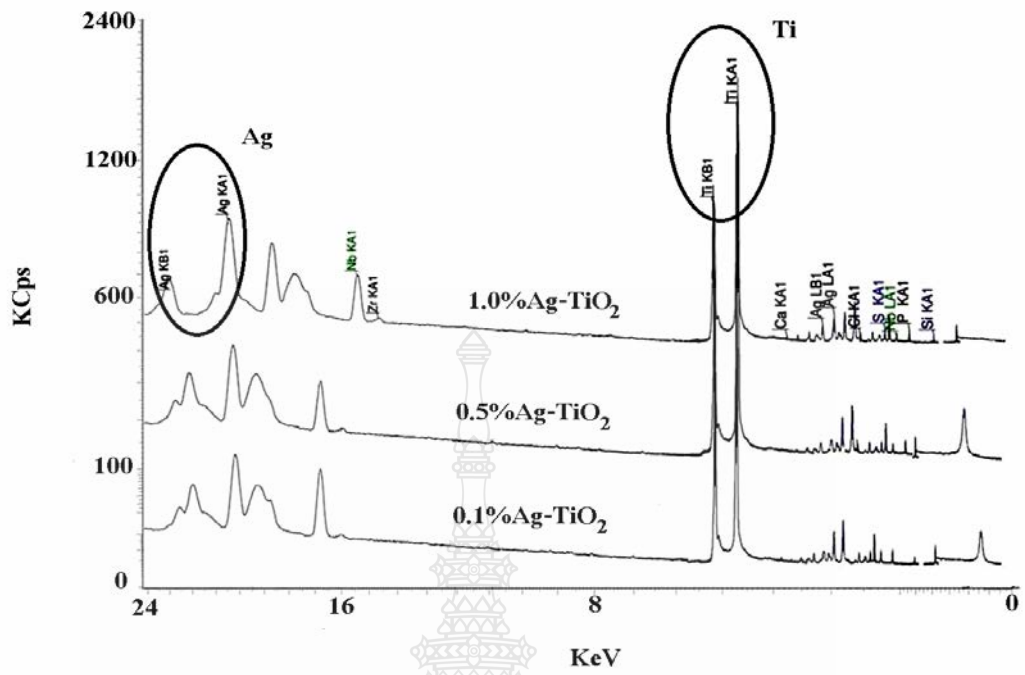
บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

งานวิจัยนี้เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรตในโตรเจน (NO_3^- -N) ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ระดับเข้มข้นร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาผง Ag-TiO_2 โดยการใช้การเจือเงินในปริมาณที่แตกต่างกัน 3 ค่า ได้แก่ 0.1%, 0.5% และ 1.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร รวมทั้งศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้น และศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรตในโตรเจน ซึ่งผลการทดลองมีรายละเอียดดังนี้

4.1 ลักษณะคุณสมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาผง Ag-TiO_2

4.1.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบและปริมาณสารประกอบต่างๆ ของตัวเร่งปฏิกิริยาผง Ag-TiO_2 เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบและปริมาณสารประกอบต่างๆ ของตัวเร่งปฏิกิริยาผง 0.1% Ag-TiO_2 , 0.5% Ag-TiO_2 และ 1.0% Ag-TiO_2 ชนิดต่างๆ จากการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาผง Ag-TiO_2 ด้วยวิธีการ Composite colloid deposition ที่เตรียมขึ้น โดยใช้อุปกรณ์ Bruker model S8 tiger ผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.1 และปริมาณองค์ประกอบสารประกอบต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ผลวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาของ Ag-TiO₂ ด้วยอุปกรณ์ Bruker model S8 tiger



ตารางที่ 4.1 ปริมาณองค์ประกอบของสารประกอบต่างๆ

ตัวเร่งปฏิกิริยา	ชนิดของสารประกอบ	ปริมาณโดยน้ำหนัก (%)
0.1%Ag-TiO ₂	Titanium dioxide (TiO ₂)	98.700%
	Silver (Ag)	0.098 %
	Sodium Oxide (Na ₂ O)	0.857 %
	Phosphorus Pentoxide (P ₂ O ₅)	0.153 %
	Niobium Pentoxide (Nb ₂ O ₅)	0.112 %
	สารประกอบอื่นๆ	0.080 %
0.5%Ag-TiO ₂	Titanium Dioxide (TiO ₂)	97.000 %
	Silver (Ag)	0.480 %
	Sodium Oxide (Na ₂ O)	2.065 %
	Phosphorus Pentoxide (P ₂ O ₅)	0.155 %
	Niobium Pentoxide (Nb ₂ O ₅)	0.182 %
	สารประกอบอื่นๆ	0.118 %
1.0%Ag-TiO ₂	Titanium Dioxide (TiO ₂)	95.300 %
	Silver (Ag)	0.988 %
	Sodium Oxide (Na ₂ O)	3.330 %
	Phosphorus Pentoxide (P ₂ O ₅)	0.160 %
	Niobium Pentoxide (Nb ₂ O ₅)	0.112 %
	สารประกอบอื่นๆ	0.110%

จากรูปที่ 4.1 และตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ag-TiO₂ ในปริมาณที่ต่างกัน ได้แก่ 0.1%, 0.5% และ 1.0% แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบของสารประกอบและธาตุในตัวเร่งปฏิกิริยา Ag-TiO₂, 0.5%Ag-TiO₂ และ 1.0% Ag-TiO₂ พบสารประกอบ TiO₂ เป็นองค์ประกอบหลักในปริมาณโดยน้ำหนัก เท่ากับ 98.700 %, 97.000% และ 95.300 % ตามลำดับ ทั้งนี้เมื่อพิจารณาธาตุ Ag ที่มีการเจือลงไปในตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂ ในปริมาณ โดยน้ำหนักด้วยอุปกรณ์ Bruker model S8 tiger แสดงให้เห็นว่าผลจากการเจือ Ag ลงไปในตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าว พบปริมาณ Ag มีปริมาณที่ใกล้เคียงกับปริมาณ

Ag ที่เจือลงไปโดยมีค่าโดยน้ำหนัก เท่ากับ 0.098 %, 0.480 % และ 0.988 % สำหรับ ตัวเร่งปฏิกิริยาผง 0.1%Ag-TiO₂, 0.5%Ag-TiO₂ และ 1.0% Ag-TiO₂ ตามลำดับ

4.1.2 การวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิวเฉพาะและปริมาตรรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาผง Ag-TiO₂ ที่เตรียมขึ้นด้วยอุปกรณ์ BET Surface

จากการวิเคราะห์พื้นที่ผิวเฉพาะ และปริมาตรรูพรุนของผง Ag-TiO₂ ปริมาณที่แตกต่างกัน ได้แก่ 0.1%, 0.5% และ 1.0% ที่เตรียมขึ้น โดยใช้ อุปกรณ์ Autosorb IQC-(BET) ผลการวิเคราะห์ ในพารามิเตอร์ดังกล่าวสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.2 โดยแสดงให้เห็นถึงพื้นที่ผิวเฉพาะ และปริมาตรรูพรุน ของตัวเร่งปฏิกิริยาผง Ag-TiO₂ ที่เตรียมขึ้นดังกล่าว โดยอาศัยเทคนิคการแทนที่พื้นที่ผิวของรูพรุนด้วย แก๊สไนโตรเจนในการวิเคราะห์

ตารางที่ 4.2 ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาผง Ag-TiO₂

ตัวเร่งปฏิกิริยา	พื้นที่ผิวเฉพาะ (m ² .g ⁻¹)	ปริมาตรรูพรุน (m ³ .g ⁻¹)
0.1%Ag-TiO ₂	2.716 × 10 ²	5.079 × 10 ⁻⁷
0.5%Ag-TiO ₂	1.276 × 10 ²	3.572 × 10 ⁻⁷
1.0%Ag-TiO ₂	1.120 × 10 ²	2.745 × 10 ⁻⁷

ผลจากการวิเคราะห์พื้นที่ผิวเฉพาะ และปริมาตรรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาผง Ag-TiO₂ ที่เตรียมขึ้นด้วยอุปกรณ์ BET Surface โดยมีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1%Ag-TiO₂, 0.5%Ag-TiO₂ และ 1.0%Ag-TiO₂ พบว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณ Ag ที่มีการเจือลงไปในตัวเร่งปฏิกิริยาผง TiO₂ ทำให้พื้นที่ผิวเฉพาะและปริมาตรรูพรุนมีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัย [40],[43] ที่มีการเติม Ag เป็นสารเจือปนเพิ่มขึ้นทำให้พื้นที่ผิวเฉพาะและปริมาตรรูพรุนลดลง นอกจากนี้ผลงานวิจัยที่ผ่านมายังพบว่า การเติมสารเจือปนอื่นๆ ส่งผลให้พื้นที่ผิวเฉพาะลดลงได้ เช่นเดียวกัน [44-45]

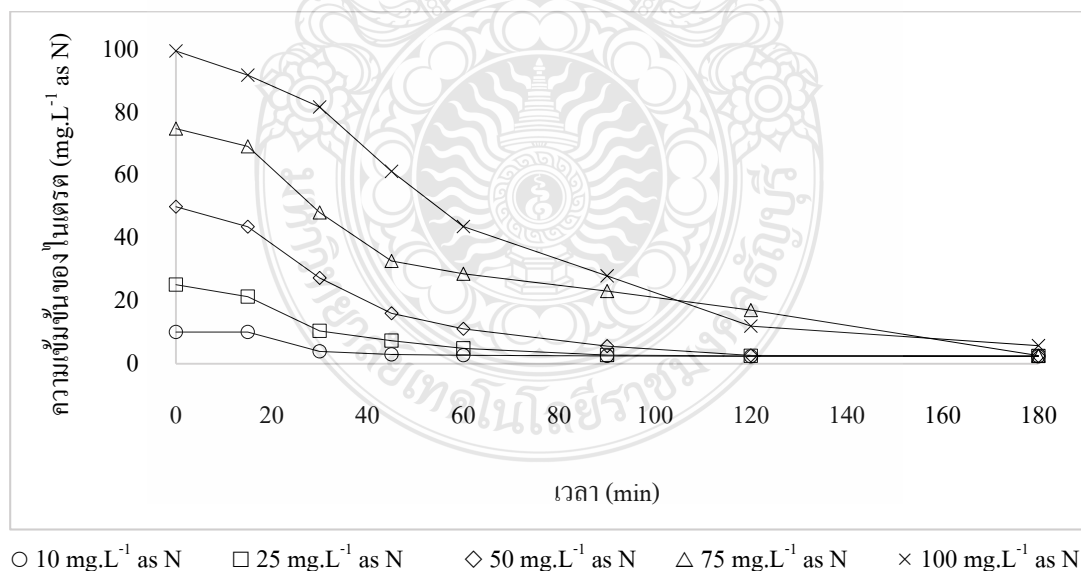
4.2 การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรตในโตรเจนด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน ในชุดควบคุม

สำหรับการทดลองในชุดควบคุมที่ 1-3 ในสภาวะทดลองดังตารางที่ 3.2 จากผลการทดลองพบว่า ในทุกกรณีที่ไม่มีแหล่งกำเนิดแสง กรดฟอร์มิก และตัวเร่งปฏิกิริยาอย่างใดอย่างหนึ่ง จะทำให้ไม่เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน

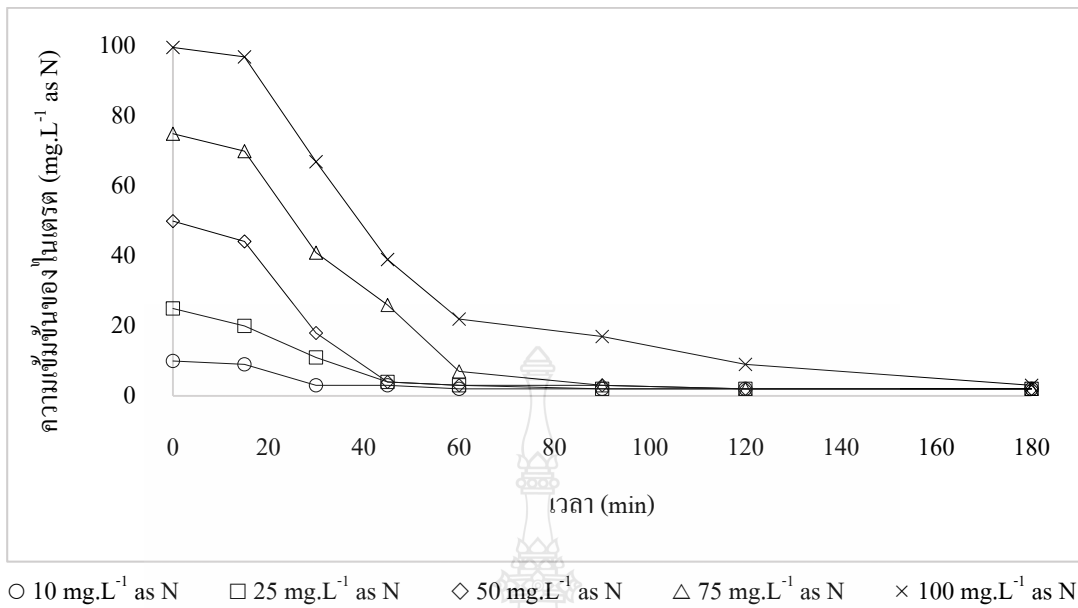
4.3 การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรตในโตรเจนด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผง Ag-TiO₂

4.3.1 การติดตามการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไนเตรตโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผง Ag-TiO₂

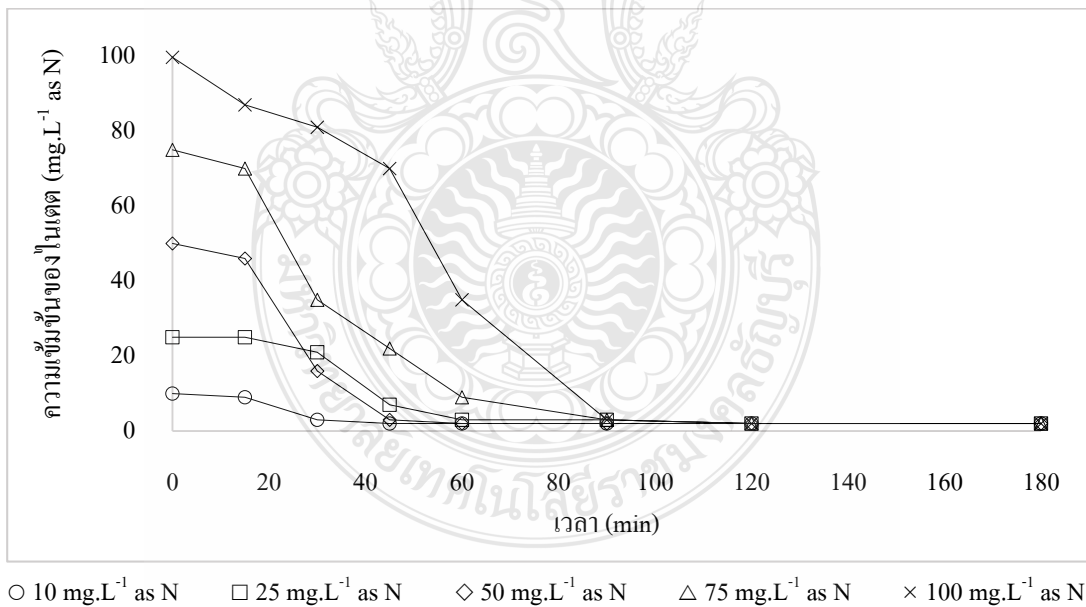
สำหรับการศึกษาการกำจัดไนเตรตด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผงทั้งหมดที่เตรียมขึ้น พบว่าการเกิดไนโตรเจนในรูปต่างๆ โดยมีความเข้มข้นเริ่มต้นได้แก่ 10, 25, 50, 75 และ 100 mg.L⁻¹ as N ซึ่งได้กำหนดเวลาในการทดลองไว้ที่ 0, 15, 30, 60, 90, 120 และ 180 min ทั้งนี้ผลการติดตามการเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มข้นของไนเตรตซึ่งเกิดจากกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชันดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 4.2-4.4



รูปที่ 4.2 ความเข้มข้นของไนเตรตที่เวลาต่างๆ โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชันที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผง 0.1%Ag-TiO₂



รูปที่ 4.3 ความเข้มข้นของไนเตรตที่เวลาต่างๆ โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ระดับที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผง 0.5%Ag-TiO₂



รูปที่ 4.4 ความเข้มข้นของไนเตรตที่เวลาต่างๆ โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ระดับที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผง 1.0%Ag-TiO₂

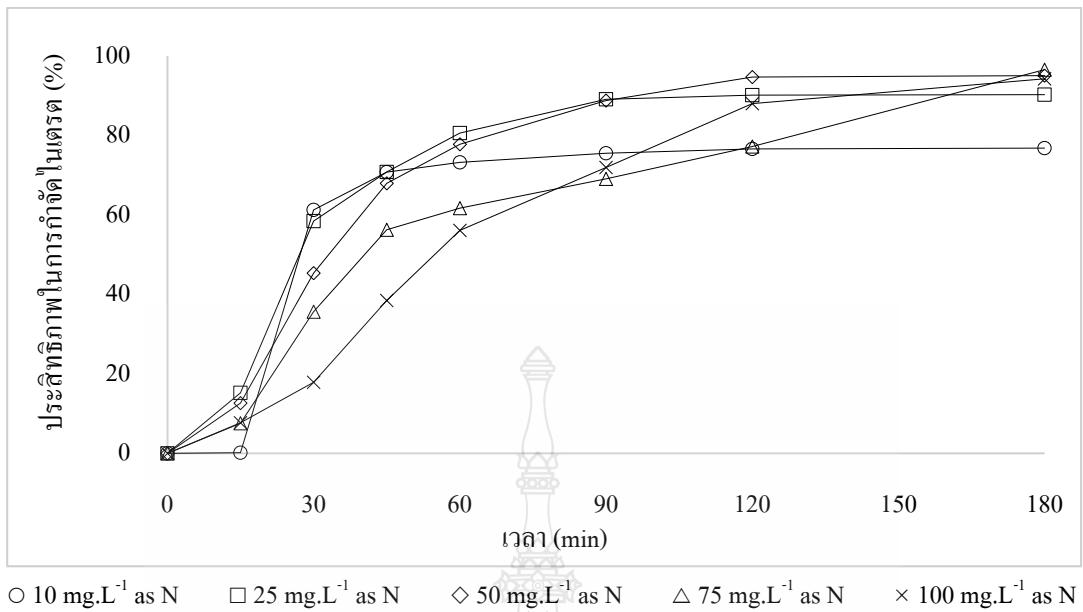
ตารางที่ 4.3 การเปลี่ยนรูปของไนเตรตไปเป็นไนไตรต์ และแอมโมเนีย ที่เวลา 180 min

ตัวเร่งปฏิกิริยา	การเปลี่ยนรูปของไนเตรตไปเป็น ไนไตรต์ และแอมโมเนีย		
	ไนเตรตความเข้มข้นเริ่มต้น 100 mg.L ⁻¹ as N		
	NO ₃ ⁻ (mg.L ⁻¹ as N)	NO ₂ ⁻ (mg.L ⁻¹ as N)	NH ₃ (mg.L ⁻¹ as N)
0.1%Ag-TiO ₂	5.77	3.30	2.94
0.5%Ag-TiO ₂	3.17	0.75	5.55
1.0%Ag-TiO ₂	2.44	11.63	3.84

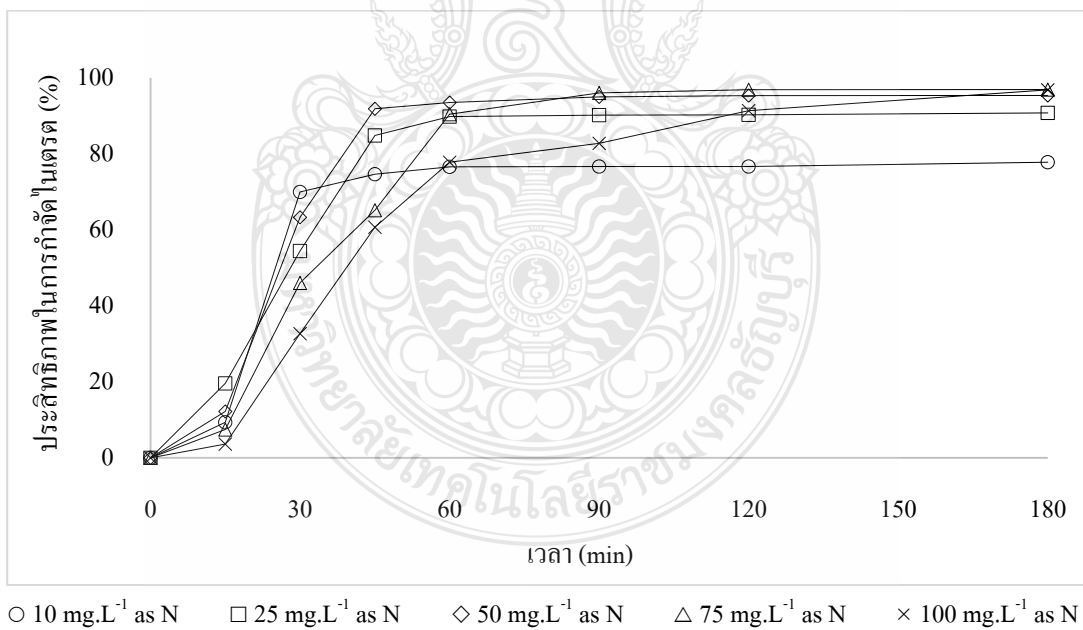
จากรูปที่ 4.2-4.4 และตารางที่ 4.3 พบว่า กระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผง 0.1%Ag-TiO₂, 0.5%Ag-TiO₂ และ 1.0%Ag-TiO₂ ส่งผลให้ไนเตรตที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10, 25, 50, 75 และ 100 mg.L⁻¹ as N มีความเข้มข้นลดลงอย่างต่อเนื่องตามเวลา โดยผลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผง Ag-TiO₂ ที่มีการเจือเงินลงไปปริมาณที่สูงส่งผลให้การกำจัดไนเตรตสามารถใช้เวลาที่สั้นกว่า แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเวลาผ่านไป 180 min พบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผง Ag-TiO₂ ทั้ง 3 ชนิด ส่งผลต่อการกำจัดไนเตรตได้ไม่แตกต่างกัน โดยจากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาผง 0.1%Ag-TiO₂, 0.5%Ag-TiO₂ และ 1.0%Ag-TiO₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 100 mg.L⁻¹ as N โดยสามารถกำจัดไนเตรตที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ กันจนทำให้ความเข้มข้นลดลงมีค่าเท่ากับ 5.77, 3.17 และ 2.44 mg.L⁻¹ as N ซึ่งจากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าที่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาผง 0.5%Ag-TiO₂ โดยตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถกำจัดไนเตรตได้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน กำหนดให้มีไนเตรตไม่เกิน 5.0 mg.L⁻¹ as N [46] และเนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาผง 0.5%Ag-TiO₂ มีการเจือเงินลงไปปริมาณที่น้อยกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาผง 1.0%Ag-TiO₂

