



การบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียจากโรงงานผลิตน้ำยางข้นด้วย

ปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติก

**Treatment of NH₃ in Waste Air from Concentrated Rubber Latex Industry Using
Photocatalytic Reactor**

พฤกระยา พงศ์ยี่หล้า

Prukraya Pongyeela

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of

Master of Engineering in Chemical Engineering

Prince of Songkla University

2555

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์	การบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียจากโรงงานผลิตน้ำยางข้นด้วยปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติก
ชื่อผู้เขียน	นางสาวพฤกระยา พงศ์ยี่หล้า
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา	2554

บทคัดย่อ

แอมโมเนีย (NH_3) เป็นก๊าซที่มีกลิ่นฉุนและเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมเมื่อเกิดการรั่วไหลสู่บรรยากาศ โรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำยางข้นมีการใช้แอมโมเนียเป็นส่วนประกอบในทุกขั้นตอนของกระบวนการผลิต ซึ่งทำให้เกิดไอระเหยของแอมโมเนียจากกระบวนการผลิตที่ระดับความเข้มข้น 200-700 ppmv อันส่งผลต่อสุขภาพของมนุษย์ สัตว์ พืช และสภาพแวดล้อม ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียจากโรงงานผลิตน้ำยางข้นด้วยระบบปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติกที่ประกอบด้วยคอลัมน์แก้ว โฟโตแคตะลิสต์ หลอดไฟ และถังปฏิกรณ์ โดยระบบที่อากาศเสียไหลผ่านเป็นคอลัมน์แก้วชนิดคอลัมน์บรรจุ (packed column) ที่บรรจุด้วยโฟโตแคตะลิสต์ชนิด $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ และ TiO_2 สังเคราะห์ขึ้นด้วยวิธีโซล-เจลและวิธีสารแขวนลอยซึ่งเคลือบบนวัสดุตัวกลาง รอบนอกของคอลัมน์ติดตั้งด้วยหลอดไฟที่ให้แสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) จากหลอดยูวีและหลอดแบลคไลท์ (black light) ที่ความยาวคลื่นแสงในช่วง 315-400 nm โดยทำการติดตั้งในแนวตั้งกับผนังภายในของถังปฏิกรณ์ ทำการทดสอบความสามารถเบื้องต้นของโฟโตแคตะลิสต์ต่อประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียด้วยการบำบัดแอมโมเนียในของเหลวด้วยชุดปฏิกรณ์แบบแบทช์ (batch reactor) และทำการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียด้วยปฏิกรณ์แบบไหลต่อเนื่อง (continuous-flow reactor)

โฟโตแคตะลิสต์ $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ ชนิดผงที่เตรียมขึ้นจากวิธีโซล-เจลมีความสามารถในการบำบัดแอมโมเนียในของเหลวด้วยประสิทธิภาพ 70% ที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนีย 100 ppm การเคลือบโฟโตแคตะลิสต์ชนิด $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ บนตัวกลางเซรามิกและใยแก้วเพื่อใช้ในการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสีย พบว่า การใช้ตัวกลางเซรามิกไม่สามารถบำบัดแอมโมเนียในอากาศ

เสียได้เนื่องจากเกิดการบดบังแสงจากหอดูดาววิ ส่วนโฟโตแคตะลิสต์ชนิด $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ บนตัวกลางใยแก้วให้ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนีย 60% ที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียในอากาศเสีย 100-200 ppmv แต่จากปัญหาของตัวกลางใยแก้วที่เปราะแตกง่ายและสารตั้งต้น TiO_2 ที่ใช้เตรียมโฟโตแคตะลิสต์มีราคาแพง จึงทำให้ต้องหาตัวกลางในการเคลือบผิวชนิดอื่นและเปลี่ยนเทคนิคการเตรียมโฟโตแคตะลิสต์เป็นแบบวิธีสารแขวนลอยด้วยการใช้ผง TiO_2 ขนาดอนุภาคนาโนเป็นสารตั้งต้น

การพัฒนาเทคนิคการเตรียมโฟโตแคตะลิสต์โดยใช้ผง TiO_2 ขนาดอนุภาคนาโน Degussa P25 และทำการเคลือบบนวัสดุตัวกลางชนิดหอดแก้วขนาด 0.8 เซนติเมตร ยาว 2.0 เซนติเมตร ทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายของสารตั้งต้นโฟโตแคตะลิสต์และเพิ่มประสิทธิภาพในการสัมผัสกันระหว่างกระแสอากาศเสียและแสงจากหอดูดาววิได้ จากการทดลองบำบัดแอมโมเนียในของเหลว พบว่า โฟโตแคตะลิสต์ชนิด TiO_2 เคลือบบนหอดแก้วไม่เหมาะสำหรับการบำบัดแอมโมเนียที่ปนเปื้อนในของเหลว แต่ระบบให้ประสิทธิภาพสูงถึง 87% สำหรับการบำบัดแอมโมเนียที่ปนเปื้อนในอากาศเสียด้วยระบบปฏิกรณ์แบบไหลต่อเนื่อง ทำการออกแบบการทดลองและหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง Response Surface Methodology (RSM) แบบ Central Composite Design (CCD) เพื่อประเมินผลและแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระอันจะนำไปสู่ภาวะการดำเนินการที่เหมาะสม โดยตัวแปรที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อระบบประกอบด้วยความเข้มแสง ($23\text{-}114 \text{ W/m}^2$) อัตราการไหลอากาศเสีย ($1\text{-}5 \text{ l/min}$) และปริมาณ TiO_2 ($1.18\text{-}5.90$ กรัม) ทำให้ได้แบบจำลองสมการ Quadratic model ของประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนีย ซึ่งพบว่าภาวะที่เหมาะสมในการดำเนินการ คือ ที่ความเข้มแสง 114 W/m^2 อัตราการไหลอากาศเสีย 1 l/min และปริมาณ TiO_2 5.9 กรัม ที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนีย 300 ppmv จากการทำนายผลด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ทำให้ได้ประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียสูงสุด 91.45% และมีผลการทดสอบจากการทดลองจริงที่ 90.02% โดยอากาศเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตแคตะลิสต์มีองค์ประกอบหลักเป็นไนโตรเจนที่ไม่มีการปนเปื้อนของก๊าซอันตรายชนิด NO_x ที่จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งผลสำเร็จของงานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการนำไปสู่การออกแบบและใช้งานจริงในระดับอุตสาหกรรมผลิตน้ำยางข้นสำหรับแก้ปัญหาการปล่อยอากาศเสียที่ปนเปื้อนแอมโมเนียสู่บรรยากาศต่อไป

Thesis Title Treatment of NH₃ in waste air from concentrated rubber latex industry using photocatalytic reactor

Author Miss Prukraya Pongyeela

Major Program Chemical Engineering

Academic Year 2011

ABSTRACT

Ammonia is an odorous and toxic gas to the environment when it leaks into the atmosphere. The concentrated rubber latex industry has used the high concentration of ammonia in all steps of latex process. The ammonia vapor is evaporated from the process to waste air at (200-700 ppmv) that has affected threatens to human health, animals, vegetation, and environment. Therefore objective of this research was to study for the treatment of ammonia in waste air from concentrated rubber latex industry by photocatalytic reactor consisting of glass column, photocatalyst, lamps, and reactor chamber. The glass column system packed with the photocatalyst for waste air treatment was the packed column type. The photocatalysts consisting of TiO₂-SiO₂ and TiO₂ synthesized by the sol-gel and suspension method and coating on supporting media were packed in the glass column and installed in stainless steel photo-reactor chamber. UV and Blacklight lamps of ultra-violet (UV) light in the wavelength range of 315-400 nm were vertically installed inside walls of the photo-reactor. To initial test of the photocatalyst on ammonia treatment, catalyst powder was synthesized and tested for ammonia contaminated in water phase by batch photo-reactor. The treatment of ammonia in waste air was performed in continuous flow reactor.

The TiO₂-SiO₂ photocatalyst powder prepared by sol-gel technique could get 70% treatment efficiency of the 100 ppm ammonia in water. The TiO₂-SiO₂ photocatalysts were coated on ceramic foam and fiber glass media for the treatment of ammonia in waste air. The results showed that TiO₂-SiO₂ coated on ceramic foam media cannot treat ammonia in the air

because of contacting problem between photocatalyst surface and UV light. In contrast, the $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ coated on the fiber glass media achieved 60% ammonia treatment efficiency at 100-200 ppm ammonia concentration in waste air. But the fiber glass media has the brittle property and high cost of the TiO_2 photocatalysts precursor for sol-gel preparing. Other medium type and preparing technique were needed to change for the surface coating and preparation of the photocatalyst. Suspension method using TiO_2 powder nanoparticle as precursor was chosen for synthesis of the photocatalyst.

Development for preparation of the photocatalysts using TiO_2 powder nanoparticle Degussa P25 and coating on glass cylindrical tube supporters (0.8 x 2.0 cm in size) was developed to reduce cost of photocatalyst precursor and increase system efficiency in contact between waste air and light from a UV lamp. The experiments for ammonia treatment in water showed that TiO_2 photocatalyst coated on glass tube is not suitable for the treatment of contaminated water. The system performance of up to 87% for ammonia treated in waste air with continuous flow reactor. Experimental sets were designed and conducted based on central composite design (CCD) and analyzed using response surface methodology (RSM). These were used to evaluate the effects of process variables and their interactions towards attainment of their optimum conditions. Three significant variables, viz. light intensity (23-114W/m²), waste air flow rate (1-5 l/min), and TiO_2 loading (1.18-5.90 g) were fitted in a quadratic model to the response of NH_3 treatment efficiency. The optimum conditions obtained from the regression analysis performing were 114 W/m² in light intensity, 1 l/min waste air flow rate, and 5.90 g TiO_2 loading. The maximum efficiency of 91.45% NH_3 treatment at 300 ppmv NH_3 in waste air was predicted from the mathematical model, which fitted well with the laboratory verification results (90.02%). The main treated gas from the photocatalytic system was found the nitrogen gas without NO_x contamination which has not affected to environment. The results of this study can be used as guidance to the design and actual use in the concentrated rubber latex industrial for solving the problem of air pollution contaminated with ammonia gas.

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทิมา ชั่งสิริพร อาจารย์ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์หลัก และรองศาสตราจารย์ ดร.เล็ก สีคง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้กรุณา
ให้คำแนะนำในการทำวิจัย แนวทางในการค้นคว้าหาข้อมูลและการเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้
ดำเนินไปอย่างสมบูรณ์ รวมถึงการขัดเกลากระบวนการคิด การแก้ไขปัญหาและแนวทางในการ
ดำเนินชีวิต

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ลือพงศ์ แก้วศรีจันทร์ รองศาสตราจารย์
ดร.กัลยา ศรีสุวรรณ และดร.พรศิริ แก้วประดิษฐ์ กรรมการผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัย ที่กรุณาให้
คำแนะนำและตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ โครงการมหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ (NRU) ที่ให้ทุนอุดหนุนใน
การทำวิจัยประจำปีการศึกษา 2553 ถึงปีการศึกษา 2555

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์และบัณฑิตวิทยาลัย ที่จัดสรรเงินทุน
ในการวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ให้สถานที่ในการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณทีมงานของหน่วยวิจัยเทคโนโลยีการบำบัดมลพิษและสิ่งแวดล้อม
(PTRU) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ทุกคน ที่คอยให้ความช่วยเหลือและ
คอยแนะนำการแก้ปัญหาในการทำงานวิจัยตลอดการทำวิทยานิพนธ์นี้

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ พี่ๆ และเพื่อนๆ ที่สนับสนุนให้กำลังใจ
และทุนทรัพย์ในการศึกษามาโดยตลอด ขอขอบพระคุณบุคลากรทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ ตลอดจนขอขอบคุณทุกท่านที่มีได้กล่าว
นามมา ณ ที่นี้ด้วย ที่มีส่วนช่วยให้ให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ด้วยดี

พฤกระยา พงศ์ยี่หล้า

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(10)
รายการภาพประกอบ	(11)
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	4
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	5
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 แอมโมเนีย (NH_3)	7
2.2 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2)	11
2.3 กระบวนการโฟโตแคตะไลติก (photocatalytic process)	15
2.4 กระบวนการเตรียม TiO_2 บนตัวกลาง	18
2.5 การบำบัดแอมโมเนียด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกออกซิเดชัน	21
2.6 การติดตั้งปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติกสำหรับบำบัดอากาศเสีย	22
2.7 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment, DOE)	24
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	27
บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย	
3.1 วัสดุ	32
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์	33
3.3 ปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติก (photocatalytic reactor)	34
3.4 ระบบเตรียมอากาศเสียสังเคราะห์	37
3.5 การเตรียมโฟโตแคตะไลต์ชนิด $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ ($\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ catalyst preparation)	38
3.6 การเตรียมโฟโตแคตะไลต์ชนิด TiO_2	41
3.7 วิธีการทดลองบำบัดแอมโมเนียในของเหลว	43
3.8 วิธีการทดลองบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสีย	46
	(8)

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.9 การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์แอมโมเนีย	48
3.10 การออกแบบการทดลอง	51
3.11 การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และหาภาวะที่เหมาะสม	56
3.12 การวิเคราะห์ NO _x จากปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกออกซิเดชัน	57
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	
4.1 ผลการเตรียมโฟโตแคตะลิสต์	59
4.2 ผลการบำบัดแอมโมเนียโดยใช้โฟโตแคตะลิสต์ชนิด TiO ₂ -SiO ₂	62
4.3 ผลการบำบัดแอมโมเนียโดยใช้โฟโตแคตะลิสต์ชนิด TiO ₂	68
4.4 ผลการวิเคราะห์ NO _x ในอากาศเสียที่ผ่านการบำบัด	80
4.5 ผลการบำบัดแอมโมเนียในปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติกโดยเทคนิค Response Surface Methodology (RSM) ในการออกแบบการทดลอง	81
4.6 ภาวะที่เหมาะสมของการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียด้วยปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติก	89
4.7 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต (Economic analysis)	91
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	
5.1 สรุปผลการวิจัย	93
5.2 ข้อเสนอแนะ	95
เอกสารอ้างอิง	96
ภาคผนวก	101
ภาคผนวก ก การวิเคราะห์ความเข้มข้นของแอมโมเนียในอากาศเสีย	102
ภาคผนวก ข ข้อมูลการบำบัดแอมโมเนียด้วยแคตะลิสต์ชนิด TiO ₂ -SiO ₂ และ TiO ₂	105
ภาคผนวก ค ข้อมูลการบำบัดแอมโมเนียด้วยการออกแบบโดยเทคนิค RSM	114
ภาคผนวก ง ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่จากวิทยานิพนธ์	135
ประวัติผู้เขียน	150

รายการตาราง

ตารางที่		หน้า
2-1	แสดงระดับอันตรายของแอมโมเนีย	9
2-2	แสดงระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียในพื้นที่ของโรงงานน้ำยางชั้น	10
2-3	แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของ TiO_2 ที่มีโครงสร้างแบบอนาเทส	12
2-4	ชนิดของรังสี UV และแหล่งกำเนิดที่ความยาวคลื่นต่างๆ	18
3-1	แสดงช่วงของตัวแปรดำเนินการและสัญลักษณ์ของการออกแบบการทดลอง	52
3-2	ผลการแสดงรหัสตัวแปรที่ทำการศึกษาด้วยเทคนิค RSM ประกอบด้วยตัวแปรอิสระ 3 ตัวแปร และตัวแปรตาม 1 ตัวแปร	54
3-3	ผลการแปลงรหัสตัวแปรที่ทำการศึกษาประกอบด้วยตัวแปรอิสระ 3 ตัวแปร และตัวแปรตาม 1 ตัวแปร	55
4-1	แสดงผลตอบสนองประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียด้วย TiO_2 โดยปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติกที่ภาวะการทดลองต่างๆ จากการออกแบบการทดลองด้วยเทคนิค RSM แบบ CCD	83
4-2	ผลการวิเคราะห์ ANOVA จากความแปรปรวนของแบบจำลองสำหรับบำบัดแอมโมเนียด้วยปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติก	84
4-3	แสดงภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียและเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทำนายด้วยสมการกับผลการทดลอง	89
4-4	ผลการคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ในกระบวนการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสีย	91
4-5	อัตราค่าไฟฟ้าประเภทกิจการขนาดเล็ก ซึ่งมีความต้องการพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยในเวลา 15 นาทีสูงสุดต่ำกว่า 30 กิโลวัตต์ โดยต่อผ่านเครื่องวัดไฟฟ้าเครื่องเดียว	91
4-6	ผลของการคำนวณค่าวัตถุดิบทั้งหมดที่ใช้ในการสังเคราะห์แคตะลิสต์ต่อ 250 ชิ้น	92

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบที่	หน้า	
2-1	แสดงรูปร่างโมเลกุลของแอมโมเนีย	8
2-2	แสดงโครงสร้างไททาเนียมไดออกไซด์ชนิด Rutile, Anatase และ Brookite	13
2-3	แสดงขั้นตอนการจุ่มเคลือบผิวของตัวกลางด้วยโฟโตแคตะลิสต์	21
3-1	แสดงวัสดุตัวกลางชนิดเซรามิกโพลิม (ก) ไยแก้ว (ข) และหลอดแก้ว (ค) ที่ใช้ในการเคลือบผิวด้วยแคตะลิสต์ TiO_2-SiO_2 และ TiO_2	32
3-2	แสดงคอลัมน์ที่บรรจุด้วยตัวกลางหลอดแก้วที่ผ่านการเคลือบด้วยโฟโตแคตะลิสต์ชนิด TiO_2 (ก) และไดอะแกรมคอลัมน์บรรจุ (ข)	35
3-3	แสดงปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติกที่บรรจุด้วยโฟโตแคตะลิสต์ชนิด TiO_2-SiO_2 ที่เคลือบบนเซรามิกโพลิม (ก) ไยแก้ว (ข) และแคตะลิสต์ชนิด TiO_2 ที่เคลือบบนหลอดแก้ว (ค)	35
3-4	แสดงการติดตั้งหลอดไฟภายในถังปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติก (ก) และไดอะแกรมภายในถังปฏิกรณ์ (ข)	36
3-5	แสดงระบบโฟโตแคตะไลติกที่ใช้บำบัดแอมโมเนียโดยบรรจุตัวกลางที่เคลือบด้วยโฟโตแคตะลิสต์ในปฏิกรณ์	36
3-6	แสดงไดอะแกรมของระบบโฟโตแคตะไลติกที่ใช้บำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียโดยบรรจุตัวกลางที่เคลือบด้วยโฟโตแคตะลิสต์ในปฏิกรณ์	37
3-7	แสดงขวดบรรจุแอมโมเนียไฮดรอกไซด์เพื่อผลิตอากาศเสียจำลองที่มีก๊าซแอมโมเนียที่ปนเปื้อน	38
3-8	แสดงขั้นตอนการเตรียมโฟโตแคตะลิสต์ชนิด TiO_2-SiO_2 ด้วยวิธีโซล-เจล	40
3-9	แสดงขั้นตอนการเคลือบผิวเซรามิกโพลิมด้วยวิธีการจุ่มเคลือบ	41
3-10	แสดงขั้นตอนการเคลือบผิวใยแก้วด้วยวิธีการจุ่มเคลือบ	41
3-11	แสดงขั้นตอนการเตรียมโฟโตแคตะลิสต์ชนิด TiO_2 (แบบผง) ที่เคลือบบนตัวกลางหลอดแก้วด้วยวิธีการจุ่มเคลือบ	43
3-12	แสดงไดอะแกรมการบำบัดแอมโมเนียที่ปนเปื้อนในของเหลวในปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติกด้วยระบบแบบเบบท์	44

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่		หน้า
3-13	แสดงลักษณะของหลอดไฟที่ใช้ในกระบวนการโฟโตแคตะไลติก	44
3-14	แสดงการบรรจุโฟโตแคตะลิสต์ชนิด TiO_2 ที่เคลือบบนหลอดแก้วที่ปริมาณต่างๆ ในขวดใสที่บรรจุของเหลวปนเปื้อนด้วยแอมโมเนีย	45
3-15	แสดงการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตจากหลอดไฟในการทดลองบำบัดแอมโมเนียที่ปนเปื้อนในของเหลวด้วยปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติก	46
3-16	ปั๊มเก็บตัวอย่างอากาศเสียเพื่อวัดความเข้มข้นของแอมโมเนียในอากาศ	49
3-17	แสดงการวิเคราะห์ความเข้มข้นของแอมโมเนียด้วยวิธีการไทเทรต	50
3-18	แสดงสีของสารละลายที่ปนเปื้อนแอมโมเนียก่อนและหลังการไทเทรต	50
3-19	แสดงหน้าต่างของโปรแกรม Design Expert software เวอร์ชัน 8.0.7.1 trial	51
3-20	แสดงการวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารกลุ่ม NO_x ด้วย gas detector tube	57
3-21	แสดง Gas detector tube ของสารกลุ่ม NO_x	58
3-22	แสดงวิธีการเก็บตัวอย่างการวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารกลุ่ม NO_x ด้วย gas detector tube	58
4-1	ลักษณะพื้นผิวของตัวกลางเซรามิกที่เคลือบด้วยโฟโตแคตะลิสต์ชนิด TiO_2-SiO_2 ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า	60
4-2	ลักษณะพื้นผิวของตัวกลางใยแก้วที่เคลือบด้วยแคตะลิสต์ชนิด TiO_2-SiO_2 ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า	61
4-3	ลักษณะพื้นผิวของตัวกลางหลอดแก้วที่เคลือบด้วยแคตะลิสต์ชนิด TiO_2 ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า	61
4-4	แสดงประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียที่ปนเปื้อนในของเหลวกับเวลาในรอบการใช้โฟโตแคตะลิสต์ครั้งที่ 1 ด้วยปฏิกรณ์แบบแบทช์ ที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียในของเหลว 100 ppm ใช้หลอดยูวี ที่ความเข้มแสง 92 W/m^2 (4 หลอด)	63
4-5	แสดงประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียที่ปนเปื้อนในของเหลวกับเวลาในรอบการใช้โฟโตแคตะลิสต์ครั้งที่ 2 ด้วยปฏิกรณ์แบบแบทช์ ที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียในของเหลว 100 ppm ใช้หลอดยูวี ที่ความเข้มแสง 92 W/m^2 (4 หลอด)	64

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่		หน้า
4-6	แสดงประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียที่ปนเปื้อนในของเหลวกับเวลาในรอบการใช้โฟโตแคตะลิสต์ครั้งที่ 3 ด้วยปฏิกรณ์แบบแบทช์ ที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียในของเหลว 100 ppm ใช้หลอดยูวี ที่ความเข้มแสง 92 W/m^2 (4 หลอด)	64
4-7	แสดงคอลัมน์บรรจุเซรามิกโพลีที่เคลือบด้วยโฟโตแคตะลิสต์ชนิด $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$	65
4-8	แสดงประสิทธิภาพในการบำบัดก๊าซแอมโมเนียในอากาศเสียกับเวลาโดยใช้แคตะลิสต์ชนิด $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ ที่เคลือบบนตัวกลางเซรามิก 8 ชั้น ที่ความเข้มแสง 92 W/m^2 (หลอดยูวี 4 หลอด) อัตราการไหลของอากาศเสีย 1 l/min ที่ระดับความเข้มข้น 100 ppmv	66
4-9	แสดงคอลัมน์ที่บรรจุด้วยใยแก้วที่เคลือบบนโฟโตแคตะลิสต์ชนิด $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$	67
4-10	แสดงประสิทธิภาพในการบำบัดก๊าซแอมโมเนียโดยใช้โฟโตแคตะลิสต์ชนิด $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ เคลือบบนตัวกลางใยแก้วกับเวลา ที่ความเข้มแสง 92 W/m^2 (ใช้หลอดยูวี 4 หลอด) ที่อัตราการไหลของอากาศเสีย 1 l/min	67
4-11	แสดงการประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียในของเหลว โดยการใช้หลอดยูวีเอและหลอดแบล็คไลท์ ในระบบปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติกแบบแบทช์ ใช้จำนวนโฟโตแคตะลิสต์ 30 กรัม ที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนีย 300 ppm	70
4-12	แสดงประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียในของเหลวด้วยระบบปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติกแบบแบทช์ ที่ปริมาณ TiO_2 ต่างๆ เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง ที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนีย 300 ppm	71
4-13	แสดงประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียในของเหลวด้วยระบบปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติกแบบแบทช์ ที่ระดับความเข้มข้นแอมโมเนียต่างๆ	72
4-14	แสดงประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียกับเวลาในการดำเนินการด้วยการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง โดยการใช้โฟโตแคตะลิสต์ชนิด TiO_2 เคลือบบนหลอดแก้วในระบบปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติกแบบไหลต่อเนื่อง	73

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่		หน้า
4-15	แสดงประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียที่ความเข้มแสง ต่างๆ กับเวลาในการดำเนินการโดยใช้ปริมาณ TiO_2 3.54 กรัม (จำนวนคอลัมน์ 3 คอลัมน์) อัตราการไหลอากาศเสีย 3 l/min ที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียในอากาศเสีย 300 ppmv	74
4-16	แสดงผลของความเข้มแสงต่อประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียด้วย ปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก ใช้ปริมาณ TiO_2 3.54 กรัม (จำนวนคอลัมน์ 3 คอลัมน์) อัตราการไหลอากาศเสีย 3 l/min ที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียในอากาศเสีย 300 ppmv	75
4-17	แสดงประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียที่ปริมาณ TiO_2 ต่างๆ กับเวลาในการ ดำเนินการ โดยใช้ความเข้มแสง 68 W/m^2 (จำนวนหลอดไฟ 3 หลอด) ที่อัตราการ ไหลอากาศเสีย 3 l/min ที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียในอากาศเสีย 300 ppmv	76
4-18	แสดงผลของปริมาณ TiO_2 ต่อประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียด้วย ปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก ใช้ความเข้มแสง 68 W/m^2 (จำนวนหลอดไฟ 3 หลอด) อัตราการไหลอากาศเสีย 3 l/min ที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียในอากาศเสีย 300 ppmv	77
4-19	แสดงประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียที่อัตราการไหลอากาศเสียต่างๆกับเวลา ดำเนินการ โดยใช้ความเข้มแสง 68 W/m^2 (จำนวนหลอดไฟ 3 หลอด) ด้วยปริมาณ TiO_2 3.54 กรัม (จำนวนคอลัมน์ 3 คอลัมน์) ที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียใน อากาศเสีย 300 ppmv	78

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่		หน้า
4-20	แสดงผลของอัตราการไหลอากาศเสียต่อประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียด้วยปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติกที่มีการไหลของอากาศเสียอย่างต่อเนื่อง โดยใช้โฟโตแคตะไลสต์ชนิด TiO_2 ที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียในอากาศเสีย 300 ppmv	79
4-21	แสดงผลของ Retention time ต่อประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียด้วยปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติกที่ที่ปริมาณของคอลัมน์และอัตราการไหลอากาศเสียต่างๆ โดยใช้โฟโตแคตะไลสต์ชนิด TiO_2 ที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนีย 300 ppmv	80
4-22	แสดงวิธีการและผลการตรวจสอบปริมาณ NO_x ด้วย Gas detector tube	81
4-23	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียที่ได้จากค่าทดลองและจากการทำนายของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (4-1)	86
4-24	กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสง (x_1) และอัตราการไหลอากาศเสีย (x_2) ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนีย ที่ระดับความเข้มข้น 300 ppmv	87
4-25	กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสง (x_1) และปริมาณ TiO_2 (x_3) ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนีย ที่ระดับความเข้มข้น 300 ppmv	88
4-26	ผลการทดสอบหาประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียด้วยปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติกตามภาวะที่เหมาะสม (ความเข้มแสง 114 W/m^2 อัตราการไหลอากาศเสีย 1 l/min และปริมาณ TiO_2 5.9 กรัม)	90