4.3.2 ประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรตโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผง 0.1%Ag-TiO₂, 0.5%Ag-TiO₂ และ 1.0%Ag-TiO₂

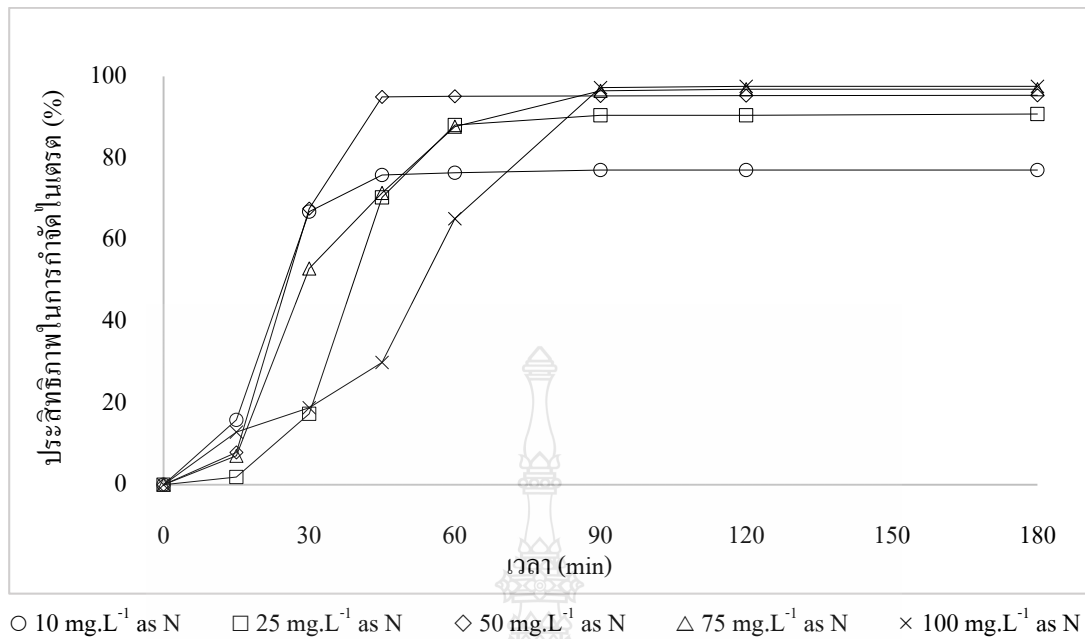
การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรตด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผง Ag-TiO₂ ที่มีการเจือเงินในปริมาณที่แตกต่างกัน 3 ค่า ได้แก่ 0.1%, 0.5% และ 1.0% กำหนดให้มีค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของไนเตรตมีค่าเท่ากับ 10, 25, 50, 75 และ 100 mg.L⁻¹ as N โดยติดตามประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรตที่เวลาต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.5-4.8



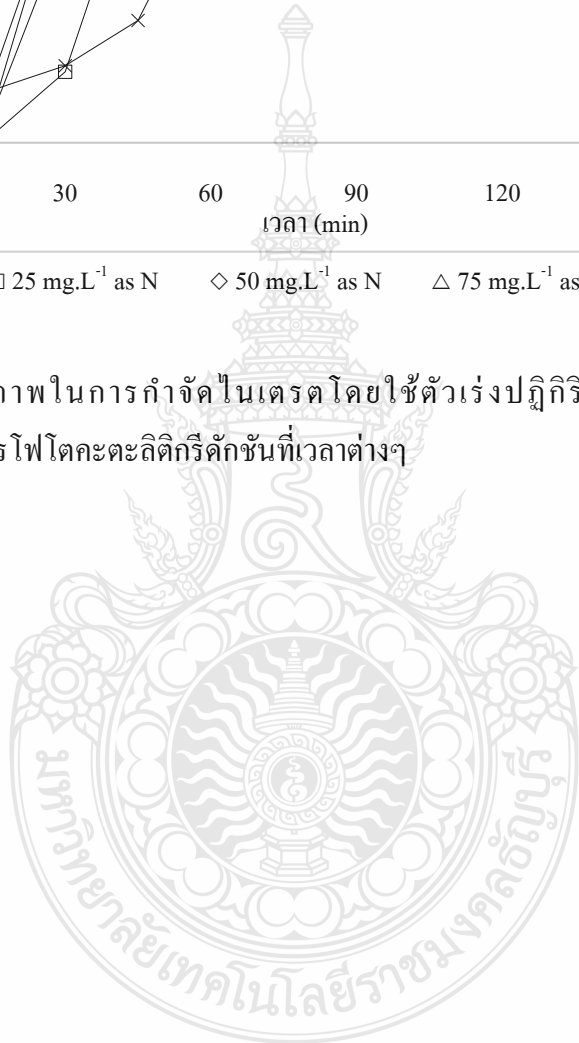
รูปที่ 4.5 ประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรตโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผง 0.1%Ag-TiO₂ ด้วย
 กระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ระดับความเข้มข้นที่เวลาต่างๆ

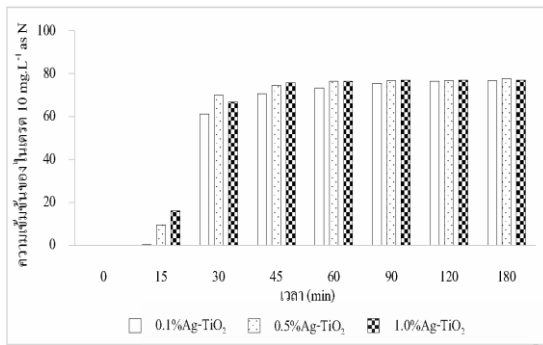


รูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรตโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผง 0.5%Ag-TiO₂ ด้วย
 กระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ระดับความเข้มข้นที่เวลาต่างๆ

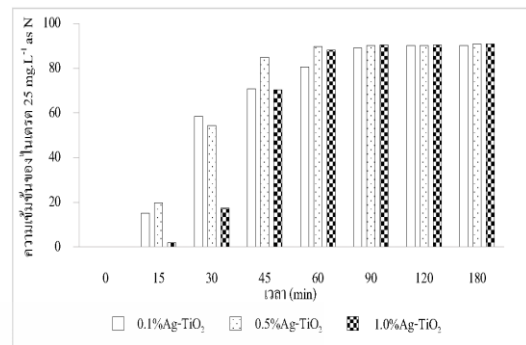


รูปที่ 4.7 ประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรตโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผง 1.0%Ag-TiO₂ ด้วย
 กระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ระดับความเข้มข้นที่เวลาต่างๆ

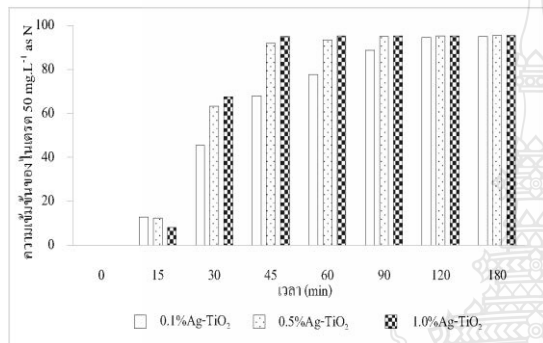




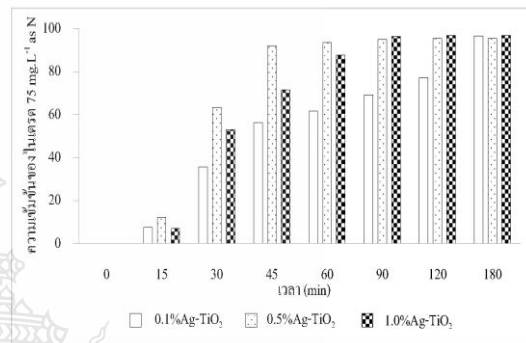
ก. ความเข้มข้นของไนเตรต 10 mg.L⁻¹ as N



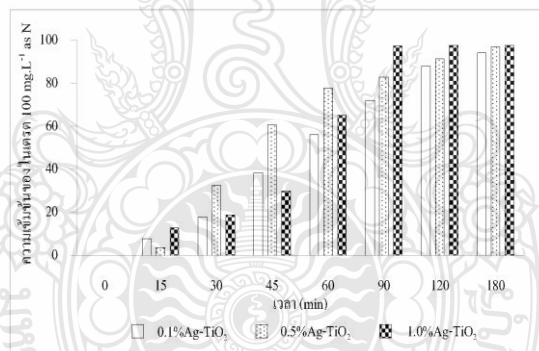
ข. ความเข้มข้นของไนเตรต 25 mg.L⁻¹ as N



ค. ความเข้มข้นของไนเตรต 50 mg.L⁻¹ as N



ง. ความเข้มข้นของไนเตรต 75 mg.L⁻¹ as N



จ. ความเข้มข้นของไนเตรต 100 mg.L⁻¹ as N

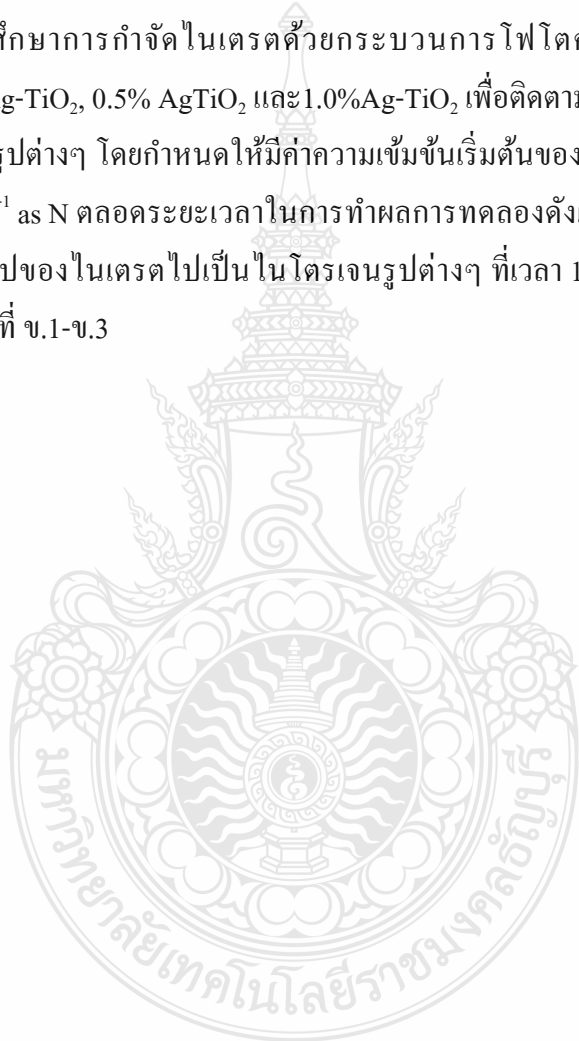
รูปที่ 4.8 ประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรตที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 10, 25, 50, 75 และ 100 mg.L⁻¹ as N โดยใช้ตัวเร่งตัวปฏิกิริยาทั้ง 3 ชนิด

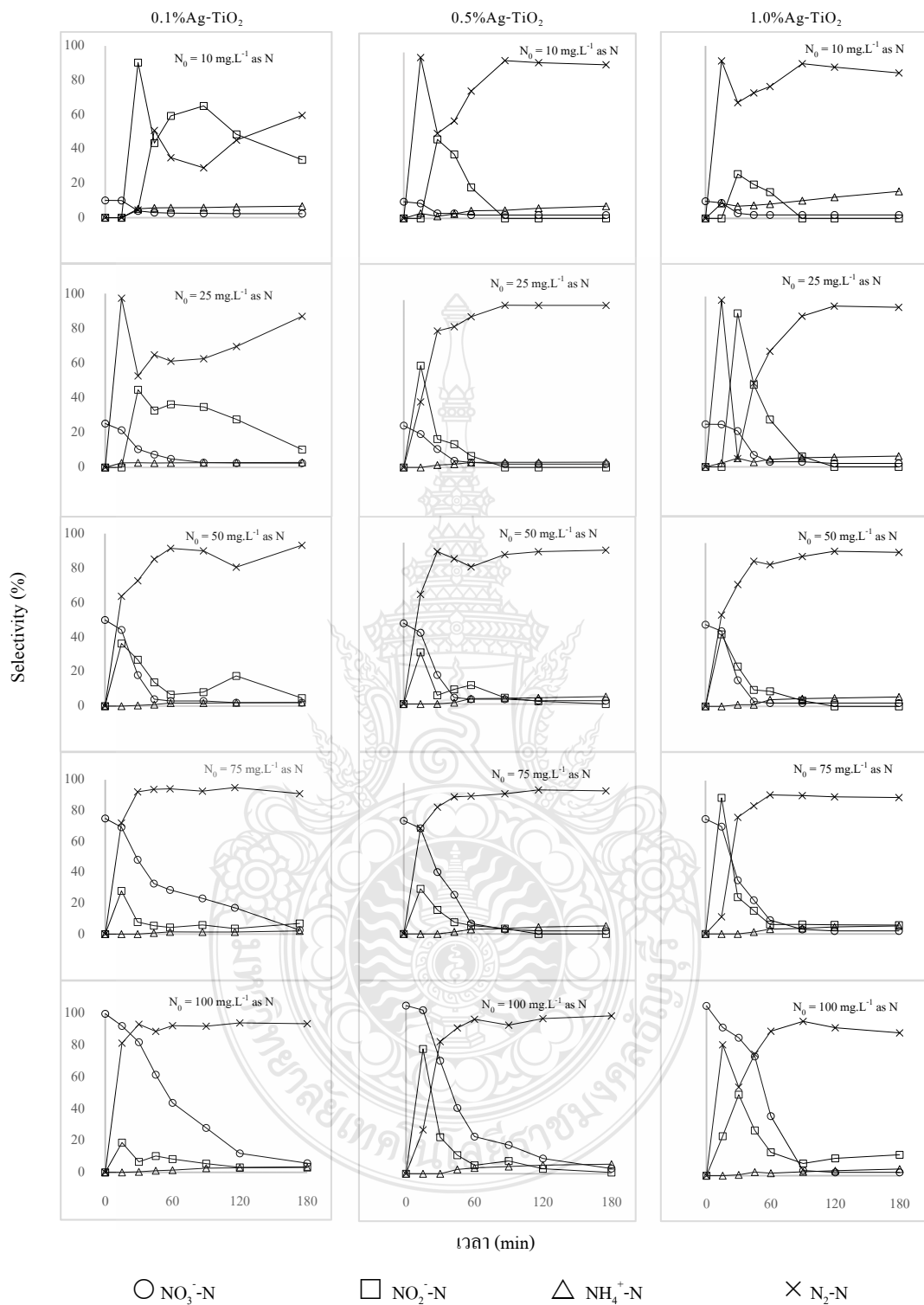
จากรูปที่ 4.5-4.8 เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดไนเตรตด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ดักซัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ag-TiO₂ ทั้ง 3 ชนิด พบว่าที่ตัวเร่งปฏิกิริยา 1.0% Ag-TiO₂ มีประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรตได้สูงสุดเท่ากับ 97.56% ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นไนเตรต 100 mg.L⁻¹ as N ในระยะเวลา 180 min โดยมีประสิทธิภาพดีที่สุดเมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1% Ag-TiO₂ และ

0.5%Ag-TiO₂ และเมื่อเทียบกับความเข้มข้นไนเตรตที่ 10, 25, 50 และ 75 mg.L⁻¹ as N แต่เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับมาตรฐานคุณภาพน้ำดื่มในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท ตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข เรื่องน้ำบริโภคในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท พ.ศ. 2534 กำหนดให้น้ำดื่มดังกล่าวมีปริมาณไนเตรตไม่เกิน 4.0 mg.L⁻¹ as N [19] โดยจากผลการทดลองพบว่าที่ตัวเร่งปฏิกิริยาผง 1.0%Ag-TiO₂ สามารถกำจัดไนเตรตที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 mg.L⁻¹ as N ให้ลดเหลือ 2.76 mg.L⁻¹ as N ได้ในระยะเวลาเพียง 90 min

4.3.3 การเปลี่ยนแปลงของไนเตรตด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน

การศึกษากำจัดไนเตรตด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1%Ag-TiO₂, 0.5% AgTiO₂ และ 1.0%Ag-TiO₂ เพื่อติดตามการเปลี่ยนรูปของไนเตรตไปเป็นไนโตรเจนในรูปแบบต่างๆ โดยกำหนดให้มีค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของไนเตรตมีค่าเท่ากับ 10, 25, 50, 75 และ 100 mg.L⁻¹ as N ตลอดระยะเวลาในการทำผลการทดลองดังแสดงดังรูปที่ 4.9 และเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนรูปของไนเตรตไปเป็นไนโตรเจนรูปแบบต่างๆ ที่เวลา 15 min ผลการทดลองแสดงดังภาคผนวก ข ตารางที่ ข.1-ข.3





รูปที่ 4.9 การเปลี่ยนรูปของไนเตรตด้วยกระบวนการโฟโตรีดักชันที่เวลาต่างๆ (Selectivity)
 หมายเหตุ NO₃⁻-N = ความเข้มข้นของไนเตรตเริ่มต้น 10, 25, 50, 75 และ 100 mg.L⁻¹ as N

จากสมการที่ 3.2-3.4 ซึ่งใช้อธิบายการเปลี่ยนรูปของไนเตรดที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นไนโตรเจนในรูปอื่นๆ ที่เกิดจากระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผง 0.1%Ag-TiO₂, 0.5%Ag-TiO₂ และ 1.0%Ag-TiO₂ ผลการทดลองเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนรูปของไนเตรดไปเป็นไนโตรเจนในรูปต่างๆ แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาผง 1.0%Ag-TiO₂ ไนเตรดสามารถเปลี่ยนไปเป็นแก๊สไนโตรเจนมากที่สุดเท่ากับ 97.87% ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 25 mg.L⁻¹ as N ในระยะเวลา 15 min เมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาผง 0.1%Ag-TiO₂ และ 0.5%Ag-TiO₂ และเมื่อเทียบกับความเข้มข้น 10, 50, 75, และ 100 mg.L⁻¹ as N

ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนรูปของไนเตรดกับงานวิจัยอื่น

ตัวเร่งปฏิกิริยา	แหล่งกำเนิดแสง	[NO ₃ ⁻] ₀ - [NO ₃ ⁻] _t [NO ₂] [NH ₃]				%[NO ₃ ⁻] Reduction	งานวิจัย
		(mg.L ⁻¹ as N)					
0.1%Ag-TiO ₂	UVA	100	5.77	3.30	2.94	94.23%	งานวิจัยนี้
0.5% Ag-TiO ₂	ความยาวคลื่น	100	3.17	0.75	5.55	96.83%	
1.0%Ag-TiO ₂	400-315 nm	100	2.44	11.64	3.84	97.56%	
1.0%Ag-TiO ₂ (A)	UVA	100	1.60	0.00	0	98.40%	
1.0%Ag-TiO ₂ (B)	ความยาวคลื่น	100	28.30	11.50	0.17	77.70%	[47]
TiO ₂ (P25)	365 nm	100	84.80	0.00	0.00	15.20%	
	Xenon						
TiO ₂ (P90)	ความยาวคลื่น	100	11.00	0.00	11.00	89.00%	[48]
	240-280 nm						
TiO ₂ (P25)	UVA	100	73.20	2.80	4.60	26.80%	
	ความยาวคลื่น						
1.0% Ag ₂ O/P25	365 nm	100	22.60	0.30	11.10	77.4%	[49]

หมายเหตุ 1.0%Ag-TiO₂ (A) เตรียมด้วยวิธี A pH-Controlled photocatalytic process

1.0%Ag-TiO₂ (B) เตรียมด้วยวิธี A convention chemical reduction

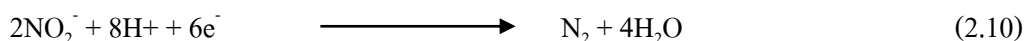
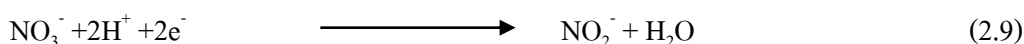
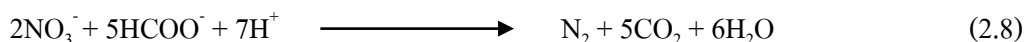
จากตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนรูปของไนเตรดกับงานวิจัยอื่น พบว่า ที่ตัวเร่งปฏิกิริยาผง 1.0%Ag-TiO₂ สามารถลดปริมาณไนเตรดได้เท่ากับ 2.44 mg.L⁻¹ as N ซึ่งเมื่อ

เปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ พบว่า กระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชันร่วมกับผงไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นกระบวนการหนึ่งที่สามารถลดไนเตรดได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชันในงานวิจัยอื่นๆ ที่แตกต่างกัน พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้น (1.0%Ag-TiO₂) มีประสิทธิภาพมากที่สุด เท่ากับ 97.56% โดยมีผลิตภัณฑ์อื่นๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน ได้แก่ ไนไตรต์ เท่ากับ 11.64 mg.L⁻¹ as N และแอมโมเนีย เท่ากับ 3.84 mg.L⁻¹ as N

จากผลการทดลองเมื่อพิจารณาการใช้กระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชันในการกำจัดไนเตรดในโตรเจน โดยกลไกการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 3 ชนิด ได้รับการกระตุ้นจากแสงที่มีระดับมากกว่าขนาดช่องว่างแถบพลังงานส่งผลให้อิเล็กตรอนที่แถบวาเลนซ์ถูกกระตุ้นขึ้นไปแถบคอนดักชันแบนด์ทำให้เกิดสภาวะขาดอิเล็กตรอนและเกิดช่องว่างที่เรียกว่า โฮลที่แถบวาเลนซ์ (hole) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการเติมสารให้อิเล็กตรอน เพื่อทดแทนอิเล็กตรอนที่หลุดหายไป ในงานวิจัยนี้ใช้กรดฟอร์มิกเป็น (Hole scavenger) เนื่องจากเป็นสารให้อิเล็กตรอนที่ดีเมื่อเทียบกับสารอินทรีย์ตัวอื่น เมื่อกรดฟอร์มิกแตกตัวไปเป็นฟอร์มेटจะทำหน้าที่ให้อิเล็กตรอนปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในส่วนนี้เรียกว่า ปฏิกิริยาออกซิเดชันดังสมการที่ 2.5-2.6



สำหรับอิเล็กตรอนที่เกิดจากปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกรีดักชันดังสมการที่ 2.6 อิเล็กตรอนดังกล่าวจะหลุดจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบตัวนำและเกิดช่องว่างโฮลขึ้นที่แถบวาเลนซ์ ทั้งนี้ในการกำจัดไนเตรดด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน ไนเตรดจะทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน ส่งผลให้ไนเตรดเปลี่ยนไปเป็นไนโตรเจนดังสมการที่ 2.7-2.10 และนอกจากนี้ยังสามารถเกิดไปเป็นผลิตภัณฑ์ ไปเป็นไนโตรเจนรูปอื่นๆ ได้แก่ ไนไตรต์และแอมโมเนีย ส่งผลให้ความเข้มข้นของไนเตรดมีการลดลงอย่างต่อเนื่องตามระยะเวลา [26-27], [50-51]



จากภาพรวมของผลการทดลองทั้งหมดเป็นไปตามกระบวนการโฟโตคะตะลิติกส์ที่ระดับสูงซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระบวนการดังกล่าวมีศักยภาพในการกำจัดไนเตรตและสามารถเปลี่ยนรูปไปเป็นแก๊สไนโตรเจนในปริมาณสูง โดยพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาผง 1.0%Ag-TiO₂ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 25 mg.L⁻¹ as N ในเตรตเปลี่ยนไปเป็นแก๊สไนโตรเจนได้มากที่สุดเท่ากับ 97.87% เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนรูปของไนเตรตไปเป็นแก๊สไนโตรเจนในรูปแบบต่างๆ ได้แก่ ไนไตรต์ และแอมโมเนียซึ่งเป็นสารไม่พึงประสงค์ในกระบวนการดังกล่าว เนื่องจากไนไตรต์ที่เกิดขึ้นเป็นสารมัธยันต์ (Intermediate product) เป็นสารกลางที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกส์ที่ระดับสูง ซึ่งยังไม่สามารถเปลี่ยนไปเป็นแก๊สไนโตรเจนได้อย่างสมบูรณ์ ทั้งนี้เมื่อพิจารณาแอมโมเนียซึ่งเป็นผลของการเปลี่ยนรูปของไนเตรตโดยปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกส์ที่ระดับสูงอาจจะต้องมีการนำสู่กระบวนการบำบัดต่อไป เนื่องจากแอมโมเนียที่เกิดขึ้นดังกล่าวหากปล่อยทิ้งลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากไนโตรเจนในรูปแบบดังกล่าวมีความคงตัว และหากมีความเข้มข้นสูงจะส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตที่อยู่ในแหล่งน้ำรวมทั้งยังส่งผลกระทบต่อปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ เนื่องจากกระบวนการย่อยสลายไนโตรเจนในรูปแบบดังกล่าวต้องใช้ออกซิเจนในกระบวนการฯ ส่งผลให้เกิดภาวะขาดออกซิเจนในแหล่งน้ำ โดยกรมควบคุมมลพิษได้กำหนดความเข้มข้นของแอมโมเนียในมาตรฐานคุณภาพน้ำแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 2 (ใช้ประโยชน์เพื่อการประมง การอนุรักษ์สัตว์น้ำ) สูงสุดไม่เกิน 0.5 mg.L⁻¹ as N [52]

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย การอภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

สำหรับการการกำจัดไนเตรตด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ระดับชั้น ซึ่งใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผง 0.1Ag-TiO₂, 0.5%Ag-TiO₂ และ 1.0%Ag-TiO₂ สามารถสรุปการศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา การติดตามการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไนเตรต การหาประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรตด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ระดับชั้น และการเปลี่ยนแปลงของไนเตรตไปเป็นไนโตรเจนรูปอื่นๆ ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ระดับชั้น จากการศึกษาดังกล่าวสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาผง Ag-TiO₂

จากการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาผง 0.1%Ag-TiO₂, 0.5%Ag-TiO₂ และ 1.0%Ag-TiO₂ พบว่ามีสารประกอบ TiO₂ เป็นองค์ประกอบหลักในปริมาณโดยน้ำหนักเท่ากับ 98.700 %, 97.000% และ 95.300 % ตามลำดับ และพบธาตุ Ag ที่มีการเจือลงไปในผง TiO₂ ในปริมาณโดยน้ำหนักเท่ากับ 0.098 %, 0.480 % และ 0.988 % สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาผง 0.1%Ag-TiO₂, 0.5%Ag-TiO₂ และ 1.0%Ag-TiO₂ และพบพื้นที่ผิวเฉพาะมีค่าเท่ากับ 2.716×10^2 , 1.276×10^2 และ $1.120 \times 10^2 \text{ m}^2.\text{g}^{-1}$ และปริมาตรรูพรุนมีค่าเท่ากับ 5.079×10^{-7} , 3.572×10^{-7} และ 2.745×10^{-7} ในตัวเร่งปฏิกิริยาผง 0.1%Ag-TiO₂, 0.5%Ag-TiO₂ และ 1.0%Ag-TiO₂ ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวที่เตรียมขึ้นด้วยวิธี Composite colloid deposition ภายใต้สภาวะกรดและที่อุณหภูมิห้องมีความเหมาะสมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีและนำไปใช้ในกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ระดับชั้น

5.1.2 การติดตามการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไนเตรตโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผง Ag-TiO₂

จากการติดตามการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไนเตรตด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ระดับชั้นสามารถกำจัดไนเตรตที่ความเข้มข้นเริ่มต้น $100 \text{ mg.L}^{-1} \text{ as N}$ จนทำให้ความเข้มข้นของไนเตรตลดลงจนมีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ $2.44 \text{ mg.L}^{-1} \text{ as N}$ ที่ตัวเร่งปฏิกิริยาผง 1.0%Ag-TiO₂ ในระยะเวลา 180 min

5.1.3 การหาประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรตด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ระดับชั้นโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผง Ag-TiO₂

ในการหาประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรตด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชันร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 3 ชนิด ในการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรตสูงสุดมีค่าเท่ากับ 97.56% ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา 1.0%Ag-TiO₂ ในระยะเวลา 180 min ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 100 mg.L⁻¹ as N

5.1.4 การเปลี่ยนแปลงของไนเตรตไปเป็นไนโตรเจนรูปอื่นๆ ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของไนเตรตไปเป็นไนโตรเจนรูปอื่นๆ ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผง 0.1%Ag-TiO₂, 0.5%Ag-TiO₂ และ 1.0%Ag-TiO₂ พบว่าที่ตัวเร่งปฏิกิริยาผง 1.0%Ag-TiO₂ ไนเตรตสามารถเปลี่ยนไปเป็นแก๊สไนโตรเจนได้มากที่สุด เท่ากับ 97.87% ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 25 mg.L⁻¹ as N ในระยะเวลา 15 min

5.2 ข้อเสนอแนะ

การศึกษากำจัดไนเตรตด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชันร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาผง Ag-TiO₂ ควรมีข้อเสนอแนะเพิ่มเติมในหัวข้อดังต่อไปนี้

5.2.1 ควรศึกษากระบวนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่เดิมสารมลทินอื่นๆ เพิ่มเติม

5.2.2 ควรศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาผง Ag-TiO₂ ในที่มีแสง

5.2.3 ควรศึกษากำจัดไนเตรตที่ความเข้มข้นสูงขึ้น

5.2.4 ทำการศึกษากระบวนการกำจัดไนเตรตด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชันในสถานะที่มีออกซิเจน

บรรณานุกรม

- [1] Yang, T., Doudrick, K., and Westerhoff, P. (2013). Photocatalytic reduction of nitrate using titanium dioxide for regeneration of ion exchange brine. **Water Research**. 47: 1299-1307.
- [2] O'Neal Tugaoen, H., Garcia-Segura, S., Hristovski, K., and Westerhoff, P. (2017). Challenges in photocatalytic reduction of nitrate as a water treatment technology. **Science of the Total Environment**. 599-600: 1524-1551.
- [3] Bamba, D., Coulibaly, M., and Robert, D. (2017). Nitrogen-containing organic compounds: Origins, toxicity and conditions of their photocatalytic mineralization over TiO₂. **Science of the Total Environment**. 580: 1489-1504.
- [4] Hou, M., Tang, Y., Xu, J., Pu, Yu., Lin, A., Zhang, L., and Xiong, J. (2015). Nitrate reduction in water by aluminium-iron alloy particles catalysed by copper. **Journal of Environmental Chemical Engineering**. 3: 2401-2407.
- [5] พงศ์ศักดิ์ หนูพันธ์ และ รัชชา ชัยชนะ, ผลกระทบของไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ต่อการเกิดยูโทรฟิเคชันในแหล่งน้ำและ การกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัส. **วิศวกรรมสาร มก.** (น. 59-61).
กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [6] ชงชัย พรรณสวัสดิ์, (2544). **การกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทางชีวภาพ**. กรุงเทพฯ : สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.
- [7] Venugopalan, V. P., et al. (2017). Denitrification of high strength nitrate bearing acidic waters in granular sludge sequencing batch reactors. **International Biodeterioration & Biodegradation**. 119: 28-36.
- [8] Steyn, A., and Schoeman, J. J. (2003). Nitrate removal with reverse osmosis in a rural area in South Africa. **Desalination**. 155: 15-26.
- [9] Hang-Sik, S., et al. (2002). Improved brine recycling during nitrate removal using ion exchange. **Water Research**. 36: 3330-3340.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [10] Xueming, C., and Bing-Jie, N. (2016). Model-based evaluation on simultaneous nitrate and arsenite removal in a membrane biofilm reactor. **Chemical Engineering Science**. 152: 488-496.
- [11] Amalraj, A., et al. (2016). Adsorption studies for the removal of nitrate using chitosan/PEG and chitosan/PVA polymer composites. **Journal of Water Process Engineering**. 9: 123-134.
- [12] O'Shea, K., et al. (2012). A review on the visible light active titanium dioxide photocatalysts for environmental application. **Applied Catalysis B: Environmental**. 125: 331-349.
- [13] Lee, M. K., et al. (2016). Recent developments of zinc oxide based photocatalyst in water treatment technology: A review. **Water Research**. 88: 428-448.
- [14] Király, P., et al. (2012). WO₃ photocatalysts: influence of structure and composition. **Journal of catalysis**. 294: 119-127.
- [15] Bin Ji, Hongyu Wang & Kai Yang. (2014). Nitrate and COD removal in an upflow biofilter under an aerobic atmosphere. **Bioresource Technology**, 158: 156–160.
- [16] Juan C. Alzate Marin, Alejandro H. Caravelli a & Noemí E. Zaritzky. (2016). Nitrification and aerobic denitrification in anoxic-aerobic sequencing batch reactor. **Bioresource Technology**, 200: 380–387.
- [17] López-Bellido, L., V. Muñoz-Romero, R.J. López-Bellido. (2013). Nitrate accumulation in the soil profile: Long-term effects of tillage, rotation and N rate in a Mediterranean Vertisol. **Soil & Tillage Research** 130: 18-23.
- [18] Adrian, A. Chetty., and Surendra Prasad. (2016). Flow injection analysis of nitrate and nitrite in commercial baby foods. **Food Chemistry**. 197: 503-508.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [19] ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 332 (พ.ศ. 2521) ออกตามความในพระราชบัญญัติมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม พ.ศ. 2511 เรื่องกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม น้ำบริโภค ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่ม 95 ตอนที่ 68 ลงวันที่ 4 กรกฎาคม 2521.
- [20] Metcalf and Eddy. (2004). "Wastewater Engineering Treatment and Reuse Fifth Edition." McGraw-Hill, USA.
- [21] กฤษณะ กอบวิทยา. (2557). กระบวนการโฟโตคะตะไลติกรีดักชันของไนเตรดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์ดัดแปลงจากโลหะ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [22] Umar Gaya. (2014). Heterogeneous Photocatalysis Using Inorganic Semiconductor Solids. Theory and Applications. **New York: Springer.**
- [23] การะเกด เทศศร. (2013). ตัวเร่งปฏิกิริยานาโน เทคโนโลยีการเร่งปฏิกิริยายุคใหม่. **ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา. 2: 274-280.**
- [24] Muhammad Umar, Hamidi Abdul Aziz. (2013). Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants in Water. **Environmental Sciences, RMIT University.** Australia: Melbourne.
- [25] Lee, H.U., S.C. Lee, S.Choi, B.Son, H.Kim, S.M.Lee, H.J.Kim and J. Lee. (2013). Influence of visible-light irradiation on physicochemical and photocatalytic properties of nitrogen-doped three-dimensional (3D) titanium dioxide. **Journal of Hazardous Materials.** 258-259: 10-18.
- [26] Kobwittaya, K., and Sirivithayapakorn, S. (2014). Photocatalytic reduction of nitrate over TiO₂ and Ag-modified TiO₂. **Journal of Saudi Chemical Society.** 18: 291-298.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [27] Doudrick, K., T. Yang, K. Hristovski and P. Westerhoff. (2013). Photocatalytic nitrate reduction in water: Managing the hole scavenger and reaction by-product selectivity. **Applied Catalysis B: Environmental**. 136-137: 40-47.
- [28] Pan, J.R., C. Huang, W.P. Hsieh and B.J. Wu. (2012). Reductive catalysis of novel TiO_2/Fe^0 composite under UV irradiation for nitrate removal from aqueous solution. **Separation and Purification Technology**. 84: 52-55.
- [29] สรรค์ จิตรไคร์ครวญ, การทำความสะอาดโดยตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์. วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ, น. 21-24,
- [30] พิธิษฐ์พงษ์ หมั่นประเสริฐดี, (2553). การใช้แสงร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ สลายของเสียโพลีเมอร์ในน้ำที่ระดับห้องปฏิบัติการ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาเคมีประยุกต์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [31] Liu, X., Tong, Y., and Chen, J. (2018). Surface Curing and Properties of Titanium Dioxide Self-Cleaning Ceramics. **Ceramic Sciences and Engineering**. 1-6.
- [32] Higashimoto, S., R. Shirai, Y. Osano, M. Azuma, H. Ohue, Y. Sakata and H. Kobayashi. (2014). Influence of metal ions on the photocatalytic activity: Selective oxidation of benzyl alcohol on iron (III) ion-modified TiO_2 using visible light. **Journal of Catalysis**, 311: 137-143.
- [33] Liu, L., J. Huang, L. Cao, J. Wu, J. Fei, H. Ouyang and C. Yao. (2013). Influence of temperature on the morphology and photocatalytic activity of ZnGa_2O_4 crystallites prepared by hydrothermal method. **Ceramics International**, 39: 3165-3171.
- [34] อานันท์ปภา ชื่นทรัพย์. (2555). การบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส โดยใช้ทังสเตนไดรอกไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

บรรณานุกรม (ต่อ)

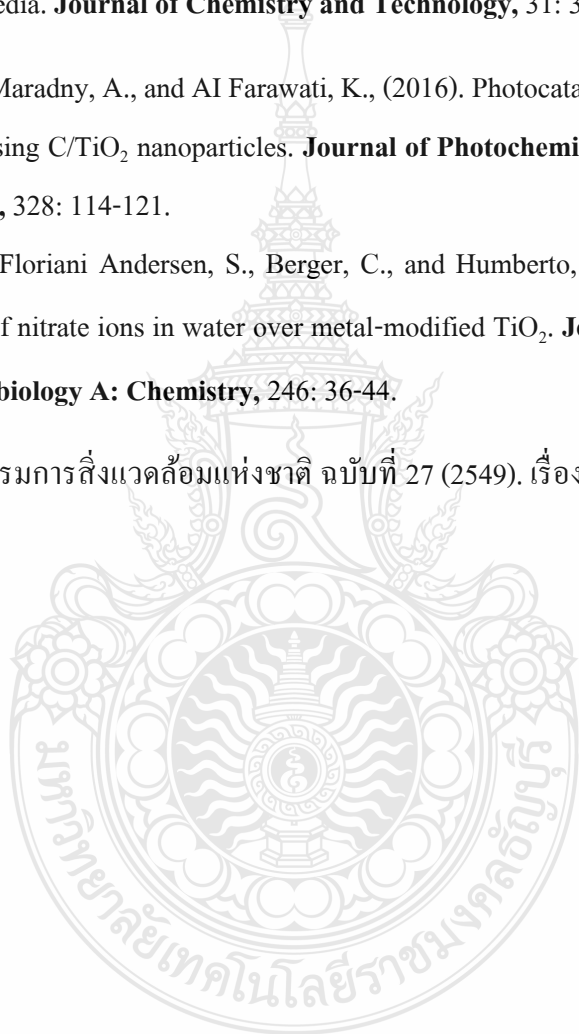
- [35] Wang, N., C.Zhang, H.He, X.Li and J.Yang. (2011). Hydrothermal-assisted liquid phase deposition synthesis and photocatalytic activities of titania nanocrystals. **Powder Technology**, 205: 61-64.
- [36] Agileo Hernandez-Gordillo, Angela G.Romero, Francisco Tzompantzi, Ricardo Gómez. (2014). Kinetic study of the 4-Nitrophenol photooxidation and photoreduction reactions using CdS. **Applied Catalysis B: Environmental**. 144: 507-513.
- [37] ปรียานุช พัฒนาการคำ. (2558). การบำบัดน้ำชะมูลฝอยจากหลุมฝังกลบเก่าด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม.
- [38] สุพะไชย์ จินดาวุฒิกุล. การวัดพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของวัสดุดูดซับ. กรมวิทยาศาสตร์บริการ, ปีที่, 60 ฉบับที่ 189 : หน้า 22-23
- [39] ณัฐชา เวชโอสถศักดิ์. (2559). การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อสแตฟิโลค็อกคัสด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม.
- [40] Fazlzadehdavilb, M., Mahvi, A., Nasser, A., and Gholami, M. (2013) Application of Ag-doped TiO₂ nanoparticle prepared by photodeposition method for nitrate photocatalytic removal from aqueous. **Desalination and Water Treatment**. 51:37-39.
- [41] ศิวิมล เขียวประเสริฐ. (2558) ปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกที่ดักจับของไนเตรทบนแผ่นสแตนเลสเคลือบด้วย Ag-TiO₂. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [42] ธนิตกานต์ วิริยนะวัตร. (2558). ปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกที่ดักจับของไนเตรทบนแผ่นแก้วที่เคลือบด้วย Ag-TiO₂. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [43] Naik, B., Hemapa Manoratne, C., Chandrashekhar, A., Iyer, A., Sivankutty Prasad, V., and Nath Ghosh, N., (2013). Preparation of TiO_2 , Ag-doped TiO_2 nanoparticle and TiO_2 -SBR-15 nanocomposites using simple aqueous solution-based chemical method and study of their photocatalytic activity. **Journal of Experimental Nanoscience**, 4: 462-479.
- [44] Vargas Hernández, J., Coste, S., García Murillo, A., Carrillo Romo, F., and Kassiba, A., (2017). Effects of metal doping (Cu, Ag, Eu) on the electronic and optical behaviour of nanostructured TiO_2 . **Journal of Alloys and Compounds**, 710: 355-363.
- [45] Nadolna, J., Arenas-Esteban, D., Gazda, M., and Zaleska-Medynska, A., (2014). Pr-doped TiO_2 , the effect of metal content on photocatalytic activity. **Physicochemical Problems of Mineral Processing**, 50(2): 515-525.
- [46] ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 8 (2537) ออกตามความในพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 111 ตอนที่ 16 ง ลงวันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2537.
- [47] Fuxiang, Z., Ruicai, J., Jixin, C., Changzhun, S., Wenliang, G., Landong, L., and Naijia, G., (2005). High photocatalytic activity and selectivity for nitrogen in nitrate reduction on Ag/TiO_2 catalyst with fine silver clusters. **Journal of Catalysis**, 232: 424-431.
- [48] Tugaoen, H., Herckes, P., Hristovski, K., and Westerhoff, P., (2018). Influence of ultraviolet wavelengths on kinetics and selectivity for N-gases during TiO_2 photocatalytic reduction of nitrate. **Applied Catalysis B: Environmental**, 220: 597-606.
- [49] Ren, H., Jia, S., Zou, J., Wu, S., and Han, X., (2015). A facile preparation of $\text{Ag}_2\text{O}/\text{P25}$ photocatalyst for selective reduction of nitrate. **Applied Catalysis B: Environmental**, 177-176: 53-61.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [50] Lozovskii, A.V., Stolyarova, I.V., Prikhod'ko, R.V., and Goncharuk, V.V., (2009). Research of photocatalytic activity of the Ag/TiO₂ catalysts in the reduction reaction of nitrate-ions in aqueous media. **Journal of Chemistry and Technology**, 31: 360-366.
- [51] Shaban, Y., EI Maradny, A., and AI Farawati, K., (2016). Photocatalytic reduction of nitrate in seawater using C/TiO₂ nanoparticles. **Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry**, 328: 114-121.
- [52] Bem Luiz, D., Floriani Andersen, S., Berger, C., and Humberto, J., (2012). Photocatalytic reduction of nitrate ions in water over metal-modified TiO₂. **Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry**, 246: 36-44.
- [52] ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 27 (2549). เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำทะเล.



ภาคผนวก ก

ตารางแสดงผลการทดลอง



ตารางที่ ก.1 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.1%Ag-TiO₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 10 mg.L⁻¹ as N ในชุดการทดลอง

เวลา (min)	pH	0.1%Ag-TiO ₂			
		FA	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺
0	2.23	2700.00	10.12	0.00	0.00
15	2.25	2365.39	10.10	0.00	0.11
30	2.28	2397.62	3.92	5.60	0.32
45	2.31	2357.85	2.96	3.11	0.41
60	2.32	2327.02	2.71	7.30	0.43
90	2.31	2311.74	2.48	4.97	0.45
120	2.30	2304.33	2.37	3.76	0.49
180	2.31	2299.68	2.35	1.31	0.49

ตารางที่ ก.2 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.1%Ag-TiO₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 25 mg.L⁻¹ as N ในชุดการทดลอง

เวลา (min)	pH	0.1%Ag-TiO ₂			
		FA	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺
0	2.17	2700.00	25.22	0.00	0.00
15	2.20	2488.34	21.38	0.00	0.10
30	2.28	2351.17	10.48	6.59	6.59
45	2.30	2342.71	7.37	5.84	5.84
60	2.31	2335.60	4.90	7.38	7.38
90	2.32	2322.94	2.76	7.81	7.81
120	2.33	2303.05	2.49	6.28	6.28
180	2.36	2286.08	2.46	2.33	2.33

ตารางที่ ก.3 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.1%Ag-TiO₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 50 mg.L⁻¹ as N ในชุดการทดลอง

เวลา (min)	pH	0.1%Ag-TiO ₂			
		FA	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺
0	2.25	2700.00	50.03	0.00	0.00
15	2.29	2643.82	43.69	2.29	0.00
30	2.40	2513.32	27.34	6.08	0.15
45	2.39	2486.87	16.05	4.65	0.30
60	2.48	2365.95	11.13	2.58	0.71
90	2.51	2233.81	5.63	3.61	0.80
120	2.56	2184.42	2.67	8.28	0.94
180	2.59	2120.43	2.48	2.24	1.00

ตารางที่ ก.4 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.1%Ag-TiO₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 75 mg.L⁻¹ as N ในชุดการทดลอง

เวลา (min)	pH	0.1%Ag-TiO ₂			
		FA	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺
0	2.29	2700.00	75.00	0.00	0.00
15	2.30	2652.35	69.25	1.63	0.00
30	2.42	2521.58	48.21	2.05	0.04
45	2.40	2495.17	32.78	2.30	0.27
60	2.49	2367.32	28.69	2.03	0.66
90	2.41	2254.84	23.19	3.13	0.75
120	2.55	2089.34	17.08	2.10	0.83
180	2.68	1997.18	2.60	4.98	1.55

ตารางที่ ก.5 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.1%Ag-TiO₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 100 mg.L⁻¹ as N ในชุดการทดลอง

เวลา (min)	pH	0.1%Ag-TiO ₂			
		FA	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺
0	2.19	2700.00	100.00	0.00	0.00
15	2.20	2624.54	92.00	1.50	0.00
30	2.26	2662.67	81.84	1.18	0.07
45	2.36	2523.80	61.34	3.98	0.41
60	2.49	2423.33	43.74	4.66	0.81
90	2.58	2336.37	27.99	3.96	1.90
120	2.70	2133.25	11.97	2.85	2.57
180	2.73	1999.52	5.77	3.30	2.94

ตารางที่ ก.6 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.5%Ag-TiO₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 10 mg.L⁻¹ as N ในชุดการทดลอง

เวลา (min)	pH	0.5%Ag-TiO ₂			
		FA	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺
0	2.21	2700.00	10.45	0.00	0.00
15	2.25	2570.19	9.47	0.00	0.03
30	2.24	2610.19	3.14	3.48	0.09
45	2.33	2573.16	2.65	3.01	0.21
60	2.27	2343.50	2.45	1.49	0.37
90	2.32	2320.43	2.44	0.00	0.39
120	2.33	2307.50	2.44	0.00	0.49
180	2.34	2285.68	2.32	0.00	0.60

ตารางที่ ก.7 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.5%Ag-TiO₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 25 mg.L⁻¹ as N ในชุดการทดลอง

เวลา (min)	pH	0.5%Ag-TiO ₂			
		FA	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺
0	2.11	2700.00	25.15	0.00	0.00
15	2.13	2664.34	20.22	3.00	0.00
30	2.19	2515.66	11.46	2.33	0.20
45	2.27	2368.61	3.82	2.97	0.42
60	2.25	2354.86	2.57	1.6	0.68
90	2.29	2345.95	2.47	0.00	0.70
120	2.32	2332.32	2.45	0.00	0.71
180	2.28	2320.91	2.32	0.00	0.73

ตารางที่ ก.8 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.5%Ag-TiO₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 50 mg.L⁻¹ as N ในชุดการทดลอง

เวลา (min)	pH	0.5%Ag-TiO ₂			
		FA	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺
0	2.11	2700.00	50.37	0.00	0.00
15	2.22	2668.01	44.22	1.97	0.00
30	2.40	2529.63	18.48	1.72	0.03
45	2.41	2406.02	4.11	4.21	0.40
60	2.51	2326.65	3.27	5.53	1.55
90	2.59	2282.25	2.53	1.86	1.68
120	2.55	2137.10	2.36	0.80	1.86
180	2.60	2062.68	2.34	0.00	2.21

ตารางที่ ก.9 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.5%Ag-TiO₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 75 mg.L⁻¹ as N ในชุดการทดลอง

เวลา (min)	pH	0.5%Ag-TiO ₂			
		FA	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺
0	2.28	2700.00	75.16	0.00	0.00
15	2.33	2628.11	69.55	1.68	0.00
30	2.45	2585.24	40.56	5.52	0.00
45	2.44	2474.16	26.18	3.81	0.68
60	2.71	2364.80	7.19	3.85	2.09
90	2.79	2223.49	3.00	2.59	2.60
120	2.75	2116.64	2.34	0.00	3.37
180	2.79	2091.83	2.32	0.00	3.86

ตารางที่ ก.10 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.5%Ag-TiO₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 100 mg.L⁻¹ as N ในชุดการทดลอง

เวลา (min)	pH	0.5%Ag-TiO ₂			
		FA	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺
0	2.25	2700.00	100.24	0.00	0.00
15	2.26	2586.51	96.59	2.66	0.00
30	2.44	2423.53	67.46	7.05	0.00
45	2.48	2223.41	39.40	6.68	1.56
60	2.75	2050.69	22.27	3.95	2.67
90	2.99	1962.18	17.30	6.29	3.54
120	2.85	1904.89	8.68	2.66	4.66
180	3.10	1801.85	3.17	0.75	5.55

ตารางที่ ก.11 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 1.0 %Ag-TiO₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 10 mg.L⁻¹ as N ในชุดการทดลอง

เวลา (min)	pH	1.0%Ag-TiO ₂			
		FA	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺
0	2.23	2700.00	10.11	0.00	0.00
15	2.19	2624.78	8.50	0.00	0.14
30	2.24	2595.45	3.35	1.74	0.48
45	2.21	2562.94	2.44	1.51	0.58
60	2.26	2554.63	2.39	1.18	0.64
90	2.31	2545.94	2.32	0.00	0.80
120	2.21	2445.73	2.32	0.00	0.96
180	2.29	2422.29	2.32	0.00	1.22

ตารางที่ ก.12 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 1.0%Ag-TiO₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 25 mg.L⁻¹ as N ในชุดการทดลอง

เวลา (min)	pH	1.0%Ag-TiO ₂			
		FA	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺
0	2.19	2700.00	25.15	0.00	0.00
15	2.23	2683.30	24.68	0.00	0.01
30	2.33	2648.32	20.79	3.93	0.22
45	2.32	2638.45	7.46	8.52	0.48
60	2.37	2626.07	3.00	6.15	0.96
90	2.42	2619.42	2.40	1.40	1.22
120	2.40	2532.32	2.40	0.00	1.28
180	2.45	2520.91	2.32	0.00	1.44

ตารางที่ ก.13 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 1.0 %Ag-TiO₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 50 mg.L⁻¹ as N ในชุดการทดลอง

เวลา (min)	pH	1.0%Ag-TiO ₂			
		FA	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺
0	2.32	2700.00	50.06	0.00	0.00
15	2.22	2696.58	46.09	1.75	0.00
30	2.28	2528.79	16.22	8.26	0.32
45	2.29	2400.07	2.52	4.79	0.48
60	2.51	2323.82	2.44	4.38	1.92
90	2.37	2313.74	2.39	1.68	2.24
120	2.52	2306.53	2.37	0.00	2.40
180	2.48	2290.42	2.32	0.00	2.72

ตารางที่ ก.14 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 1.0 %Ag-TiO₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 75 mg.L⁻¹ as N ในชุดการทดลอง

เวลา (min)	pH	1.0%Ag-TiO ₂			
		FA	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺
0	2.26	2700.00	75.40	0.00	0.00
15	2.30	2635.86	70.05	4.75	0.00
30	2.42	2528.08	35.47	9.58	0.00
45	2.39	2485.44	21.53	8.19	0.68
60	2.52	2433.90	9.29	4.05	2.09
90	2.50	2420.62	2.68	4.53	2.60
120	2.51	2405.95	2.38	4.37	3.37
180	2.84	2385.74	2.38	4.21	3.86

ตารางที่ ก.15 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 1.0%Ag-TiO₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 100 mg.L⁻¹ as N ในชุดการทดลอง

เวลา (min)	pH	1.0%Ag-TiO ₂			
		FA	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺
0	2.24	2700.00	100.36	0.00	0.00
15	2.42	2631.16	87.43	3.27	0.00
30	2.49	2551.77	81.43	8.73	0.10
45	2.60	2486.89	70.30	8.49	0.64
60	2.68	2374.61	34.99	8.89	0.96
90	2.92	2263.69	2.77	7.47	2.24
120	2.86	2186.38	2.46	10.19	2.88
180	3.06	2141.62	2.45	11.63	3.84

ตารางที่ ก.16 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.1%Ag-TiO₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 10 mg.L⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 1

เวลา (min)	pH	0.1%Ag-TiO ₂			
		FA	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺
0	2.62	2700.00	10.13	0.00	0.00
15	2.62	2700.00	10.13	0.00	0.00
30	2.63	2700.00	10.13	0.00	0.00
45	2.61	2700.00	10.13	0.00	0.00
60	2.62	2700.00	10.13	0.00	0.00
90	2.62	2700.00	10.10	0.00	0.00
120	2.59	2688.41	9.98	0.00	0.00
180	2.61	2671.85	9.01	0.00	0.00

ตารางที่ ก.17 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.1%Ag-TiO₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 25 mg.L⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 1

เวลา (min)	pH	0.1%Ag-TiO ₂			
		FA	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺
0	2.59	2700.00	25.10	0.00	0.00
15	2.59	2700.00	25.10	0.00	0.00
30	2.58	2700.00	25.10	0.00	0.00
45	2.58	2700.00	25.10	0.00	0.00
60	2.58	2700.00	25.10	0.00	0.00
90	2.59	2698.12	25.01	0.00	0.00
120	2.59	2689.45	24.98	0.00	0.00
180	2.59	2679.26	24.12	0.00	0.00

ตารางที่ ก.18 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.1%Ag-TiO₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 50 mg.L⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 1

เวลา (min)	pH	0.1%Ag-TiO ₂			
		FA	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺
0	2.58	2700.00	50.02	0.00	0.00
15	2.58	2700.00	50.02	0.00	0.00
30	2.59	2700.00	50.02	0.00	0.00
45	2.58	2700.00	50.02	0.00	0.00
60	2.59	2697.20	50.01	0.00	0.00
90	2.58	2689.85	49.97	0.00	0.00
120	2.59	2685.20	49.90	0.00	0.00
180	2.59	2679.59	49.12	0.00	0.00

ตารางที่ ก.19 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.1%Ag-TiO₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 75 mg.L⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 1

เวลา (min)	pH	0.1%Ag-TiO ₂			
		FA	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺
0	2.59	2700.00	75.00	0.00	0.00
15	2.59	2700.00	75.00	0.00	0.00
30	2.58	2700.00	75.00	0.00	0.00
45	2.58	2700.00	75.00	0.00	0.00
60	2.58	2700.00	75.00	0.00	0.00
90	2.59	2679.85	74.89	0.00	0.00
120	2.59	2668.20	74.78	0.00	0.00
180	2.59	2661.59	74.24	0.00	0.00

ตารางที่ ก.20 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.1%Ag-TiO₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 100 mg.L⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 1

เวลา (min)	pH	0.1%Ag-TiO ₂			
		FA	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺
0	2.62	2700.00	100.05	0.00	0.00
15	2.62	2700.00	100.05	0.00	0.00
30	2.62	2700.00	100.05	0.00	0.00
45	2.62	2700.00	100.05	0.00	0.00
60	2.61	2700.00	100.05	0.00	0.00
90	2.61	2694.94	99.94	0.00	0.00
120	2.62	2689.24	99.87	0.00	0.00
180	2.62	2677.89	99.30	0.00	0.00

ตารางที่ ก.21 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.5%Ag-TiO₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 10 mg.L⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 1

เวลา (min)	pH	0.1%Ag-TiO ₂			
		FA	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺
0	2.60	2700.00	10.10	0.00	0.00
15	2.59	2700.00	10.10	0.00	0.00
30	2.59	2700.00	10.10	0.00	0.00
45	2.60	2700.00	10.10	0.00	0.00
60	2.60	2700.00	10.10	0.00	0.00
90	2.59	2693.25	9.89	0.00	0.00
120	2.60	2685.36	9.68	0.00	0.00
180	2.59	2670.74	9.03	0.00	0.00

ตารางที่ ก.22 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.5%Ag-TiO₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 25 mg.L⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 1

เวลา (min)	pH	0.1%Ag-TiO ₂			
		FA	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺
0	2.60	2700.00	25.10	0.00	0.00
15	2.59	2700.00	25.10	0.00	0.00
30	2.59	2700.00	25.10	0.00	0.00
45	2.60	2700.00	25.10	0.00	0.00
60	2.60	2691.74	25.04	0.00	0.00
90	2.61	2687.01	24.96	0.00	0.00
120	2.59	2678.74	24.87	0.00	0.00
180	2.61	2665.24	24.41	0.00	0.00

ตารางที่ ก.23 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.5%Ag-TiO₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 50 mg.L⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 1

เวลา (min)	pH	0.1%Ag-TiO ₂			
		FA	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺
0	2.58	2700.00	50.05	0.00	0.00
15	2.58	2700.00	50.05	0.00	0.00
30	2.57	2700.00	50.05	0.00	0.00
45	2.57	2700.00	50.05	0.00	0.00
60	2.58	2697.21	50.01	0.00	0.00
90	2.58	2689.07	49.89	0.00	0.00
120	2.57	2677.21	49.74	0.00	0.00
180	2.57	2660.01	49.04	0.00	0.00

ตารางที่ ก.24 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.5%Ag-TiO₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 75 mg.L⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 1

เวลา (min)	pH	0.1%Ag-TiO ₂			
		FA	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺
0	2.58	2700.00	75.08	0.00	0.00
15	2.58	2700.00	75.08	0.00	0.00
30	2.57	2700.00	75.08	0.00	0.00
45	2.57	2700.00	75.08	0.00	0.00
60	2.58	2691.85	75.04	0.00	0.00
90	2.58	2686.02	74.97	0.00	0.00
120	2.57	2679.74	74.85	0.00	0.00
180	2.57	2666.83	74.04	0.00	0.00

ตารางที่ ก.25 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.5%Ag-TiO₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 100 mg.L⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 1

เวลา (min)	pH	0.1%Ag-TiO ₂			
		FA	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺
0	2.63	2700.00	100.02	0.00	0.00
15	2.63	2700.00	100.02	0.00	0.00
30	2.62	2700.00	100.02	0.00	0.00
45	2.62	2700.00	100.02	0.00	0.00
60	2.61	2692.14	99.94	0.00	0.00
90	2.62	2688.21	99.75	0.00	0.00
120	2.63	2678.01	99.59	0.00	0.00
180	2.63	262.73	99.31	0.00	0.00

ตารางที่ ก.26 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 1.0%Ag-TiO₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 10 mg.L⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 1

เวลา (min)	pH	0.1%Ag-TiO ₂			
		FA	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺
0	2.61	2700.00	10.08	0.00	0.00
15	2.61	2700.00	10.08	0.00	0.00
30	2.61	2700.00	10.08	0.00	0.00
45	2.60	2700.00	10.08	0.00	0.00
60	2.59	2691.85	10.04	0.00	0.00
90	2.59	2681.01	9.87	0.00	0.00
120	2.59	2674.19	9.74	0.00	0.00
180	2.60	2660.89	9.14	0.00	0.00

ตารางที่ ก.27 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 1.0%Ag-TiO₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 25 mg.L⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 1

เวลา (min)	pH	0.1%Ag-TiO ₂			
		FA	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺
0	2.62	2700.00	25.15	0.00	0.00
15	2.62	2700.00	25.15	0.00	0.00
30	2.62	2700.00	25.15	0.00	0.00
45	2.61	2700.00	25.15	0.00	0.00
60	2.59	2700.00	25.15	0.00	0.00
90	2.60	2693.25	25.09	0.00	0.00
120	2.61	2687.02	24.45	0.00	0.00
180	2.62	2675.85	24.10	0.00	0.00

ตารางที่ ก.28 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 1.0%Ag-TiO₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 50 mg.L⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 1

เวลา (min)	pH	0.1%Ag-TiO ₂			
		FA	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺
0	2.61	2700.00	50.14	0.00	0.00
15	2.61	2700.00	50.14	0.00	0.00
30	2.59	2700.00	50.14	0.00	0.00
45	2.60	2700.00	50.14	0.00	0.00
60	2.61	2689.52	50.10	0.00	0.00
90	2.61	2676.02	49.87	0.00	0.00
120	2.59	2662.71	49.46	0.00	0.00
180	2.61	2651.01	49.10	0.00	0.00

ตารางที่ ก.29 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 1.0%Ag-TiO₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 75 mg.L⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 1

เวลา (min)	pH	0.1%Ag-TiO ₂			
		FA	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺
0	2.61	2700.00	75.04	0.00	0.00
15	2.61	2700.00	75.04	0.00	0.00
30	2.59	2700.00	75.04	0.00	0.00
45	2.60	2700.00	75.04	0.00	0.00
60	2.61	2700.00	75.04	0.00	0.00
90	2.61	2693.25	74.98	0.00	0.00
120	2.59	2684.36	74.83	0.00	0.00
180	2.61	2677.74	74.38	0.00	0.00

ตารางที่ ก.30 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 1.0%Ag-TiO₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 100 mg.L⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 1

เวลา (min)	pH	0.1%Ag-TiO ₂			
		FA	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺
0	2.61	2700.00	100.12	0.00	0.00
15	2.61	2700.00	100.12	0.00	0.00
30	2.59	2700.00	100.12	0.00	0.00
45	2.60	2700.00	100.12	0.00	0.00
60	2.61	2700.00	100.02	0.00	0.00
90	2.61	2694.74	99.89	0.00	0.00
120	2.59	2684.36	99.62	0.00	0.00
180	2.61	2674.74	99.03	0.00	0.00

ตารางที่ ก.31 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.1%Ag-TiO₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 10 mg.L⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 2

เวลา (min)	pH	0.1%Ag-TiO ₂			
		FA	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺
0	2.74	2700.00	10.15	0.00	0.00
15	2.72	2700.00	10.15	0.00	0.00
30	2.72	2700.00	10.15	0.00	0.00
45	2.68	2700.00	10.15	0.00	0.00
60	2.64	2700.00	10.15	0.00	0.00
90	2.62	2689.25	10.04	0.00	0.00
120	2.64	2674.36	9.96	0.00	0.00
180	2.61	26765.74	9.45	0.00	0.00

ตารางที่ ก.32 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.1%Ag-TiO₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 25 mg.L⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 2