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในปัจจุบันมีโรงงานอุตสาหกรรมเคมีประเภทต่างๆ เพิ่มมากขึ้น ซึ่งในหลายกระบวนการของอุตสาหกรรมเหล่านี้มีการใช้แอมโมเนีย (ammonia, NH_3) เป็นองค์ประกอบของสารตั้งต้น (Yamazoe et al., 2007) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำยางข้นมีการใช้แอมโมเนียเป็นส่วนประกอบในทุกขั้นตอนของกระบวนการผลิต เพื่อรักษาสภาพของน้ำยางสดและช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย เช่น จากขั้นตอนการเตรียมสารละลายแอมโมเนีย การรักษาสภาพน้ำยางสดก่อนเข้าสู่โรงงานผลิตน้ำยางข้น การถ่ายน้ำยางสดจากรถบรรทุกลงสู่บ่อรับน้ำยางสด จากห้องปั่นน้ำยางข้น และขั้นตอนการไล่แอมโมเนียจากหางน้ำยาง (กรมควบคุมมลพิษ, 2548) จากการใช้แอมโมเนียในปริมาณมากและมีความเข้มข้นสูง ทำให้มีการระเหยของแอมโมเนียจากกระบวนการผลิต โดยเฉพาะบริเวณใกล้กับถังพักหางน้ำยางจะมีระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียในอากาศมากที่สุด (229.5 ppmv) เมื่อเทียบกับบริเวณอื่นภายในโรงงานผลิตน้ำยางข้นที่ (สถาบันสิ่งแวดล้อมไทย, 2545) ด้วยไอระเหยของแอมโมเนียเหล่านี้ทำให้เกิดเป็นปัญหามลพิษทางอากาศที่ก่อให้เกิดผลเสียหลายในด้านต่างๆ ได้แก่ อันตรายต่อสุขภาพของคน สัตว์ ทำลายพืช ทำให้เกิดผลเสียต่อสภาพภูมิอากาศ และนอกจากนี้เมื่อแอมโมเนียถูกเผาไหม้จะเกิดเป็นสารกลุ่มไนออกไซด์ (NO_x) (Rahimpour and Asgari, 2008) ที่เป็นสาเหตุหนึ่งในการทำลายชั้นโอโซนของบรรยากาศทำให้เกิดปัญหาโลกร้อน สิ่งเหล่านี้เป็นปัญหาที่สำคัญที่ต้องแก้ไขอย่างเร่งด่วน

การศึกษาวิจัยเพื่อหาแนวทางการบำบัดแอมโมเนียจากอากาศเสียจึงได้มีขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยมีงานวิจัยใหม่ๆ ที่มีการศึกษาพัฒนาเทคนิคต่างๆ สำหรับการบำบัดแอมโมเนียในอากาศออกมาเผยแพร่อย่างสม่ำเสมอ เทคโนโลยีที่ใช้สำหรับการบำบัดมลพิษในอากาศมีหลายวิธีขึ้นอยู่กับชนิดและสมบัติของสารมลพิษที่ต้องการบำบัดและวัตถุประสงค์ของการบำบัดสาร อาจ

มีการนำสารที่ได้จากกระบวนการบำบัดกลับมาใช้งานใหม่หรือมีการบำบัดสารมลพิษทิ้งเพื่อการทำลาย เทคโนโลยีเหล่านี้ได้แก่ การเผาทำลาย (incineration) การแยกด้วยเมมเบรน (membrane separation) การควบแน่น (condensation) การดูดซับ (adsorption) และการดูดซึม (absorption) ซึ่งวิธีการเหล่านี้เหมาะสำหรับการบำบัดอากาศเสียที่ระดับความเข้มข้นต่ำๆ (สติดา, 2004) ไม่ได้เป็นการทำลายสารมลพิษแต่เป็นเพียงการถ่ายโอนมวลจากอากาศเสียไปยังตัวกลางอื่น นอกจากนี้ยังเสียค่าใช้จ่ายสูงในการบำบัดมลพิษอีกด้วย ส่วนระบบโฟโตแคตะไลติกออกซิเดชัน (photocatalytic oxidation) เป็นวิธีการหนึ่งที่มีประสิทธิภาพสูงในการบำบัดสารมลพิษชนิดต่างๆ ในอากาศเสีย โดยการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันให้สารมลพิษเปลี่ยนเป็นสารชนิดอื่นที่ไม่มีอันตราย ดำเนินการที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ (Yamazoe et al., 2007) วิธีการนี้ดำเนินการได้ง่ายมีต้นทุนการดำเนินการต่ำ และมีข้อดีกว่าวิธีอื่นเนื่องจากสามารถนำโฟโตแคตะไลสต์ที่ผ่านการใช้งานแล้วกลับมาใช้ใหม่ได้ ในงานวิจัยนี้จึงสนใจการนำระบบโฟโตแคตะไลติกมาใช้ในการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียที่เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำยางข้น

ระบบโฟโตแคตะไลติกมีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ โฟโตแคตะไลสต์ (photocatalyst) และแหล่งกำเนิดแสง UV เมื่อโฟโตแคตะไลสต์ได้รับการกระตุ้นด้วยแสงจะเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก ซึ่งสามารถออกซิไดซ์แอมโมเนียในอากาศเสียให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นไนโตรเจน (N_2) และน้ำ (H_2O) โดยปัจจัยในการบำบัดมลพิษที่ส่งผลต่อกระบวนการโฟโตแคตะไลติก ได้แก่ ความเข้มข้นของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ อุณหภูมิ ความเข้มของแสง (light intensity) และระดับความเข้มข้นของมลพิษ (สรרך, 2552) โฟโตแคตะไลสต์จะต้องมีสมบัติที่มีความไวต่อแสง (photo-active) ใช้งานในช่วงความยาวคลื่นของแสง UV ได้ มีความคงตัวต่อแสง เช่น อนุภาคนาโนเงิน (nanoparticles silver) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) และสังกะสีออกไซด์ (ZnO) (เสรีย์, 2549) การออกแบบและติดตั้งปฏิกรณ์มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนีย ซึ่งต้องคำนึงถึงการกระจายแสงและอุณหภูมิภายในระบบปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติกให้เหมาะสม ในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบปฏิกรณ์ที่เป็นแบบคอลัมน์บรรจุ (packed column) ที่สร้างขึ้นจากแก้ว ภายในบรรจุด้วยโฟโตแคตะไลสต์ และทำการติดตั้งคอลัมน์ไว้ตรงส่วนกลางของถังปฏิกรณ์ โดยติดตั้งหลอด UV ไว้กับผนังภายในของถังซึ่งล้อมรอบคอลัมน์ เมื่อแสงกระทบกับถังปฏิกรณ์ที่

สร้างจากวัสดุสแตนเลสจะช่วยให้แสงกระจายและสามารถส่องผ่านไปยังโฟโตแคตะลิสต์ได้อย่างทั่วถึง ระบบนี้มีการควบคุมอุณหภูมิภายในถังโดยการป้อนอากาศอย่างต่อเนื่องเพื่อไม่ให้ความร้อนที่เกิดจากหลอดไฟทำให้ระบบมีอุณหภูมิสูงเกินไป เนื่องจากอุณหภูมิมิผลต่อกระบวนการโฟโตแคตะไลติก

โฟโตแคตะลิสต์ชนิด TiO_2 เป็นโฟโตแคตะลิสต์ที่มีประสิทธิภาพสูงและราคาไม่แพง มีสมบัติที่ไม่ถูกทำลายด้วยแสง ทำให้สามารถนำโฟโตแคตะลิสต์กลับมาใช้ใหม่ได้อย่างต่อเนื่อง มีการนำ SiO_2 มาใช้เป็นโฟโตแคตะลิสต์ร่วมเพิ่มประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก ซึ่งทำการเตรียมโฟโตแคตะลิสต์เพื่อให้เกิดการยึดเกาะของโฟโตแคตะลิสต์บนพื้นผิววัสดุตัวกลาง เช่น เซรามิก ใยแก้ว โดยอาศัยวิธีโซล-เจล (sol-gel) ซึ่งเป็นวิธีการที่ทำให้สารละลายโฟโตแคตะลิสต์สามารถยึดเกาะและเคลือบอยู่บนตัวกลางได้ แต่มีข้อเสียเนื่องจากการใช้สารละลาย TiO_2 - SiO_2 มีราคาแพง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาเทคนิคการเตรียมโฟโตแคตะลิสต์โดยใช้ผง TiO_2 อนุภาคขนาดนาโนผสมกับตัวทำละลายชนิดเอทานอลเพื่อให้เกิดเป็นสารแขวนลอย ใช้โพลีเอทิลีนไกลคอล (polyethylene glycol, PEG) เป็นตัวเชื่อมประสาน (binder) และช่วยเพิ่มจำนวนของ Hydroxyl group (Yu et al., 2000) ทำการเคลือบโฟโตแคตะลิสต์ TiO_2 ที่เตรียมได้บนผิวของตัวกลางหลอดแก้วด้วยวิธีการจุ่มเคลือบ (dip coating) ซึ่งทำให้สามารถเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่าง TiO_2 กับอากาศเสียและแสงจากหลอด UV เพื่อให้เกิดการบำบัดแอมโมเนียในอากาศที่ดีขึ้น ซึ่งวิธีการใช้ผง TiO_2 สามารถเพิ่มปริมาณการยึดเกาะของ TiO_2 บนตัวกลางได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังช่วยลดขั้นตอนที่ยุ่งยากในการเตรียมโฟโตแคตะลิสต์และมีราคาที่ถูกกว่าวิธีโซล-เจล

การออกแบบการทดลองบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodologies, RSM) ซึ่งออกแบบด้วยเทคนิค Central Composite Design (CCD) เป็นการออกแบบทุกระดับของแต่ละปัจจัย โดยห่างจาก Center ของการออกแบบเท่ากัน และทำซ้ำที่จุดกึ่งกลางของแต่ละปัจจัย โดยมีระดับการทดลอง 5 ระดับ ($-\alpha$, -1 , 0 , 1 , α) วิธีนี้เป็นการประเมินผลลัพธ์ที่ได้รับอิทธิพลจากปัจจัยต่างๆ ของกระบวนการ (Shahsavani et al., 2009) การทดลองตามการออกแบบอย่างเป็นระบบจะแสดงให้เห็นถึงผลกระทบโดยรวมของพารามิเตอร์ในกระบวนการ (Amini et al., 2008) การใช้โปรแกรม Design-Expert RSM สำหรับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (mathematical modeling) ของกระบวนการทำ

ให้สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรดำเนินการและทำนายภาวะที่เหมาะสม (optimum condition) ของการทดลองเพื่อให้ได้มาซึ่งประสิทธิภาพสูงสุดในการทดลอง ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อประเมินความเหมาะสมและความสำคัญของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้

งานวิจัยนี้สนใจศึกษาการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำยางชั้นที่ระดับความเข้มข้น 200-700 ppmv ด้วยระบบปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติก ที่มีคอลัมน์บรรจุด้วยโฟโตแคตะลิสต์ชนิด $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ และ TiO_2 เคลือบบนวัสดุตัวกลางเซรามิก ไยแก้ว และหลอดแก้ว ใช้หลอดไฟที่ให้แสงยูวี โดยทำการทดลองบำบัดแอมโมเนียที่ปนเปื้อนทั้งในของเหลวเพื่อการทดสอบโฟโตแคตะลิสต์เบื้องต้นด้วยชุดปฏิกรณ์แบบแบทช์ (batch reactor) และในอากาศเสียด้วยปฏิกรณ์แบบไหลต่อเนื่อง (continuous-flow reactor) ชนิดคอลัมน์บรรจุที่ติดตั้งไว้ส่วนกลางภายในถังปฏิกรณ์ทรงกระบอกที่สร้างขึ้นจากวัสดุสแตนเลส โดยมีหลอดไฟยึดไว้กับผนังภายในของถัง ทำการศึกษาผลของตัวแปร 3 ชนิด คือ ความเข้มแสง ($23\text{-}114 \text{ W/m}^2$) อัตราการไหลของอากาศเสีย ($1\text{-}5 \text{ l/min}$) และปริมาณ TiO_2 ($1.18\text{-}5.90 \text{ g}$) ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนีย ใช้วิธีพื้นผิวตอบสนองในการออกแบบการทดลอง ใช้หาภาวะที่เหมาะสมในการทดลอง และได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสีย จากประสิทธิภาพของระบบด้วยภาวะที่เหมาะสมนี้จะสามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาไปสู่การบำบัดอากาศเสียที่ปนเปื้อนแอมโมเนียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำยางชั้น และโรงงานอื่นๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อเตรียมโฟโตแคตะลิสต์ชนิด $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ เคลือบบนตัวกลางเซรามิก ไยแก้ว และ TiO_2 เคลือบบนตัวกลางหลอดแก้ว สำหรับการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียด้วยปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติก
2. เพื่อออกแบบระบบปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติกออกซิเดชันที่มีประสิทธิภาพสูง สำหรับการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสีย

3. เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดแอมโมเนียด้วยปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติกที่ได้จากการออกแบบการทดลองโดยเทคนิค RSM ที่ทำให้ได้ประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียสูงสุดและสามารถใช้เป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรมต่อไป

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ทำการเตรียมโฟโตแคตะลิสต์สำหรับการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียด้วยปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติก
2. ทำการออกแบบและสร้างระบบปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติกเพื่อใช้ในการบำบัดแอมโมเนียที่ปนเปื้อนในอากาศ
3. ศึกษาการใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Method, RSM) เพื่อนำมาออกแบบการทดลองในการบำบัดแอมโมเนียที่ปนเปื้อนในอากาศ
4. หาภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดแอมโมเนียโดยทำการศึกษาผลของตัวแปร 3 ชนิดคือ ความเข้มแสง อัตราการไหลของอากาศเสีย และปริมาณ TiO_2

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1. สามารถผลิตโฟโตแคตะลิสต์ชนิด TiO_2 ที่เคลือบบนหลอดแก้วสำหรับการบำบัดแอมโมเนียด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกออกซิเดชัน
2. ได้ภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียที่ความเข้มข้น 200-700 ppm ด้วยระบบปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติกที่มีโฟโตแคตะลิสต์ชนิด TiO_2 อย่างมีประสิทธิภาพ

3. ได้ระบบบำบัดแอมโมเนียที่ปนเปื้อนในอากาศเสีย ซึ่งจะเป็นแนวทางในการพัฒนาประยุกต์ใช้จริงในโรงงานอุตสาหกรรมและสามารถพัฒนาไปสู่การบำบัดสารประกอบอินทรีย์ชนิดอื่นที่เป็นพิษออกจากอากาศเสียได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แอมโมเนีย (NH₃)

แอมโมเนีย (NH₃) เป็นสารประกอบอนินทรีย์ชนิดหนึ่ง เมื่อแอมโมเนียอยู่ในสถานะก๊าซจะเป็นก๊าซพิษ แอมโมเนียไม่มีสี มีกลิ่นฉุนรุนแรง มีความเป็นพิษสูง สามารถละลายน้ำได้ดี และมีฤทธิ์กัดกร่อนสูง ด้วยความสามารถในการละลายน้ำได้ดี ถึงแม้ว่าแอมโมเนียจะเบากว่าอากาศ (น้ำหนักโมเลกุลของแอมโมเนีย = 17.03) แต่เมื่อมีการรั่วไหลเกิดขึ้น ก๊าซแอมโมเนียจะรวมตัวกับความชื้นในอากาศทำให้เกิดเป็นหมอกควันสีขาวของแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งจะทำให้หนักกว่าอากาศ ดังนั้นเมื่อแอมโมเนียรั่วไหลในอากาศจึงมีทั้งแอมโมเนียที่เบาและหนักกว่าอากาศอยู่ปะปนกัน แอมโมเนียสามารถลุกไหม้ได้โดยทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศเหมือนเชื้อเพลิงทั่วไป เพียงแต่ความเข้มข้นต่ำสุดของแอมโมเนียที่จะสามารถติดไฟได้คือ 16% ซึ่งค่อนข้างจะสูงมากเมื่อเทียบกับไฮโดรคาร์บอนทั่วไปที่ความเข้มข้นต่ำสุดเพียง 1% เท่านั้นก็สามารถลุกไหม้ได้ แอมโมเนียสามารถลุกติดไฟได้เอง (autoignition temperature) ที่อุณหภูมิประมาณ 650 องศาเซลเซียส แอมโมเนียที่อยู่ในภาชนะบรรจุจะอยู่ในสถานะของเหลวภายใต้ความดันประมาณ 150 ปอนด์/ตารางนิ้ว ที่อุณหภูมิ -33 องศาเซลเซียส แอมโมเนียเหลวมีอัตราการขยายตัวกลายเป็นก๊าซแอมโมเนียในอัตราส่วน 1:850 นั่นคือ แอมโมเนียเหลว 1 ส่วนหากมีการรั่วไหลออกสู่บรรยากาศจะขยายตัวเป็นก๊าซได้ 850 ส่วน

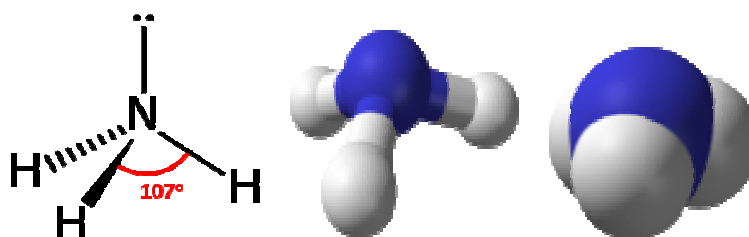
2.1.1 สมบัติทั่วไปของแอมโมเนีย

สูตรโครงสร้าง	: NH ₃
น้ำหนักโมเลกุล	: 17.03
ความถ่วงจำเพาะ	: 0.682 (ที่ -33.4 องศาเซลเซียส)

ลักษณะสีและกลิ่น	: เป็นก๊าซไม่มีสี กลิ่นฉุนรุนแรง
จุดเดือด	: -33.4 องศาเซลเซียส
จุดหลอมเหลว	: -77.7 องศาเซลเซียส
การละลาย	: ละลายน้ำได้ดี
ค่าพีเอช	: มีความเป็นด่าง (ที่ 1.0 N มีค่าพีเอช 11.6)
สมบัติอื่นๆ	: เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำให้แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH ₄ OH) และความร้อน (exothermic) $\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NH}_4\text{OH}$

2.1.2 รูปร่างโมเลกุลของแอมโมเนีย

โมเลกุลของแอมโมเนียมีลักษณะเป็นทรงสี่หน้า (tetrahedron) หรือเรียกว่า พีระมิดฐานสามเหลี่ยม ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2-1 ตามข้อสมมติฐานของทฤษฎี VSEPR รูปร่างโมเลกุลลักษณะนี้จะมีลักษณะเป็นไดโพล (dipole) ซึ่งเป็นโมเลกุลที่มีขั้ว ดังนั้นแอมโมเนียจึงละลายในน้ำได้ดี โดยอะตอมไนโตรเจนของโมเลกุลแอมโมเนียจะมีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว (lone pair electron) ทำให้แอมโมเนียมีฤทธิ์เป็นเบสในสารละลายน้ำ (aqueous solution) เมื่อแอมโมเนียมีพันธะร่วมกับไฮโดรเนียมไอออน (H₃O⁺) เกิดเป็นประจุบวกของแอมโมเนียมไอออน (NH₄⁺) และโมเลกุลของน้ำ (H₂O) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ pH ของสารละลาย



ภาพประกอบที่ 2-1 แสดงรูปร่างโมเลกุลของแอมโมเนีย

ที่มา: <http://student.mahidol.ac.th/~u4903148/ammonia%20-%20shape.htm>

2.1.3 อันตรายจากแอมโมเนีย

แอมโมเนียเป็นก๊าซพิษและมีฤทธิ์กัดกร่อน ไอระเหยของแอมโมเนียมีอันตรายต่อร่างกายทำให้เกิดการระคายเคืองและเกิดแผลไหม้ต่อระบบทางเดินหายใจ ทำให้มีเสมหะ เกิดอาการหายใจสั้นๆ เจ็บหน้าอก ชัก หมดสติ และอาจทำให้เสียชีวิตหากหายใจเอาสารนี้เข้าไป การได้รับแอมโมเนียทางปากจะทำให้เนื้อเยื่อทางเดินอาหารถูกกัดกร่อน เกิดแผลไหม้ มีอาการ คลื่นไส้ ปวดท้อง อาเจียน หมดสติ หากสัมผัสแอมโมเนียทางจุมูก ตา และผิวหนัง มีอาการระคายเคือง อึดอัดหายใจไม่สะดวก เจ็บคอ แน่นหน้าอก และหลอดลมอักเสบ ทำให้ผิวหนังและตาไหม้ และสูญเสียการมองเห็น และถ้าสัมผัสกับแอมโมเนียในสภาพของเหลวจะทำให้เกิดแผลไหม้ เนื่องจากความเย็นจัด (cold burn) การสัมผัสแอมโมเนียในระดับความเข้มข้นสูงๆ มีผลต่อระบบประสาทส่วนล่าง อาเจียน เกร็งชัก ความดันโลหิตเพิ่ม ตาบอด ถ้าได้รับในปริมาณที่สูงทำให้เสียชีวิตได้ทันที ระดับอันตรายของแอมโมเนียแสดงดังตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 แสดงระดับอันตรายของแอมโมเนีย

ความเข้มข้น NH ₃ (ppmv)	ผลต่อผู้สัมผัส	ระยะเวลาที่สัมผัส
5-9	จุมูกเริ่มรับกลิ่น ได้	เมื่อสัมผัส
100	ผู้สัมผัสบางรายมีอาการระคายเคือง อึดอัด	½ ชม.
400	ระคายเคืองลำคอ หายใจติดขัด	ไม่ควรได้รับนานเกิน 1 ชม.
500	ความดันโลหิตเพิ่ม หายใจติดขัด	½ ชม.
700	ระคายเคืองต่อตามากมองไม่ชัด	½ ชม.
1,720	อาการไอรุนแรง ชัก	หลังได้รับ ½ ชม. ทำให้เสียชีวิต
5,000-10,000	เกิดอาการเกร็งของระบบทางเดินหายใจ ภาวะการขาดออกซิเจนของเนื้อเยื่อ	เสียชีวิตทันที

ที่มา: http://www2.diw.go.th/haz/hazard/Library/ammo_3.htm

2.1.4 การใช้แอมโมเนียในโรงงานผลิตน้ำยางข้น

โรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำยางข้นมีการใช้แอมโมเนียเป็นส่วนประกอบในหลายขั้นตอนของกระบวนการผลิต แอมโมเนียทำหน้าที่รักษาสภาพของน้ำยางสดและช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย จากการใช้แอมโมเนียในปริมาณมากและมีความเข้มข้นสูง ทำให้มีการระเหยของแอมโมเนียจากขั้นตอนต่างๆ ของกระบวนการผลิต เช่น จากขั้นตอนการเตรียมสารละลายแอมโมเนีย การรักษาสภาพน้ำยางสดก่อนเข้าสู่โรงงานผลิตน้ำยางข้น การถ่ายน้ำยางสดจากรถบรรทุกลงสู่บ่อรับน้ำยางสด จากห้องปั่นน้ำยางข้น และขั้นตอนการไล่แอมโมเนียจากหางน้ำยาง ด้วยไอระเหยของแอมโมเนียเหล่านี้ทำให้เกิดเป็นปัญหามลพิษทางอากาศที่ก่อให้เกิดผลเสียหลายในด้านต่างๆ ได้แก่ อันตรายต่อสุขภาพของคนที่อยู่บริเวณโรงงาน อันตรายต่อสัตว์ ทำลายพืช ทำให้เกิดผลเสียต่อสภาพภูมิอากาศ โดยบริเวณต่างๆ ของโรงงานผลิตน้ำยางข้นมีระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียไม่เท่ากันดังแสดงรายละเอียดตามตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 แสดงระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียในพื้นที่ของโรงงานน้ำยางข้น

จุดเก็บตัวอย่าง	ระดับความเข้มข้นแอมโมเนียในอากาศ (ppmv)
1. หน้าโรงงาน	0
2. ใกล้กับถังสารละลายแอมโมเนีย	15.4
3. ใกล้กับถังรับน้ำยางสด	79.4
4. ห้องปั่นยาง	94.8
5. ใกล้ถังพักหางน้ำยาง	229.5
6. ใกล้กับหอไล่แอมโมเนีย	56.0
7. บริเวณข้างเคียงโรงงาน	5.3

ที่มา: สถาบันสิ่งแวดล้อมไทย, 2545. หน้า 16.

2.2 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂)

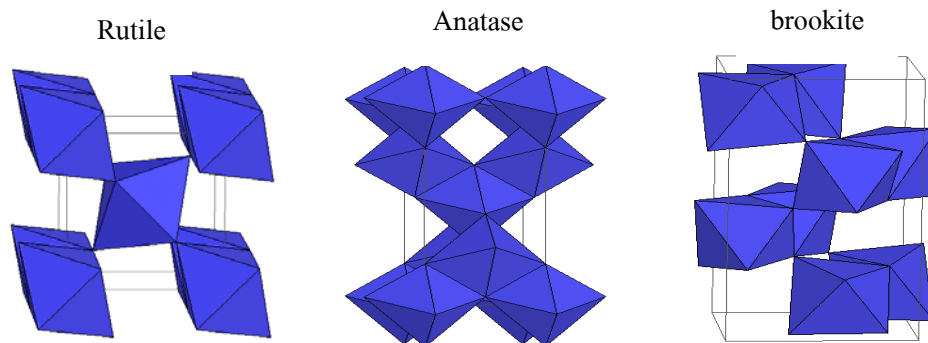
ไทเทเนียมไดออกไซด์หรือไทเทเนีย (TiO₂, titania) เป็นสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ที่มีแถบช่องว่างพลังงานเท่ากับ 3.2 eV มีแถบพลังงานสองแถบ คือ แถบวาเลนซ์ (valence band) และแถบการนำไฟฟ้า (conduction band) โดยแถบช่องว่างนี้จะขยายกว้างมากขึ้นเมื่อมีอนุภาคแสง (photons) ตกกระทบลงบน TiO₂ ซึ่งจะส่งผลให้อิเล็กตรอนย้ายตำแหน่งจากแถบวาเลนซ์ (valence band) ไปยังแถบการนำไฟฟ้า (conduction Band) แถบพลังงานทั้งสองนี้จะถูกแยกจากกันโดยมีแถบช่องว่างพลังงาน (band gap) ซึ่งเป็นความแตกต่างระหว่างชั้นพลังงาน เมื่อฟิล์ม TiO₂ ที่เคลือบบนวัสดุตัวกลางถูกกระตุ้นด้วยแสง อิเล็กตรอนจะหลุดออกจากแถบวาเลนซ์ ไปสู่แถบการนำไฟฟ้า ในขณะเดียวกันจะเกิดช่องว่างอิเล็กตรอนขึ้นที่แถบวาเลนซ์ เรียกว่า โฮล (hole, h⁺) เมื่อนำมาใช้ในกระบวนการโฟโตแคตะไลติกจะสามารถบำบัดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำหรืออากาศที่สัมผัสกับพื้นผิวของ TiO₂ ที่เป็นโฟโตแคตะลิสต์ (catalyst) ด้วยแสง (photocatalyst) ได้ ซึ่ง TiO₂ มีสมบัติที่ดีกว่าสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นๆ ในด้านของความเสถียรภาพต่อสารเคมี ไม่เกิดการกัดกร่อนหรือเปลี่ยนแปลงไปหลังจากการใช้งาน และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ (เสรีย์, 2549) จากสมบัติที่โดดเด่นเหล่านี้ทำให้ TiO₂ เป็นสารกึ่งตัวนำที่นิยมใช้เป็นโฟโตแคตะลิสต์กันอย่างแพร่หลายในกระบวนการโฟโตแคตะไลซิส (photocatalysis)

แคตะไลซิส (catalysis) หมายถึงกระบวนการที่สารมีส่วนร่วมในการเปลี่ยนแปลงอัตราของปฏิกิริยาเคมีโดยที่ตัวเองไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรือสูญหายไป ในภายหลังสารที่ทำหน้าที่คะตะไลซิสเรียกว่า โฟโตแคตะลิสต์ซึ่งช่วยเพิ่มอัตราการทำปฏิกิริยาด้วยการลดพลังงานที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเป็นการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่ใช้แสงในการกระตุ้นสาร โฟโตแคตะลิสต์ให้เปลี่ยนแปลงอัตราของปฏิกิริยาเคมี ซึ่งคุณสมบัติทางกายภาพของโฟโตแคตะลิสต์ชนิด TiO₂ แสดงไว้ในตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-3 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของ TiO_2 ที่มีโครงสร้างแบบอนาเทส (กฤษฎาพร, 2546)