เวลา (min)	pH	0.1%Ag-TiO ₂			
		FA	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺
0	2.76	2700.00	25.09	0.00	0.00
15	2.74	2700.00	25.09	0.00	0.00
30	2.73	2700.00	25.09	0.00	0.00
45	2.72	2700.00	25.09	0.00	0.00
60	2.63	2691.01	25.04	0.00	0.00
90	2.62	2686.74	24.93	0.00	0.00
120	2.61	2679.80	24.71	0.00	0.00
180	2.59	2667.24	24.20	0.00	0.00

ตารางที่ ก.33 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.1%Ag-TiO₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 50 mg.L⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 2

เวลา (min)	pH	0.1%Ag-TiO ₂			
		FA	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺
0	2.78	2700.00	50.12	0.00	0.00
15	2.76	2700.00	50.12	0.00	0.00
30	2.75	2700.00	5.12	0.00	0.00
45	2.75	2700.00	50.12	0.00	0.00
60	2.74	2696.01	50.04	0.00	0.00
90	2.73	2691.07	49.86	0.00	0.00
120	2.73	2682.36	49.43	0.00	0.00
180	2.72	2677.74	49.03	0.00	0.00

ตารางที่ ก.34 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.1%Ag-TiO₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 75 mg.L⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 2

เวลา (min)	pH	0.1%Ag-TiO ₂			
		FA	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺
0	2.76	2700.00	75.04	0.00	0.00
15	2.75	2700.00	75.04	0.00	0.00
30	2.75	2700.00	75.04	0.00	0.00
45	2.74	2700.00	75.04	0.00	0.00
60	2.75	2694.02	74.96	0.00	0.00
90	2.74	2686.10	74.83	0.00	0.00
120	2.73	2677.78	74.75	0.00	0.00
180	2.73	2663.04	74.05	0.00	0.00

ตารางที่ ก.35 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.1%Ag-TiO₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 100 mg.L⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 2

เวลา (min)	pH	0.1%Ag-TiO ₂			
		FA	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺
0	2.76	2700.00	100.07	0.00	0.00
15	2.76	2700.00	100.07	0.00	0.00
30	2.75	2700.00	100.07	0.00	0.00
45	2.73	2700.00	100.07	0.00	0.00
60	2.73	2700.00	100.07	0.00	0.00
90	2.72	2691.85	99.98	0.00	0.00
120	2.64	2686.46	99.73	0.00	0.00
180	2.63	2674.01	99.01	0.00	0.00

ตารางที่ ก.36 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.5%Ag-TiO₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 10 mg.L⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 2

เวลา (min)	pH	0.1%Ag-TiO ₂			
		FA	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺
0	2.81	2700.00	10.03	0.00	0.00
15	2.81	2700.00	10.03	0.00	0.00
30	2.80	2700.00	10.03	0.00	0.00
45	2.79	2700.00	10.03	0.00	0.00
60	2.79	2698.41	10.01	0.00	0.00
90	2.77	2691.01	9.98	0.00	0.00
120	2.77	2686.13	9.83	0.00	0.00
180	2.76	2674.72	9.43	0.00	0.00

ตารางที่ ก.37 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.5%Ag-TiO₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 25 mg.L⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 2

เวลา (min)	pH	0.1%Ag-TiO ₂			
		FA	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺
0	2.80	2700.00	25.11	0.00	0.00
15	2.80	2700.00	25.11	0.00	0.00
30	2.79	2700.00	25.11	0.00	0.00
45	2.78	2700.00	25.11	0.00	0.00
60	2.78	2692.41	25.07	0.00	0.00
90	2.77	2685.01	25.01	0.00	0.00
120	2.75	2674.13	24.94	0.00	0.00
180	2.73	2662.72	24.14	0.00	0.00

ตารางที่ ก.38 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.5%Ag-TiO₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 50 mg.L⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 2

เวลา (min)	pH	0.1%Ag-TiO ₂			
		FA	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺
0	2.79	2700.00	50.02	0.00	0.00
15	2.78	2700.00	50.02	0.00	0.00
30	2.77	2700.00	50.02	0.00	0.00
45	2.75	2700.00	50.02	0.00	0.00
60	2.72	2695.02	49.95	0.00	0.00
90	2.67	2687.41	49.82	0.00	0.00
120	2.64	2677.52	49.63	0.00	0.00
180	2.61	2669.01	49.21	0.00	0.00

ตารางที่ ก.39 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.5%Ag-TiO₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 75 mg.L⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 2

เวลา (min)	pH	0.1%Ag-TiO ₂			
		FA	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺
0	2.77	2700.00	75.04	0.00	0.00
15	2.76	2700.00	75.04	0.00	0.00
30	2.74	2700.00	75.04	0.00	0.00
45	2.73	2700.00	75.04	0.00	0.00
60	2.71	2694.41	75.01	0.00	0.00
90	2.68	2687.01	74.94	0.00	0.00
120	2.64	2663.13	74.75	0.00	0.00
180	2.61	2654.72	74.32	0.00	0.00

ตารางที่ ก.40 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.5%Ag-TiO₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 100 mg.L⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 2

เวลา (min)	pH	0.1%Ag-TiO ₂			
		FA	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺
0	2.79	2700.00	100.08	0.00	0.00
15	2.78	2700.00	100.08	0.00	0.00
30	2.76	2700.00	100.08	0.00	0.00
45	2.74	2700.00	100.08	0.00	0.00
60	2.70	2697.02	100.04	0.00	0.00
90	2.67	2690.41	99.98	0.00	0.00
120	2.64	2684.02	99.74	0.00	0.00
180	2.61	2673.94	99.06	0.00	0.00

ตารางที่ ก.41 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 1.0%Ag-TiO₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 10 mg.L⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 2

เวลา (min)	pH	0.1%Ag-TiO ₂			
		FA	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺
0	2.81	2700.00	10.11	0.00	0.00
15	2.77	2700.00	10.11	0.00	0.00
30	2.76	2700.00	10.11	0.00	0.00
45	2.74	2700.00	10.11	0.00	0.00
60	2.71	2694.71	10.04	0.00	0.00
90	2.68	2687.61	9.92	0.00	0.00
120	2.64	2663.14	9.45	0.00	0.00
180	2.62	2651.74	9.01	0.00	0.00

ตารางที่ ก.42 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 1.0%Ag-TiO₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 25 mg.L⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 2

เวลา (min)	pH	0.1%Ag-TiO ₂			
		FA	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺
0	2.78	2700.00	25.04	0.00	0.00
15	2.76	2700.00	25.04	0.00	0.00
30	2.75	2700.00	25.04	0.00	0.00
45	2.73	2700.00	25.04	0.00	0.00
60	2.71	2694.11	25.00	0.00	0.00
90	2.67	2687.91	24.83	0.00	0.00
120	2.64	2664.13	24.31	0.00	0.00
180	2.60	2657.72	24.03	0.00	0.00

ตารางที่ ก.43 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 1.0%Ag-TiO₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 50 mg.L⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 2

เวลา (min)	pH	0.1%Ag-TiO ₂			
		FA	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺
0	2.82	2700.00	50.05	0.00	0.00
15	2.80	2700.00	50.05	0.00	0.00
30	2.77	2700.00	50.05	0.00	0.00
45	2.75	2700.00	50.05	0.00	0.00
60	2.73	2693.41	50.01	0.00	0.00
90	2.69	2688.41	49.96	0.00	0.00
120	2.66	2678.13	49.45	0.00	0.00
180	2.62	2667.72	49.06	0.00	0.00

ตารางที่ ก.44 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 1.0%Ag-TiO₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 75 mg.L⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 2

เวลา (min)	pH	0.1%Ag-TiO ₂			
		FA	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺
0	2.79	2700.00	75.12	0.00	0.00
15	2.77	2700.00	75.12	0.00	0.00
30	2.77	2700.00	75.12	0.00	0.00
45	2.74	2700.00	75.12	0.00	0.00
60	2.68	2695.74	75.10	0.00	0.00
90	2.66	2684.22	75.04	0.00	0.00
120	2.63	2673.09	74.73	0.00	0.00
180	2.60	2663.01	74.13	0.00	0.00

ตารางที่ ก.45 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 1.0%Ag-TiO₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 100 mg.L⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 2

เวลา (min)	pH	0.1%Ag-TiO ₂			
		FA	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺
0	2.77	2700.00	100.10	0.00	0.00
15	2.74	2700.00	100.10	0.00	0.00
30	2.73	2700.00	100.10	0.00	0.00
45	2.69	2700.00	100.10	0.00	0.00
60	2.65	2695.32	100.04	0.00	0.00
90	2.62	2682.00	99.95	0.00	0.00
120	2.61	2671.71	99.32	0.00	0.00
180	2.58	2661.01	99.07	0.00	0.00

ตารางที่ ก.46 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.1%Ag-TiO₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 10 mg.L⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 3

เวลา (min)	pH	0.1%Ag-TiO ₂			
		FA	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺
0	9.13	-	10.03	0.00	0.00
15	9.10	-	10.03	0.00	0.00
30	8.98	-	10.03	0.00	0.00
45	8.95	-	10.03	0.00	0.00
60	8.80	-	10.03	0.00	0.00
90	8.75	-	10.03	0.00	0.00
120	8.73	-	10.03	0.00	0.00
180	8.74	-	10.03	0.00	0.00

ตารางที่ ก.47 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.1%Ag-TiO₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 25 mg.L⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 3

เวลา (min)	pH	0.1%Ag-TiO ₂			
		FA	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺
0	9.25	-	25.06	0.00	0.00
15	9.23	-	25.06	0.00	0.00
30	9.21	-	25.06	0.00	0.00
45	9.23	-	25.06	0.00	0.00
60	9.22	-	25.06	0.00	0.00
90	9.18	-	25.06	0.00	0.00
120	9.15	-	25.06	0.00	0.00
180	9.10	-	25.06	0.00	0.00

ตารางที่ ก.48 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.1%Ag-TiO₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 50 mg.L⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 3

เวลา (min)	pH	0.1%Ag-TiO ₂			
		FA	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺
0	9.32	-	50.04	0.00	0.00
15	9.31	-	50.04	0.00	0.00
30	9.29	-	50.04	0.00	0.00
45	9.25	-	50.04	0.00	0.00
60	9.21	-	50.04	0.00	0.00
90	9.18	-	50.04	0.00	0.00
120	9.14	-	50.04	0.00	0.00
180	9.10	-	50.04	0.00	0.00

ตารางที่ ก.49 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.1%Ag-TiO₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 75 mg.L⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 3

เวลา (min)	pH	0.1%Ag-TiO ₂			
		FA	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺
0	9.22	-	75.10	0.00	0.00
15	8.98	-	75.10	0.00	0.00
30	8.80	-	75.10	0.00	0.00
45	8.75	-	75.10	0.00	0.00
60	8.72	-	75.10	0.00	0.00
90	8.76	-	75.10	0.00	0.00
120	8.87	-	75.10	0.00	0.00
180	8.81	-	75.10	0.00	0.00

ตารางที่ ก.50 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.1%Ag-TiO₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 100 mg.L⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 3

เวลา (min)	pH	0.1%Ag-TiO ₂			
		FA	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺
0	9.25	-	100.13	0.00	0.00
15	9.13	-	100.13	0.00	0.00
30	8.89	-	100.13	0.00	0.00
45	8.82	-	100.13	0.00	0.00
60	8.74	-	100.13	0.00	0.00
90	8.65	-	100.13	0.00	0.00
120	8.75	-	100.13	0.00	0.00
180	8.84	-	100.13	0.00	0.00

ตารางที่ ก.51 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.5%Ag-TiO₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 10 mg.L⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 3

เวลา (min)	pH	0.1%Ag-TiO ₂			
		FA	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺
0	9.09	-	10.02	0.00	0.00
15	8.89	-	10.02	0.00	0.00
30	8.78	-	10.02	0.00	0.00
45	8.66	-	10.02	0.00	0.00
60	8.71	-	10.02	0.00	0.00
90	8.69	-	10.02	0.00	0.00
120	8.74	-	10.02	0.00	0.00
180	8.82	-	10.02	0.00	0.00

ตารางที่ ก.52 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.5%Ag-TiO₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 25 mg.L⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 3

เวลา (min)	pH	0.1%Ag-TiO ₂			
		FA	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺
0	9.17	-	25.07	0.00	0.00
15	8.98	-	25.07	0.00	0.00
30	8.86	-	25.07	0.00	0.00
45	8.73	-	25.07	0.00	0.00
60	8.64	-	25.07	0.00	0.00
90	8.87	-	25.07	0.00	0.00
120	8.56	-	25.07	0.00	0.00
180	8.74	-	25.07	0.00	0.00

ตารางที่ ก.53 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.5%Ag-TiO₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 50 mg.L⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 3

เวลา (min)	pH	0.1%Ag-TiO ₂			
		FA	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺
0	9.21	-	50.08	0.00	0.00
15	8.85	-	50.08	0.00	0.00
30	8.74	-	50.08	0.00	0.00
45	8.43	-	50.08	0.00	0.00
60	8.68	-	50.08	0.00	0.00
90	8.45	-	50.08	0.00	0.00
120	8.39	-	50.08	0.00	0.00
180	8.71	-	50.08	0.00	0.00

ตารางที่ ก.54 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.5%Ag-TiO₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 75 mg.L⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 3

เวลา (min)	pH	0.1%Ag-TiO ₂			
		FA	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺
0	9.24	-	75.05	0.00	0.00
15	8.89	-	75.05	0.00	0.00
30	8.79	-	75.05	0.00	0.00
45	8.64	-	75.05	0.00	0.00
60	8.38	-	75.05	0.00	0.00
90	8.65	-	75.05	0.00	0.00
120	8.71	-	75.05	0.00	0.00
180	8.81	-	75.05	0.00	0.00

ตารางที่ ก.55 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 0.5%Ag-TiO₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 100 mg.L⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 3

เวลา (min)	pH	0.1%Ag-TiO ₂			
		FA	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺
0	9.22	-	100.04	0.00	0.00
15	8.88	-	100.04	0.00	0.00
30	8.56	-	100.04	0.00	0.00
45	8.78	-	100.04	0.00	0.00
60	8.26	-	100.04	0.00	0.00
90	8.49	-	100.04	0.00	0.00
120	8.38	-	100.04	0.00	0.00
180	8.76	-	100.04	0.00	0.00

ตารางที่ ก.56 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 1.0%Ag-TiO₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 10 mg.L⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 3

เวลา (min)	pH	0.1%Ag-TiO ₂			
		FA	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺
0	10.10	-	10.07	0.00	0.00
15	10.08	-	10.07	0.00	0.00
30	9.98	-	10.07	0.00	0.00
45	9.94	-	10.07	0.00	0.00
60	9.87	-	10.07	0.00	0.00
90	9.87	-	10.07	0.00	0.00
120	9.86	-	10.07	0.00	0.00
180	9.86	-	10.07	0.00	0.00

ตารางที่ ก.57 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 1.0%Ag-TiO₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 25 mg.L⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 3

เวลา (min)	pH	0.1%Ag-TiO ₂			
		FA	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺
0	10.25	-	25.12	0.00	0.00
15	10.23	-	25.12	0.00	0.00
30	10.19	-	25.12	0.00	0.00
45	10.24	-	25.12	0.00	0.00
60	10.15	-	25.12	0.00	0.00
90	10.14	-	25.12	0.00	0.00
120	10.21	-	25.12	0.00	0.00
180	10.20	-	25.12	0.00	0.00

ตารางที่ ก.58 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 1.0%Ag-TiO₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 50 mg.L⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 3

เวลา (min)	pH	0.1%Ag-TiO ₂			
		FA	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺
0	10.32	-	50.14	0.00	0.00
15	10.31	-	50.14	0.00	0.00
30	10.29	-	50.14	0.00	0.00
45	10.25	-	50.14	0.00	0.00
60	10.26	-	50.14	0.00	0.00
90	10.21	-	50.14	0.00	0.00
120	10.19	-	50.14	0.00	0.00
180	10.30	-	50.14	0.00	0.00

ตารางที่ ก.59 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 1.0%Ag-TiO₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 75 mg.L⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 3

เวลา (min)	pH	0.1%Ag-TiO ₂			
		FA	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺
0	10.37	-	75.02	0.00	0.00
15	10.33	-	75.02	0.00	0.00
30	10.33	-	75.02	0.00	0.00
45	10.33	-	75.02	0.00	0.00
60	10.30	-	75.02	0.00	0.00
90	10.31	-	75.02	0.00	0.00
120	10.29	-	75.02	0.00	0.00
180	10.27	-	75.02	0.00	0.00

ตารางที่ ก.60 การบำบัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน โดยใช้ 1.0%Ag-TiO₂ ที่ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น 100 mg.L⁻¹ as N ในชุดควบคุมที่ 3

เวลา (min)	pH	0.1%Ag-TiO ₂			
		FA	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺
0	10.51	-	100.06	0.00	0.00
15	10.35	-	100.06	0.00	0.00
30	10.32	-	100.06	0.00	0.00
45	10.26	-	100.06	0.00	0.00
60	10.36	-	100.06	0.00	0.00
90	10.35	-	100.06	0.00	0.00
120	10.35	-	100.06	0.00	0.00
180	10.42	-	100.06	0.00	0.00

ภาคผนวก ข

ตารางแสดงผลการเปลี่ยนรูปของไนเตรต ที่เวลา 15 min



ตารางที่ ข.1 การเปลี่ยนรูปของไนเตรตเกิดที่ขึ้นในกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ระดับที่เวลา 15 min
0.1%Ag-TiO₂

[NO ₃ ⁻] ₀ (mg.L ⁻¹ as N)	Nitrate transformation (%)			
	[NO ₂ ⁻]	[NH ₄ ⁺]	[N ₂]	Total Nitrogen (%)
10	0.00	0.00	0.00	0.00
25	0.00	2.60	97.40	100.00
50	36.28	0.00	63.72	100.00
75	28.02	0.00	71.98	100.00
100	18.75	0.00	81.25	100.00

ตารางที่ ข.2 การเปลี่ยนรูปของไนเตรตเกิดที่ขึ้นในกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ระดับที่เวลา 15 min
0.5%Ag-TiO₂

[NO ₃ ⁻] ₀ (mg.L ⁻¹ as N)	Nitrate transformation (%)			
	[NO ₂ ⁻]	[NH ₄ ⁺]	[N ₂]	Total Nitrogen (%)
10	0.00	3.06	96.94	100.00
25	60.85	0.00	39.15	100.00
50	32.03	0.00	67.97	100.00
75	29.95	0.00	70.05	100.00
100	73.97	0.00	26.03	100.00

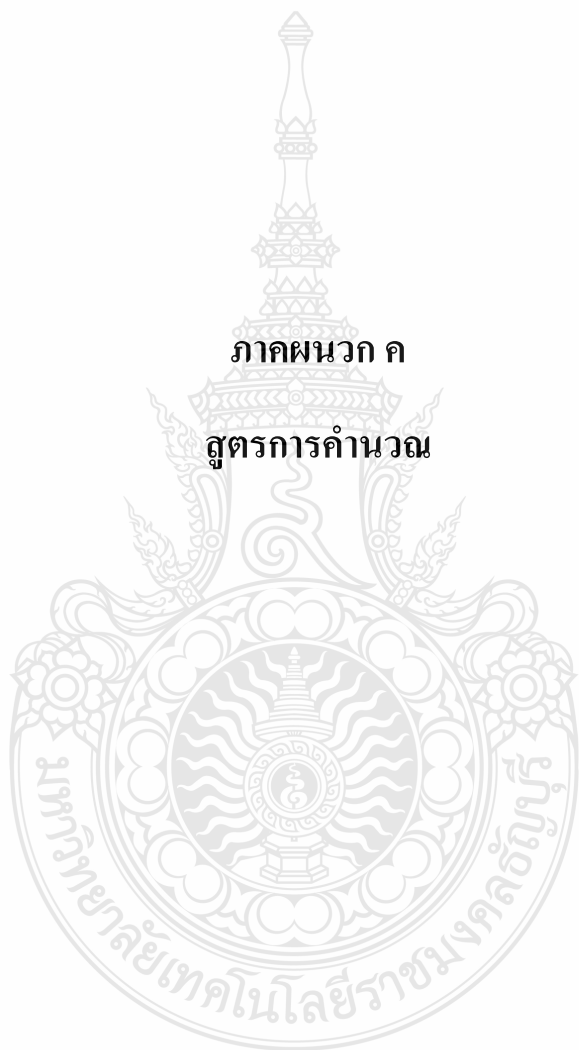
ตารางที่ ข.3 การเปลี่ยนรูปของไนเตรตเกิดที่ขึ้นในกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ระดับความเข้มข้นที่เวลา 15 min
1.0%Ag-TiO₂

[NO ₃ ⁻] ₀ (mg.L ⁻¹ as N)	Nitrate transformation (%)			
	[NO ₂ ⁻]	[NH ₄ ⁺]	[N ₂]	Total Nitrogen (%)
10	0.00	8.70	91.30	100.00
25	0.00	2.13	97.87	100.00
50	44.08	0.00	55.92	100.00
75	88.79	0.00	11.21	100.00
100	23.20	0.00	76.80	100.00