คุณสมบัติ	ไทเทเนียมไดออกไซด์
สูตรทางเคมี	TiO_2
ชื่อที่ใช้เรียก	1. Titanium dioxide 2. Titanic anhydride 3. Titania
พื้นที่ผิว	50 ตารางเมตร/กรัม
ขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ย	2 นาโนเมตร
ความหนาแน่น	4.23 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร
มวลโมเลกุล	79.9 กรัม/โมล
ความถ่วงจำเพาะ	0.7 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

TiO_2 มีโครงสร้าง 3 รูปแบบ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2-2 คือ รูไทล์ (rutile) ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบ Tetragonal อนาเทส (anatase) มีโครงสร้างผลึกแบบ Tetragonal และบรูไคต์ (brookite) มีโครงสร้างผลึกแบบ Orthorhombic (Benedix et al., 2000) อนาเทสมีแถบช่องว่างพลังงาน 3.2 eV ซึ่งมากกว่ารูไทล์ (3.02 eV) อนาเทสจึงมีสมบัติเป็นโฟโตแคตะลิสต์ที่สูงกว่ารูไทล์ อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นของผลึกรูไทล์จะกลับมารวมตัวกับหลุมประจุบวกเร็วมากและเร็วกว่ากรณีของอนาเทส จึงทำให้ปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกเกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้นๆ และมีประสิทธิภาพต่ำ นอกจากนี้ TiO_2 ที่อยู่ในรูปเฟสอนาเทสมีความเป็นผลึกสูงและพื้นที่ผิวมากที่สุด เมื่อเทียบกับเฟสอื่นๆ (Yang et al., 2002) TiO_2 ชนิดรูไทล์ ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมสี อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง และอุตสาหกรรมอาหาร TiO_2 ชนิดอนาเทสจะนิยมใช้ในกระบวนการใช้แสงเพื่อบำบัดน้ำและอากาศเสีย ส่วน TiO_2 ชนิดบรูไคต์ เป็นผลึกที่พบในแร่เท่านั้น



ภาพประกอบที่ 2-2 แสดงโครงสร้างไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิด Rutile, Anatase และ Brookite

ที่มา: <http://ruby.colorado.edu/~smyth/min/tio2.html>

2.2.1 ประโยชน์ของไทเทเนียมไดออกไซด์

1. การยับยั้งหรือการต้านแบคทีเรีย TiO_2 ไม่เพียงแต่ฆ่าแบคทีเรียได้เท่านั้น แต่ยังช่วยในการย่อยสลายซากของแบคทีเรีย สาร TiO_2 ที่เป็นสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงมีประสิทธิภาพสูงกว่าสารต้านแบคทีเรียชนิดอื่นๆ เนื่องจากปฏิกิริยาจะทำงานเมื่อมีเซลล์แบคทีเรียสัมผัสกับพื้นผิวหรือเมื่อแบคทีเรียแพร่กระจายไปบนพื้นผิว นอกจากนี้สารพิษที่เกิดจากการตายของเซลล์ก็จะถูกทำลายจากการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของ TiO_2 ด้วย และที่สำคัญ TiO_2 จะไม่เกิดการเสื่อมประสิทธิภาพหลังจากที่ทำลายเชื้อแบคทีเรีย ทำให้มีประสิทธิภาพการใช้งานที่ยาวนาน โดยทั่วไปเมื่อกล่าวถึงประสิทธิภาพด้านยับยั้งหรือต่อต้านการติดเชื้อ TiO_2 จะมีความสามารถมากกว่าคลอรีน 3 เท่า และมากกว่าไอโซน 1.5 เท่า

2. การกำจัดกลิ่น อนุภาคไฮดรอกซีที่เกิดจากโฟโตแคตะลิซิส TiO_2 สามารถกำจัดโมเลกุลของสารอินทรีย์ระเหย (Volatile Organic Compounds หรือ VOCs) อยู่ในอากาศ อันเป็นสาเหตุของกลิ่นไม่พึงประสงค์ได้ โดยการทำลายพันธะระหว่างโมเลกุลของสารเหล่านั้น ด้วยวิธีการนี้จะทำให้สารอินทรีย์ที่ระเหยอยู่ในอากาศแตกออกเป็นโมเลกุลเดี่ยวจึงไม่สามารถทำอันตรายหรือส่งผลต่อร่างกายมนุษย์ได้ นอกจากนี้ยังมีประสิทธิภาพในการฟอกอากาศให้สะอาด โดยการกำจัดโมเลกุลของสารที่ทำให้เกิดกลิ่นไม่พึงประสงค์ตัวอย่างเช่น กลิ่นบุหรี่ กลิ่นยาสูบ สาร

ประเภท พอร์ซิลีไฮด์ ในโตรเจนไดออกไซด์ ยูเรีย น้ำมันเชื้อเพลิง และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอีกหลายชนิดในอากาศ โฟโตแคตะลิสต์ TiO_2 ทำให้อากาศสะอาดจากควัน เกสรดอกไม้ แบคทีเรีย และไวรัส รวมถึงก๊าซอันตราย ด้วยคุณสมบัติของการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

3. การฟอกอากาศ โฟโตแคตะลิสต์ TiO_2 ที่ถูกเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงจะสามารถกำจัดสารที่ก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศได้ เช่น สารประกอบไนโตรเจนออกไซด์ คาร์บอนหริ้ รวมถึงสารระเหยต่างๆ ที่ออกมาจากอาคาร นอกจากนี้ยังช่วยป้องกันเขม่า และคราบต่างๆ ที่จะเกาะผนังบ้าน รวมถึงช่วยกำจัดสารประเภทที่ทำลายชั้นบรรยากาศ เช่น ก๊าซคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (CFC) และก๊าซเรือนกระจกประเภทอื่น รวมถึงก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ทั้งทางตรงและทางอ้อมเมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยแสง ในบริเวณที่มีมลภาวะสูง TiO_2 จะช่วยลดสารก่อมลภาวะเหล่านี้ได้

4. การทำความสะอาดคราบและทำความสะอาดตัวเอง ผนังด้านนอกของอาคารที่ถูกปกคลุมด้วยคราบเขม่าจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ที่มีส่วนประกอบเป็นน้ำมัน เมื่อผนังตึกถูกทาด้วยโฟโตแคตะลิสต์ TiO_2 ซึ่งมีสมบัติการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง จะทำให้ผนังมีคุณสมบัติในการทำความสะอาดตัวเอง โดยเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสง TiO_2 จะทำลายสารประกอบไฮโดรคาร์บอนรวมทั้งฝุ่นผงต่าง ๆ ที่เกาะติดอยู่กับผนัง และจะถูกชะล้างออกจากผนังอย่างง่ายได้เมื่อฝนตกลงมา ทำให้ผนังตึกสะอาดและใหม่อยู่เสมอ

5. การผลิตน้ำสะอาด โฟโตแคตะลิสต์ TiO_2 ร่วมกับรังสีอัลตราไวโอเลต (UV) สามารถกำจัดสารอินทรีย์ที่ก่อมลภาวะให้กลายเป็นสารที่ไม่เป็นอันตรายได้ เช่น ทำให้กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และน้ำ (H_2O) รวมถึงมีคุณสมบัติในการต้านแบคทีเรีย เทคโนโลยีนี้มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสารอินทรีย์อันตราย และสามารถนำไปใช้ได้เป็นอย่างดีในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย

2.3 กระบวนการโฟโตแคตะไลติก (photocatalytic process)

กระบวนการโฟโตแคตะไลติกออกซิเดชัน (photocatalytic oxidation) เป็นกระบวนการที่มีการใช้แสงร่วมกับการใช้โฟโตแคตะลิสต์ โดยทั่วไปโมเลกุลของสารตั้งต้นจะถูกดูดซับไว้ที่ผิวของโฟโตแคตะลิสต์แล้วปฏิกิริยาจะเกิดที่ผิวของโฟโตแคตะลิสต์ โมเลกุลที่ถูกดูดซับจะเกิดการเปลี่ยนแปลงในแง่ของการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนและบางพันธะของโมเลกุลจะเริ่มสลายตัว (Arslan et al., 1999) โฟโตแคตะลิสต์ที่ใช้ในกระบวนการโฟโตแคตะไลติกออกซิเดชันนี้เป็นสารกึ่งตัวนำ ได้แก่ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ซิงค์ซัลไฟด์ (ZnS) แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) ทังสเตนออกไซด์ (WO_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) เป็นต้น ซึ่งในโครงสร้างของสารกึ่งตัวนำจะมีแถบพลังงาน 2 แถบ คือ แถบวาเลนซ์ (valence band) และแถบการนำไฟฟ้า (conduction band) แถบทั้งสองนี้จะถูกแยกจากกันโดยมีแถบช่องว่างพลังงาน (energy band gap) กั้นอยู่ กระบวนการโฟโตแคตะไลติกออกซิเดชันนี้สามารถทำลายสสารโดยมีโฟโตแคตะลิสต์ที่ต้องใช้แสง เมื่อทำการฉายแสงในกระบวนการโฟโตแคตะไลติกจะเป็นการให้พลังงานกับระบบเมื่อแสงไปกระทบพื้นผิวของ TiO_2 ทำให้ตัวมันเกิดการดูดซับโฟตอน (photon) ที่มีพลังงานเท่ากับหรือสูงกว่าช่องว่างพลังงาน เกิดการกระตุ้นให้อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์เคลื่อนที่ไปอยู่ในแถบนำไฟฟ้า ทำให้มีการสร้าง Electron hole pair หรือหลุมประจวบที่เรียกว่า โฮล (hole, h^+) กับ Adsorbed species (reactant) ที่ผิวของ Semi-conductor ขึ้น (ธรรมบุญ, 2549) ซึ่งโฮลที่แถบวาเลนซ์และอิเล็กตรอนที่แถบการนำไฟฟ้าสามารถที่จะกลับมาอยู่ในสภาวะเดิมได้อีก เรียกว่า การรวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอนกับโฮล (electron/hole recombination) โดยกระบวนการนี้เรียกว่ากระบวนการ Photo-Oxidation

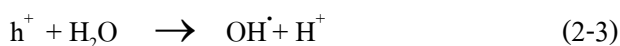
ตามธรรมชาติตัวเร่งปฏิกิริยาดำแสงหรือโฟโตแคตะลิสต์ (photocatalyst) ไม่สามารถดูดซับสารอินทรีย์ แบคทีเรีย เชื้อรา ที่อยู่ในน้ำหรืออากาศ ยกเว้นว่าสิ่งเหล่านั้นจะมาเกาะติดที่ผิวหน้าของโฟโตแคตะลิสต์ และจะไม่สามารถทำงานได้ถ้าปราศจากแสง กลไกการกระตุ้นของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกเพื่อให้เกิดเป็น h^+ แสดงดังสมการที่ (2-1) ส่วนที่ผิวของสารกึ่งตัวนำที่มี h^+ จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) และน้ำ เกิดเป็นไฮดรอกซิล

เรดิคอล (OH^\cdot) และเรดิคอลตัวอื่น ดังแสดงในสมการที่ (2-2) และสมการที่ (2-3) อิเล็กตรอนจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับออกซิเจนที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ เกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์ไอออน (O_2^\cdot) ดังสมการที่ (2-4) (Yu et al., 2000)

- การกระตุ้น



- การเกิดเรดิคอล จาก e^- / h^+



- ปฏิกิริยารีดักชัน



กระบวนการโฟโตแคตะไลติกเป็นกระบวนการที่ถูกนำมาใช้บำบัดมลพิษกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันเนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงในการทำลายสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำหรืออากาศ โดยมีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ โฟโตแคตะลิสต์และพลังงานจากแสงยูวี ซึ่งโฟโตแคตะลิสต์จะต้องมีสมบัติดังนี้

- 1) มีความไวต่อแสง (photo-active)
- 2) ใช้งานในช่วงความยาวคลื่นของแสง UV
- 3) มีความคงตัวต่อแสง
- 4) ไม่เสื่อมสภาพขณะใช้งาน
- 5) สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เกิดการฟื้นฟูสภาพพื้นผิวของ TiO_2 ด้วยการให้

พลังงานโดยการฉายแสงเพื่อสามารถนำกลับมาใช้ใหม่

พลังงานแสงต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับพลังงานโฟตอนของตัวโฟโตแคตะลิสต์ โดยโฟโตแคตะลิสต์ชนิด TiO_2 มีสมบัติตรงตามเกณฑ์เหล่านี้ในการนำมาใช้เป็นตัวแคตะลิสต์ในกระบวนการโฟโตแคตะไลติกเพื่อบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสีย

2.3.1 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการโฟโตแคตะไลติกออกซิเดชัน

ปัจจัยต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการโฟโตแคตะไลติกออกซิเดชัน มีดังนี้

1. ปริมาณโฟโตแคตะไลสต์ TiO_2 อนุภาค TiO_2 ทำหน้าที่ให้อนุมูลอิสระไฮดรอกซิลเพื่อทำปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกออกซิเดชันกับสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ การยึดเกาะของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ขึ้นอยู่กับปริมาณและขนาดของอนุภาค TiO_2 ดังนั้นพื้นที่ผิวจึงเป็นปัจจัยควบคุมการเกิดปฏิกิริยา มีการศึกษาพบว่า ปริมาณ TiO_2 ที่มากเกินไปจะทำให้ปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกออกซิเดชันลดลง เนื่องจากอนุภาคของ TiO_2 ที่มากเกินไปจะไปขัดขวางแสงยูวีทำให้ไม่สามารถกระจายแสงส่องได้ทั่วทุกโมเลกุลของ TiO_2 และทำให้ปริมาณอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลลดลง

2. ชนิดของสารปนเปื้อนในมลพิษ ประสิทธิภาพการบำบัดสารด้วยระบบโฟโตแคตะไลติกออกซิเดชันจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างโมเลกุลของสารปนเปื้อนด้วย ถ้าโครงสร้างโมเลกุลไม่ซับซ้อนก็สามารถบำบัดได้ง่าย แต่ถ้าโครงสร้างโมเลกุลมีความซับซ้อนมากขึ้นการบำบัดสารด้วยระบบโฟโตแคตะไลติกออกซิเดชันนี้ก็เกิดได้ยากขึ้น

3. ความเข้มของแสง เนื่องจากความเข้มของแสงขึ้นอยู่กับพลังงานของแสงโดยตรง (ความเข้มแสง คือ พลังงานต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยเวลา) ความเข้มแสงที่ใช้กระตุ้น TiO_2 ให้เกิดอิเล็กตรอนที่แถบการนำไฟฟ้าและโฮลที่แถบวาเลนซ์ต้องใช้ความยาวคลื่นของโฟตอนที่มีพลังงานเท่ากับแถบพลังงานของ TiO_2 คือ 388 นาโนเมตร หรือต้องมีพลังงานอย่างน้อย 3.2 eV (Benedix et al., 2000) พลังงานแสงที่ใช้ได้จึงอยู่ในช่วงความยาวคลื่นของ UV หรืออยู่ในช่วง 100 ถึง 400 นาโนเมตร ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2-4

ตารางที่ 2-4 ชนิดของรังสี UV และแหล่งกำเนิดที่ความยาวคลื่นต่างๆ

ชนิด	แหล่งกำเนิด
Long wave : UVA (320-400 nm)	- ดวงอาทิตย์ - หลอดไฟม่วง - โคมไฟให้ความร้อน - ประกายเชื่อมโลหะ - High intensity discharge lamp
Middle wave : UVB (280-320 nm)	- ดวงอาทิตย์ - โคมไฟให้ความร้อน - ประกายเชื่อมโลหะ - เครื่องมือเลเซอร์ทางการแพทย์
Short wave : UVC (100-280 nm)	- ดวงอาทิตย์ - โคมไฟให้ความร้อน - ประกายเชื่อมโลหะ - High intensity discharge lamp

ที่มา : <http://th.wikipedia.org/wiki/รังสีอัลตราไวโอเล็ต>

2.4 กระบวนการเตรียม TiO₂ บนตัวกลาง

ในการเตรียมโฟโตแคตะลิสต์ชนิด TiO₂ สำหรับใช้ในการบำบัดแอมโมเนียนั้น ประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 2 ขั้นตอน คือ การเตรียมสารละลายของโฟโตแคตะลิสต์และเคลือบโฟโตแคตะลิสต์บนวัสดุตัวกลาง (supporting media)

2.4.1 การเตรียมสารละลายโฟโตแคตะลิสต์ชนิด TiO_2

การเตรียมสารละลายของโฟโตแคตะลิสต์ TiO_2 สำหรับเคลือบบนพื้นผิวของวัสดุตัวกลางนั้น ทำได้โดยการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกันระหว่างสารประกอบตั้งต้น (precursor) กับตัวทำละลายที่เหมาะสม ซึ่งส่วนใหญ่มักเป็นแอลกอฮอล์เนื่องจากสามารถละลาย TiO_2 ได้ ซึ่งเกิดเป็นสารแขวนลอยที่มีขนาดอนุภาคเล็กๆ ในของเหลวที่เรียกว่า “โซล” จากวิธีนี้สามารถนำมาใช้ในการเตรียม TiO_2 ที่เคลือบบนพื้นผิวของวัสดุตัวกลาง เป็นวิธีสำหรับการเตรียมฟิล์มของแข็งจากสารละลายที่เรียกว่า วิธีการโซล-เจล (Sol-gel) ซึ่งประกอบไปด้วยขั้นตอนดังนี้

(1) เตรียมสารละลายตั้งต้นในตัวทำละลายที่เหมาะสม ซึ่งส่วนใหญ่มักเป็นแอลกอฮอล์ จากนั้นจะปล่อยให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis reaction) ตามด้วยปฏิกิริยาการรวมตัว (condensation reaction) ปฏิกิริยาการรวมตัวจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้เกิดเป็นสารที่มีโมเลกุลใหญ่ขึ้นกลายเป็นโซล

(2) จากสารละลายของโฟโตแคตะลิสต์ TiO_2 ที่เรียกว่าโซล เกิดเจลเลชัน (gelation) โดยเกิดการรวมตัวกันระหว่างโมเลกุล ซึ่งเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเหลวเป็นเจลที่มีความหนืด (viscosity) เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วเมื่อเริ่มเกิดโครงตาข่าย

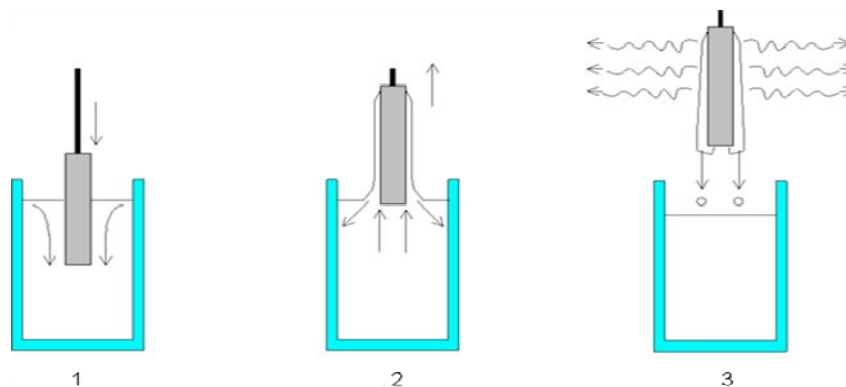
(3) การอบแห้ง (drying) จะทำหลังจากการเคลือบโฟโตแคตะลิสต์ TiO_2 ลงบนตัวกลางเพื่อเป็นการระเหยตัวทำละลาย

2.4.2 การเคลือบผิวตัวกลางด้วยวิธีการจุ่ม (dip coating)

ทำการเคลือบพื้นผิวของตัวกลางด้วยสารละลายของโฟโตแคตะลิสต์ TiO_2 เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างโฟโตแคตะลิสต์กับของเสี้ยว และช่วยชะลอการสัมผัสระหว่างโฟโตแคตะลิสต์กับอากาศเสี้ยวเนื่องจากทำหน้าที่เป็นตัว Raschig ring ทำให้แสงสามารถส่องผ่านโฟโตแคตะลิสต์ได้อย่างทั่วถึง เพื่อให้เกิดการบำบัดที่ดีขึ้น ในงานวิจัยนี้ใช้ตัวกลาง 3 ชนิด คือ เซรามิกใยแก้ว และหลอดแก้วทรงกระบอก ในการเลือกตัวกลางนั้นมีความสำคัญต่อการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก เนื่องจากต้องมีความคงทนต่อแสง และต้องทนอุณหภูมิสูงได้ เพราะต้องเผาตัวกลางที่ผ่านการเคลือบด้วยโฟโตแคตะลิสต์ ซึ่งโฟโตแคตะลิสต์นั้นจะเกิดเป็นเฟสอานาเทสได้ต้องเผาที่

อุณหภูมิสูง ซึ่งพื้นผิวของตัวกลางมีผลต่อการเคลือบ ถ้าพื้นผิวของตัวกลางเรียบลื่น เช่น หลอดแก้ว ทรงกระบอก จะทำให้การยึดเกาะของโฟโตแคตะลิสต์ที่เคลือบบนตัวกลางหลุดลอกได้ง่ายและติดผิวตัวกลางในปริมาณน้อย จึงต้องใช้ตัวผสมในการช่วยยึดเกาะระหว่างโฟโตแคตะลิสต์และผิวของตัวกลาง ในที่นี้เลือกใช้โพลิเอทิลีนไกลคอล (polyethylene glycol, PEG) เป็นตัวเชื่อมผสม (binder) และส่งผลให้โฟโตแคตะลิสต์ชนิด TiO_2 ที่เคลือบบนตัวกลางมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ในการจุ่มเคลือบนั้นสามารถแบ่งขั้นตอนในขณะเคลือบได้ 3 ขั้นตอนดังแสดงในภาพประกอบที่ 2-3 และมีรายละเอียดดังนี้

1. เตรียมพื้นผิวตัวกลางเพื่อพร้อมสำหรับเคลือบผิว โดยขัดหลอดแก้วด้วยกระดาษทรายเบอร์ 8 แล้วนำไปตัดให้มีความยาว 2 เซนติเมตร จากนั้นแช่ในน้ำยากัดกระจกเพื่อให้พื้นผิวหลอดแก้วหยาบอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งหลอด และโฟโตแคตะลิสต์สามารถยึดเกาะได้ดีขึ้น
2. ขั้นตอนการจุ่มชิ้นงาน (immersion) โดยจุ่มตัวกลางลงในสารละลายของโฟโตแคตะลิสต์เป็นเวลา 1 นาที
3. ขั้นตอนที่สารละลายเกาะที่ผิวชิ้นงานและเริ่มไหลย้อนกลับ (deposition and drainage) ในขั้นตอนนี้ PEG จะทำหน้าที่ยึดเกาะกับตัวกลางเพื่อให้โฟโตแคตะลิสต์เกาะติดตัวกลางได้คงทนขึ้น
4. ขั้นตอนที่สารละลายระเหย (evaporation) สำหรับตัวทำละลายที่ระเหยง่าย เช่น แอลกอฮอล์ ขั้นตอนการระเหยมักจะเกิดขึ้นพร้อมกับขั้นตอนที่ 2 ถ้าอุณหภูมิขณะทำการทดลองสูงการระเหยก็จะเกิดได้ดีขึ้น
5. การเผาวัตถุตัวกลาง เมื่อตัวทำละลายระเหยออกจากพื้นผิวของวัตถุตัวกลางเรียบร้อยแล้วทำการเผาตัวกลางตามอุณหภูมิที่ต้องการซึ่งโฟโตแคตะลิสต์จะเกิดปฏิกิริยาคาร์โบเทอร์มอลรีดักชันขึ้น ทำให้ได้ผลของปฏิกิริยาเป็นของแข็ง เพื่อให้ได้โครงสร้างของโฟโตแคตะลิสต์ในเฟส อนาเทสจึงต้องทำการเผาที่อุณหภูมิ 400-700 °C

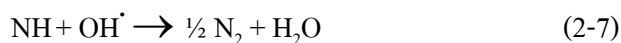
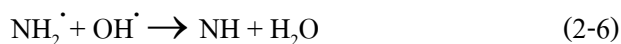
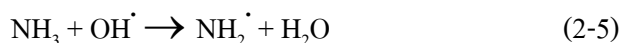


ภาพประกอบที่ 2-3 แสดงขั้นตอนการจุ่มเคลือบผิวของตัวกลางด้วยโฟโตแคตะลิสต์

ที่มา <http://www.solgel.com/articles/nov00/mennig.htm>

2.5 การบำบัดแอมโมเนียด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกออกซิเดชัน

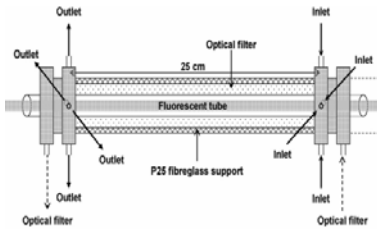
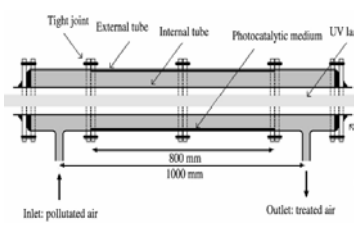
ระบบโฟโตแคตะไลติกมีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ โฟโตแคตะลิสต์ (photocatalyst) และแสง UV เมื่อโฟโตแคตะลิสต์ได้รับการกระตุ้นด้วยแสงจะเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกออกซิเดชัน ซึ่งสามารถออกซิไดซ์แอมโมเนียให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นไนโตรเจน (N_2) และน้ำ (H_2O) ในกระบวนการบำบัดแอมโมเนียเกิดจาก OH^\cdot ที่ได้จากปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกของ TiO_2 ร่วมกับแสง เข้าทำปฏิกิริยาโดยตรงกับ NH_3 ดังแสดงในสมการที่ (2-5) ถึง (2-7) (Yamazoe et al., 2007 and Teramura et al., 2004) No R

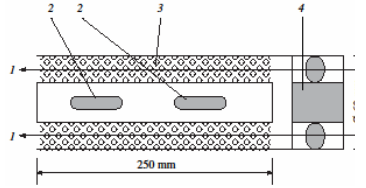
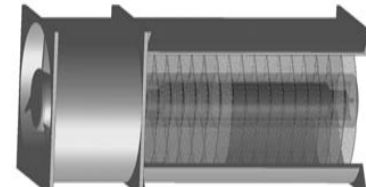
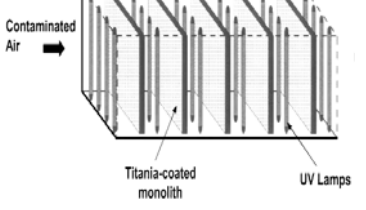


ในการบำบัดก๊าซเสียที่ปนเปื้อนด้วยแอมโมเนียโดยใช้ปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกออกซิเดชันจะมีก๊าซ N_2 เกิดขึ้นเป็นผลิตภัณฑ์หลักที่ต้องการ นอกเหนือจากผลิตภัณฑ์ที่ต้องการแล้ว

อาจจะมีผลิตภัณฑ์พลอยได้ (by product) ที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นคือ สารกลุ่มไนโตรเจนออกไซด์ (Nitrogen Oxides) หรือ NOx ก๊าซในกลุ่มนี้ประกอบด้วย Nitrogen และ Oxygen ในสัดส่วนที่แตกต่างกัน ส่วนใหญ่ของ NOx เป็นก๊าซที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ยกเว้น Nitrogen dioxide ที่รวมกับอนุภาคต่างๆ ในอากาศ ทำให้สามารถเห็นเป็นชั้นสีน้ำตาลแดง ในชั้นบรรยากาศมีปริมาณก๊าซ NOx สะสมอยู่ไม่มาก มันจึงเป็นก๊าซเรือนกระจกที่มีส่วนในการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อนน้อยกว่าคาร์บอนไดออกไซด์ที่สะสมในชั้นบรรยากาศเป็นปริมาณมากกว่า โดยไนโตรเจนออกไซด์เป็นก๊าซเรือนกระจกที่ก่อให้เกิดภาวะโลกร้อนมากเป็นอันดับที่ 4 ต่อจากคาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน และไอน้ำ ไนโตรเจนออกไซด์ชนิดอื่นก่อภาวะโลกร้อนโดยตรงโดยเป็นตัวสร้างโอโซนในบรรยากาศชั้นโทรโปสเฟียร์ในช่วงที่เกิดหมอกปนควัน (smog) การควบคุม NOx จึงนับเป็นมาตรการหนึ่งเพื่อลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

2.6 การติดตั้งปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติกสำหรับบำบัดอากาศเสีย

Reference	ลักษณะปฏิกรณ์	รูปประกอบ
Vincent et al., 2008	ปฏิกรณ์เป็นท่อลักษณะแบบวงแหวนมีหลอด UV อยู่ตรงกลางท่อด้านใน มีทางเข้าและทางออกอย่างละ 4 ทาง ผนังด้านในของท่อภายนอกปกคลุมด้วยเส้นใยแก้วที่เคลือบด้วยโฟโตแคตะไลต์ชนิด TiO_2 มี liquid filter กันระหว่าง หลอดกับตัวโฟโตแคตะไลต์	
Boulinguez et al., 2008	ปฏิกรณ์เป็นท่อแบบวงแหวนมีหลอด UV อยู่ตรงกลางท่อด้านใน ผิวด้านในของท่อภายนอกมีเส้นใยเซลลูโลสที่เคลือบด้วยโฟโตแคตะไลต์ผสม TiO_2 ซีโอไลต์ และซิลิกา	

Vorontsov et al., 2005	ปฏิกิริยาเป็นทรงกระบอก มีหลอด UV อยู่ตรงกลาง 2 หลอด มี TiO_2 เป็นตัวโฟโตแคตะลิสต์ที่เคลือบบนผิวด้านในของถังภายนอก มีพัดลมติดอยู่ส่วนปลายปฏิกิริยา	
Vorontsov et al., 2005	ปฏิกิริยาเป็นทรงกระบอก มีหลอด UV อยู่ตรงกลาง 1 หลอด มี TiO_2 เคลือบบนตาข่ายซึ่งอยู่ติดกับผิวด้านในของถังภายนอก มีพัดลมติดอยู่ส่วนปลายปฏิกิริยา	
Raupp et al., 2001	ปฏิกิริยาเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม มีหลอด UV เรียงซ้อนกันตามแนว monolith ที่เป็นตัวกลางโดยเคลือบด้วยโฟโตแคตะลิสต์ชนิด TiO_2	

การออกแบบและการติดตั้งระบบปฏิกิริยามีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนีย ซึ่งต้องคำนึงถึงการกระจายแสงและอุณหภูมิภายในระบบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกให้เหมาะสม ส่วนการออกแบบคอลัมน์ต้องมีลักษณะที่มีความโปร่งแสงเพื่อให้แสงสามารถส่องผ่านไปสัมผัสกับโฟโตแคตะลิสต์ที่บรรจุไว้ภายใน เช่น คอลัมน์ที่ทำจากแก้ว และถึงปฏิกิริยาต้องออกแบบให้มีการกระจายแสงได้ดี เช่น ถังปฏิกิริยาที่ทำจากสแตนเลส จะช่วยให้แสงกระจายและสามารถส่องผ่านไปยังโฟโตแคตะลิสต์ได้อย่างทั่วถึง ต้องมีการควบคุมอุณหภูมิภายในถังปฏิกิริยาเพื่อไม่ให้ความร้อนที่เกิดจากหลอดไฟทำให้ระบบมีอุณหภูมิสูงเกินไป เนื่องจากอุณหภูมิมีผลต่อกระบวนการโฟโตแคตะไลติก การติดตั้งระบบบำบัดแอมโมเนียที่ได้กล่าวข้างต้นนี้ทำให้สามารถบำบัดแอมโมเนียได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.7 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment, DOE)

การออกแบบการทดลอง เป็นการออกแบบเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความเหมาะสม โดยการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) ซึ่งอาศัยแบบจำลองหรือสมการทางคณิตศาสตร์มาอธิบายความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ สามารถศึกษาผลของหลายๆ ปัจจัยพร้อมกันในเวลาเดียวกันด้วยวิธีใช้จำนวนการทดลองน้อยกว่าการศึกษาทีละปัจจัย การออกแบบการทดลองจึงเป็นวิธีการเก็บข้อมูลที่มีประสิทธิภาพ โดยการเปลี่ยนแปลงหรือปรับค่าของปัจจัย (factors) อย่างมีจุดมุ่งหมายที่จะสังเกตการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์ที่ได้ (response) ที่เกิดขึ้นในการออกแบบการทดลอง นอกจากนี้ต้องทำการทดลองอย่างเป็นระบบเพื่อที่จะหาความสัมพันธ์เชิงสถิติ โดยความสัมพันธ์เชิงสถิติที่ได้นำมาซึ่งผลของพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) งานวิจัยนี้ได้นำเทคนิค RSM มาใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อการศึกษาตัวแปรดำเนินการต่างๆ ตามหลักสถิติ โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.7.1 คำจำกัดความของ RSM

RSM คือ การรวบรวมข้อมูลทางสถิติและเทคนิคทางคณิตศาสตร์ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ปัญหา เพื่อพัฒนาการเพิ่มประสิทธิภาพและการหาจุดที่เหมาะสมของกระบวนการ ซึ่ง RSM ประกอบด้วยกลุ่มของตัวแปรตามหลักการทางคณิตศาสตร์และสถิติ โดยจะใช้หลักการเหล่านี้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองและตัวแปรอิสระ โดย RSM ประกอบขึ้นมาจากผลของตัวแปรอิสระซึ่งอาจมีเพียงตัวเดียวหรือหลายตัว สำหรับการวิเคราะห์ของตัวแปรอิสระที่ได้จากผลการทดลองนั้นจะถูกนำมาสร้างเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ซึ่งจะอยู่ในรูปแบบของผลตอบสนองในรูปแบบของพื้นผิวดตอบสนอง (Response Surface) โดยความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองที่ได้กับข้อมูลดิบแสดงดังสมการที่ 2-8

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) + \varepsilon \quad (2-8)$$

เมื่อ	y	คือ ผลตอบสนองที่เกิดขึ้น
	f	คือ ฟังก์ชันการทำงานที่ตัวแปรที่ยังไม่ทราบต่อผลตอบสนอง
	x_1, x_2, \dots, x_n	คือ ตัวแปรอิสระซึ่งจะถูกเรียกว่า ตัวแปรธรรมชาติ
	n	คือ จำนวนของตัวแปรอิสระ
	ε	คือ ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นซึ่งเกิดมาจากแหล่งต่างๆ ซึ่งไม่สามารถถูกรวบรวมเอาไว้ใน f ได้ ซึ่งแหล่งที่วานี้ก่อให้เกิดผลกระทบ เช่น ค่าการวัดผิดพลาด โดยที่จะถูกคาดคะเนด้วยค่า ε มีการกระจายตัวด้วยค่าเฉลี่ยศูนย์และค่าความแปรปรวน

2.7.2 การออกแบบการทดลองโดยใช้เทคนิค RSM

การออกแบบการทดลองโดยใช้เทคนิค RSM มีขั้นตอนดังนี้

1. กำหนดตัวแปรที่จะศึกษา ประกอบไปด้วยตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม กระบวนการทางเคมีและทางชีวเคมี สามารถได้รับผลกระทบจากกระบวนการต่างๆ มากมาย เพราะเป็นไปได้ที่จะระบุผลกระทบต่างๆ ที่เกิดขึ้นได้จากทุกตัวแปรที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีความจำเป็นในการเลือกตัวแปรบางตัวที่สร้างผลกระทบได้โดยตรงออกมา การคัดเลือกโดยการทดลองนั้นมีความสำคัญในการระบุตัวแปรอิสระ หลังจากทำการระบุตัวแปรสำคัญต่างๆ แล้วจะสามารถกำหนดทิศทางในการพัฒนารูปแบบ ซึ่งจะสามารถระบุระดับความสำคัญของตัวแปรต่างๆ ได้ การระบุตัวแปรมีความสำคัญ เนื่องจากการหาจุดที่เหมาะสมของกระบวนการนั้นเกี่ยวข้องกันโดยตรง

2. กำหนดรหัส (Code) ของตัวแปรอิสระที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการออกแบบภาวะที่ใช้ในการทดลองโดยวิธีการ Central Composite Design (CCD) และทำการแปลงค่ารหัสตัวแปรอิสระ (Coded Variables) โดยใช้สมการที่ 2-9 ซึ่งการดำเนินการจะต้องกำหนดค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของตัวแปรอิสระที่สนใจ

$$x = \left[\frac{z - \frac{z_{\max} + z_{\min}}{2}}{\frac{z_{\max} - z_{\min}}{2}} \right] \quad (2-9)$$

โดยที่	x	= Coded variables
	x	= ตัวแปรอิสระ
	x_{\max}	= ค่าสูงสุดของตัวแปรอิสระ
	x_{\min}	= ค่าต่ำสุดของตัวแปรอิสระ

3. ทำการทดลองตามภาวการณ์ออกแบบ รวมทั้งแปลงรหัส (decode) ของตัวแปรอิสระแต่ละตัว เพื่อให้ได้ผลการตอบสนองของแต่ละการทดลอง

4. แสดงผลของตัวแปรอิสระต่างๆ ที่ได้จากการทดลองในรูปแบบผลการตอบสนอง จากนั้นทำการหาแบบจำลองในรูปของกราฟพื้นผิว (surface plot) โดย Regression analysis ใช้โปรแกรม Design-Expert ซึ่งแบบจำลองที่ได้จะอยู่ในรูปแบบสมการกำลังสอง (quadratic equation) ดังแสดงได้ในสมการที่ 2-10

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \left[\sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} x_i x_j \right]_{i(j)} \quad (2-10)$$

เมื่อ $\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}$ และ β_{ij} คือสัมประสิทธิ์ถดถอยทั้งแบบเชิงเส้น แบบกำลังสอง และสัมประสิทธิ์เชิงซ้อน ตามลำดับ

2.7.3 ประโยชน์ของเทคนิค RSM

ประโยชน์ของเทคนิค RSM มีมากเมื่อทำการเปรียบเทียบกับวิธีการออกแบบการทดลองโดยวิธีดั้งเดิม สิ่งสำคัญคือ จำนวนชุดการทดลองที่ออกแบบโดย RSM นั้นมีจำนวนที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับการออกแบบการทดลองแบบดั้งเดิม เพราะ RSM นั้นจะนำเสนอข้อมูลจำนวนมาก

จากการทดลองเพียงไม่กี่ครั้ง ซึ่งต่างจากการทดลองในแบบดั้งเดิมที่จะใช้จำนวนการทดลองที่มากกว่าเพื่ออธิบายถึงพฤติกรรมของระบบ และ RSM มีความเป็นไปได้ที่จะเจอผลกระทบที่มีลักษณะเป็นผลกระทบภายใน (interactive effect) จากตัวแปรอิสระ โดยเฉพาะกระบวนการทางชีวเคมี นอกจากนี้โมเดลสมการอย่างง่ายของ RSM จะเพิ่มความเข้าใจต่อผลที่เกิดจากการผสมกันของตัวแปรอิสระต่างๆ เมื่อสังเกตสมการนั้นผ่านการทดลองต่างๆ ก็พบว่า ข้อมูลของตัวแปรอิสระต่างๆ ที่ได้กับผลตอบสนองนั้นมีความสอดคล้องกัน จึงกล่าวได้ว่า RSM เป็นเครื่องมือที่เป็นประโยชน์สำหรับการหาจุดที่เหมาะสมของกระบวนการทางเคมีและกระบวนการทางชีวเคมี

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.8.1 การเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกของแอมโมเนีย

Yamazoe et al., 2007 ทำการศึกษาการออกซิเดชันของแอมโมเนียแบบเลือกเกิดบนโฟโตแคตะลิสต์ (SCO) ให้กลายเป็นไนโตรเจนภายใต้การฉายแสง (Photo-SCO) บนพื้นผิวของโฟโตแคตะลิสต์ชนิด TiO_2 โดยการดำเนินไปที่อุณหภูมิห้อง จากผลการทดลอง Photo-SCO เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบนพื้นผิวของ TiO_2 ชนิดต่างๆ พบว่าตัวอย่างชนิด JRC-TIO-8 มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาที่ดี และสามารถสลายแอมโมเนียได้ 100% ให้ค่า selectivity ของไนโตรเจน 95 เปอร์เซ็นต์ ที่ค่าอัตราการไหลของก๊าซต่อปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ (GHSV) = 25,000 h^{-1} Photo-SCO ได้ดำเนินไปโดยการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง NH_3 เรดิคัล และออกซิเจนแอนไอออนเรดิคัล ซึ่งพบว่าความว่องไวของ Photo-SCO มีความสัมพันธ์กับปริมาณการดูดซับของแอมโมเนีย ปริมาณของ TiO_2 และออกซิเจนแอนไอออนเรดิคัลโดยปริมาณ O_3^- เรดิคัล ที่เกิดขึ้นมีความว่องไวต่อปฏิกิริยามากกว่า O_2^- เรดิคัล ใน Photo-SCO

Ozaki et al., 2007 ทำการศึกษาความว่องไวต่อปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกของการบำบัดแอมโมเนียโดยการดัดแปลงพื้นผิว TiO_2 ด้วยโลหะชนิด B, Mg, Al, P, Zn, และ Ga โฟโตแคตะลิสต์ชนิด TiO_2 เป็นผลึกอนุภาคนาโนที่ได้มาจากการเกิดปฏิกิริยา Glycothermal เมื่อตรวจสอบสมบัติทางกายภาพและปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก พบว่าในบรรดาดัวย่างทั้ง 6 ชนิด

ตัวอย่างที่ดัดแปลงด้วย P มีประสิทธิภาพมากที่สุดต่อปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก เพื่อสลาย Acetaldehyde ภายใต้การฉายแสงในช่วง Visible TiO_2 ที่ผ่านการดัดแปลงพื้นผิวด้วย P แสดงการดูดกลืนแสงที่ดีในช่วง Visible (400-500 nm) พบว่าความว่องไวต่อปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก มีความสัมพันธ์กับปริมาณอะตอมของไนโตรเจนในโครงสร้างอนาเทส

2.8.2 การบำบัดมลพิษ

Pichat et al., 2000 ทำการศึกษาการใช้ TiO_2 ในการบำบัดกลิ่นหรือบำบัดอากาศภายในอาคารและอากาศเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมให้บริสุทธิ์ โดยใช้ปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติกออกซิเดชันในระดับห้องปฏิบัติการซึ่งติดตั้งด้วยหลอดที่ให้แสงที่มีความยาวคลื่น 365 nm และใช้ TiO_2 เคลือบบนตาข่ายใยแก้ว เพื่อทำการทดลองบำบัด BTX (benzene, toluene, m- xylene และ xylene) พบว่าสามารถบำบัดสารเหล่านี้ได้ดี นอกจากนั้นยังทำการศึกษการบำบัดโดยการเติมโอโซนเข้าสู่ระบบ พบว่าโอโซนช่วยเพิ่มความสามารถในการบำบัดอากาศของระบบได้

Jo et al., 2002 ทำการศึกษาการใช้โฟโตแคตะไลติกชนิด TiO_2 สำหรับการบำบัด VOCs ที่ความเข้มข้นต่ำที่พบในยานพาหนะต่างๆ ชนิดของ VOCs ที่ทำการศึกษาได้แก่ เบนซีน เอทิลเบนซีน และ o-, m-, p- ไซลีน ตัวแปรที่ทำการศึกษาได้แก่ ความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity) เส้นผ่าศูนย์กลางไฮดรอลิก (hydraulic diameter) และอัตราการไหลของอากาศที่ป้อน ตัวแปรที่กำหนดให้คงที่ตลอดการทดลอง ได้แก่ ความเข้มข้นของ VOCs แหล่งกำเนิดแสง UV วัสดุที่ใช้ในปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติก และน้ำหนักของ TiO_2 จากการดำเนินการภายใต้ภาวะการทดลองที่กำหนดทำให้ได้ประสิทธิภาพการบำบัดเข้าใกล้ 100% สำหรับที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ต่างกัน 4 ค่า จากการควบคุมความชื้นของบรรยากาศ พบว่าประสิทธิภาพของการเกิดโฟโตแคตะไลติกออกซิเดชันจะขึ้นอยู่กับเส้นผ่าศูนย์กลางไฮดรอลิกของปฏิกรณ์และอัตราการป้อนของอากาศ ในการทดลองมี CO เกิดขึ้นในปริมาณเล็กน้อยเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ของปฏิกิริยาออกซิเดชัน

Yu et al., 2001 ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของฟิล์มบาง TiO_2 ที่มีปริมาณอนาเทสที่แตกต่างกันโดยการนำฟิล์มบาง TiO_2 ไปใช้ในการสลายสีเมทิลออเรนจ์ (methyl orange) ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส พบว่าฟิล์มบาง TiO_2 ที่มีปริมาณของอนาเทสมากที่สุด จะมีค่าคงที่ในการเกิดปฏิกิริยาการลดสีของเมทิลออเรนจ์มากที่สุด และค่าคงที่ในการเกิดปฏิกิริยาจะลดลงเมื่อใช้ฟิล์มบาง TiO_2 ที่มีปริมาณอนาเทสลดลง

Hung et al., 2001 ได้ทำการศึกษาการย่อยสลายสีอะโซและสีออเรนจ์จี (Orange G) โดยใช้แสงในช่วงใกล้ยูวีและมี TiO_2 ชนิด P-25 anatase เป็นโฟโตแคตะลิสต์ พบว่า ค่า pH ปริมาณ TiO_2 ความเข้มของแสง และเวลาในการเกิดปฏิกิริยามีผลต่ออัตราการย่อยสลายสี คือ อัตราการย่อยสลายสีออเรนจ์จีจะเกิดได้เร็วในสภาวะที่เป็นกรด เมื่อมีปริมาณ TiO_2 และความเข้มแสงที่เหมาะสม และพบว่า สีออเรนจ์จีที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตรสามารถสลายตัวได้มากกว่าร้อยละ 80 ภายในเวลา 60 นาที และจลนพลศาสตร์การเกิดปฏิกิริยาเป็นแบบ Pseudo-first order สำหรับอัตราการย่อยสลายสีอะโซจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของ TiO_2 และความเข้มแสงเพิ่มขึ้น

2.8.3 การเตรียมโฟโตแคตะลิสต์

Su et al., 2004 ทำการทดลองเตรียม TiO_2 ด้วยวิธีโซล-เจล พบว่า TiO_2 เป็นตัวโฟโตแคตะลิสต์ เนื่องจากเกิดช่องว่างอิเล็กทรอนิกส์ที่เรียกว่า “โซล” โดยโซลที่เกิดขึ้นเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรง มีความคงตัวสูง และเลือกเป็นตัวรีดออกซ์ การเตรียม TiO_2 ด้วยวิธีโซล-เจล เริ่มจากการเตรียมโซลของ TiO_2 โดยการย่อยสลายและการรวมตัวของไทเทเนียม (IV) n-butoxide ใน Iso-propyl alcohol การวิเคราะห์ขนาดอนุภาค และรูปร่างลักษณะของผลิตภัณฑ์โดยตรวจสอบจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (TEM) โครงสร้างผลึกโดย X - ray diffraction (XRD) และวิเคราะห์สภาพทางเคมีโดยอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี อนุภาคไทเทเนียในโซลเริ่มต้นมีลักษณะเป็นรูปไข่ เมื่อนำไปอบที่อุณหภูมิ 400°C เกิดเป็นอนุภาค TiO_2 ที่มีรูปร่างหลายเหลี่ยม เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 400°C จะเป็นเฟสของอนาเทส ขณะที่เพิ่มอุณหภูมิในการเผาเป็น 700°C จะเป็นเฟสของรูไทล์ จากข้อมูลที่ได้จาก XRD พบว่าขนาดผลึกของ TiO_2 เพิ่มขึ้นจาก 4 นาโนเมตร เป็น 35 นาโนเมตรเมื่อ

เพิ่มอุณหภูมิเป็น 700°C พื้นที่ผิว BET ลดลงจาก $122 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ เป็น $11.5 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ ความว่องไวต่อปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกของ TiO_2 ที่สลายกรดซาลิไซลิก พบว่าเฟสอนาเทสสลายกรดซาลิไซลิกได้ดีภายใต้ความเหมาะสมในการทดลอง ซึ่งความว่องไวต่อปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกมีความสัมพันธ์กับความเหมาะสมในการเตรียม TiO_2

Kim et al., 2002 ได้ศึกษาถึงผลกระทบของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาเคลือบฟิล์ม TiO_2 ด้วยวิธีโซล-เจล โดยใช้ไทเทเนียมเตตระไฮดรอกไซด์ : ไอโซโพรพานอล : 0.7 N ไฮโดรคลอริก ในอัตราส่วนโมล 1 : 26.5 : 1.5 โดยใช้อุณหภูมิในการอบเคลือบผิวที่แตกต่างกัน คือ 300, 400, 500 จนถึง $1,100^{\circ}\text{C}$ ผลการทดลองพบว่า จะพบผลิตภัณฑ์ได้ตั้งแต่ที่อุณหภูมิ 400°C ขึ้นไป และมีความเข้มของจุดสูงสุดมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แต่ความเข้มจุดสูงสุดของอนาเทสจะลดลงที่อุณหภูมิตั้งแต่ $1,000^{\circ}\text{C}$ ขึ้นไป และจะเริ่มพบผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นแทน ซึ่งความเข้มจุดสูงสุดของรูไทล์เริ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ส่วนผลิตภัณฑ์เริ่มลดลงตามลำดับ

Yu et al., 2000 ทำการศึกษาลักษณะโครงสร้างพื้นผิวฟิล์มบางของ TiO_2 ที่เตรียมด้วยวิธีโซล-เจล ทำการเติมสารโพลีเอทิลีนไกลคอล (PEG) ลงไปเพื่อเป็นสารละลายตั้งต้น โดยดูการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างพื้นผิวและฟิล์มบางของ TiO_2 จากผลการทดลอง พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของ PEG ในสารละลายตั้งต้น ทำให้ฟิล์มมีขนาดใหญ่และมีจำนวนรูพรุนมากขึ้น นั่นก็คือมีไฮดรอกซิลเพิ่มขึ้นบนพื้นผิวของ TiO_2 อย่างไรก็ตามปริมาณแสงที่ส่องมายังฟิล์มลดลง เนื่องจากเกิดการกระเจิงของแสงโดยรูขุมขนที่มีขนาดใหญ่และจำนวนมากขึ้นในฟิล์ม เพื่อเป็นการยืนยันผลจึงได้ทำการทดลองกำจัดสีย้อมชนิดเมธิลลอรันจ์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสามารถกำจัดสีย้อมชนิดเมธิลลอรันจ์ ด้วย TiO_2 ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยใช้แสงยูวี และโครงสร้างพื้นผิวที่มีการเติม PEG ร่วมในสารตั้งต้นทำให้เพิ่มความสามารถของ TiO_2 ให้เป็นโฟโตแคตะลิสต์ที่ดี

Guillard et al., 2002 ได้ทำการศึกษาถึงประสิทธิภาพของฟิล์ม TiO_2 โดยใช้การเตรียมที่แตกต่างกันด้วยวิธีโซล-เจล พบว่าประสิทธิภาพของฟิล์มนั้นจะขึ้นอยู่กับจำนวนรอบในการจุ่มเคลือบ ความหนาของฟิล์ม อุณหภูมิในการอบเคลือบ และการเตรียมสารละลายในการจุ่มเคลือบ ต้องมีการเลือกสภาวะให้เหมาะสมแล้วจะได้ฟิล์ม TiO_2 ที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด ที่ได้จากการ

วิเคราะห์ลักษณะของพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยมีลักษณะพื้นผิวที่ไม่แตกและเรียบอย่างสม่ำเสมอ

Yoon et al., 2006 ได้ทำการศึกษาฟิล์มบาง TiO_2 ลงบนแผ่นแก้วซึ่งเตรียมด้วยวิธีโซล-เจล โดยทำการเทียบลักษณะของผิวฟิล์มบาง TiO_2 ที่เติมและไม่เติมอะซิโตน พบว่าที่เติมอะซิโตนจะได้ผิวของฟิล์มบางเรียบกว่าที่ไม่เติมเนื่องจากการเติมอะซิโตนช่วยให้ฟิล์มยึดติดกันดีมากขึ้น และเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิในการเตรียมฟิล์มบาง TiO_2 ให้สูงขึ้น อัตราการย่อยสลายด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสจะสูงขึ้นด้วย

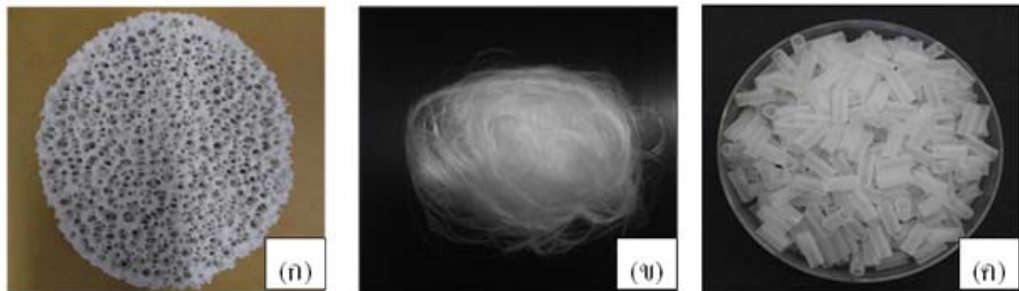
บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

3.1 วัสดุ

3.1.1 วัสดุตัวกลาง

วัสดุตัวกลางสำหรับการเคลือบผิวด้วยโฟโตแคตะลิสต์ชนิด $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ และ TiO_2 ที่ใช้ในการทดลองบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียประกอบด้วย 3 ชนิด คือ เซรามิกโฟม (ceramic foam) ไยแก้ว (fiber glass) และหลอดแก้ว (glass tube) ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3-1



ภาพประกอบที่ 3-1 แสดงวัสดุตัวกลางชนิดเซรามิกโฟม (ก) ไยแก้ว (ข) และหลอดแก้ว (ค) ที่ใช้ในการเคลือบผิวด้วยโฟโตแคตะลิสต์ $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ และ TiO_2

3.1.2 สารเคมี

- สารเคมีสำหรับเตรียมโฟโตแคตะลิสต์
 - ไทเทเนียมเตตระไอโซโพรพอกไซด์ (Titanium tetra isopropoxide, TTIP) (FLUKA)
 - ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2 , Degussa P25)
 - 2- โพรพานอล (2- Propanol) (LAB-SCAN, 99.7%)

- กรดไฮโดรคลอริก (HCl) เข้มข้น 2 โมลาร์
- เตตระเอทอกซีไซเลน (Tetraethoxysilane, TEOS) (Sigma Aldrich)
- เอทานอล (99.9%; Merck Germany)
- กรดไนตริก (HNO₃) (J. T. Baker, Thailand)
- Polyethylene glycol (PEG)
- สารเคมีสำหรับเตรียมอากาศเสียจำลองและวิเคราะห์อากาศเสีย
 - แอมโมเนีย (25%, commercial grade, Merck)
 - กรดบอริก (commercial grade, Merck)
 - มิกซ์อินดิเคเตอร์ (mix indicator)
 - กรดไฮโดรคลอริก (HCl) เข้มข้น 0.02 โมลาร์

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- ปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติก (photocatalytic reactor) มี 2 ชนิด
 - แบบแบทช์ เพื่อใช้บำบัดแอมโมเนียในของเหลว ใช้ขวดแก้วใส (2 × 8 เซนติเมตร) บรรจุโฟโตแคตะลิสต์ชนิดผง และใช้ขวดพลาสติกใส (7 × 13 เซนติเมตร) บรรจุโฟโตแคตะลิสต์ที่เคลือบบนตัวกลาง
 - แบบไหลต่อเนื่อง เพื่อใช้บำบัดแอมโมเนียในอากาศเสีย ใช้คอลัมน์ทำจากอะคริลิก (10 × 38 เซนติเมตร) และทำจากแก้ว (5 × 30 เซนติเมตร)
- หลอดยูวี (8W, F20T12-BLB, USA)
- หลอดแบล็คไลท์ (8W, F20T12-BLB, USA)
- ถังปฏิกรณ์ที่ทำจากสแตนเลส (chamber) ขนาด $\pi \times 20^2 \times 50 \text{ cm}^3$
- ท่อสายยางซิลิโคน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1 เซนติเมตร
- อุปกรณ์วัดอัตราการไหลอากาศชนิด Rotameter
- เครื่องอัดอากาศ (air compressor)

3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างแอมโมเนียในของเหลวและก๊าซ

- บิวเรตขนาด 10 มิลลิลิตร
- ปิเปตขนาด 2 มิลลิลิตร
- ขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร
- อิมพิงเจอร์ (Impingers)
- ปัมป์เก็บตัวอย่างอากาศ (224- PCXR8 Air Sampling Pump, SKC Inc.)

3.2.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมโฟโตแคตะลิสต์

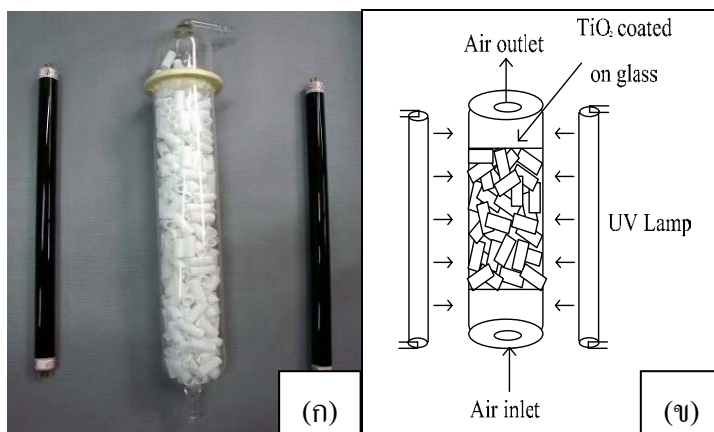
- เครื่องกวน (stirrer) พร้อมแท่งแม่เหล็กกวน (magnetic bar)
- กระจกบอทดวง (cylinder) ขนาด 100 มิลลิลิตร
- บีกเกอร์ (beaker)
- ตู้อบความร้อน (natural oven) ผลิตโดย EYELA รุ่น NDO-600N
- เตาเผาอุณหภูมิสูง Muffle Furnaces model ยี่ห้อ CARBOLITE ชนิด ELF 11/14B

3.3 ปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติก (photocatalytic reactor)

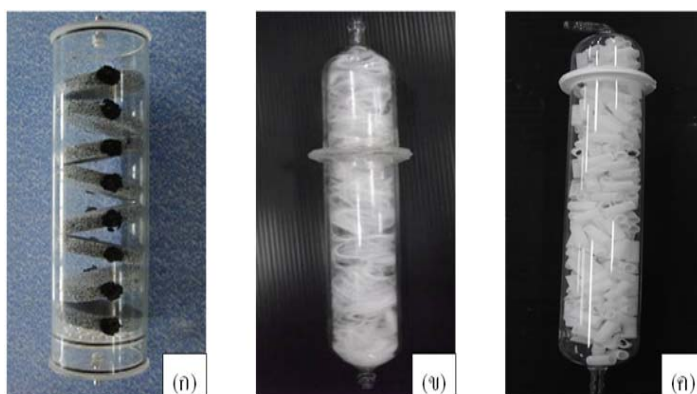
ชุดทดลองปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติกมีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน คือ ส่วนของปฏิกรณ์แบบแบทช์ทำจากขวดแก้วและขวดพลาสติกใส ปฏิกรณ์แบบไหลต่อเนื่องทำจากคอลัมน์อะคริลิกและแก้ว ส่วนของโฟโตแคตะลิสต์ที่เคลือบอยู่บนตัวกลาง และส่วนของหลอดไฟ UV ดังแสดงรูปจริงพร้อมไดอะแกรมในภาพประกอบที่ 3-2 และแสดงคอลัมน์บรรจุที่มีตัวกลางชนิดเซรามิกโพรไมท์ ไยแก้ว และหลอดแก้ว ดังภาพประกอบที่ 3-3 ซึ่งสามารถอธิบายรายละเอียดของปฏิกรณ์ได้ดังนี้

1. คอลัมน์บรรจุมีลักษณะเป็นทรงกระบอกด้านในบรรจุตัวกลางที่เคลือบด้วยโฟโตแคตะลิสต์ โดยตัวกลางเซรามิกโพรไมท์กับไยแก้วเคลือบด้วยแคตะลิสต์ชนิด $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ และตัวกลางหลอดแก้วเคลือบด้วยแคตะลิสต์ชนิด TiO_2 ส่วนของหลอดไฟจะติดกับผนังของถังปฏิกรณ์

ในแนวตั้ง ทำการป้อนอากาศเสียเข้าทางส่วนล่างของคอลัมน์บรรจุและปล่อยอากาศที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลติกออกซิเดชันออกทางส่วนบนของคอลัมน์บรรจุ



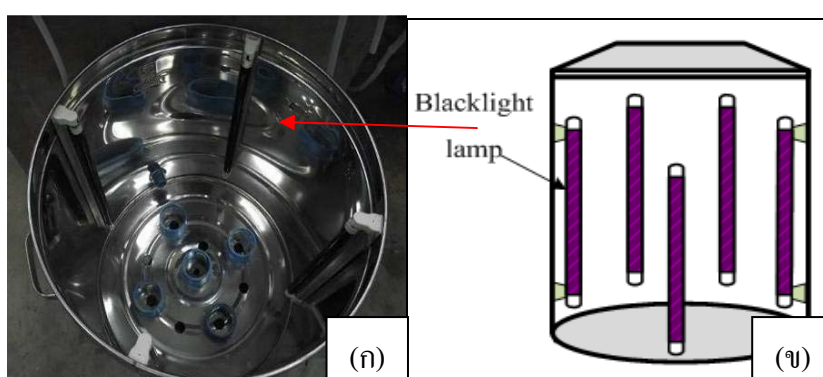
ภาพประกอบที่ 3-2 แสดงคอลัมน์ที่บรรจุด้วยตัวกลางหลอดแก้วที่ผ่านการเคลือบด้วยโฟโตแคตะไลสต์ชนิด TiO_2 (ก) และไดอะแกรมคอลัมน์บรรจุ (ข)



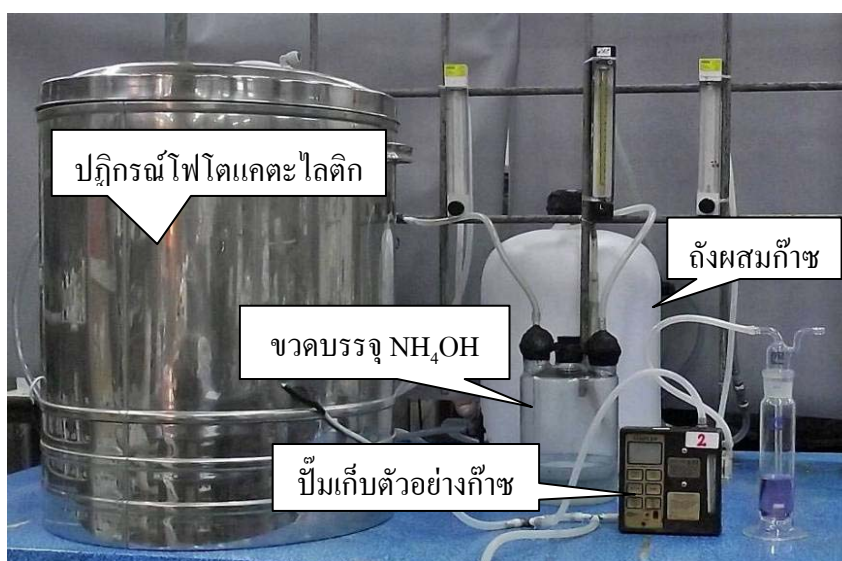
ภาพประกอบที่ 3-3 แสดงคอลัมน์ที่บรรจุตัวกลางเซรามิกโฟม (ก) โยแก้ว (ข) ที่เคลือบด้วยโฟโตแคตะไลสต์ชนิด $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ และตัวกลางหลอดแก้ว (ค) ที่เคลือบด้วยแคตะไลสต์ชนิด TiO_2

2. หลอดไฟที่ใช้ในการทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียมี 2 ชนิด คือ หลอดแบล็คไลท์ (black light lamp) และหลอดยูวี (UV lamp) ติดตั้งหลอดไฟไว้กับผนังภายในของถังปฏิกรณ์ ซึ่งจะอยู่บริเวณรอบนอกของคอลัมน์ เพื่อให้แสงสามารถส่งผ่านคอลัมน์เข้าไปสัมผัสกับโฟโตแคตะไลสต์ได้อย่างทั่วถึงดังภาพประกอบที่ 3-4 ในการ

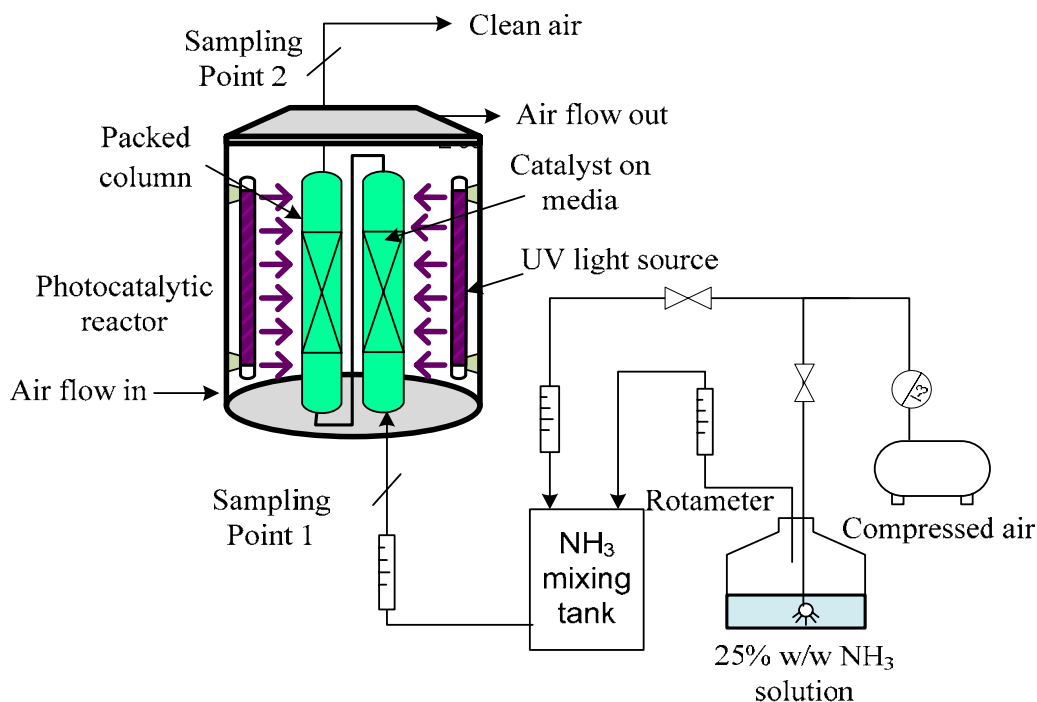
ทดลองนี้จะมีการใช้หลอดไฟจำนวน 1-5 หลอด ซึ่งจะให้ระดับความเข้มแสงช่วง $23-114 \text{ W/m}^2$ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียดด้วยกำลังวัตต์ที่แตกต่างกัน โดยหลอดไฟ 1 หลอด จะใช้กำลังไฟฟ้า 8 วัตต์ ระบบปฏิกรณ์นี้เป็นส่วนที่สำคัญต่อระบบบำบัดแอมโมเนียโดยแสดงไว้ดังภาพประกอบที่ 3-5 และแสดงไดอะแกรมในภาพประกอบที่ 3-6 ซึ่งมีการควบคุมอุณหภูมิภายในถังโดยการเปื้อนอากาศอย่างต่อเนื่องเพื่อไม่ให้ความร้อนที่เกิดจากหลอดไฟทำให้ระบบมีอุณหภูมิสูงเกินไป เนื่องจากอุณหภูมิมีผลต่อกระบวนการโฟโตแคตะไลติก



ภาพประกอบที่ 3-4 แสดงการติดตั้งหลอดไฟภายในถังปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติก (ก) และไดอะแกรมภายในถังปฏิกรณ์ (ข)



ภาพประกอบที่ 3-5 แสดงระบบโฟโตแคตะไลติกที่ใช้บำบัดแอมโมเนียโดยบรรจุตัวกลางที่เคลือบด้วยโฟโตแคตะลิสต์ลงในคอลัมน์ภายในถังปฏิกรณ์



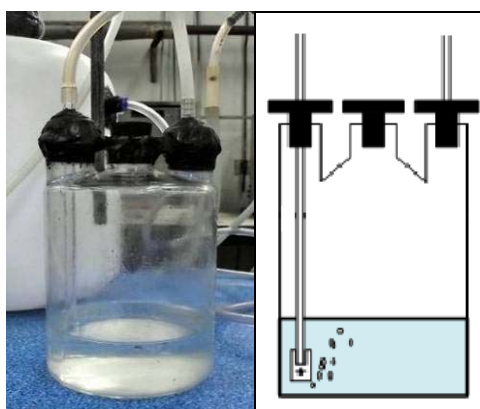
ภาพประกอบที่ 3-6 แสดงไดอะแกรมของระบบโฟโตแคตะไลติกที่ใช้บำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียโดยบรรจุตัวกลางที่เคลือบด้วยโฟโตแคตะลิสต์ลงในคอลัมน์ภายในถังปฏิกรณ์

3.4 ระบบเตรียมอากาศเสียสังเคราะห์

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการติดตั้งระบบบำบัดอากาศเสียด้วยปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติกที่ใช้ $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ และ TiO_2 เป็นโฟโตแคตะลิสต์ ซึ่งมีส่วนประกอบและรายละเอียดที่สำคัญดังนี้

1. เครื่องอัดอากาศ (air compressor) ใช้สำหรับการผลิตอากาศอัด (compressed air) ที่จะป้อนเข้าสู่ระบบปฏิกรณ์ด้วยอัตราการไหลที่ต้องการ
2. โรตاميเตอร์ (rotameter) เป็นอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศซึ่งเป็นแบบลูกลอยที่มีสเกลบอกถึงอัตราการไหลในหน่วยลิตรต่อนาที
3. วาล์วควบคุมอัตราการไหล (manual valve) ใช้ในการปรับอัตราการไหลของอากาศที่ป้อนเข้าสู่ปฏิกรณ์ให้ได้ตามค่าควบคุมที่ต้องการ ในการปรับวาล์วจะปรับตามค่าที่อ่านได้จากโรตاميเตอร์

4. ขวดบรรจุแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH) เป็นขวดแก้วปลายเปิด 3 ด้าน โดยมีการต่อท่ออากาศที่ทำจากแก้วลงไปในส่วนละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งอากาศจะไหลไปตามท่อลงสู่สารละลายที่บรรจุอยู่ อากาศจะพาก๊าซแอมโมเนียที่เกิดจากการระเหยของแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ออกจากขวดไปกับกระแสอากาศที่ท่อทางออกดังแสดงในภาพประกอบที่ 3-5



ภาพประกอบที่ 3-7 แสดงขวดบรรจุแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เพื่อผลิตอากาศเสียจำลองที่มีก๊าซแอมโมเนียที่ปนเปื้อน

5. ข้อต่อและท่อซิลิโคน ใช้สำหรับเชื่อมต่อท่ออากาศที่ปนเปื้อนเข้าสู่ระบบซึ่งมีการแยกและรวมเส้นท่อในหลายจุด รวมถึงใช้สำหรับเก็บตัวอย่างอากาศที่ทางเข้าและทางออกของปฏิกรณ์ เส้นท่อที่ใช้ในการเตรียมอากาศปนเปื้อนเข้าสู่ระบบจะใช้ท่อซิลิโคนเพื่อให้สามารถติดตั้งระบบท่ออากาศได้ง่ายและลดการรั่วซึมของอากาศจากระบบท่อ

3.5 การเตรียมโฟโตแคตะลิสต์ชนิด $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ ($\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ catalyst preparation)

การสังเคราะห์โฟโตแคตะลิสต์ชนิด $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ สำหรับการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกออกซิเดชันเพื่อบำบัดแอมโมเนีย ด้วยการเคลือบบนตัวกลางเซรามิกและใยแก้ว ขั้นตอนการสังเคราะห์โฟโตแคตะลิสต์จะแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนหลัก คือ ขั้นตอนการเตรียมสารละลายโฟโตแคตะลิสต์ (sol) และการเคลือบโฟโตแคตะลิสต์ลงบนตัวกลางด้วยวิธีการจุ่ม

เคลือบ (dip coating) ให้เกิดเป็นฟิล์มบางบนพื้นผิวของตัวกลางที่มีพื้นที่ผิวมากเพียงพอที่จะสัมผัสกับแอมโมเนียในอากาศเสีย และเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกออกซิเดชันสำหรับการกำจัดแอมโมเนียได้อย่างมีประสิทธิภาพ และนำโฟโตแคตะไลสต์ที่สังเคราะห์ได้บรรจุลงในคอลัมน์ที่อยู่ภายในถังปฏิกรณ์

3.5.1 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายโฟโตแคตะไลสต์ชนิด $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$

การศึกษาการเตรียมสารละลายโฟโตแคตะไลสต์ชนิด $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ โดยใช้วิธีโซล-เจล ซึ่งมีรายละเอียดในการดำเนินการดังนี้

1. ทำการเตรียมสารละลาย TiO_2 โดยละลายไทเทเนียมเตตระไอโซโพรพอกไซด์ (TTIP) ในตัวทำละลาย 2-โพรพานอล (2- Propanol) ที่อุณหภูมิห้องด้วยสัดส่วนของ TTIP: 2- Propanol เป็น 1:60 โดยโมลทำการกวนผสมสารละลายเป็นเวลา 10 นาที

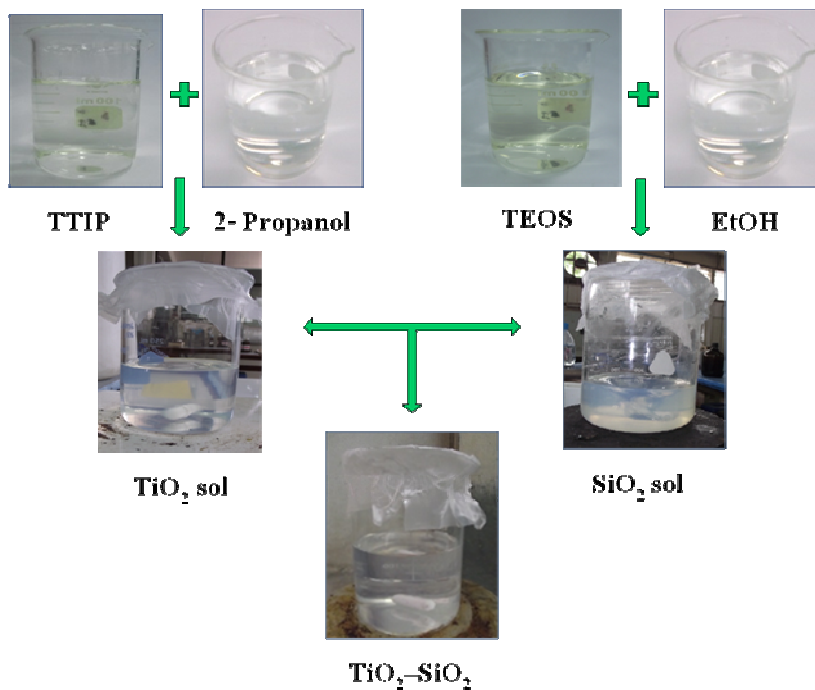
2. ปรับ pH ของสารละลาย TiO_2 ให้มีค่าเท่ากับ pH 3 โดยเติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 2 โมลาร์ (Su et al., 2004) และกวนผสมสารละลายต่อเนื่องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะทำให้ได้เป็นสารละลายของโฟโตแคตะไลสต์ที่เรียกว่า ไทเทเนียมไดออกไซด์โซล (TiO_2 sol)

3. ทำการเตรียมสารละลาย SiO_2 โดยละลายเตตระเอททรอกซีซิลีน (TEOS) ในตัวทำละลายเอทานอลที่อุณหภูมิห้องด้วยสัดส่วนของ TEOS: EtOH เป็น 1:60 โดยโมลทำการกวนผสมสารละลายเป็นเวลา 10 นาที

4. ปรับ pH ของสารละลาย SiO_2 ให้มีค่าเท่ากับ pH 3 เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 2 โมลาร์ และกวนผสมสารละลายต่อเนื่องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ได้เป็นสารละลายของโฟโตแคตะไลสต์ที่เรียกว่า ซิลิกาไดออกไซด์โซล (SiO_2 sol)

5. ทำการกวนผสม TiO_2 sol กับ SiO_2 sol ที่อุณหภูมิห้องด้วยอัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร (Vives et al., 2008) ได้เป็นสารละลายโฟโตแคตะไลสต์ที่เรียกว่า $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ sol

ขั้นตอนการเตรียมสารละลายโฟโตแคตะไลสต์ชนิด $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ แสดงดังภาพประกอบที่ 3-8



ภาพประกอบที่ 3-8 แสดงขั้นตอนการเตรียม โฟโตแคตะลิสต์ชนิด TiO_2 - SiO_2 ด้วยวิธีโซล-เจล

3.5.2 ขั้นตอนการเคลือบโฟโตแคตะลิสต์ TiO_2 - SiO_2 ลงบนวัสดุตัวกลาง

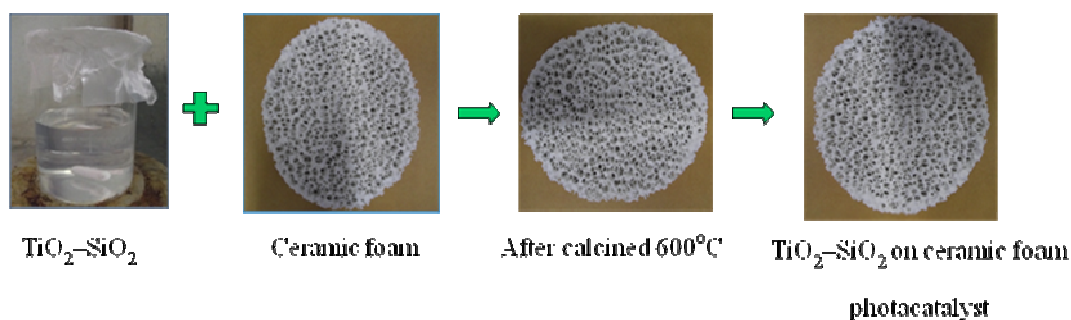
เมื่อทำการเตรียมสารละลายของโฟโตแคตะลิสต์ TiO_2 - SiO_2 sol ด้วยวิธีโซล-เจลเสร็จสมบูรณ์แล้ว ทำการเคลือบสารละลายโฟโตแคตะลิสต์ให้เป็นฟิล์มบางลงบนวัสดุตัวกลาง 2 ชนิด คือ เซรามิกโพลี และใยแก้ว เพื่อนำไปบรรจุในคอลัมน์สำหรับการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสีย โดยมีรายละเอียดของการเคลือบเป็นฟิล์มบาง (thin film) บนวัสดุตัวกลางดังนี้

1. เคลือบสารละลายโซลของโฟโตแคตะลิสต์ชนิด TiO_2 - SiO_2 บนพื้นผิวของวัสดุตัวกลางด้วยวิธีการจุ่มเคลือบ ปล่อยให้วัสดุตัวกลางจุ่มอยู่ในสารละลายเป็นเวลา 1 นาที วางวัสดุตัวกลางที่ผ่านการจุ่มไว้ในบรรยากาศที่อุณหภูมิห้องจนโซลที่เคลือบอยู่บนพื้นผิวตัวกลางแห้ง
2. นำวัสดุตัวกลางที่ผ่านการเคลือบผิวไปอบแห้งในตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้ตัวทำละลายระเหยออกจากฟิล์มที่เคลือบบนเซรามิกโพลีจนหมด

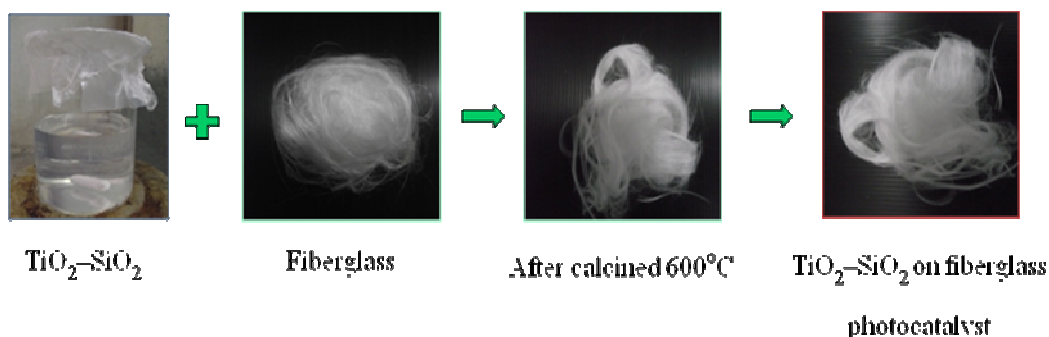
3. ทำซ้ำการจุ่มและอบแห้ง 3 ครั้ง

4. นำตัวกลางที่ผ่านการเคลือบด้วยโฟโตแคตะลิสต์ที่ได้ไปเผาในเตาเผา อุณหภูมิสูง ที่อุณหภูมิ 600°C เพื่อให้เกิดเป็นฟิล์มผลึกอนาเทส (anatase) ของแคตะลิสต์บนผิวของ เซรามิกโฟมและใยแก้ว ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3-9 และ 3-10 ตามลำดับ

5. นำตัวอย่างโฟโตแคตะลิสต์ที่เคลือบบนตัวกลางไปทำการวิเคราะห์ ลักษณะของพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)



ภาพประกอบที่ 3-9 แสดงขั้นตอนการเคลือบผิวเซรามิกโฟมด้วยวิธีการจุ่มเคลือบ



ภาพประกอบที่ 3-10 แสดงขั้นตอนการเคลือบผิวใยแก้วด้วยวิธีการจุ่มเคลือบ

3.6 การเตรียมโฟโตแคตะลิสต์ชนิด TiO_2

การเตรียมแคตะลิสต์ชนิด TiO_2 จากสารตั้งต้น TiO_2 ชนิดผงขนาดอนุภาคนาโน ละลายในเอทานอลได้เป็นสารแขวนลอย แล้วทำการเคลือบบนตัวกลางหลอดแก้ว ซึ่งมีขั้นตอนหลักแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการเตรียมสารแขวนลอยโฟโตแคตะลิสต์ และการเคลือบ โฟโตแคตะลิสต์บนตัวกลางด้วยวิธีการจุ่มเคลือบ มีรายละเอียดของขั้นตอนการเตรียมดังนี้

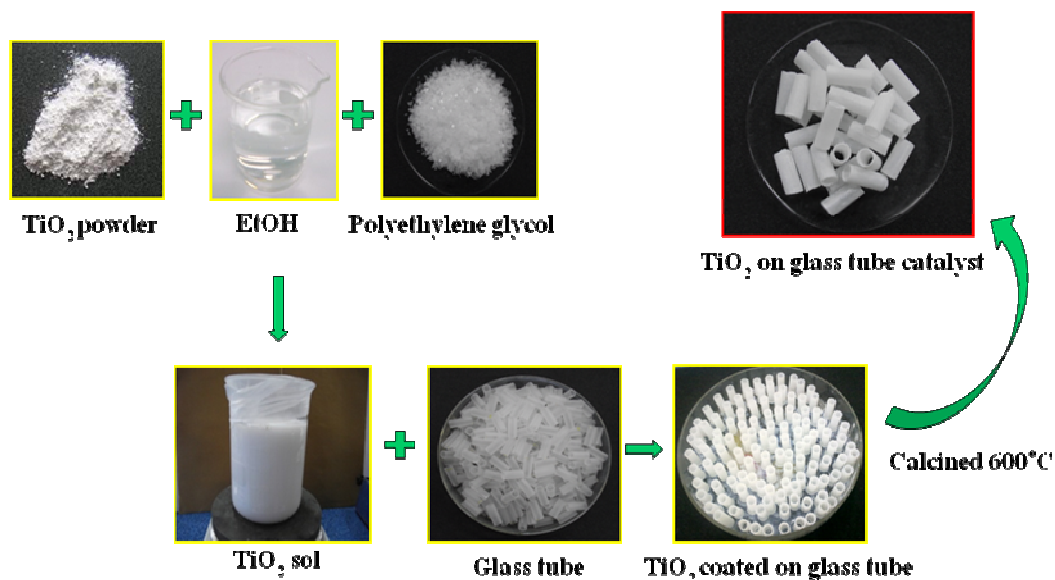
3.6.1 ขั้นตอนการเตรียมสารแขวนลอยของโฟโตแคตะลิสต์ชนิด TiO_2