ภาคผนวก ค

สูตรการคำนวณ



สูตรการคำนวณ

1. การคำนวณความเข้มข้นของไนเตรตเริ่มต้นในกระบวนการโฟโตคะตะลิติก รีดักชัน

$$[\text{NO}_3^-] = \frac{(x+1.356)}{0.5836} \quad (1)$$

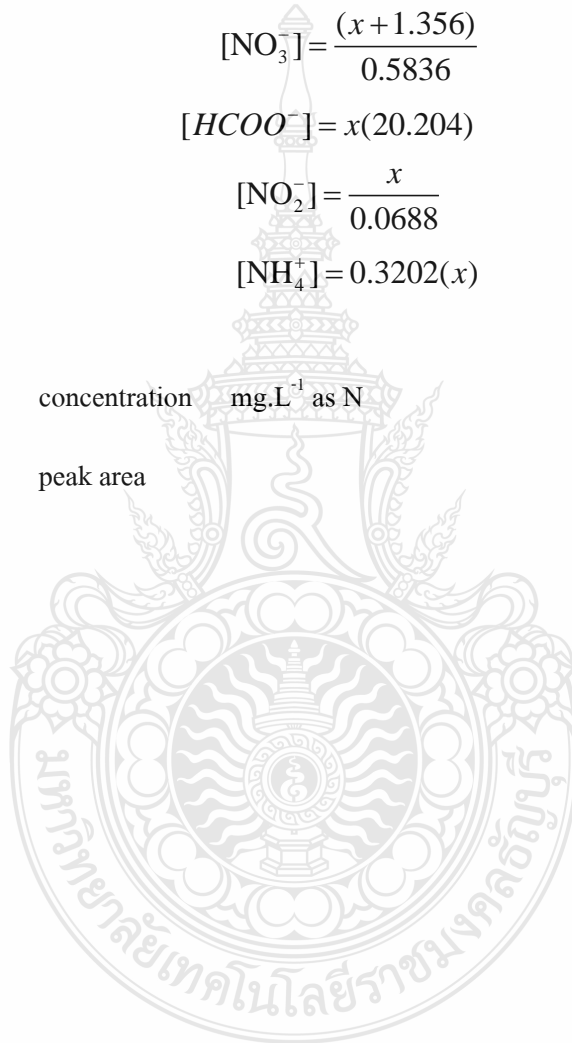
$$[\text{HCOO}^-] = x(20.204) \quad (2)$$

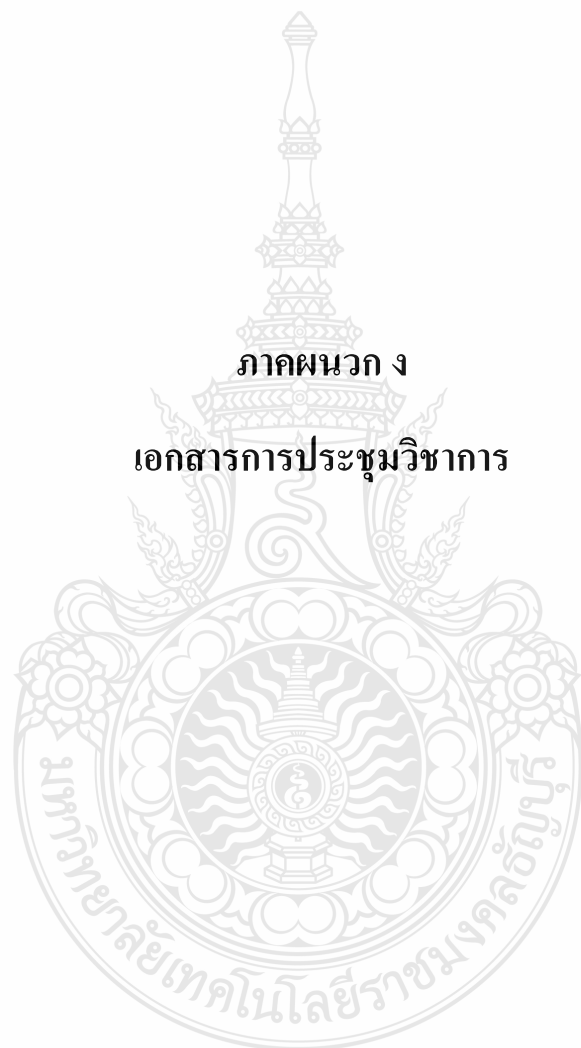
$$[\text{NO}_2^-] = \frac{x}{0.0688} \quad (3)$$

$$[\text{NH}_4^+] = 0.3202(x) \quad (4)$$

หมายเหตุ [] concentration mg.L^{-1} as N

x peak area





ภาคผนวก ง

เอกสารการประชุมวิชาการ



การประชุมวิชาการ วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 23

เอกสารประกอบการประชุมวิชาการ

วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ ๒๓

Proceeding of the 23rd National Convention on Civil Engineering

NCCE-23



ภายใต้หัวข้อการประชุม

วิศวกรรมโยธายุคใหม่กับการรับใช้สังคม

SMART Civil Engineering and Social Enterprise

18-20 กรกฎาคม 2561

ณ โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า
อำเภอเมือง จังหวัดนครนายก

จัดโดย

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย
ในพระบรมราชูปถัมภ์

กองวิชาวิศวกรรมโยธา
โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ





การประชุมวิชาการ วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 23
23rd National Convention on Civil Engineering

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ

รายชื่อ	สังกัด	สาขา
ศ.ดร. เอลิมซันน์ สก๊ิตระพจน์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	วิศวกรรมสำรวจและระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์
ศ.ดร. ชวลิต ชาลีรักษ์ตระกูล	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์	วิศวกรรมแหล่งน้ำ
ศ.ดร. ปิติ สุขคนธสุขกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	วิศวกรรมโครงสร้าง
		วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง
ศ.ดร. พาณิช วัฒนพิทักษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	วิศวกรรมปฐพี
รศ.ดร. เกษม ชูจารุกุล	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะและโลจิสติกส์
รศ.ดร. กิตติชัย ธนกรพิสัยสิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะและโลจิสติกส์
รศ.ดร. จักรพงษ์ พงษ์เพ็ง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	วิศวกรรมการบริหารงานก่อสร้าง
รศ.ดร. จิตติชัย รุจนกนกนาฏ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะและโลจิสติกส์
รศ.ดร. อัครชัย ไชติชญากร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	วิศวกรรมแหล่งน้ำ
รศ.ดร. ชวเลศ วัฒนวิวัฒน์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตบางเขน	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะและโลจิสติกส์
รศ.ดร. ติญญ เมธากุลชาติ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	วิศวกรรมสำรวจและระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์
รศ.ดร. ทวีช พูลเงิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	วิศวกรรมโครงสร้าง
		วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง
รศ.ดร. ธนกร ชมภูรัตน์	มหาวิทยาลัยพะเยา	วิศวกรรมปฐพี
รศ.ดร. ธนพร สุปรีย์ศิลป์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	วิศวกรรมโครงสร้างพื้นฐาน
รศ.ดร. บวร อิศรางกูร ณ อยุธยา	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา	วิศวกรรมแหล่งน้ำ
		วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง
		วิศวกรรมการบริหารงานก่อสร้าง
รศ.ดร. บุรฉัตร อัครวีระ	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต	วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง
รศ.ดร. พงศกร พรรณรัตนศิลป์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	วิศวกรรมปฐพี
รศ.ดร. พนกฤษณ คลังบุญครอง	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะและโลจิสติกส์
รศ.ดร. พรเกษม จงประดิษฐ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	วิศวกรรมปฐพี



รายนามผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ

รายชื่อ	สังกัด	สาขา
รศ.พีชรี หอวิจิตร	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและพลังงาน
รศ.ดร. พิกษา แจ่มสว่าง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	วิศวกรรมปฐพี
รศ.ดร. วรัช ก้องกิจกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	วิศวกรรมปฐพี
รศ.ดร. วิโรจน์ บุญญภิญโญ	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต	วิศวกรรมโครงสร้าง
รศ.ดร. วิจิต ปานสุข	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	วิศวกรรมโครงสร้าง วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง
รศ.ดร. วิสุทธิ ช่อวิเชียร	มหาวิทยาลัยนเรศวร	วิศวกรรมการบริหารงานก่อสร้าง วิศวกรรมโยธาและการศึกษา
รศ.ดร. วีรยา ฉิมอ้อย	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต	วิศวกรรมปฐพี
รศ.ดร. ศรีเลิศ ไซตพันธ์รัตน์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	วิศวกรรมแหล่งน้ำ วิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและพลังงาน
รศ.ดร. สมชาย ปฐุมศิริ	มหาวิทยาลัยมหิดล	วิศวกรรมการบริหารงานก่อสร้าง วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะและโลจิสติกส์ วิศวกรรมโยธาและการศึกษา
รศ.ดร. สิทธิชัย แสงอาทิตย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	วิศวกรรมโครงสร้าง วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง
รศ.ดร. สุนิติ สุภาพ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	วิศวกรรมโครงสร้าง
รศ.ดร. สุนา ราษฎร์กิติ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและพลังงาน
รศ.ดร. แหลมทอง เหล่าคงการ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	วิศวกรรมการบริหารงานก่อสร้าง
รศ.ดร. อภินิติ ไซตสังกาศ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	วิศวกรรมปฐพี
รศ.ดร. อัครวิชร์ เล่นวารี	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	วิศวกรรมโครงสร้าง
รศ.ดร. อำพล ทารุณสุนทวงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะและโลจิสติกส์
รศ.ดร. อума สิญญะเรือง	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	วิศวกรรมแหล่งน้ำ
ผศ.ดร. เกียรติสุดา สมนา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง วิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและพลังงาน
ผศ.ดร. ทมล อมรฟ้า	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน	วิศวกรรมปฐพี



การประชุมวิชาการ วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 23
23rd National Convention on Civil Engineering

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ

รายชื่อ	สังกัด	สาขา
พศ.ดร. กริสน์ ชัยมูล	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	วิศวกรรมโครงสร้าง วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง
พศ.ดร. เจริญชัย ฤทธิฤท	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง
พศ.ดร. จักขดา อ่างวุฒิ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	วิศวกรรมโครงสร้าง วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง
พศ.ดร. วัชร สุจินดา	มหาวิทยาลัยศรีปทุม	วิศวกรรมโครงสร้าง
พศ.ดร. วัชรพันธ์ จินตนาภักดี	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	วิศวกรรมโครงสร้าง
พ.อ.พศ.ชวน จันทวาลย์	โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า	วิศวกรรมโยธาและการศึกษา
พศ.ดร. ชินพัฒน์ นิวชาติ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	วิศวกรรมโครงสร้าง วิศวกรรมโยธาและการศึกษา
พศ.ฐิตาภรณ์ พ่อนุตรดี	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ	วิศวกรรมกรรมการบริหารงานก่อสร้าง
พ.อ.พศ.ดร. กวีพร บุตยะสกุล	โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า	วิศวกรรมโครงสร้าง
พศ.ดร. ดวงฤดี ไชยศักดิ์วงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี	วิศวกรรมแหล่งน้ำ วิศวกรรมโยธาและการศึกษา
พศ.ต่อศักดิ์ ประเสริฐสิงห์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ สกลนคร	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะ และ-โลจิสติกส์
พศ.ดร. ทรงเกียรติ ภัทรนิคมวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและพลังงาน
พศ.กวีศักดิ์ ศรีจันทร์อินทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชมงคลสุวรรณภูมิ	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะ และ-โลจิสติกส์
พศ.ดร. ธนศ ศรีศิริโรจนาร	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	วิศวกรรมปฐพี
พศ.ดร. ธนากร กุจินำ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง
พศ.ดร. ธนาคล คงสมบูรณ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	วิศวกรรมปฐพี
พศ.ดร. ธิดารัตน์ จิระวัฒนาสกุล	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (บางเขน)	วิศวกรรมโครงสร้าง วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง
พศ.ดร. ธิดารัตน์ บุญศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี	วิศวกรรมแหล่งน้ำ วิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและพลังงาน
พศ.ดร. นันทวัฒน์ นพหวน	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน	วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง
พศ.นิรช นกแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะ และ-โลจิสติกส์



รายนามผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ

รายชื่อ	สังกัด	สาขา
พศ.ดร. ปกรณ์ ดิษฐกิจ	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์	วิศวกรรมแหล่งน้ำ
พศ.ดร. ปฐเบศ ภาวนิตพจนาน	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	วิศวกรรมโครงสร้าง
พศ.ดร. ปณิศจัยย ชาญโชติศักดิ์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	วิศวกรรมโครงสร้าง
พศ.ดร. ประเมศวร์ เหลือเทพ	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะและโลจิสติกส์
พศ.ดร. ประชา บุญยวานิชกุล	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	วิศวกรรมและเทคโนโลยีการป้องกันประเทศ
พศ.ดร. ปรียาพร โทงา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	วิศวกรรมแหล่งน้ำ
พศ.ดร. ปิติศานต์ กรำมาศ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง
พศ.ดร. ไพจิตร ภาวัน	มหาวิทยาลัยศรีปทุม	วิศวกรรมการบริหารงานก่อสร้าง
พศ.ดร. พงษ์ธร จุฬพันธ์ทอง	มหาวิทยาลัยนครสวรรค์	วิศวกรรมโครงสร้าง วิศวกรรมปฐพี วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะและโลจิสติกส์
พศ.ดร. พรพจน์ ต้นเสียง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	วิศวกรรมปฐพี
พศ.ดร. ภาณุวัฒน์ จ้อยกลัด	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	วิศวกรรมโครงสร้าง วิศวกรรมปฐพี วิศวกรรมโยธาและการศึกษา วิศวกรรมและเทคโนโลยีการป้องกันประเทศ
พศ.ทาวิต ไชยชาตนาวิก	มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะและโลจิสติกส์
พศ.ดร. กาสกร ชัยวิริยะวงศ์	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	วิศวกรรมโครงสร้าง วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง วิศวกรรมโครงสร้างพื้นฐาน วิศวกรรมโยธาและการศึกษา วิศวกรรมและเทคโนโลยีการป้องกันประเทศ
พศ.ดร. รัฐพล ภู่นพพาพันธ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะและโลจิสติกส์
พ.อ.พศ.วสันต์ พัฒน์วิชัยโชติ	โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า	วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง
พศ.ดร. วัฒนวงศ์ ทรัพย์ละ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	วิศวกรรมโครงสร้าง



การประชุมวิชาการ วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 23
23rd National Convention on Civil Engineering

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ

รายชื่อ	สังกัด	สาขา
	วิทยาเขตเฉลิม	วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง
พศ.ดร. วิชุดา กล้าเวช	มหาวิทยาลัยทักษิณ	วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง
พศ.ดร. วิษุวัตน์ แต่สมบัติ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน	วิศวกรรมแหล่งน้ำ
พศ.ดร. สโรช บุญศิริพันธ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะ และโลจิสติกส์
พศ.ดร. สกลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ	มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง	วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง
พศ.ดร. สมบูรณ์ เชียงวิน	มหาวิทยาลัยพะเยา	วิศวกรรมโครงสร้าง
พศ.ดร. สยาม ยิมศิริ	มหาวิทยาลัยบูรพา	วิศวกรรมปฐพี
พศ.ดร. สรณกร เหมะวิบูลย์	มหาวิทยาลัยนเรศวร	วิศวกรรมโครงสร้าง วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง
พศ.ดร. สิกรา เจนศิริศักดิ์	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะ และโลจิสติกส์
พศ.ดร. สิริกัญญา ทองชาติ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน	วิศวกรรมปฐพี
พศ.ดร. สุชัญญา ไปยะนันท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าพระนครเหนือ	วิศวกรรมการบริหารงานก่อสร้าง
พศ.ดร. สุนิรินทร์ เพชรรัตน์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	วิศวกรรมสำรวจและระบบ สารสนเทศภูมิศาสตร์
พศ.ดร. สุนิรัตน์ กุศดาศัย	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	วิศวกรรมการบริหารงานก่อสร้าง
พศ.ดร. สุภาพร แก้วก้อยเสียวไพโรจน์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะ และโลจิสติกส์
พศ.ดร. สุรมศร์ พิริยะวัฒน์	มหาวิทยาลัยบูรพา	วิศวกรรมโครงสร้างพื้นฐาน วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะ และโลจิสติกส์
พศ.ดร. สุริยาอูร ประอ้าย	มหาวิทยาลัยพะเยา	วิศวกรรมปฐพี
พศ.ดร. เหมือนนาศ วิเชียรสินธุ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะ และโลจิสติกส์
พศ.ดร. เวกชัย ศิริกิจพานิชย์กุล	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะ และโลจิสติกส์
พศ.ดร. เอกสิทธิ์ ไชยิตสกุลชัย	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน	วิศวกรรมโครงสร้างพื้นฐาน วิศวกรรมแหล่งน้ำ



รายนามผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ

รายชื่อ	สังกัด	สาขา
พ.อ.พศ.ดร. อนันต์ ปิจวิทย์	โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า	วิศวกรรมการบริหารงานก่อสร้าง
พศ.ดร. อนุสรณ์ บุญปก	มหาวิทยาลัยพะเยา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและพลังงาน
พศ.ดร. อภิชาติ คำกาหล้า	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง วิศวกรรมปฐพี
พศ. ดร. อรรถนพ วงศ์เรือง	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและพลังงาน
อ.ดร. เกรียงไกร อรุโณทยานันท์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะ และโลจิสติกส์
อ.ดร. กรกฎ นุสิทธิ์	สถานวิจัยเพื่อความเลิศทางวิชาการ ด้านเทคโนโลยีพลังงานและสิ่งแวดล้อม หน่วยวิจัยด้านการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ ทรัพยากรธรรมชาติและภัยพิบัติ	วิศวกรรมปฐพี
ร.อ.กฤษฎา ศรีโพธิ์อ่อน	โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า	วิศวกรรมโครงสร้าง
ดร. กิตติ ทรัพย์ประสม	ผู้อำนวยการแขวงทางหลวงชนบทสุรินทร์ ที่ปรึกษาคณะอนุกรรมการการศึกษา ด้านโลจิสติกส์	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะ และโลจิสติกส์
ดร. จตุพล ตังปภาสิต	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง
อ.ดร. จักรพันธ์ เทือกดี	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	วิศวกรรมโครงสร้าง วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง
อ.ดร. ชัยวัฒน์ เอกวัฒน์พานิชย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี	วิศวกรรมแหล่งน้ำ
ดร. ชานูชัย ศรีสุวรรณ	สำนักสำรวจด้านวิศวกรรม และธรณี กรมชลประทาน	วิศวกรรมปฐพี
อ.ดร. ชานูยุทธ กภาพกาญจน์	มหาวิทยาลัยบูรพา	วิศวกรรมแหล่งน้ำ
อ.ดร. ชูกลพัศ เจนจิวัฒน์กุล	มหาวิทยาลัยสยาม	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะ และโลจิสติกส์
ดร. ณัฐกรณ์ เจริญธรรม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะ และโลจิสติกส์
พ.อ.ณัฐภูมิ ศรีเพชร	โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะ และโลจิสติกส์
ดร. ณัฐวุฒิ ธนศรีสถิตย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าพระนครเหนือ	วิศวกรรมโครงสร้าง



การประชุมวิชาการ วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 23
23rd National Convention on Civil Engineering

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ

รายชื่อ	สังกัด	สาขา
ดร. ศุภฤกษ์ สติระเศรษฐิกวี	มหาวิทยาลัยนเรศวร	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะและโลจิสติกส์
ร.อ.ดร. ต้อมการ แก้วเฉลิมทอง	โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า	วิศวกรรมกรรมการบริหารงานก่อสร้าง
ดร. ทนงศักดิ์ อิ่มใจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก	วิศวกรรมโครงสร้าง
ดร. ทายากร จันทรางศุ	กรมโยธาธิการและผังเมือง	วิศวกรรมโครงสร้าง
ดร. ทรงฤทธิ์ ชยานันท์	กรมทางหลวง	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะและโลจิสติกส์
ดร. ทวีพงษ์ สุภสวัสดิ์	สำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนากรมทางหลวงชนบท	วิศวกรรมปฐพี
อ.ดร. ธิรพงษ์ สิริโพรงน์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	วิศวกรรมโครงสร้างพื้นฐาน วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะและโลจิสติกส์
อ.ดร. นพคุณ บุญกระพือ	มหาวิทยาลัยบูรพา	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะและโลจิสติกส์
ดร. นพพล กระประเสริฐ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะและโลจิสติกส์
อ.บุญพล มีไชย	มหาวิทยาลัยนเรศวร	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะและโลจิสติกส์
อ.ดร. ปรางกานา ประชาบุรุษย์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและพลังงาน
ดร. ปรีดา ไชยมหาวัน	มหาวิทยาลัยพะเยา	วิศวกรรมโครงสร้าง
อ.ดร. ปรีดา พิชยาพันธ์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะและโลจิสติกส์
อ.ดร. ปิยนุช ใจแก้ว	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและพลังงาน
ดร. พัฒนพงษ์ ไตภาคาม	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	วิศวกรรมโครงสร้าง วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง
ดร. พิทรพงษ์ อาสนจินดา	มหาวิทยาลัยบูรพา	วิศวกรรมโครงสร้าง วิศวกรรมโยธาและการศึกษา
ดร. พันธุ์วี กองบุญเทียม	มหาวิทยาลัยแม่โจ้	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะและโลจิสติกส์



รายนามผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ

รายชื่อ	สังกัด	สาขา
พ.ต.พีรศักดิ์ เอี่ยมละออ	โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า	วิศวกรรมแหล่งน้ำ
อ.ภคพงศ์ หอมเนียม	มหาวิทยาลัยนเรศวร	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะ- และโลจิสติกส์ วิศวกรรมสำรวจและ- ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์
ดร. กัทสินพ ศิลปาจารย์	กรมทางหลวง	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะ- และโลจิสติกส์
อ.ภัทรมาศ เทียมเงิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชมงคลสุวรรณภูมิ (ศูนย์นนทบุรี)	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและพลังงาน
ดร. ภาคภูมิ ธีรรัตน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและพลังงาน
ดร. นนทิยา เสริมกิจ	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์	วิศวกรรมโครงสร้าง
คุณรัฐธรรม อัสโรฟาร	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	วิศวกรรมปฐพี
ดร. วรณวรางค์ รัตนนิคม	มหาวิทยาลัยบูรพา	วิศวกรรมปฐพี
ดร. วรศักดิ์ จักรปิยะนันท์	บริษัท พร็อพเพอร์ตี้ เพอร์เฟค จำกัด (มหาชน)	วิศวกรรมโครงสร้าง
อ.ดร. วรนิธ บุญย-โรจน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชมงคลพระนคร	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและพลังงาน
อ.ดร. วิชัยรัตน์ ก้าวเจือ	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	วิศวกรรมโครงสร้าง วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง
อ.วิชานันท์ ชะน้าย	มหาวิทยาลัยราชภัฏราชชนนครินทร์	วิศวกรรมการบริหารงานก่อสร้าง
ดร. วีรพันธ์ เจียมมีปรีชา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน	วิศวกรรมโครงสร้าง
ดร. เสกียง เจริญเหรียญ	กรมโยธาธิการและผังเมือง	วิศวกรรมโครงสร้าง
ดร. แสงสุรีย์ พังแดง	มหาวิทยาลัยนครพนม	วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง
ดร. สมรยา ทองอรุณศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชมงคลล้านนา ตาก	วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง
อ.ดร. สมชาย ดอนเจดีย์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน	วิศวกรรมแหล่งน้ำ
ดร. สฤกษ์ดี ศิษะวงศ์สุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะ- และโลจิสติกส์ วิศวกรรมโครงสร้างพื้นฐาน วิศวกรรมสำรวจและ- ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์



การประชุมวิชาการ วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 23
23rd National Convention on Civil Engineering

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ

รายชื่อ	สังกัด	สาขา
สสิกรณณ์ เหลืองวิชเชษฐ	มหาวิทยาลัยนครสวรรค์	วิศวกรรมโครงสร้าง
ดร. สิกธิภัทร์ เอื้ออภิวัชร	มหาวิทยาลัยบูรพา	วิศวกรรมปฐพี
ดร. สุกิจ ยินดีสุข	สำนักก่อสร้างสะพาน กรมทางหลวง	วิศวกรรมโครงสร้าง
ดร. สุศา อธิรสกรณรัตน์	ศูนย์วิจัยและฝึกอบรมด้านสิ่งแวดล้อม กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและพลังงาน
อ.สุทธิพงษ์ มีโย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะ และโลจิสติกส์
ดร. สุรชาติพย สีนิง	มหาวิทยาลัยมหิดล	วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และพลังงาน
สุธารัตน์ หมั่นมี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและพลังงาน
อ.ดร. สุริดา ทีปรัถยพันธ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและพลังงาน
อ.สุนิศา คุณารักษ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	วิศวกรรมและเทคโนโลยี การป้องกันประเทศ
อ.สุรัตน์ ศรีจันทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	วิศวกรรมปฐพี
ดร. หริส ประสารว่า	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	วิศวกรรมแหล่งน้ำ
อ.หวิงแก้ว บุญสอน	มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล	วิศวกรรมโครงสร้าง วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง วิศวกรรมโยธาและการศึกษา
คุณเอกรินทร์ เหลืองวิสัย	กองวิจัยและพัฒนา การทางพิเศษแห่งประเทศไทย	วิศวกรรมปฐพี
ดร. อติเทพ ศรีคงศรี	สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์	วิศวกรรมปฐพี วิศวกรรมโยธาและการศึกษา
ดร. อนันต์ นันทวัฒน์	มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี (ศูนย์สาบพร้าว)	วิศวกรรมโครงสร้าง
ดร. อนุวัติ อรรถไชยวุฒิ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาลัยเกษตรศรีราชา	วิศวกรรมโครงสร้าง วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง



รายนามผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ

รายชื่อ	สังกัด	สาขา
อ.ดร. อรรถมล วจอภิสักดิ์	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะและโลจิสติกส์
อ.ดร. อรรถวิทย์ อุปโยคิน	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะและโลจิสติกส์
อ.ดร. อรอนงค์ ลากปรีสุภธิ์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและพลังงาน
อ.ดร. อัฐสิทธิ์ ศิริวิชารัตน์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	วิศวกรรมปฐพี
ดร. อำนาจ ฤทธิรงค์	บจก.วิศวกรที่ปรึกษา 535	วิศวกรรมปฐพี





สารบัญบทความ	หน้า
วิศวกรรมโครงสร้าง (Structural Engineering, STR)	1-53
วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง (Construction Material Engineering, MAT)	55-111
วิศวกรรมการบริหารงานก่อสร้าง (Construction Engineering and Management, CEM)	113-182
วิศวกรรมปฐพี (Geotechnical Engineering, GTE)	183-240
วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะ และโลจิสติกส์ (Intelligent Transportation, Traffic and Logistics Engineering, TRL)	241-302
วิศวกรรมแหล่งน้ำ (Water Resource Engineering, WRE)	303-336
วิศวกรรมสำรวจและระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Survey and Geographic Information System Engineering, SGI)	337-356
วิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและพลังงาน (Environmental and Energy Engineering, ENV)	357-378
วิศวกรรมโครงสร้างพื้นฐาน (Infrastructure Engineering, INF)	379-384
วิศวกรรมโยธาและการศึกษา (Civil Engineering and Education, CEE)	385-392
วิศวกรรมและเทคโนโลยีการป้องกันประเทศ (Defense Engineering and Technology, STR)	393-398



การประชุมวิชาการ วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 23
23rd National Convention on Civil Engineering

ENV08
ID193

Nitrate Removal Using Photocatalytic Reduction Process with Ag-TiO₂ Catalyst

Sunee Kwanyuen¹ Thammasak Rojviroon^{2,*} Orawan Rojviroon³ and Sanya Sirivithayapakorn⁴

^{1,2,3} Department of Environmental Engineer, Faculty of Engineering, Kasetsart University

⁴ Department of Civil Engineer, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

*Corresponding author; E-mail address: Sunee_k@mail.mutt.ac.th

Abstract

This research aims to study the efficiency of nitrate (NO₃-N) removal by photocatalytic reduction process using Ag doped TiO₂ (Ag-TiO₂) nanopowder catalyst. The Ag-TiO₂ was prepared by composite colloid deposition under low temperature with acidic condition. Ag was doped into TiO₂ film by 3 different mounts, i.e. 0.1%, 0.5% and 1.0% weight to volume. The physical characteristics of the catalyst prepared were investigated by X-ray fluorescence spectrometer (XRF) and Brunauer, Emmett and Teller analyser (BET). The efficiency of photocatalytic reduction of nitrate removal was evaluated from nitrate removal with initial nitrate concentration of 100 mg.L⁻¹ as N under UVA light source of 1,000 UW.cm⁻². The highest efficiency of photocatalytic reduction process for nitrate removal was 97.23% within 90 min. In addition, the selectivity (S) of nitrogen conversion in photocatalytic reduction process were 7.17%, 2.30% and 90.53%, for nitrite, ammonia and nitrogen, respectively.

Keywords: for nitrite, ammonia and nitrogen, respectively.

การกำจัดไนเตรดด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ศึกษาร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน

สุนีย์ ขวัญยูน¹ ธรรมศักดิ์ โรจนวิโรจน์^{2,*} อรวรรณ โรจนวิโรจน์³ และ สันญา สิริวิทย์วิทยapakorn⁴

^{1,2,3} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จ.ปทุมธานี

⁴ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร

*Corresponding author; E-mail address: thammasak.roj@en.mutt.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรดในโตรเจน (NO₃-N) ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ศึกษาร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน (Ag-TiO₂) ที่เตรียมขึ้นด้วยวิธีการ Composite Colloid Deposition ภายใต้สภาวะกรดและอุณหภูมิต่ำ โดยใช้การเจือเงินในปริมาณที่แตกต่างกัน 3 ค่า ได้แก่ 0.1%, 0.5% และ 1.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาณรวม ทั้งศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นด้วยอุปกรณ์ X-ray fluorescence spectrometer (XRF) และ Brunauer, Emmett and Teller analyser (BET) สำหรับการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรดในโตรเจนที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 100 mg.L⁻¹ as N ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ศึกษาร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวข้างต้นร่วมกับแหล่งกำเนิดแสง UVA ที่มีความเข้มแสง 1,000 UW.cm⁻² พบว่า กระบวนการดังกล่าวสามารถกำจัดไนเตรดในโตรเจนโดยมีประสิทธิภาพสูงสุด เท่ากับ 97.23% ที่เวลา 90 min โดยเมื่อพิจารณาว่า selectivity (S) ของการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนในกระบวนการดังกล่าว พบว่าค่า selectivity ของไนโตรเจนรูปอื่น ๆ มีค่าเท่ากับ 7.17%, 2.30% และ 90.53% สำหรับไนเตรด แอมโมเนีย และไนโตรเจน ตามลำดับ

คำสำคัญ: โฟโตคะตะลิติก, ไนเตรดรีดักชัน, การเปลี่ยนรูปไนโตรเจน, สารเติม



การกำจัดไนเตรดด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ดัดกันร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา

ไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน

Nitrate Removal Using Photocatalytic Reduction Process with Ag-TiO₂ Catalyst

สุนีย์ ขวัญยืน¹ ธรรมศักดิ์ โจนันวิรุฬห์² อรรวรรณ โจนันวิรุฬห์ และ สัญญา สิริวิทยากรณ์³

^{1,2,3} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จ.ปทุมธานี

⁴ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จ.กรุงเทพฯ

*Corresponding author; E-mail address: thammakr@en.mutl.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรดในโตรเจน (NO₃-N) ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ดัดกันร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน (Ag-TiO₂) ที่เตรียมขึ้นด้วยวิธีการ Composite colloid deposition ภายใต้สภาวะกรดและอุณหภูมิต่ำ โดยใช้การเจือเงินในปริมาณที่แตกต่างกัน 3 ค่า ได้แก่ 0.1%, 0.5% และ 1.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร รวมทั้งศึกษา ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นด้วยอุปกรณ์ X-ray fluorescence spectrometer (XRF) และ Brunauer, Emmett and Teller analyser (BET) ซึ่งสามารถระบุองค์ประกอบของธาตุในตัวเร่งปฏิกิริยาและพื้นที่ผิวเฉพาะ โดยผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาผง Ag-TiO₂ ที่เตรียมขึ้นทั้งหมดมีองค์ประกอบของ TiO₂ และ Ag เป็นไปตามที่ต้องการ สำหรับการศึกษาดูประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรดในโตรเจนที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 100 mg.L⁻¹ as N ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ดัดกันร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวข้างต้นร่วมกับแหล่งกำเนิดแสง UVA ที่มีความเข้มแสง 1,000 μW.cm² พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมและดีที่สุดคือ 1.0%Ag-TiO₂ โดยสามารถกำจัดไนเตรดในโตรเจนโดยมีประสิทธิภาพสูงสุด เท่ากับ 97.55% ที่เวลา 180 min และมีอัตราการกำจัดไนเตรดสูงสุด เท่ากับ 1.08 mg.L⁻¹.min⁻¹ as N โดยเมื่อพิจารณาค่า selectivity (S) ของการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนที่เวลา 90 min ในกระบวนการดังกล่าว พบว่าค่า selectivity ของไนโตรเจนรูปอื่น ๆ มีค่าเท่ากับ 7.17%, 2.30% และ 90.53% สำหรับไนไตรต์ (S_{NO₂⁻}), แอมโมเนีย (S_{NH₄⁺}) และไนโตรเจน (S_{N₂}) ตามลำดับ

คำสำคัญ: โฟโตรีดักชัน, ไนเตรดรีดักชัน, การเปลี่ยนรูปไนโตรเจน, สารได้ป

Abstract

This research aims to study the efficiency of nitrate (NO₃-N) removal by photocatalytic reduction process using Ag doped TiO₂ (Ag-TiO₂) nanopowder catalyst. The Ag-TiO₂ was prepared by composite colloid deposition under low temperature with acidic condition. Ag was doped into TiO₂ film by 3 different amounts, i.e. 0.1%, 0.5% and 1.0% weight to volume. The physical characteristics of the catalyst prepared were investigated by X-ray fluorescence spectrometer (XRF) and Brunauer, Emmett and Teller analyser (BET) that can identified elements and specific surface area of the catalyst prepared. The results showed that the all of Ag-TiO₂ nanopowder catalyst has the required components. The efficiency of photocatalytic reduction of nitrate removal was evaluated from nitrate removal with initial nitrate concentration of 100 mg.L⁻¹ as N under UVA light source of 1,000 μW.cm². The highest efficiency of photocatalytic reduction process for nitrate removal was 97.55% within 180 min and the highest reaction rate for NO₃⁻ removal was 1.08 mg.L⁻¹.min⁻¹ as N. In addition, the selectivity (S) of nitrogen conversion in photocatalytic reduction process at 90 min were 7.17%, 2.30% and 90.53%, for nitrite (S_{NO₂⁻}), ammonia (S_{NH₄⁺}) and nitrogen (S_{N₂}), respectively.

1. บทนำ

แหล่งกำเนิดของน้ำเสียที่มีผลกระทบต่อระบบนิเวศน์ทางน้ำ โดยทั่วไปแล้วสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ น้ำทิ้งจากชุมชน น้ำทิ้งจากภาคอุตสาหกรรม และน้ำทิ้งจากภาคเกษตรกรรม ทั้งนี้ปัญหาหลักของการบำบัดน้ำทิ้งอย่างหนึ่ง คือ น้ำทิ้งที่มีองค์ประกอบของสารอาหารกลุ่มไนโตรเจนและฟอสฟอรัสซึ่งบำบัดได้ยาก

และยังเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดสภาวะยูโทรฟิเคชันทำให้สาหร่ายในแหล่งน้ำเกิดการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว [1-5]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นในการกำจัดไนโตรเจนในโตรเจน โดยใช้กระบวนการโฟโตคะตะลิสต์กึ่งตัวนำ ซึ่งเป็นกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา และแสงอัลตราไวโอเล็ต ทั้งนี้วัตถุประสงค์หลักในงานวิจัยนี้ ได้แก่ การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน (Ag-TiO₂) ในปริมาณที่ต่างกันด้วยวิธี Composite Colloid Deposition รวมทั้งนำตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวมาทดสอบหาประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนในโตรเจนร่วมกับกระบวนการโฟโตคะตะลิสต์กึ่งตัวนำ

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาผง Ag-TiO₂

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาผง Ag-TiO₂ โดยใช้สารตั้งต้นผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) ผสมกับตัวทำละลายกรดฟอร์มิก (HCOOH) ในอัตราส่วน 1:6.7 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ปรับ pH ให้เท่ากับ 2 ด้วยกรดไนตริก (HNO₃) สำหรับการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาผง 0.1%Ag-TiO₂, 0.5%Ag-TiO₂ และ 1.0%Ag-TiO₂ เตรียมโดยเติมซิลเวอร์ไนเตรต (AgNO₃) ในอัตราส่วน 0.1%, 0.5% และ 1.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร กวนและผสมและใส่ภาควัดด้วยแก๊สไนโตรเจนในที่มีดเป็นเวลา 1 hr จากนั้นนำไปล้างปรับ pH ให้เป็นกลาง และทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 24 hr ซึ่งจะได้ตัวเร่งปฏิกิริยาผง Ag-TiO₂

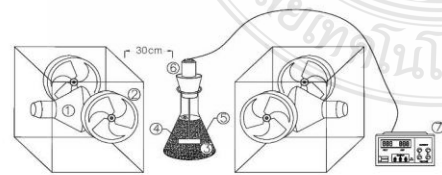
2.2 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาผง Ag-TiO₂

สำหรับวิธีการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาผง Ag-TiO₂ ที่เตรียมขึ้น แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อุปกรณ์และวิธีการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาผง Ag-TiO₂ ที่เตรียมขึ้น

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์	อุปกรณ์
องค์ประกอบ	X-ray Fluorescence Spectroscopy (XRF)	Bruker model S8 Tiger
พื้นที่ผิว และ ปริมาตรรูพรุน	Brunauer Emmett and Teller (BET)	Autosorb IQC (BET)

2.3 ชุดทดลอง Photoreactor สำหรับศึกษาการกำจัดไนโตรเจนในโตรเจนด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิสต์กึ่งตัวนำ



รูปที่ 1 Photoreactor สำหรับกระบวนการโฟโตคะตะลิสต์

1. แหล่งกำเนิดแสง
2. พัดลมระบายความร้อน
3. ผง Ag-TiO₂
4. ไบอวอน
5. ขวดปฐมน้ำขนาด 100 mL
6. มอเตอร์
7. แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า

2.4 การหาประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจน

สำหรับการหาประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจน โดยทำการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 100 mg.L⁻¹ as N จากนั้นทำการชั่งผง Ag-TiO₂ ปริมาณ 1 g ในขวดปฐมน้ำปริมาตร 100 mL และทำการเติมน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาณ 100 mL ลงในขวดปฐมน้ำที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาผง Ag-TiO₂ ใช้แผ่นพาไพร์มปิดครอบขวด หลังจากนั้นนำขวดปฐมน้ำไปวางระหว่างแหล่งกำเนิดแสงที่มีความเข้มแสง 1,000 μW.cm⁻² ทำการเก็บตัวอย่างที่เวลา 0, 15, 30, 45, 60, 90, 120 และ 180 min

2.5 การเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนในกระบวนการโฟโตคะตะลิสต์กึ่งตัวนำ

สำหรับการศึกษาการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนทำได้โดยการติดตามความเข้มข้นของไนโตรเจนที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นไนโตรเจนในรูปต่างๆที่เกิดขึ้นจากกระบวนการโฟโตคะตะลิสต์กึ่งตัวนำ ได้แก่ ไนโตรดแอมโมเนียและแก๊สไนโตรเจนสามารถคำนวณได้ดังสมการ 1-3 [6-7]

$$S_{NO_2} = \frac{[NO_2]_t}{[NO_3]_0 - [NO_3]_t} \times 100 \quad (1)$$

$$S_{NH_4^+} = \frac{[NH_4^+]_t}{[NO_3]_0 - [NO_3]_t} \times 100 \quad (2)$$

$$S_{N_2} = \frac{[NO_3]_0 - [NO_3]_t - [NO_2]_t - [NH_4^+]_t}{[NO_3]_0 - [NO_3]_t} \times 100 \quad (3)$$

โดยที่

S_{NO_2} = การเปลี่ยนรูปของ NO₃⁻ ไปเป็น NO₂ (%)

$S_{NH_4^+}$ = การเปลี่ยนรูปของ NO₃⁻ ไปเป็น NH₄⁺ (%)

S_{N_2} = การเปลี่ยนรูปของ NO₃⁻ ไปเป็น N₂ (%)

$[NO_3]_0$ = ความเข้มข้นของ NO₃⁻ ที่เวลาใดๆ (mg.L⁻¹ as N)

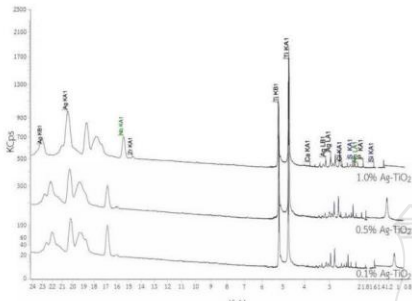
$[NO_3]_t$ = ความเข้มข้นของ NO₃⁻ ที่เวลาใดๆ (mg.L⁻¹ as N)

$[NH_4^+]_t$ = ความเข้มข้นของ NH₄⁺ ที่เวลาใดๆ (mg.L⁻¹ as N)

3 ผลการทดลองและวิจารณ์

3.1 ผลวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาผง Ag-TiO₂

ผลวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาผง Ag-TiO₂ ชนิดต่างๆ ที่เตรียมขึ้นโดยอุปกรณ์ Bruker model S8 Tiger แสดงดังรูปที่ 2 นอกจากนี้ปริมาณองค์ประกอบสารประกอบต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2



รูปที่ 2 ผลวิเคราะห์ด้วย EDX ของสารประกอบ Ag-TiO₂ อุปกรณ์ Bruker model S8 Tiger

ตารางที่ 2 ปริมาณองค์ประกอบของสารประกอบต่างๆ

ตัวเร่งปฏิกิริยา	ปริมาณโดยน้ำหนัก (%) ของสารประกอบ					
	TiO ₂	Ag	Na ₂ O	P ₂ O ₅	Nb ₂ O ₅	อื่นๆ
0.1%	98.700	0.098	0.857	0.153	0.112	0.080
0.5%	97.000	0.480	2.065	0.155	0.182	0.118
1.0%	95.300	0.988	3.330	0.160	0.112	0.110

เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ในรูปที่ 2 และตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบของสารประกอบและธาตุในตัวเร่งปฏิกิริยาของ 0.1%Ag-TiO₂, 0.5%Ag-TiO₂ และ 1.0%Ag-TiO₂ พบสารประกอบ TiO₂ เป็นองค์ประกอบหลักในปริมาณโดยน้ำหนักเท่ากับ 98.700%, 97.000% และ 95.300% ตามลำดับ ทั้งนี้เมื่อพิจารณาธาตุ Ag ที่มีการเจือลงในตัวเร่งปฏิกิริยาของ TiO₂ ในปริมาณโดยน้ำหนักด้วยอุปกรณ์ Bruker model S8 tiger แสดงให้เห็นว่าผลจากการเจือ Ag ลงไปในตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าว พบว่าปริมาณ Ag มีปริมาณใกล้เคียงกับปริมาณ Ag ที่เจือลงไปโดยมีค่าโดยน้ำหนักเท่ากับ 0.098%, 0.480% และ 0.988% สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาของ 0.1%Ag-TiO₂, 0.5%Ag-TiO₂ และ 1.0%Ag-TiO₂ ตามลำดับ