1. ผสมผง TiO_2 ปริมาณ 6 กรัม ในตัวทำละลายเอทานอล 150 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้องทำการกวนผสมให้เกิดเป็นสารแขวนลอยเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
2. เติมโพลีเอทิลีนไกลคอล (polyethylene glycol, PEG) ลงไปในสารแขวนลอย TiO_2 จำนวน 1 กรัม เพื่อเป็นตัวเชื่อมประสาน (binder) ระหว่างตัวกลางกับโฟโตแคตะลิสต์ และกวนผสมสารแขวนลอยต่อเนื่องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
3. ปรับ pH ของสารแขวนลอยที่ได้ให้มีค่าเท่ากับ pH 3 ด้วยการเติมกรดไนตริก (HNO_3) เข้มข้น 2 โมลาร์ และกวนผสมสารแขวนลอยต่อเนื่องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ได้เป็นสารแขวนลอยของโฟโตแคตะลิสต์ชนิด TiO_2

3.6.2 ขั้นตอนการเคลือบโฟโตแคตะลิสต์ชนิด TiO_2 บนวัสดุตัวกลาง

1. ขัดผิวภายนอกของหลอดแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 เซนติเมตร ด้วยกระดาษทรายเบอร์ 8 เพื่อให้พื้นผิวที่เรียบลื่นของหลอดแก้วมีความหยาบก่อนนำไปเคลือบผิว แล้วตัดให้มีความยาว 2 เซนติเมตร
2. เตรียมพื้นผิวหลอดแก้วที่ผ่านการตัดโดยการแช่หลอดแก้วในน้ำยาคัดกระจกเพื่อให้มีพื้นผิวที่หยาบสม่ำเสมอทั่วทั้งหลอด และโฟโตแคตะลิสต์สามารถยึดเกาะพื้นผิวตัวกลางได้ดีขึ้น
3. ทำการเคลือบสารแขวนลอยของโฟโตแคตะลิสต์ชนิด TiO_2 ลงบนพื้นผิวของหลอดแก้วโดยจุ่มหลอดแก้วลงในสารแขวนลอยของโฟโตแคตะลิสต์เป็นเวลา 1 นาที
4. วางหลอดแก้วที่ผ่านการจุ่มสารแขวนลอยบนตะแกรงที่อุณหภูมิห้อง จนสารแขวนลอยที่เคลือบอยู่บนพื้นผิวหลอดแก้วแห้ง จากนั้นนำหลอดแก้วไปอบแห้งในตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้ตัวทำละลายระเหยออกจากฟิล์มที่เคลือบบนหลอดแก้วจนหมด (จุ่มซ้ำ 3 ครั้ง)
5. นำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้ไปเผาในเตาเผาอุณหภูมิ 600°C เพื่อให้เกิดเป็นฟิล์มของโฟโตแคตะลิสต์บนผิวของหลอดแก้ว ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3-11

6. นำตัวอย่างโฟโตแคตะลิสต์ที่เคลือบบนหลอดแก้วไปทำการวิเคราะห์ลักษณะของพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)



ภาพประกอบที่ 3-11 แสดงขั้นตอนการเตรียมโฟโตแคตะลิสต์ชนิด TiO₂ (แบบผง) ที่เคลือบบนตัวกลางหลอดแก้วด้วยวิธีการจุ่มเคลือบ

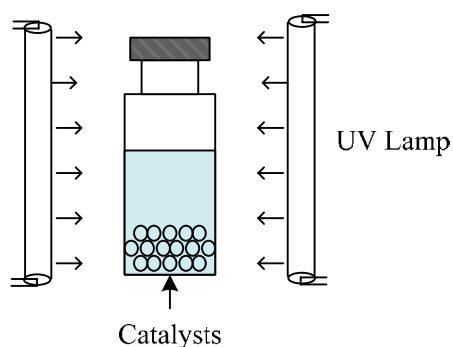
3.7 วิธีการทดลองบำบัดแอมโมเนียในของเหลว

สำหรับการทดลองบำบัดแอมโมเนียในของเหลวด้วยปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติกในระบบแบบแบทช์ (batch system) เพื่อเป็นการทดสอบเบื้องต้นถึงความสามารถของโฟโตแคตะลิสต์ที่เตรียมได้ว่ามีเสถียรภาพในการบำบัดแอมโมเนียมากน้อยเพียงใด ก่อนที่จะนำโฟโตแคตะลิสต์ที่เตรียมได้นี้ไปใช้สำหรับการทดลองบำบัดแอมโมเนียในก๊าซที่ใช้ระบบแบบไหลต่อเนื่อง (continuous system) ซึ่งมีรายละเอียดในการดำเนินการดังนี้

3.7.1 ตัวแปรการทดลองบำบัดแอมโมเนียที่ปนเปื้อนในของเหลว

การบำบัดแอมโมเนียที่ปนเปื้อนในของเหลวด้วยปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติก โดยใช้ระบบแบบแบทช์ ดำเนินการ โดยทำการศึกษาผลของชนิดหลอดไฟแบบสเปคไลท์ ปริมาณ

โฟโตแคตะลิสต์ (10-40 กรัม) และระดับความเข้มข้นของแอมโมเนีย (100-700 ppm) ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนีย ดังแสดงไดอะแกรมตามภาพประกอบที่ 3-12 และมีรายละเอียดการทดลองดังต่อไปนี้



ภาพประกอบที่ 3-12 แสดงไดอะแกรมการบำบัดแอมโมเนียที่ปนเปื้อนในของเหลวในปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติกด้วยระบบแบบเบบเบทซ์

1. ชนิดหลอดไฟ ทำการศึกษาผลของหลอดไฟ 2 ชนิด ต่อประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียของระบบ คือ ชนิดหลอดยูวีเอ (UV-A lamp) และหลอดแบล็คไลท์ (blacklight lamp) (จำนวน 4 หลอด) ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3-13 ที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนีย 300 ppm เพื่อเป็นการเปรียบเทียบผลการบำบัดและนำผลที่ได้ไปใช้สำหรับการทดลองบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียต่อไป

หลอดยูวี



หลอดแบล็คไลท์



ภาพประกอบที่ 3-13 แสดงลักษณะของหลอดไฟที่ใช้ในกระบวนการโฟโตแคตะไลติก

2. ปริมาณโฟโตแคตะลิสต์ ทำการศึกษาปริมาณโฟโตแคตะลิสต์โดยทำการซั่งหลอดแก้วที่ผ่านการเคลือบโฟโตแคตะลิสต์แล้ว 10, 20, 30, และ 40 กรัม ซึ่งมีปริมาณ TiO_2 ที่เคลือบ 0.48, 0.96, 1.44 และ 1.92 กรัม ตามลำดับ แล้วบรรจุลงในขวดใสเดิมของเหลวที่ปนเปื้อนแอมโมเนียที่ได้จากการสังเคราะห์ที่ระดับความเข้มข้น 300 ppm ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3-14



ภาพประกอบที่ 3-14 แสดงการบรรจุโฟโตแคตะลิสต์ชนิด TiO_2 ที่เคลือบบนหลอดแก้วที่ปริมาณต่างๆ ในขวดใสที่บรรจุของเหลวปนเปื้อนด้วยแอมโมเนีย

3. ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนีย ระดับความเข้มข้นของการปนเปื้อนแอมโมเนียในของเหลวเป็นปัจจัยที่สำคัญในการทดลองศึกษาประสิทธิภาพของการบำบัดแอมโมเนีย ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองที่ระดับความเข้มข้น 100, 300, 500 และ 700 ppm โดยใช้โฟโตแคตะลิสต์ที่เคลือบด้วยตัวกลางแล้วปริมาณ 30 กรัม

3.7.2 ขั้นตอนการทดลองบำบัดแอมโมเนียที่ปนเปื้อนในของเหลว

1. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนด้วยแอมโมเนีย โดยใช้น้ำกลั่นละลายแอมโมเนียเหลวเข้มข้น 25% w/w ในขวดวัดปริมาตรตามระดับความเข้มข้นที่ต้องการจากนั้นวิเคราะห์หาความเข้มข้นของแอมโมเนียในสารละลายที่เตรียมได้
2. ซั่งหลอดแก้วที่ผ่านการเคลือบด้วยโฟโตแคตะลิสต์แล้ว ตามปริมาณที่ต้องการทดลองบรรจุในภาชนะใสเพื่อใช้เป็นปฏิกรณ์ในการทดลอง

3. เทของเหลวปนเปื้อนด้วยแอมโมเนียที่ได้จากการสังเคราะห์ลงไปในช่วงใสที่บรรจุโฟโตแคตะลิสต์ ปริมาตร 200 มิลลิลิตร จากนั้นเปิดหลอดไฟเพื่อฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3-15

4. วัดความเข้มข้นของแอมโมเนียตั้งต้นและที่เหลืออยู่ในสารละลายตามช่วงเวลา โดยจะแบ่งเป็น 2 ช่วง คือ ชั่วโมงแรกจะเก็บตัวอย่างทุก 10 นาที ชั่วโมงถัดมาจะเก็บตัวอย่างทุก 20 นาที จนครบเวลา 2 ชั่วโมง



ภาพประกอบที่ 3-15 แสดงการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตจากหลอดไฟในการทดลองบำบัดแอมโมเนียที่ปนเปื้อนในของเหลวด้วยปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติก

3.8 วิธีการทดลองบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสีย

การบำบัดแอมโมเนียที่ปนเปื้อนในอากาศเสียประกอบด้วยขั้นตอนหลัก คือ การเตรียมอากาศเสียจำลองที่ปนเปื้อนด้วยแอมโมเนีย การทดลองบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียด้วยโฟโตแคตะลิสต์ชนิด $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ เคลือบบนตัวกลางเซรามิกกับใยแก้ว และโฟโตแคตะลิสต์ชนิด TiO_2 เคลือบบนตัวกลางหลอดแก้วที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์เพื่อใช้เป็นปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติกแบบต่อเนื่อง เก็บตัวอย่างอากาศที่ทางเข้าและทางออกของคอลัมน์ที่อยู่ภายในถังปฏิกรณ์เพื่อการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของระบบ

3.8.1 การเตรียมอากาศเสียจำลองที่ปนเปื้อนด้วยแอมโมเนีย

การเตรียมอากาศเสียจำลองที่ปนเปื้อนด้วยแอมโมเนียทำได้โดยการใช้ขวดบรรจุแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ เพื่อให้อากาศพาแอมโมเนียที่ระเหยไปรวมกับอากาศที่ถึงผสมรายละเอียดของการเตรียมอากาศเสียมีดังนี้

1. เริ่มจากการนำแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์มาบรรจุในขวดแก้วปลายเปิด 3 ด้าน เพื่อเป็นแหล่งปลดปล่อยแอมโมเนียสำหรับผลิตเป็นอากาศเสียจำลองในการทดลอง
2. ทำการป้อนอากาศอัดเป็นกระแสอากาศหลักจากเครื่องอัดอากาศซึ่งถูกแยกเป็นสองส่วน ส่วนแรกป้อนเข้าสู่ถังผสมและส่วนที่สองป้อนเข้าสู่ขวดที่บรรจุแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ เพื่อเร่งให้แอมโมเนียเกิดการระเหยและเกิดการพาของแอมโมเนียติดไปกับกระแสอากาศ
3. ส่งกระแสอากาศจากทางออกของขวดที่ปนเปื้อนด้วยแอมโมเนียเข้าผสมกับกระแสอากาศที่ถึงผสมตามสัดส่วนของอัตราการไหลและความเข้มข้นของอากาศเสียที่ต้องการ
4. ทำการป้อนอากาศเสียที่ผลิตได้เข้าสู่ทางเข้าของระบบปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติก วัดความเข้มข้นของแอมโมเนียในกระแสอากาศป้อน โดยทำการเก็บตัวอย่างอากาศเสียด้วยปั๊มเก็บอากาศและดูดซึมแอมโมเนียด้วยกรดบอริกเข้มข้น 2% w/v ในขวดอิมพิงเจอร์ เพื่อนำไปทำการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของแอมโมเนียในก๊าซโดยวิธีการไทเทรต (Rodrigues et al., 2007)
5. ควบคุมอัตราการไหลและความเข้มข้นของแอมโมเนียในอากาศด้วยการปรับวาล์ว จนได้ความเข้มข้นของแอมโมเนียในกระแสอากาศตามต้องการ โดยในช่วงแรกของการเตรียมอากาศเสียจะได้ค่าความเข้มข้นของแอมโมเนียในอากาศเสียที่ไม่สม่ำเสมอ จึงต้องปล่อยอากาศเสียทิ้งจนกว่าระบบเข้าสู่ภาวะสม่ำเสมอ (steady state) ประมาณ 15-30 นาที จึงจะสามารถปล่อยอากาศเสียจำลองเข้าทำการบำบัดในระบบปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติกได้

3.8.2 การทดลองบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสีย

เมื่อทำการปรับความเข้มข้นของแอมโมเนียในกระแสอากาศและอัตราการป้อนอากาศเสียได้ตามความต้องการแล้วจึงเริ่มดำเนินการทดสอบบำบัดแอมโมเนียในอากาศด้วยระบบแบบไหลต่อเนื่อง โดยการติดตั้งคอลัมน์ที่บรรจุด้วยตัวกลางที่เคลือบด้วยโฟโตแคตะลิสต์ชนิด

TiO₂-SiO₂ และ TiO₂ วัสดุตรงส่วนกลางของถังปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติกที่มีหลอดแบล็คไลท์ล้อมรอบคอลัมน์ มีขั้นตอนการดำเนินการดังนี้

1. เปิดหลอดหลอดแบล็คไลท์ตามจำนวนหลอดที่ทำการศึกษา
2. ทำการป้อนอากาศที่ปนเปื้อนด้วยแอมโมเนียเข้าสู่ระบบปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติกทางส่วนล่างของคอลัมน์ ให้อากาศไหลผ่านโฟโตแคตะไลสต์ที่เคลือบอยู่บนตัวกลาง และอากาศที่ผ่านการบำบัดแอมโมเนียจะไหลออกทางท่อด้านบนของคอลัมน์
3. ทำการเก็บตัวอย่างอากาศที่ทางเข้าและทางออกของระบบปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติกโดยใช้ปั๊มเก็บตัวอย่างอากาศ เพื่อทำการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของแอมโมเนียในอากาศเสียและคำนวณหาประสิทธิภาพ (%eff) ของระบบโดยใช้สมการที่ (3-1)

$$\% \text{ eff.} = \frac{\text{NH}_3 \text{ inlet conc.} - \text{NH}_3 \text{ outlet conc.}}{\text{NH}_3 \text{ inlet conc.}} \times 100 \quad (3-1)$$

เมื่อ % eff คือ ร้อยละของประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียของระบบ กำหนดให้ inlet conc. คือ ความเข้มข้นของแอมโมเนียในอากาศเสียที่ท่อทางเข้าของระบบ และ outlet conc. คือ ความเข้มข้นของแอมโมเนียในอากาศเสียที่ท่อทางออกของระบบในหน่วย Parts per million by volume (ppmv)

3.9 การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์แอมโมเนีย

3.9.1 การเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์แอมโมเนียในอากาศเสีย

1. อุปกรณ์เก็บตัวอย่างอากาศ

อุปกรณ์ชุดการเก็บตัวอย่างอากาศเพื่อวิเคราะห์หาความเข้มข้นของแอมโมเนียในอากาศเสียที่ทางเข้าและทางออกของระบบปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติก มีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้

- (1) ปั๊มเก็บตัวอย่างอากาศ (air sampling pump) แสดงดังภาพประกอบที่ 3-16 ใช้ดูดเก็บตัวอย่างอากาศที่ปนเปื้อนด้วยแอมโมเนียจากท่ออากาศเสียที่ทางเข้าและทางออก

ของระบบปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติก เพื่อส่งตัวอย่างอากาศเข้าทำการดูดซึมแอมโมเนียด้วยกรดบอริกในอิมฟิงเจอร์ โดยต่ออิมฟิงเจอร์เข้ากับท่อสายยางที่ทางออกของปั๊ม ซึ่งปั๊มเก็บตัวอย่างอากาศสามารถปรับและควบคุมอัตราการไหลของตัวอย่างอากาศที่จะป้อนเข้าอิมฟิงเจอร์ได้ตามความเหมาะสมของความเข้มข้นแอมโมเนียในอากาศเสียที่ทำการศึกษา

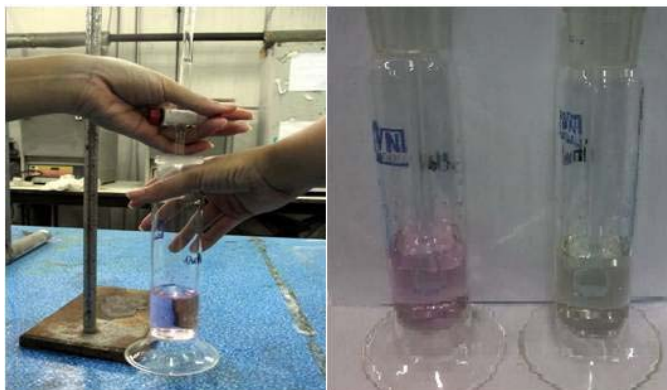


ภาพประกอบที่ 3-16 ปั๊มเก็บตัวอย่างอากาศเสียเพื่อวัดความเข้มข้นของแอมโมเนียในอากาศ

(2) ท่อสายยาง ใช้ท่อซิลิโคนสำหรับเป็นทางไหลของตัวอย่างอากาศเสีย ที่ต่อระหว่างระบบท่อทางเข้าและทางออกของปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติกกับชุดเก็บตัวอย่างอากาศเสีย โดยจุดเก็บตัวอย่างจะต่อด้วยท่อ 3 ทาง เพื่อให้การเก็บตัวอย่างอากาศเสียไม่รบกวนกับระบบ ในขณะที่กำลังทำการทดลอง

2. การวิเคราะห์ตัวอย่าง

เมื่อทำการเก็บตัวอย่างอากาศเสียที่ปนเปื้อนด้วยแอมโมเนียลงไปนในสารดูดซึมด้วยกรดบอริก (boric, H_3BO_3) โดยใช้อิมฟิงเจอร์ จากนั้นทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นของแอมโมเนียทั้งทางเข้าและทางออกด้วยวิธีการไทเทรต (Rodrigues et al., 2007) ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3-17



ภาพประกอบที่ 3-17 แสดงการวิเคราะห์ความเข้มข้นของแอมโมเนียด้วยวิธีการไทเทรต

3.9.2 การเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์แอมโมเนียในของเหลว

ทำการเก็บตัวอย่างแอมโมเนียในของเหลวโดยดูดสารละลายปริมาตร 2 มิลลิลิตร ด้วยปิเปตลงไปในขวดรูปชมพู่ที่มีสารละลายบอริกเข้มข้น 2% w/v ปริมาตร 8 มิลลิลิตร เพื่อใช้เป็นสารดูดซึมแอมโมเนีย จากนั้นทำการไทเทรตด้วยกรดไฮโดรคลอริก 0.02 โมลาร์ ซึ่งใช้มิกซ์อินดิเคเตอร์เป็นตัวบ่งชี้จุดยุติ ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีจากสารละลายสีเขียวเป็นสารละลายสีม่วง ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3-18



ภาพประกอบที่ 3-18 แสดงสีของสารละลายที่ปนเปื้อนแอมโมเนียก่อนและหลังการไทเทรต

3.10 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียด้วยระบบปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติกที่มีการไหลแบบต่อเนื่อง ดำเนินการโดยใช้เทคนิคพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้หลักการทางสถิติในการออกแบบการทดลองหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และหาภาวะที่เหมาะสมเพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งหมดด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance: ANOVA) การออกแบบนี้สามารถศึกษาผลของหลายๆ ปัจจัยพร้อมกันในเวลาเดียวกันด้วยวิธีใช้จำนวนการทดลองน้อยกว่าการศึกษาทีละปัจจัย การออกแบบการทดลองจึงเป็นวิธีการเก็บข้อมูลที่มีประสิทธิภาพโดยการเปลี่ยนแปลงหรือปรับค่าของ Input (factors) อย่างมีจุดมุ่งหมายที่จะสังเกตการเปลี่ยนแปลงของ Output (response) ที่เกิดขึ้น ด้วยโปรแกรม Design Expert software ดังแสดงไว้ตามภาพประกอบที่ 3-19



ภาพประกอบที่ 3-19 แสดงหน้าต่างของโปรแกรม Design Expert software เวอร์ชัน 8.0.7.1 trial

ระบบปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติกประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ส่วนของคอลัมน์ ส่วนของโฟโตแคตะลิสต์ และส่วนของหลอดไฟ UV ดังนั้นตัวแปรที่ทำการศึกษาในการบำบัด

แอมโมเนียในอากาศเสียในงานวิจัยนี้จึงประกอบด้วย ความเข้มแสงยูวี อัตราการไหลอากาศเสีย และปริมาณ TiO_2 โดยแสดงรายละเอียดของขั้นตอนในการออกแบบการทดลองดังต่อไปนี้

1. กำหนดตัวแปรและช่วงของการดำเนินการที่ศึกษา ประกอบด้วย

(1) ตัวแปรอิสระ (independent variable) ประกอบด้วย 3 ตัวแปร คือ ความเข้มแสงอยู่ในช่วง 23-114 W/m^2 อัตราการไหลของอากาศเสียอยู่ในช่วง 1-5 l/min และปริมาณ TiO_2 อยู่ในช่วง 1.18-5.9 g กำหนดให้ x แทนตัวแปรอิสระ ระดับขอบเขตและสัญลักษณ์แทนการออกแบบการทดลองแสดงไว้ดังตารางที่ 3-1

(2) ตัวแปรตอบสนอง (response) มี 1 ตัวแปร คือ ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนีย ในแต่ละการทดลอง กำหนดให้ y เป็นตัวแปรตาม

ตารางที่ 3-1 แสดงช่วงของตัวแปรดำเนินการและสัญลักษณ์ของการออกแบบการทดลอง

ตัวแปรอิสระ	ระดับต่ำสุด (lower limit)	ระดับสูงสุด (upper limit)	สัญลักษณ์
ความเข้มแสง (W/m^2)	23	114	x_1
อัตราการไหลอากาศเสีย (l/min)	1	5	x_2
ปริมาณ TiO_2 (g)	1.18	5.90	x_3

2. กำหนดรหัส (code) ของช่วงดำเนินการออกแบบการทดลองของตัวแปรอิสระที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการออกแบบภาวะที่ใช้ในการทดลองด้วยเทคนิคของ Central Composite Design (CCD) และทำการแปลงค่ารหัสตัวแปรอิสระ (coded variables) โดยใช้สมการที่ 3-2 และผลการออกแบบการทดลองแสดงไว้ดังตารางที่ 3-2

$$x = \left[\frac{z - \frac{z_{\max} + z_{\min}}{2}}{\frac{z_{\max} - z_{\min}}{2}} \right] \quad (3-2)$$

เมื่อ	x	= Coded variables
	z	= ตัวแปรอิสระ
	z_{\max}	= ค่าสูงสุดของตัวแปรอิสระ
	z_{\min}	= ค่าต่ำสุดของตัวแปรอิสระ

3. แปลงรหัส (decode) จากการออกแบบการทดลองด้วยเทคนิคของ Central Composite Design (CCD) ในตารางที่ 3-2 ทำการแปลงค่าตัวแปรให้เป็นค่าดำเนินการของตัวแปรอิสระและตัวแปรตามในแต่ละตัวในการดำเนินการทดลอง เพื่อหาค่าตัวแปรตอบสนองของกระบวนการ โดยการแปลงค่าตัวแปรแสดงดังตารางที่ 3-3 ทำการทดลองซ้ำค่ากลาง (ที่ความเข้มแสง 68 W/m^2 อัตราการไหลอากาศเสีย 3 l/min และปริมาณ TiO_2 3.54 g) ของแต่ละตัวแปรที่เกิดจากการออกแบบเป็น 3 ซ้ำ เพื่อทดสอบเสถียรภาพของโฟโตแคตะลิสต์ ทำการออกแบบการทดลองเพิ่มเติมในการทดลองที่ 18-20 เพื่อศึกษาแนวโน้มของตัวแปรอิสระเนื่องจากการออกแบบด้วยเทคนิค RSM จะให้ผลการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรอิสระตัวละ 3 ค่า ซึ่งข้อมูลยังไม่เพียงพอในการแสดงค่ากราฟ 2 มิติ จึงมีการออกแบบการทดลองเพิ่มเติมให้ได้ผลของค่าตัวแปรอิสระ ตัวแปรละ 4 ค่า เพื่อได้แนวโน้มของตัวแปรนั้นสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ตารางที่ 3-2 ผลการแสดงผลตัวแปรที่ทำการศึกษาด้วยเทคนิค RSM ประกอบด้วยตัวแปรอิสระ 3 ตัวแปร และตัวแปรตาม 1 ตัวแปร

การทดลองที่	x_1	x_2	x_3	Response
1	$-\alpha$	0	0	y
2	-1	1	-1	
3	-1	-1	-1	
4	-1	-1	1	
5	-1	1	1	
6	0	0	0	
7	0	0	0	
8	0	$-\alpha$	0	
9	0	0	0	
10	0	α	0	
11	0	0	$-\alpha$	
12	0	0	α	
13	1	-1	1	
14	1	1	1	
15	1	-1	-1	
16	1	1	-1	
17	α	0	0	
18	0	-1	0	
19	0	0	1	
20	1	0	0	

ตารางที่ 3-3 ผลการแปลงรหัสตัวแปรที่ทำการศึกษาประกอบด้วยตัวแปรอิสระ 3 ตัวแปร และตัวแปรตาม 1 ตัวแปร

การทดลองที่	ความเข้มแสง (W/m ²)	อัตราการไหลอากาศเสีย (l/min)	ปริมาณโฟโตแคตะลิสต์ (g)	Response
1	23	3	3.54	ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนีย
2	45	4	2.36	
3	45	2	2.36	
4	45	2	4.72	
5	45	4	4.72	
6	68	3	3.54	
7	68	3	3.54	
8	68	1	3.54	
9	68	3	3.54	
10	68	5	3.54	
11	68	3	1.18	
12	68	3	5.9	
13	92	2	4.72	
14	92	4	4.72	
15	92	2	2.36	
16	92	4	2.36	
17	114	3	3.54	
18	68	2	3.54	
19	68	3	4.72	
20	92	3	3.54	

3.11 การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และหาภาวะที่เหมาะสม

การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดำเนินการโดย Regression Analysis ใช้โปรแกรม Design Expert โดยมีรายละเอียดในการดำเนินการดังนี้

1. ดำเนินการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระทั้ง 3 ตัวแปร โดยนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองไปวิเคราะห์ด้วย ANOVA แบบจำลองที่ได้อยู่ในรูปแบบสมการเส้นโค้ง (quadratic equation) ดังสมการที่ 3-3

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \left(\sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} x_i x_j \right)_{i < j} \quad (3-3)$$

เมื่อ $\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}$ และ β_{ij} คือสัมประสิทธิ์ถดถอยทั้งแบบเชิงเส้น แบบกำลังสอง และสัมประสิทธิ์เชิงซ้อน ตามลำดับ

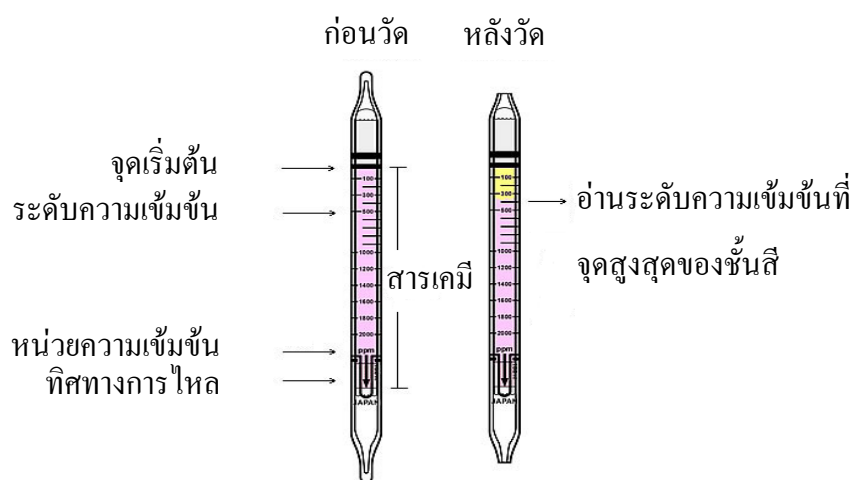
2. การวิเคราะห์เชิงสถิติด้วย ANOVA (Analysis of variance) เป็นวิธีการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่าง ตั้งแต่ 3 กลุ่มขึ้นไป ซึ่งจะเป็นการวิเคราะห์อัตราส่วนระหว่างความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม (between-group variance) และความแปรปรวนภายในกลุ่ม (within-group variance) ความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม เป็นค่าที่เกิดจากความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่มต่างๆ ถ้าค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่มต่างๆ แตกต่างกันมาก ค่าความแปรปรวนระหว่างกลุ่มก็จะมากตามไปด้วย สำหรับความแปรปรวนภายในกลุ่มเป็นค่าที่แสดงให้เห็นว่าคะแนนแต่ละตัวที่รวบรวมมานั้นภายในแต่ละกลุ่มมีการกระจายมากหรือน้อย ค่าที่คำนวณได้เรียกว่าความคลาดเคลื่อน