ในส่วนของการวิเคราะห์พื้นที่ผิวเฉพาะ และปริมาตรรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาของ Ag-TiO₂ ที่เตรียมขึ้นโดยอุปกรณ์ Autosorb IQC (BET) สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3 โดยแสดงให้เห็นถึงพื้นที่ผิวเฉพาะ และปริมาตรรูพรุน ของตัวเร่งปฏิกิริยาของ Ag-TiO₂ ที่เตรียมขึ้นดังกล่าวโดยอาศัยเทคนิคการแทนที่พื้นที่ผิวของรูพรุนด้วยแก๊สไนโตรเจนในการวิเคราะห์

ตารางที่ 3 ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา Ag-TiO₂

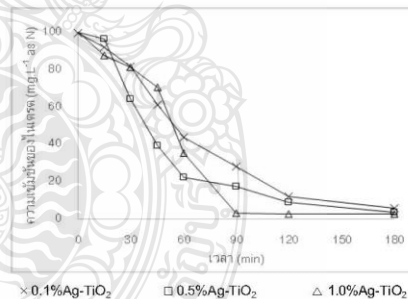
ตัวเร่งปฏิกิริยา	พื้นที่ผิวเฉพาะ (m ² g ⁻¹)	ปริมาตรรูพรุน (m ³ g ⁻¹)
0.1%Ag-TiO ₂	2.176 × 10 ²	5.079 × 10 ⁻⁷
0.5%Ag-TiO ₂	1.276 × 10 ²	3.572 × 10 ⁻⁷
1.0%Ag-TiO ₂	1.120 × 10 ²	2.745 × 10 ⁻⁷

ผลจากการวิเคราะห์พื้นที่ผิวเฉพาะ และปริมาตรรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาของ Ag-TiO₂ ที่เตรียมขึ้นด้วยอุปกรณ์ Autosorb IQC (BET) โดยมีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1%Ag-TiO₂, 0.5%Ag-TiO₂ และ 1.0%Ag-TiO₂ พบว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณ Ag ที่มีการเจือลงไปในตัวเร่งปฏิกิริยาของ TiO₂ ทำให้พื้นที่ผิวเฉพาะและปริมาตรรูพรุนมีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัย [8-9] ที่มีการเติม Ag สารเจือปนเพิ่มขึ้นทำให้พื้นที่ผิวเฉพาะและปริมาตรรูพรุนลดลง นอกจากนี้งานวิจัยที่ผ่านมายังพบว่ามีการเติมสารเจือปนตัวอื่นๆ ส่งผลให้พื้นที่ผิวเฉพาะลดลงเช่นเดียวกัน [10-11]

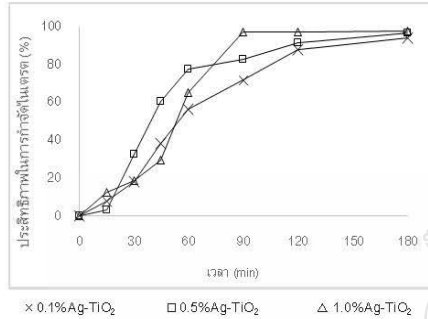
3.2 การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรตในโตรเจนด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของ Ag-TiO₂

3.2.1 การติดตามการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไนเตรตโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของ Ag-TiO₂

สำหรับการศึกษากำจัดไนเตรตด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของ Ag-TiO₂ ในอัตราส่วน 0.1%, 0.5% และ 1.0% ในการทดลอง พบว่า กระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของทั้ง 3 ชนิดส่งผลให้ไนเตรตที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 100 mg.L⁻¹ as N มีความเข้มข้นลดลงอย่างต่อเนื่องตามเวลา (รูปที่ 3) เมื่อพิจารณาปริมาณสามารถเปลี่ยนรูปการเกิดไนโตรเจนในรูปต่างๆ โดยผลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของ Ag-TiO₂ ที่มีการเติม Ag ในปริมาณที่สูงส่งผลให้สามารถกำจัดไนเตรตได้โดยใช้เวลาที่สั้นกว่า แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเวลาดำเนินไปถึงเวลาที่ 180 min พบว่า การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของทั้ง 3 ชนิดส่งผลต่อการกำจัดไนเตรตได้ไม่แตกต่างกัน โดยมีความเข้มข้นไนเตรตที่เวลาดังกล่าวเท่ากับ 5.77, 3.17 และ 2.45 mg.L⁻¹ as N สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาของ 0.1%Ag-TiO₂, 0.5%Ag-TiO₂ และ 1.0%Ag-TiO₂ ตามลำดับ



รูปที่ 3 ความเข้มข้นของไนเตรตที่เวลาต่างๆ โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชันที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของ 0.1%Ag-TiO₂, 0.5%Ag-TiO₂ และ 1.0%Ag-TiO₂

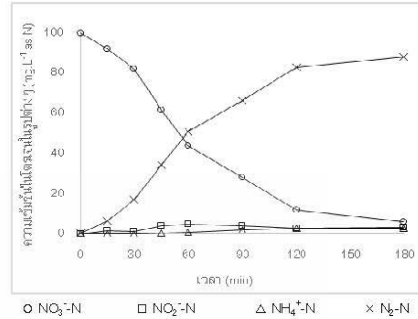


รูปที่ 4 ประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรตด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิสต์ที่รักษาด้วยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของเตรียมขึ้น

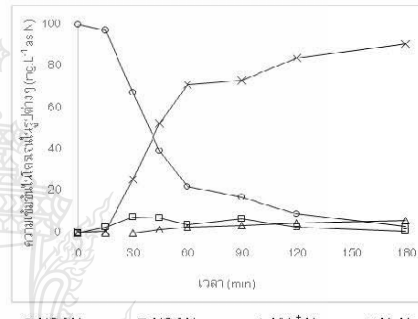
ทั้งนี้ประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดไนเตรตด้วยกระบวนการดังกล่าวที่เวลา 180 min มีค่าเท่ากับ 94.23%, 96.83% และ 97.55% สำหรับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของ 0.1%Ag-TiO₂, 0.5%Ag-TiO₂ และ 1.0%Ag-TiO₂ ตามลำดับ แต่พิจารณาเมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานคุณภาพน้ำดื่มในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท ตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข เรื่อง น้ำบริโภคในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท พ.ศ.2534 กำหนดให้น้ำดื่มดังกล่าวต้องมีปริมาณไนเตรตไม่เกิน 4 mg.L⁻¹ as N [12] ซึ่งผลจากการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของ Ag-TiO₂ ที่มีการเติม Ag เท่ากับ 1.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตรสามารถกำจัดไนเตรตที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 100 mg.L⁻¹ as N ให้เหลือ 2.77 mg.L⁻¹ as N ได้ในเวลาเพียง 90 min

3.2.2 การเปลี่ยนแปลงรูปของไนเตรตด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิสต์ที่รักษา

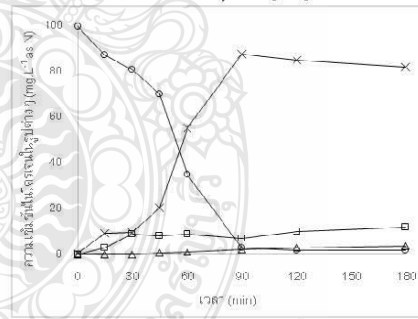
จากสมการที่ 1-3 ซึ่งใช้อธิบายการเปลี่ยนรูปของไนเตรตที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นไนโตรเจนในรูปแบบต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการโฟโตคะตะลิสต์ที่รักษา ทั้งนี้ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าไนเตรตสามารถเปลี่ยนแปลงไปเป็นไนโตรเจนรูปแบบต่างๆ ได้โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิสต์ที่รักษา โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 3 ชนิดตลอดระยะเวลาในการทำการทดลองดังแสดงในรูป 5-7 และเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนรูปของไนเตรตไปเป็นไนโตรเจนในรูปแบบต่างๆ ที่เวลา 90 min ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4



รูปที่ 5 การเปลี่ยนรูปของไนเตรตด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิสต์ที่รักษาที่เวลาต่างๆ 0.1%Ag-TiO₂



รูปที่ 6 การเปลี่ยนรูปของไนเตรตด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิสต์ที่รักษาที่เวลาต่างๆ 0.5%Ag-TiO₂



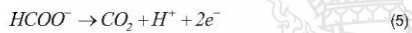
รูปที่ 7 การเปลี่ยนรูปของไนเตรตด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิสต์ที่รักษาที่เวลาต่างๆ 1.0%Ag-TiO₂

ตารางที่ 4 การเปลี่ยนรูปของไนเตรตไปเป็นไนโตรเจนในรูปแบบต่างๆ ที่เวลา 90 min

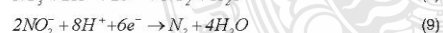
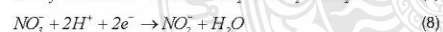
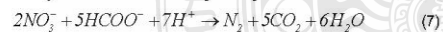
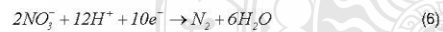
ตัวเร่งปฏิกิริยา	การเปลี่ยนรูปของไนเตรตไปเป็นไนโตรเจนรูปแบบต่างๆ (%)		
	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺	N ₂
0.1%Ag-TiO ₂	9.66	2.38	87.52
0.5%Ag-TiO ₂	7.60	4.27	88.14
1.0%Ag-TiO ₂	7.17	2.30	90.53

จากผลการทดลองเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนรูปของไนเตรตไปเป็นไนโตรเจนรูปต่างๆ แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาของ 0.1%Ag-TiO₂, 0.5%Ag-TiO₂ และ 1.0%Ag-TiO₂ มีการเปลี่ยนรูปไนเตรตเป็นแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 87.52%, 88.14% และ 90.53% แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาของ 1.0%Ag-TiO₂ ในเตรตเปลี่ยนไปเป็นแก๊สไนโตรเจนมากที่สุดที่ระยะเวลา 90 min เมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาของ 0.1%Ag-TiO₂ และ 0.5%Ag-TiO₂

ทั้งนี้เมื่อพิจารณาการใช้กระบวนการเกิดโฟโตคะตะลิติกรีดักชันในการกำจัดไนเตรต โดยกลไกการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาของ Ag-TiO₂ ได้รับความกระตุ้นจากแสงที่มีระดับพลังงานมากกว่าขนาดช่องว่างแถบพลังงานส่งผลให้อิเล็กตรอนที่แถบวาเลนซ์ถูกกระตุ้นไปที่แถบการนำเกิดสภาวะขาดอิเล็กตรอนและเกิดช่องว่างที่เรียกว่า โฮล (hole) จึงจำเป็นต้องมีสารให้อิเล็กตรอนเพื่อทดแทนอิเล็กตรอนที่หายไป ในงานวิจัยนี้ใช้กรดฟอร์มิกเป็น (Hole Scavenger) เนื่องจากเป็นสารให้อิเล็กตรอนที่ดีเมื่อเทียบกับสารอินทรีย์ตัวอื่น เมื่อกรดฟอร์มิกแตกตัวไปเป็นฟอร์เมตจะทำให้หน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอนปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในส่วนนี้เรียกว่าปฏิกิริยาออกซิเดชันดังสมการที่ 4-5



สำหรับอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกรีดักชันดังสมการที่ (5) อิเล็กตรอนดังกล่าวจะเคลื่อนที่จากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำและเกิดโฮลขึ้นที่แถบวาเลนซ์ ทั้งนี้ในการกำจัดไนเตรตด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน ไนเตรตจะทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอนส่งผลให้ไนเตรตเปลี่ยนรูปไปเป็นแก๊สไนโตรเจนดังสมการที่ 6-9 นอกจากนี้ยังเกิดไปเป็นผลิตภัณฑ์ ไปเป็นไนโตรเจนรูปอื่นๆ อีก ได้แก่ ไนไตรต์และแอมโมเนีย ส่งผลให้ความเข้มข้นไนเตรตลดลงอย่างต่อเนื่องและแปรผันตรงกับเวลา [13-20]



ภาพรวมของผลการทดลองเป็นไปตามกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชันซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระบวนการดังกล่าวมีศักยภาพในการกำจัดไนเตรตและสามารถเปลี่ยนรูปไนเตรตเป็นแก๊สไนโตรเจนได้ในปริมาณสูง โดยพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา 1.0%Ag-TiO₂ ในเตรตเปลี่ยนไปเป็นแก๊สไนโตรเจนมากที่สุดเท่ากับ 90.53% เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนรูปของไนเตรตที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นไนโตรเจนในรูปต่างๆ ได้แก่ ไนไตรต์ และแอมโมเนียซึ่งเป็นสารไม่พึงประสงค์ในกระบวนการดังกล่าว เนื่องจากไนไตรต์เป็นสารมัธยันต์ (intermediate product) เป็นสารกลางที่เกิดขึ้นระหว่างการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกรีดักชัน ซึ่งยังไม่สามารถเปลี่ยนไปเป็นแก๊สไนโตรเจนได้อย่างสมบูรณ์ ทั้งนี้ในส่วน

ของแอมโมเนียซึ่งเป็นผลของการเปลี่ยนรูปไนเตรตโดยปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกรีดักชันอาจต้องมีการนำเข้าสู่กระบวนการบำบัดต่อไป เนื่องจากแอมโมเนียที่เกิดขึ้นในกระบวนการดังกล่าวหากปล่อยทิ้งลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติสามารถส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากเป็นไนโตรเจนในรูปดังกล่าวมีความคงตัว และหากมีความเข้มข้นสูงจะส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำรวมทั้งส่งผลกระทบต่อปริมาณออกซิเจนละลายน้ำเนื่องจากกระบวนการย่อยสลายไนโตรเจนในรูปดังกล่าวต้องใช้ออกซิเจนในกระบวนการฯ ส่งผลให้เกิดภาวะขาดออกซิเจนในแหล่งน้ำ โดยกรมควบคุมมลพิษได้กำหนดความเข้มข้นของแอมโมเนียในมาตรฐานคุณภาพน้ำผิวดินประเภทที่ 2 (ใช้ประโยชน์เพื่อการประมง การอนุรักษ์สัตว์น้ำ) สูงสุดไม่เกิน 0.5 mg.L⁻¹ [21]

4. สรุป

งานวิจัยดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าสามารถเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาของ Ag-TiO₂ ด้วยวิธีการ Composite colloid deposition โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นมีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชันโดยพิจารณาจากผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นด้วยอุปกรณ์ BET และ XRF รวมทั้งนำตัวเร่งปฏิกิริยาของ Ag-TiO₂ ที่เตรียมขึ้นไปทดสอบหาประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรต ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมและดีที่สุดคือ 1.0%Ag-TiO₂ โดยสามารถกำจัดไนเตรตได้เท่ากับ 97.55% ที่เวลา 180 min และเปลี่ยนไปเป็นแก๊สไนโตรเจนได้สูงสุดเท่ากับ 90.53% ที่เวลา 90 min

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณแหล่งทุนงบประมาณสำหรับการทำวิจัยในครั้งนี้ ได้แก่ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยประจำปี 2561 ส่งผลให้การดำเนินงานวิจัยดังกล่าวเป็นไปด้วยความเรียบร้อยและสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Yang, T., Doudrick, K., and Westerhoff, P., (2013). Photocatalytic reduction of nitrate using titanium dioxide for regeneration of ion exchange brine. *Water Research*, 47, pp. 1,299-1,307.
- [2] O'Neal Tugaoen, H., Garcia-Segura, S., Hristovski, K., and Westerhoff, P., (2017). Challenges in photocatalytic reduction of nitrate as a water treatment technology. *Science of the Total Environment*, 599-600, pp. 1,524-1,551.
- [3] Bamba, D., Coulibaly, M., and Robert, D., (2017). Nitrogen-containing organic compounds: Origins, toxicity and conditions of their photocatalytic mineralization over

- TiO₂. *Science of the Total Environment*, 580, pp.1489-1504.
- [4] Hou, M., Tang, Y., Xu, J., Pu, Yu., Lin, A., Zhang, L., and Xiong, J., (2015). Nitrate reduction in water by aluminium-iron alloy particles catalysed by copper. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 3, pp. 2,401-2,407.
- [5] ชงชัย พรรณสวัสดิ์ (2544). การกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทางชีวภาพ. *สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย*. กรุงเทพฯ, หน้า 50-120.
- [6] Doudrick, K., Yang, T., and Westerhoff, P., (2013). Photocatalytic nitrate reduction in water: managing the hole scavenger and reaction by-product selectivity. *Applied Catalysis B: Environmental*, 136-137, pp. 40-47.
- [7] Kobwittaya, K., and Sirivithayapakorn, S., (2014). Photocatalytic reduction of nitrate over TiO₂ and Ag-modified TiO₂. *Journal of Saudi Chemical Society*, 18, pp. 291-298.
- [8] Nasser, S., Fazlzadehdavilb, M., Mahvi, A., and Gholami, M., (2013). Application of Ag-doped TiO₂ nanoparticle prepared by photodeposition method for nitrate photocatalytic removal from aqueous. *Desalination and Water Treatment*, 37-39, pp.7,137-7,144.
- [9] Naik, B., Hemapa Manoranthe, C., Chandrashekhar, A., Iyer, A., Sivankutty Prasad, V., and Nath Ghosh, N., (2013). Preparation of TiO₂, Ag-doped TiO₂ nanoparticle and TiO₂-SBR-15 nanocomposites using simple aqueous solution-based chemical method and study of their photocatalytic activity. *Journal of Experimental Nanoscience*, 4, pp. 462-479.
- [10] Vargas Hernández, J., Coste, S., Garcia Murillo, A., Camillo Romo, F., and Kassiba, A., (2017). Effects of metal doping (Cu, Ag, Eu) on the electronic and optical behaviour of nanostructured TiO₂. *Journal of Alloys and Compounds*, 710, pp. 355-363.
- [11] Nadolna, J., Arenas-Esteban, D., Gazda, M., and Zaleska-Medynska, A., (2014). Pr-doped TiO₂ the effect of metal content on photocatalytic activity. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 50(2), pp. 515-525.
- [12] ประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 61. (2524). เรื่องน้ำบริโภคในภาชนะที่ปิดสนิท. 24 กันยายน 2524. 98 ตอนที่ 157.
- [13] Lozovskii, A.V., Stolyarova, I.V., Prikhod'ko, R.V., and Goncharuk, V.V., (2009). Research of photocatalytic activity of the Ag/TiO₂ catalysts in the reduction reaction of nitrate-ions in aqueous media. *Journal of Chemistry and Technology*, 31, pp. 360-366.
- [14] Shaban, Y., El Maradny, A., and Al Farawati, K., (2016). Photocatalytic reduction of nitrate in seawater using C/TiO₂ nanoparticles. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 328, pp. 114-121.
- [15] Bem Luiz, D., Floriani Andersen, S., Berger, C., and Humberto, J., (2012). Photocatalytic reduction of nitrate ions in water over metal-modified TiO₂. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 246, pp. 36-44.
- [16] Wenling, G., Ruicai, J., Jixin, C., Xinxin, G., Haisheng, Z., Fuxiang, Z., and Najin, G., (2004). Titania-support bimetallic catalysts for photocatalytic reduction of nitrate. *Catalysis Today*, 90, pp. 331-336.
- [17] Soares, O., Pereira, M., Órfão, J.L., and Silva, C.G., (2014). Photocatalytic nitrate reduction over Pd-Cu/TiO₂. *Chemical Engineering Journal*, 251, pp. 123-130.
- [18] Eun-kyoung, C., Kuy-hyun, Park., Ho-bin, L., Misun, C., and Samyoung, A., (2013). Formic acid as an alternative reducing agent for the catalytic nitrate reduction in aqueous media. *Journal of Environmental Sciences*, 25(8), pp. 1,696-1,702.
- [19] Sá, J., Alcaraz Agüera, C., Gross, S., and A. Anderson, J., (2009). Photocatalytic nitrate reduction over metal modified TiO₂. *Applied Catalysis B: Environmental*, 85, pp. 192-200.
- [20] Hai-Tao, R., Shao-Yi, J., Ji-Jun, Z., Song-Hai, W., and Xu, H., (2015). A facile preparation of Ag₂O/P25 photocatalyst for selective reduction of nitrate. *Applied Catalysis B: Environmental*, 176-177, pp. 53-61.
- [21] ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 27 (2549). เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำทะเล.



เกียรติบัตรฉบับนี้เพื่อแสดงว่า

นางสาวสุณีย์ วัฒนัยน

ได้นำเสนอบทความในหัวข้อ

การกำจัดไมตรดด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิสต์กรัดักชันร่วมกับ ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน

ในการประชุมวิชาการ วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 23
ซึ่งจัดขึ้นระหว่างวันที่ 18-20 กรกฎาคม 2561 ณ โรงแรมนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

พินิจ 

วันที่ พินิจ 

(อองศาตราจารย์ เอกภพ ศิริพาดกร)
ประธานสาขาวิศวกรรมโยธา
วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธน จันทวาลย์)
ผู้อำนวยการกองบริหารการประเมินผล
และการศึกษา วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์

(อองศาตราจารย์ ดร. อภิพร ศิริสวัสดิ์)
คณบดีสาขาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ภาคผนวก



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นางสาวสุนีย์ ขวัญยืน
วัน เดือน ปีเกิด	29 เมษายน 2537
ที่อยู่	1/1 หมู่ 4 ตำบล เชียงรากน้อย อำเภอ บางปะอิน จังหวัด พระนครศรีอยุธยา 13180
การศึกษา	ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
เบอร์โทรศัพท์	096-7291446
อีเมล	Suneenookk@hotmail.com