3. หากกราฟพื้นผิว (surface plot) ของการทดลองเพื่อแสดงผลของตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนีย กราฟพื้นผิวได้จากสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการทดลอง โดยการเอาผลความสัมพันธ์ของผลตอบสนองกับตัวแปรที่ทำการศึกษา นำมาพล็อตเป็นกราฟพื้นผิวเพื่อนำไปหาค่าภาวะที่เหมาะสมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

4. หาภาวะที่เหมาะสมในการดำเนินการ ด้วยโปรแกรม Design Expert software

3.12 การวิเคราะห์ NO_x จากปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกออกซิเดชัน

ในการบำบัดก๊าซเสียที่ปนเปื้อนด้วยแอมโมเนียโดยใช้ปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกออกซิเดชันจะมีก๊าซ N₂ เกิดขึ้นเป็นผลิตภัณฑ์หลักที่ต้องการ นอกเหนือจากผลิตภัณฑ์ที่ต้องการแล้ว อาจจะมีผลิตภัณฑ์พลอยได้ (by product) ที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นคือ สารกลุ่ม NO_x ซึ่งสารกลุ่มนี้เป็นก๊าซเรือนกระจกที่มีส่วนก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการวิเคราะห์สารกลุ่มนี้เพื่อให้แน่ใจว่าสารกลุ่มนี้ไม่เกิดขึ้นในระบบการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียข้างต้น โดยใช้หลอดตรวจวัดความเข้มข้นก๊าซ (gas detector tube) ได้อธิบายส่วนประกอบต่างๆ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3-20 และแสดงตัวอย่างจริงในภาพประกอบที่ 3-21



ภาพประกอบที่ 3-20 แสดงการวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารกลุ่ม NO_x ด้วย Gas detector tube



ภาพประกอบที่ 3-21 แสดง Gas detector tube ของสารกลุ่ม NO_x

การวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารกลุ่ม NO_x ทำได้โดยหักปลายทั้งสองด้านของ Detector tube ออก และต่อปลายด้านทางเข้าของ Detector tube กับปั๊มเก็บตัวอย่างอากาศ (sampling pump) ตั้งค่าอัตราการไหลของอากาศในการเก็บตัวอย่าง 1 ลิตรต่อนาที ทำการเก็บตัวอย่างอากาศเป็นเวลา 10 นาที สามารถอ่านความเข้มข้นของก๊าซหลังการวิเคราะห์จากสเกลวัดระดับความเข้มข้นในหน่วย ppmv ดังแสดงชุดการวิเคราะห์ตามภาพประกอบที่ 3-22 ซึ่งสามารถอ่านระดับความเข้มข้นของสารที่จุดสูงสุดของชั้นสี ในการวิเคราะห์ NO_x มีการเปลี่ยนสีจากสีขาวเป็นสีเขียวอ่อน



ภาพประกอบที่ 3-22 แสดงวิธีการเก็บตัวอย่างการวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารกลุ่ม NO_x ด้วย gas detector tube

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการศึกษาทดลองบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียด้วยปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติก (photocatalytic reactor) โดยใช้โฟโตแคตะไลสต์ชนิด $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ และ TiO_2 เคลือบบนวัสดุตัวกลางชนิดเซรามิกโพลีเมอร์ ไยแก้ว และหลอดแก้ว บรรจุลงในคอลัมน์บรรจุ ซึ่งได้แบ่งการทดลองเป็น 2 ส่วนหลัก คือ ศึกษาการใช้งานของโฟโตแคตะไลสต์เบื้องต้นด้วยการบำบัดแอมโมเนียที่ปนเปื้อนในของเหลวและศึกษาบำบัดแอมโมเนียปนเปื้อนในอากาศ สามารถแสดงผลการเตรียมโฟโตแคตะไลสต์ การติดตั้งระบบถังปฏิกรณ์ ผลการทดลอง การวิเคราะห์ผล โดยนำข้อมูลการทดลองที่ได้มา คำนวณหาประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนีย (NH_3 treatment efficiency, %) สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสีย หากภาวะที่เหมาะสมของการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสีย และวิเคราะห์ NO_x ในการทำปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกออกซิเดชันออกซิเดชันระหว่างแอมโมเนียในอากาศเสียกับ TiO_2 มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 ผลการเตรียมโฟโตแคตะไลสต์

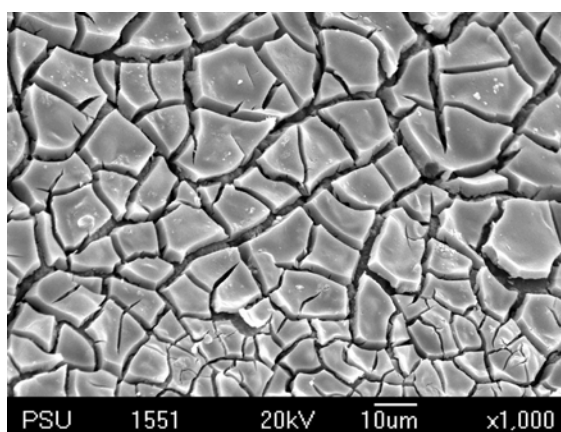
จากการเตรียมโฟโตแคตะไลสต์ที่เคลือบบนตัวกลางชนิดเซรามิกโพลีเมอร์ ไยแก้ว และหลอดแก้ว ด้วยวิธีโซล-เจลและวิธีสารแขวนลอยด้วยผง TiO_2 ขนาดนาโน นำตัวกลางที่เคลือบด้วยโฟโตแคตะไลสต์ที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ลักษณะของพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) จะสามารถแบ่งการอธิบายผลตามชนิดของคัพโตแคตะไลสต์ ดังนี้

4.1.1 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของตัวกลางที่เคลือบด้วย $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$

โฟโตแคตะไลสต์ชนิด $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ เตรียมขึ้นจากวิธีโซล-เจล แล้วเคลือบบนตัวกลาง 2 ชนิด คือ เซรามิกโพลีเมอร์และใยแก้ว สามารถแสดงผล SEM ดังต่อไปนี้

1. ลักษณะพื้นผิวของตัวกลางเซรามิกโพลีเคลือบด้วย $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$

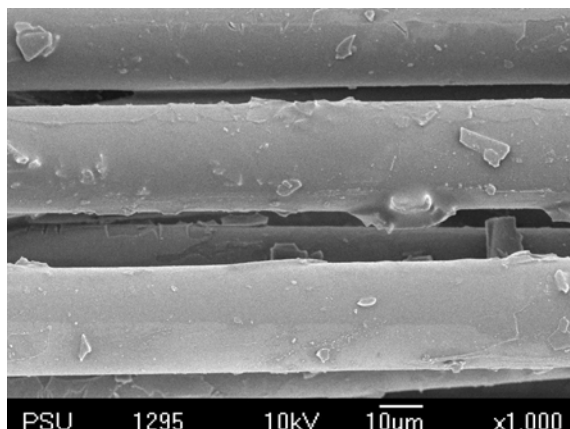
เมื่อนำตัวกลางชนิดเซรามิกโพลีที่เคลือบด้วยโฟโตแคตะลิสต์ชนิด $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ ไปตรวจสอบลักษณะพื้นผิวด้วยเครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า ดังแสดงผลในภาพประกอบที่ 4-1 พบว่า ฟิล์มที่ได้มีลักษณะเป็นรอยแตกตลอดพื้นผิว เนื่องจากพื้นผิวของเซรามิกโพลีมีลักษณะขรุขระมาก ทำให้โฟโตแคตะลิสต์ที่ยึดเกาะบนเซรามิกโพลีไม่เรียบ ผลจากการที่ฟิล์มมีรอยแตกมากนั้นอาจส่งผลต่อความทนทานและการหลุดลอกของฟิล์มเมื่อนำฟิล์ม $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ ไปใช้งาน ถ้าใช้เป็นเวลานานอาจหลุดลอกได้ง่ายเมื่อเทียบกับฟิล์มที่มีผิวเรียบและมีรอยแตกลittle



ภาพประกอบที่ 4-1 ลักษณะพื้นผิวของตัวกลางเซรามิกที่เคลือบด้วยโฟโตแคตะลิสต์ชนิด $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า

2. ลักษณะพื้นผิวของตัวกลางใยแก้วเคลือบด้วย $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$

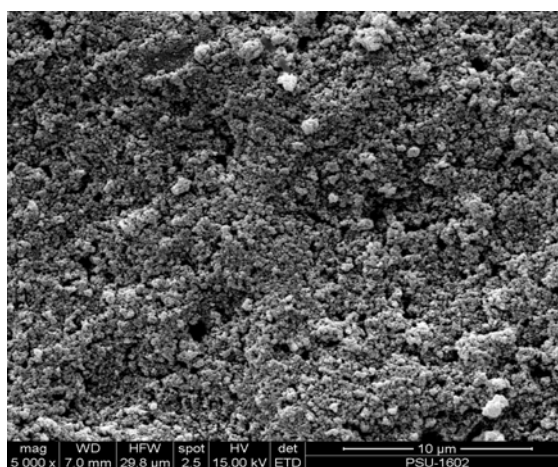
เมื่อนำตัวกลางชนิดใยแก้วที่เคลือบด้วยแคตะลิสต์ชนิด $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ ไปตรวจสอบลักษณะพื้นผิวด้วยเครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า พบว่า ฟิล์มที่เกิดขึ้นมีลักษณะพื้นผิวที่เรียบและมีรอยแตกลittle ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-2 ซึ่งเห็นได้ชัดว่าชนิดของตัวกลางมีผลต่อการเคลือบผิวด้วยโฟโตแคตะลิสต์ ลักษณะผิวของตัวกลางที่หยาบเกินไปจะทำให้ฟิล์มที่เคลือบมีรอยแตกมาก มีโอกาสที่จะหลุดได้ง่ายกว่าเมื่อนำไปใช้งานในระยะยาว



ภาพประกอบที่ 4-2 ลักษณะพื้นผิวของตัวกลางใยแก้วที่เคลือบด้วยแคตะลิสต์ชนิด $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า

4.1.2 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของตัวกลางหลอดแก้วเคลือบด้วย TiO_2

โฟโตแคตะลิสต์ชนิด TiO_2 เตรียมขึ้นจากวิธีการเตรียมสารแขวนลอยด้วยผง TiO_2 ขนาดนาโนในตัวทำละลายชนิดเอทานอล แล้วทำการเคลือบบนตัวกลางหลอดแก้ว เมื่อนำโฟโตแคตะลิสต์ชนิด TiO_2 ที่เตรียมได้ไปตรวจสอบลักษณะพื้นผิวด้วยเครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า พบว่า มีการกระจายตัวของโฟโตแคตะลิสต์ที่สม่ำเสมอบนพื้นผิวของตัวกลางหลอดแก้ว และมีปริมาณโฟโตแคตะลิสต์หนาแน่น ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-3



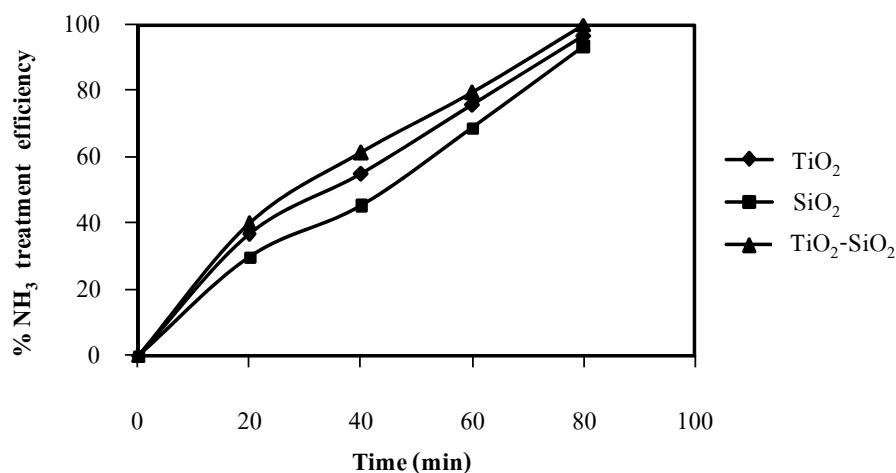
ภาพประกอบที่ 4-3 ลักษณะพื้นผิวของตัวกลางหลอดแก้วที่เคลือบด้วยแคตะลิสต์ชนิด TiO_2 ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า

4.2 ผลการบำบัดแอมโมเนียโดยใช้โฟโตแคตะลิสต์ชนิด $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$

การศึกษาทดลองการบำบัดแอมโมเนียโดยใช้โฟโตแคตะลิสต์ชนิด $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ มีการดำเนินการทั้งในเฟสของเหลวและในอากาศ โดยทดสอบโฟโตแคตะลิสต์ชนิดผงที่เตรียมได้ด้วยการบำบัดแอมโมเนียในของเหลวในชุดปฏิกรณ์แบบแบทช์ (batch reactor) ทั้งนี้เพื่อลดการหลุดลอกของโฟโตแคตะลิสต์ที่เคลือบผิวตัวกลางโดยการชะด้วยสารละลายแอมโมเนีย จึงใช้โฟโตแคตะลิสต์ชนิดผงในการทดลองในของเหลว ส่วนการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียดำเนินการทดลองในปฏิกรณ์แบบไหลต่อเนื่อง (continuous-flow reactor) โดยใช้โฟโตแคตะลิสต์ที่เคลือบบนตัวกลาง 2 ชนิด คือ เซรามิกโฟมและใยแก้ว ซึ่งแสดงผลการทดลองดังต่อไปนี้

4.2.1 ผลการบำบัดแอมโมเนียที่ปนเปื้อนในของเหลว

การทดลองบำบัดแอมโมเนียในปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติกแบบแบทช์ ดำเนินการโดยทำการเปรียบเทียบผงโฟโตแคตะลิสต์ 3 ชนิด คือ TiO_2 , SiO_2 และ $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ สำหรับการบำบัดแอมโมเนียในของเหลวซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อทดสอบเบื้องต้นถึงความสามารถและเสถียรภาพของ โฟโตแคตะลิสต์ในการนำไปใช้สำหรับบำบัดแอมโมเนียที่ปนเปื้อนในอากาศเสียต่อไป โดยทำการทดลองด้วยระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียในของเหลวที่ 100 ppm ใช้หลอดยูวีชนิดยูวีเอ ขนาด 8 วัตต์/หลอด จำนวน 4 หลอด จะให้ความเข้มแสง 92 W/m^2 และใช้ปริมาณโฟโตแคตะลิสต์ 0.2 กรัม ในของเหลวที่ปนเปื้อนด้วยแอมโมเนีย 25 มิลลิลิตร โดยสามารถแสดงผลของประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียที่ปนเปื้อนในของเหลวกับเวลาได้ดังภาพประกอบที่ 4-4

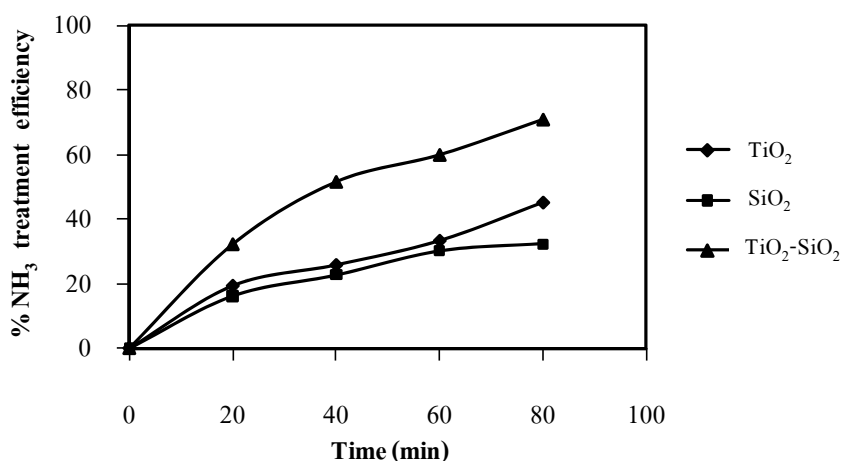


ภาพประกอบที่ 4-4 แสดงประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียที่ปนเปื้อนในของเหลวกับเวลาในรอบการใช้โฟโตแคตะลิสต์ครั้งที่ 1 ด้วยปฏิกรณ์แบบแบตช์ ที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียในของเหลว 100 ppm ใช้หลอดยูวี ที่ความเข้มแสง 92 W/m² (4 หลอด)

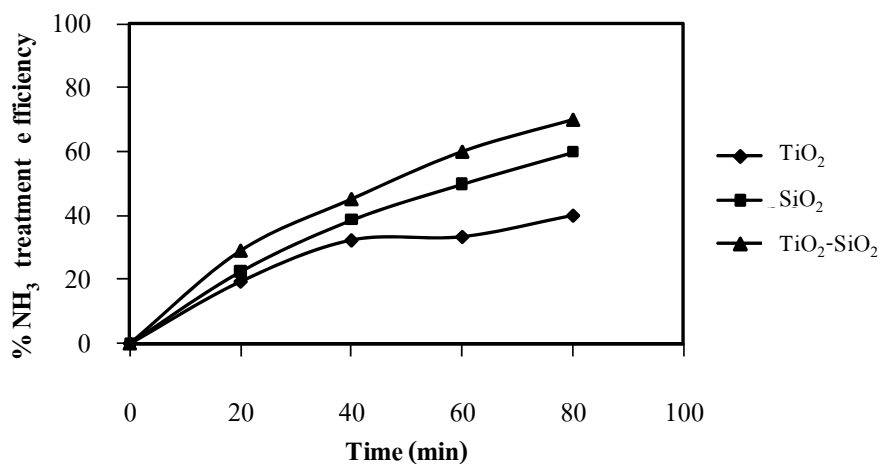
จากผลการทดลองพบว่าโฟโตแคตะลิสต์ผงชนิด TiO₂-SiO₂ มีประสิทธิภาพสูงกว่าโฟโตแคตะลิสต์ TiO₂ และ SiO₂ ในทุกช่วงเวลากำเนินการ ซึ่งโฟโตแคตะลิสต์ชนิด TiO₂-SiO₂ สามารถบำบัดแอมโมเนียได้ประสิทธิภาพ 100% เมื่อมีระยะเวลาดำเนินการ 80 นาที ทั้งนี้เนื่องจากสาร SiO₂ ทำหน้าที่เป็นตัวเสริมในการเพิ่มความสามารถของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกออกซิเดชัน โดยทำให้โฟโตแคตะลิสต์ที่เตรียมได้เกิดเป็นเฟสของอนาเทสได้ดียิ่งขึ้น และโครงสร้างที่มี SiO₂ ทำให้อนุภาค TiO₂ (anatase) มีความเสถียรมากขึ้น รวมทั้งขนาดผลึกของโฟโตแคตะลิสต์มีขนาดเล็กลงทำให้พื้นที่ผิวในการสัมผัสกับของเสียเพิ่มขึ้น อันจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียที่ดีกว่าการใช้สาร TiO₂ และ SiO₂ บริสุทธิ์

ผลของประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียในของเหลวด้วยโฟโตแคตะลิสต์ชนิด TiO₂, SiO₂ และ TiO₂-SiO₂ ในรอบที่ 2 และ 3 แสดงได้ในภาพประกอบที่ 4-5 และ 4-6 พบว่าโฟโตแคตะลิสต์ชนิด TiO₂-SiO₂ ให้ประสิทธิภาพสูงสุดสำหรับการบำบัดแอมโมเนียที่ปนเปื้อนในของเหลวทั้งรอบที่ 2 และ 3 โดยประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียของระบบเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาในการฉายแสง ซึ่งโฟโตแคตะลิสต์ชนิด TiO₂-SiO₂ ยังคงมีประสิทธิภาพสูงถึง 70% หลังจาก

การใช้งานมาแล้วสำหรับการบำบัดแอมโมเนียในรอบที่ 3 ซึ่งโฟโตแคตะลิสต์ชนิดอื่นมี ประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียลดลง เมื่อถูกนำมาใช้ใหม่



ภาพประกอบที่ 4-5 แสดงประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียที่ปนเปื้อนในของเหลวกับเวลาใน รอบการใช้โฟโตแคตะลิสต์ครั้งที่ 2 ด้วยปฏิกรณ์แบบแบทช์ ที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนีย ในของเหลว 100 ppm ใช้หลอดยูวี ที่ความเข้มแสง 92 W/m² (4 หลอด)



ภาพประกอบที่ 4-6 แสดงประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียที่ปนเปื้อนในของเหลวกับเวลาใน รอบการใช้โฟโตแคตะลิสต์ครั้งที่ 3 ด้วยปฏิกรณ์แบบแบทช์ ที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนีย ในของเหลว 100 ppm ใช้หลอดยูวี ที่ความเข้มแสง 92 W/m² (4 หลอด)

4.2.2 ผลการบำบัดแอมโมเนียที่ปนเปื้อนในอากาศเสียด้วย $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$

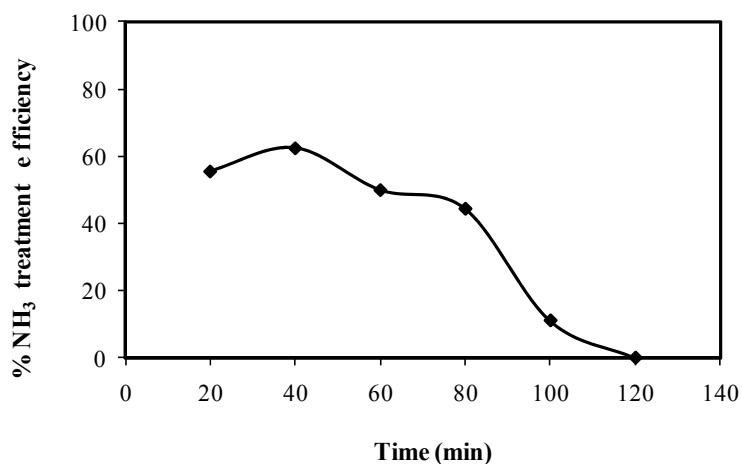
จากการทดลองเบื้องต้นในการบำบัดแอมโมเนียของเหลวด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกแบบแบทช์ พบว่า การใช้โฟโตแคตะไลสต์ชนิด $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ ให้ประสิทธิภาพสูงสุด ดังนั้นจึงเลือกโฟโตแคตะไลสต์ชนิด $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ มาใช้สำหรับการทดลองบำบัดแอมโมเนียที่ปนเปื้อนในอากาศเสียด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกแบบไหลต่อเนื่อง โดยทำการเคลือบโฟโตแคตะไลสต์ชนิด $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ บนตัวกลางเซรามิกโฟมและใยแก้วด้วยวิธีโซล-เจล ทำการบรรจุตัวกลางที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยโฟโตแคตะไลสต์ลงในคอลัมน์บรรจุ ซึ่งต้องมีปริมาณโฟโตแคตะไลสต์ที่เหมาะสมเพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกออกซิเดชัน และจัดวางคอลัมน์ภายในถังปฏิกิริยาให้แสงสามารถส่องผ่านได้ทั่วถึงโดยไม่ทำให้เกิดการขัดขวางของแสงที่จะไปสัมผัสกับพื้นผิวโฟโตแคตะไลสต์ ซึ่งสามารถแสดงผลการทดลองดังต่อไปนี้

1. ผลของโฟโตแคตะไลสต์ $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ ที่เคลือบบนตัวกลางเซรามิกโฟม

ทำการจัดวางตัวกลางเซรามิกโฟมที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยโฟโตแคตะไลสต์ชนิด $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ ลงในคอลัมน์อะคริลิกในลักษณะเอียงทำมุม 45 องศา กับพื้นราบ เพื่อให้แสงสามารถส่องผ่านไปสัมผัสกับแคตะไลสต์ได้อย่างทั่วถึง คอลัมน์มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 10 เซนติเมตร สูง 38 เซนติเมตร ใช้โฟโตแคตะไลสต์จำนวน 8 กรัม ที่ความเข้มแสง 92 W/m^2 (หลอดยูวี 4 หลอด) และดำเนินการที่อัตราการไหลของอากาศเสีย 1 l/min ดังแสดงการจัดวางตัวกลางเซรามิกโฟมไว้ในภาพประกอบที่ 4-7 และผลการบำบัดแอมโมเนียในปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกที่ระดับความเข้มข้น 100 ppmv แสดงไว้ดังภาพประกอบที่ 4-8



ภาพประกอบที่ 4-7 แสดงคอลัมน์บรรจุเซรามิกโฟมที่เคลือบด้วยโฟโตแคตะไลสต์ชนิด $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$



ภาพประกอบที่ 4-8 แสดงประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียกับเวลาโดยใช้แคตะลิสต์ชนิด $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ ที่เคลือบบนตัวกลางเซรามิกโฟม 8 ชั้น ที่ความเข้มแสง 92 W/m^2 (หลอดยูวี 4 หลอด) อัตราการไหลของอากาศเสีย 1 l/min ที่ระดับความเข้มข้น 100 ppmv

จากผลการทดลองพบว่าความสามารถในการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียลดลงกับเวลา จนเวลาการดำเนินการผ่านไป 2 ชั่วโมง โฟโตแคตะลิสต์ไม่สามารถบำบัดแอมโมเนียได้ ทั้งนี้เนื่องจากในช่วงต้นของการดำเนินการแอมโมเนียได้ถูกดูดซับไว้ในตัวกลางเซรามิกโฟม เมื่อชั้นเซรามิกโฟมอิ่มตัวด้วยแอมโมเนีย ทำให้ไม่สามารถทำการดูดซับได้อีก จึงส่งผลต่อประสิทธิภาพที่ลดลงจนเป็นศูนย์ และจากปัญหาของการบดบังแสงที่ทำให้แสงไม่สามารถส่องผ่าน โฟโตแคตะลิสต์ที่อยู่ด้านในของตัวกลางเซรามิกโฟมได้ ทำให้การเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกออกซิเดชันระหว่างก๊าซแอมโมเนียกับโฟโตแคตะลิสต์น้อย ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียลดลง ดังนั้นต้องทำการเปลี่ยนชนิดของตัวกลางให้มีความเหมาะสมกับการบำบัดแอมโมเนียที่ปนเปื้อนในอากาศเสีย

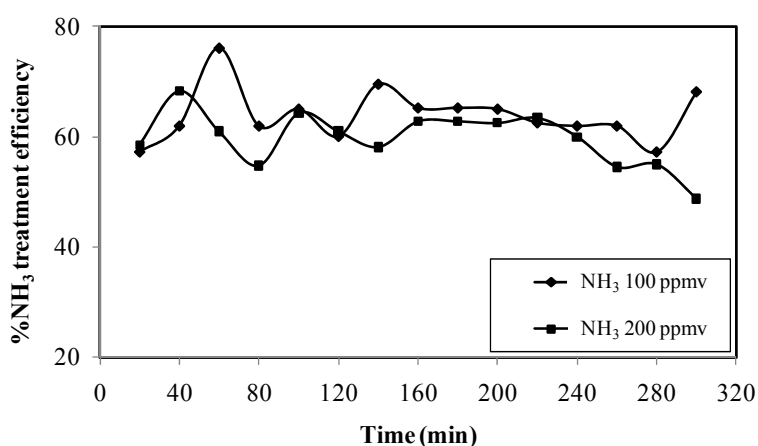
2. ผลของโฟโตแคตะลิสต์ที่เคลือบบนตัวกลางใยแก้ว

การเลือกใช้ชนิดและรูปแบบของวัสดุตัวกลางสำหรับการเคลือบผิวด้วยโฟโตแคตะลิสต์มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนีย เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกจะต้องเกิดขึ้นจากการสัมผัสกันอย่างมีประสิทธิภาพของพื้นผิวโฟโตแคตะลิสต์และแสงยูวี ดังนั้นจึงต้องคำนึงถึงความโปร่งแสงของตัวกลาง เพื่อให้แสงสามารถส่องผ่าน

โฟโตแคตะลิสต์ได้อย่างทั่วถึง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ตัวกลางชนิดใยแก้ว (fiber glass) แทนการใช้เซรามิกโฟมโดยใช้เทคนิคโซล-เจลในการเตรียมโฟโตแคตะลิสต์ ในการทดลองหาประสิทธิภาพของโฟโตแคตะลิสต์ดำเนินการได้โดยการบรรจุโฟโตแคตะลิสต์ในคอลัมน์ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 3 เซนติเมตร สูง 15 เซนติเมตร ใช้โฟโตแคตะลิสต์ที่เคลือบบนตัวกลางแล้วจำนวน 5 กรัม ที่ความเข้มแสง 92 W/m^2 ที่อัตราการไหลของอากาศเสีย 1 l/min รูปแบบของคอลัมน์ดังแสดงได้ดังภาพประกอบที่ 4-9 และแสดงผลการทดลองดังภาพประกอบที่ 4-10



ภาพประกอบที่ 4-9 แสดงคอลัมน์ที่บรรจุด้วยใยแก้วที่เคลือบบนโฟโตแคตะลิสต์ชนิด $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$



ภาพประกอบที่ 4-10 แสดงประสิทธิภาพในการบำบัดก๊าซแอมโมเนียโดยใช้โฟโตแคตะลิสต์ชนิด $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ เคลือบบนตัวกลางใยแก้วกับเวลา ที่ความเข้มแสง 92 W/m^2 (ใช้หลอดยูวี 4 หลอด) ที่อัตราการไหลของอากาศเสีย 1 l/min

จากการทดลองการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียพบว่าประสิทธิภาพของระบบโฟโตแคตะลิสต์มีค่าคงที่ตลอดช่วงเวลาดำเนินการ 5 ชั่วโมง ซึ่งมีประสิทธิภาพในการบำบัดโดยเฉลี่ยประมาณ 60% ที่ความเข้มข้น 100 และ 200 ppmv โดยโฟโตแคตะลิสต์ชนิด $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ สามารถเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกและเกิดการฟื้นฟูสภาพได้อย่างต่อเนื่อง ด้วยการใช้แสงจากหลอดยูวีสำหรับการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกออกซิเดชันกับแอมโมเนียในอากาศเสีย สำหรับการใส่ตัวกลางชนิดใยแก้วเป็นตัวกลางในการยึดเกาะของโฟโตแคตะลิสต์ในขั้นตอนนี้มีข้อเสียคือเป็นตัวกลางที่เปราะแตกง่าย มีความคงทนน้อยไม่เหมาะสำหรับการนำไปใช้งานในระยะยาว ดังนั้นจึงต้องทำการเลือกตัวกลางชนิดใหม่ให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน

4.3 ผลการบำบัดแอมโมเนียโดยการใช้โฟโตแคตะลิสต์ชนิด TiO_2

จากการทดลองบำบัดแอมโมเนียโดยการใช้โฟโตแคตะลิสต์ชนิด $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ ที่เตรียมขึ้นด้วยวิธีโซล-เจล ซึ่งมีขั้นตอนที่ยุ่งยากและสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมโฟโตแคตะลิสต์ชนิด $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ มีราคาแพง จึงมีการพัฒนาเทคนิคการเตรียมโฟโตแคตะลิสต์แบบสารแขวนลอยโดยใช้ผง TiO_2 อนุภาคขนาดนาโนผสมกับตัวทำละลายชนิดเอทานอลแทน และใช้โพลีเอทิลีนไกลคอลเป็นตัวเชื่อมประสาน (binder) จากนั้นทำการเคลือบตัวกลางด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบนำโฟโตแคตะลิสต์ที่ผ่านการเคลือบบนตัวกลางไปอบที่อุณหภูมิ 100°C และเผาที่อุณหภูมิ 600°C

ตัวกลางชนิดหลอดแก้วได้ถูกนำมาใช้แทนใยแก้ว เนื่องจากหลอดแก้วสามารถทำหน้าที่เป็นทั้งตัวกลางในการเคลือบโฟโตแคตะลิสต์และเป็นตัวกลางวัสดุบรรจุ (packing media) ประเภท Raschig ring ที่ช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างอากาศเสีย แสง และโฟโตแคตะลิสต์ ทำให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกออกซิเดชันได้ดีขึ้น โดยหลอดแก้วที่ใช้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.8 เซนติเมตร ยาว 2 เซนติเมตร โดยแก้วมีความโปร่งใสทำให้แสงสามารถส่องผ่านได้อย่างทั่วถึง และมีความคงทนต่อแสง เหมาะสำหรับการใช้งานระยะยาว การทดสอบโฟโตแคตะลิสต์เบื้องต้นทำได้โดยการศึกษาบำบัดแอมโมเนียที่ปนเปื้อนในของเหลวในชุดทดลองปฏิกรณ์แบบแบทช์ เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของโฟโตแคตะลิสต์ที่เคลือบบนตัวกลางชนิดหลอดแก้วในการบำบัด

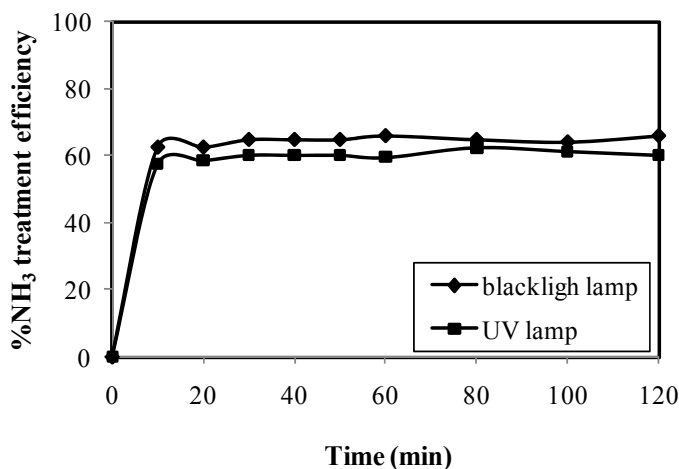
แอมโมเนีย เมื่อทราบผลของประสิทธิภาพของโฟโตแคตะลิสต์แล้วทำการทดลองบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียในปฏิกรณ์แบบไหลต่อเนื่อง ซึ่งแสดงผลการทดลองดังต่อไปนี้

4.3.1 ผลการบำบัดแอมโมเนียที่ปนเปื้อนในของเหลวด้วย TiO_2

ในการบำบัดแอมโมเนียที่ปนเปื้อนในของเหลวด้วย TiO_2 เคลือบบนตัวกลางหลอดแก้วนั้นได้ทำการศึกษาผลของชนิดของหลอดยูวี ปริมาณโฟโตแคตะลิสต์ และระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียในของเหลว ซึ่งตัวแปรเหล่านี้มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนีย ดังนี้

1. ผลของชนิดของหลอดยูวี

แหล่งกำเนิดหรือชนิดของหลอดไฟเป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการบำบัดแอมโมเนีย ซึ่งการดำเนินการนี้เป็นการเปรียบเทียบการฉายแสงโดยใช้หลอดยูวีเอและหลอดแบล็คไลท์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด โดยใช้จำนวนแคตะลิสต์ 30 กรัม (รวมน้ำหนักของหลอดแก้วที่มี TiO_2 เคลือบ 0.048 กรัม) ที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนีย 300 ppm จากผลการทดลองสามารถแสดงได้ในภาพประกอบที่ 4-11 พบว่าชนิดของหลอดยูวีให้ผลต่อการบำบัดที่ไม่แตกต่างกัน โดยทั้งหลอดยูวีเอและหลอดแบล็คไลท์ให้ประสิทธิภาพการบำบัดที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งในการดำเนินการต่อไปจะเลือกใช้หลอดแบล็คไลท์ เนื่องจากมีราคาที่ถูกกว่าและยังมีความปลอดภัยในการนำไปใช้งานมากกว่าหลอดยูวี



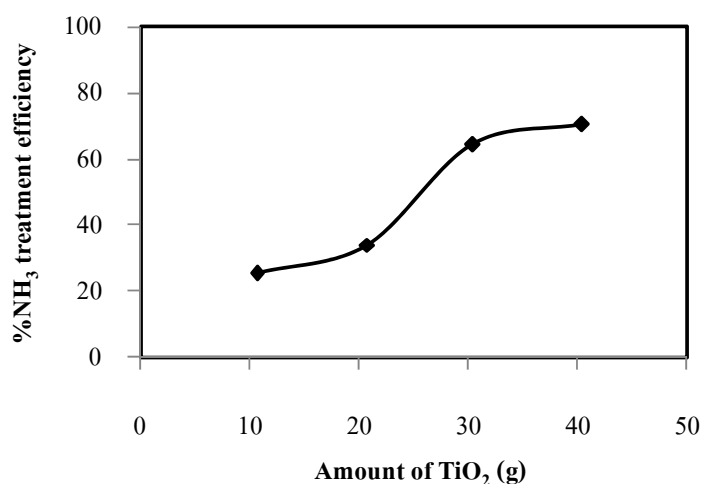
ภาพประกอบที่ 4-11 แสดงการประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียในของเหลว โดยการใช้หลอดหลอดยูวีเอและหลอดแบล็คไลท์ ในระบบปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติกแบบเบทซ์ ใช้จำนวนโฟโตแคตะลิสต์ 30 กรัม ที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนีย 300 ppm

นอกจากนั้นผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าการใช้โฟโตแคตะลิสต์ชนิด TiO_2 ที่เคลือบบนหลอดแก้วสำหรับการบำบัดแอมโมเนียในของเหลวเป็นลักษณะของการดูดซับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าในช่วงเวลา 10 นาทีแรกระบบสามารถบำบัดแอมโมเนียได้ด้วยประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นเป็น 60% แต่หลังจากนั้นระบบไม่สามารถบำบัดแอมโมเนียที่เหลืออยู่ในของเหลวได้เพิ่มเติมอีก ดังนั้นโฟโตแคตะลิสต์ชนิด TiO_2 ที่เคลือบบนหลอดแก้วจึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการบำบัดแอมโมเนียในของเหลว

2. ผลของปริมาณโฟโตแคตะลิสต์

จากการศึกษาบำบัดแอมโมเนียที่ระดับความเข้มข้น 300 ppm เมื่อมีการฉายแสงจากหลอดแบล็คไลท์ที่ความเข้มแสง 92 W/m^2 (จำนวน 4 หลอด) และใช้ปริมาณ TiO_2 10-40 กรัม (ซึ่งน้ำหนักของตัวกลางที่ผ่านการเคลือบด้วย TiO_2) ซึ่งหลอดแก้ว 1 ชั้น มีปริมาณ TiO_2 0.004 กรัม ดำเนินการทดลอง 2 ชั่วโมง โดยช่วง 1 ชั่วโมงแรกเก็บตัวอย่างทุก 10 นาที ช่วงชั่วโมงที่ 2 เก็บตัวอย่างทุก 20 นาที ดังแสดงผลในภาพประกอบที่ 4-12 จากการทดลองแสดงให้เห็นได้ว่าเมื่อปริมาณของ TiO_2 เพิ่มขึ้นจาก 10 กรัม ถึง 40 กรัม ในปริมาตรของเหลวที่ปนเปื้อนแอมโมเนีย 150 มิลลิลิตร/ปฏิกรณ์ ให้ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาโฟโต-

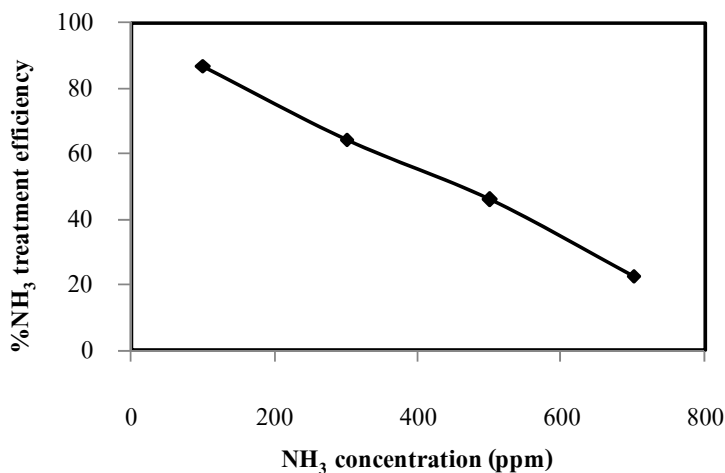
แคตะไลติกออกซิเดชันของแอมโมเนียจะเกิดขึ้นที่ผิวอนุภาคของ TiO_2 เมื่อปริมาณของ TiO_2 เพิ่มขึ้น ส่งผลต่อพื้นที่ผิวของ TiO_2 เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ทำให้จำนวนแอคทีฟไซต์ (active sites) บนพื้นผิวของโฟโตแคตะลิสต์มากขึ้น นำไปสู่การสร้างจำนวนไฮดรอกซิลเรดิคัล ($\cdot\text{OH}$) ให้มากขึ้น จึงมีการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น ได้ประสิทธิภาพการบำบัดที่สูงขึ้น ซึ่งประสิทธิภาพการบำบัดมีค่าสูงสุดเมื่อปริมาณของ TiO_2 เท่ากับ 40 กรัม จะเห็นได้ว่า เมื่อปริมาณของ TiO_2 เพิ่มขึ้นจาก 30 กรัม เป็น 40 กรัม ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก ดังนั้นจึงเลือกปริมาณของ TiO_2 เท่ากับ 30 กรัม เพื่อใช้ในการศึกษาต่อไป



ภาพประกอบที่ 4-12 แสดงประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียในของเหลวด้วยระบบปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติกแบบแบทช์ที่ปริมาณ TiO_2 ต่างๆ เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง ที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนีย 300 ppm

3. ผลของความเข้มข้นของแอมโมเนียในของเหลว

จากการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของแอมโมเนียในของเหลวที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัด โดยใช้ TiO_2 ปริมาณ 30 กรัม เป็นโฟโตแคตะลิสต์และฉายแสงจากหลอดแบล็คไลท์ที่มีความเข้มแสง 92 W/m^2 (จำนวน 4 หลอด) ดำเนินการทดลอง 2 ชั่วโมง โดยช่วง 1 ชั่วโมงแรกเก็บตัวอย่างทุก 10 นาที ช่วงชั่วโมงที่ 2 เก็บตัวอย่างทุก 20 นาที ทดลองที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของแอมโมเนียในช่วง 100 ถึง 700 ppm ดังแสดงผลการทดลองในภาพประกอบที่ 4-13



ภาพประกอบที่ 4-13 แสดงประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียในของเหลวด้วยระบบปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติกแบบแบทช์ ที่ระดับความเข้มข้นแอมโมเนียต่างๆ

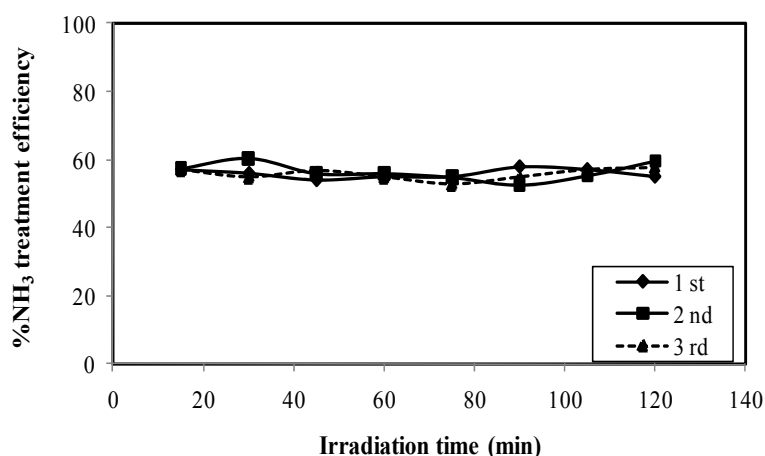
จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของแอมโมเนียเพิ่มขึ้นจาก 100 ถึง 700 ppm ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียมีค่าน้อยลง เนื่องจากที่ความเข้มข้นต่ำๆ จะมีโมเลกุลของแอมโมเนียน้อย ทำให้ถูกบำบัดได้ง่ายกว่าที่ความเข้มข้นสูง ในระยะเวลาที่ทำการทดลองเท่ากันที่ระดับความเข้มข้นสูงปริมาณแอมโมเนียยังคงเหลือสูงหลังการบำบัด เนื่องจากโมเลกุลของแอมโมเนียถูกสลายไปน้อย

4.3.2 ผลการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียด้วยโฟโตแคตะลิสต์ชนิด TiO₂

จากการทดลองด้วยการนำโฟโตแคตะลิสต์ชนิด TiO₂ ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยใช้ TiO₂ ชนิดผงขนาดอนุภาคนาโนเคลือบบนพื้นผิวของหลอดแก้ว และทำการเตรียมปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติกโดยบรรจุโฟโตแคตะลิสต์ที่สังเคราะห์ลงในคอลัมน์แก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร และยาว 30 เซนติเมตร (ใช้โฟโตแคตะลิสต์ 295 จีน/คอลัมน์ มีปริมาณ TiO₂ 1.18 กรัม) มาใช้สำหรับการทดลองการบำบัดแอมโมเนียที่ปนเปื้อนในอากาศเสีย ซึ่งมีผลการศึกษาดังต่อไปนี้

1. เสถียรภาพของโฟโตแคตะลิสต์ต่อการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสีย

การทดสอบเสถียรภาพของโฟโตแคตะลิสต์ที่สังเคราะห์ได้ในการบำบัดแอมโมเนียที่ปนเปื้อนในอากาศเสีย ดำเนินการด้วยระบบแบบไหลต่อเนื่องที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียคงที่เท่ากับ 300 ppmv ผลการทดสอบแสดงได้ดังภาพประกอบที่ 4-14 ซึ่งเป็นการพล็อตระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียกับเวลา การดำเนินการของระบบภายใต้การทดลองที่อัตราการไหลของอากาศเสียที่ 3 l/min บำบัดโดยใช้ปริมาณ TiO_2 3.54 กรัม ที่บรรจุในคอลัมน์ (จำนวน 3 คอลัมน์) และใช้แสงยูวีจากหลอดแบล็คไลท์ที่มีความเข้มแสง 68 W/m^2 (จำนวน 3 หลอด) ดำเนินการโดยนำโฟโตแคตะลิสต์ที่ผ่านการใช้งานแล้วมาทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ที่สภาพแวดล้อมเดียวกัน ทดสอบประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียโดยเก็บตัวอย่างทุก 15 นาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



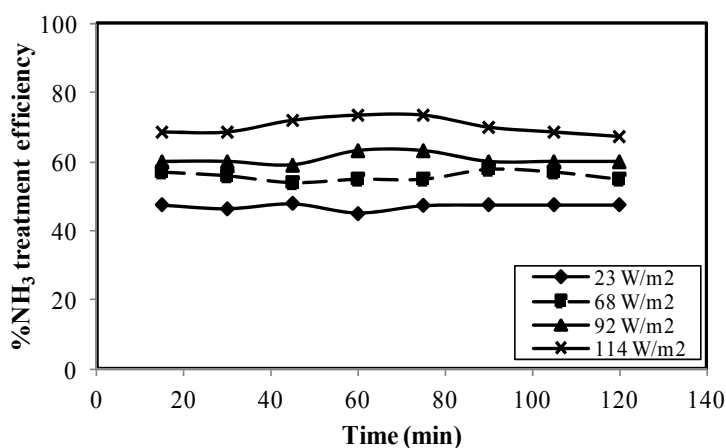
ภาพประกอบที่ 4-14 แสดงประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียกับเวลาในการดำเนินการด้วยการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง โดยการใช้โฟโตแคตะลิสต์ชนิด TiO_2 เคลือบบนหลอดแก้ว ในระบบปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติกแบบไหลต่อเนื่อง

จากผลการศึกษาด้วยระบบปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติกแบบไหลต่อเนื่องพบว่า โฟโตแคตะลิสต์ชนิด TiO_2 ที่เคลือบบนหลอดแก้วสามารถบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียได้อย่างต่อเนื่องด้วยประสิทธิภาพเฉลี่ยคงที่ประมาณ 60% เป็นระยะเวลาดำเนินการ 2 ชั่วโมง จากการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียยังคงมีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกับการ

ดำเนินการในครั้งที่ 1 คือ 60% ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงเสถียรภาพของโฟโตแคตะลิสต์ชนิด TiO_2 ที่เคลือบบนหลอดแก้วในปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติก ทั้งนี้เป็นเพราะโฟโตแคตะลิสต์ชนิด TiO_2 สามารถทำการฟื้นฟูสภาพด้วยการฉายแสงยูวีในช่วงคลื่น 315-400 จากหลอดแบล็คไลท์ หลังจากที่ทำปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกออกซิเดชันกับแอมโมเนียในอากาศเสีย

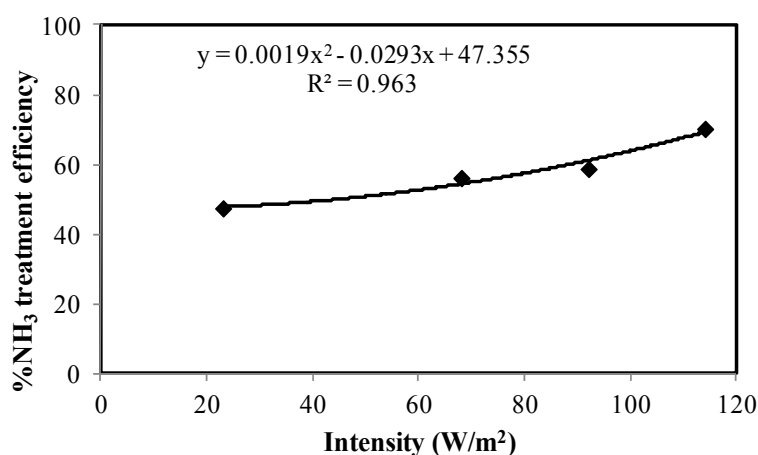
2. ผลของความเข้มแสงต่อการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสีย

เนื่องจากความเข้มของแสงยูวีเป็นตัวแปรที่สำคัญสำหรับการบำบัดแอมโมเนียด้วยปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติก การทดลองนี้จึงดำเนินการโดยใช้หลอดไฟชนิดแบล็คไลท์ที่ให้แสงยูวีในช่วงคลื่น 315-400 ขนาด 8 วัตต์/หลอด จำนวน 1-5 หลอด ทำการติดตั้งหลอดไว้กับผนังภายในของถังปฏิกรณ์ และติดตั้งคอยล์น้ำไว้ที่กึ่งกลางของถังปฏิกรณ์ ทำการศึกษาผลของความเข้มแสงของการฉายแสง UV จากการปรับเปลี่ยนจำนวนหลอดไฟ ซึ่งจำนวนหลอดไฟมีความสัมพันธ์กับความเข้มแสง กล่าวคือ จำนวนหลอดไฟเพิ่มขึ้นทำให้ความเข้มแสงมากขึ้น ซึ่งในการทดลองนี้ ดำเนินการภายใต้การทดลองที่ใช้อัตราการไหลอากาศเสียที่ 3 l/min และบำบัดโดยใช้ปริมาณ TiO_2 3.54 กรัม ที่บรรจุในคอยล์ (จำนวน 3 คอยล์) ที่ระดับความเข้มข้น 300 ppmv โดยผลของประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียที่ความเข้มแสงต่างๆ กับระยะเวลาในการดำเนินการแสดงดังภาพประกอบที่ 4-15



ภาพประกอบที่ 4-15 แสดงประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียที่ความเข้มแสงต่างๆ กับเวลาในการดำเนินการ โดยใช้ปริมาณ TiO_2 3.54 กรัม (จำนวนคอยล์ 3 คอยล์) อัตราการไหลอากาศเสีย 3 l/min ที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียในอากาศเสีย 300 ppmv

จากกราฟพบว่า การเพิ่มจำนวนหลอดแบล็คไลท์ในการฉายแสง ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียเพิ่มขึ้น ดังนั้นความเข้มแสงจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกออกซิเดชัน เพราะความเข้มแสงต่างกันจะส่งผลให้มีความสามารถในการผลิตคู่อิเล็กตรอน (electron-hole pairs) ของโฟโตแคตะลิสต์ชนิด TiO_2 ได้ต่างกัน (Li et al., 2008) และเมื่อความเข้มแสงจากหลอดแบล็คไลท์เพิ่มขึ้นจะมีจำนวนโฟตอนมากขึ้นเมื่อเทียบกับหน่วยเวลาและพื้นที่ ดังนั้นที่ความเข้มแสง 114 W/m^2 (จำนวนหลอดไฟ 5 หลอด) จึงให้ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียสูงที่สุดถึง 70% และสามารถแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียกับความเข้มแสงได้ดังภาพประกอบที่ 4-16 สำหรับกรณีที่ไม่มีฉายแสงยูวีด้วยหลอดแบล็คไลท์จะไม่เกิดการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียขึ้น ซึ่งมีประสิทธิภาพในการบำบัดเท่ากับ 0%

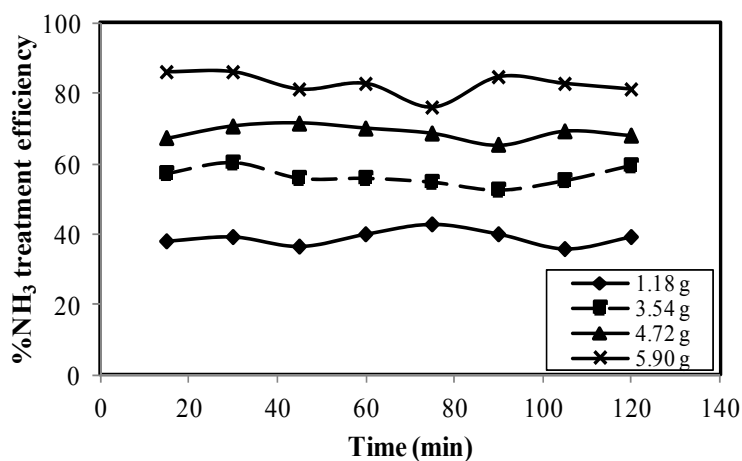


ภาพประกอบที่ 4-16 แสดงผลของความเข้มแสงต่อประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียด้วยปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติก ใช้ปริมาณ TiO_2 3.54 กรัม (จำนวนคอลัมน์ 3 คอลัมน์) อัตราการไหลอากาศเสีย 3 l/min ที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียในอากาศเสีย 300 ppmv

3. ผลของปริมาณโฟโตแคตะลิสต์ TiO_2 ต่อการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสีย

การใช้โฟโตแคตะลิสต์ชนิด TiO_2 ผงขนาดนาโนที่เคลือบบนหลอดแก้วที่สังเคราะห์ได้และทำการบรรจุลงไปในคอลัมน์สำหรับบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสีย โดยปริมาณของโฟโตแคตะลิสต์ที่ใช้จะเพิ่มขึ้นตามจำนวนของคอลัมน์ที่ทำการติดตั้งในระบบปฏิกรณ์โฟโต-

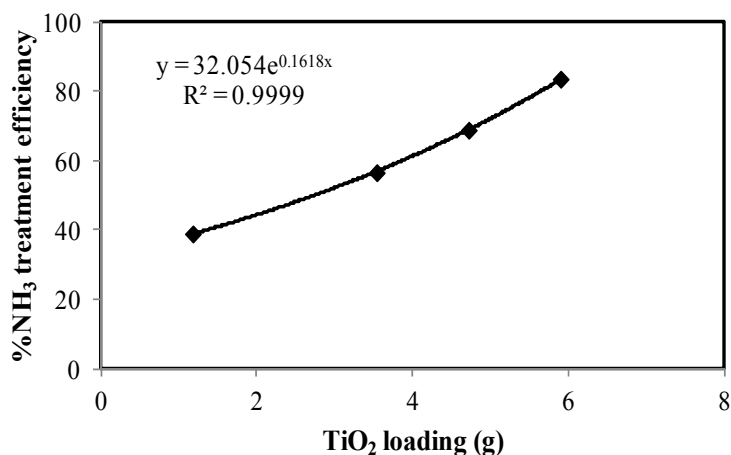
แคตะไลติกแบบไหลต่อเนื่อง โดยทำการติดตั้งคอลัมน์แบบอนุกรม (ใช้โฟโตแคตะลิสต์ 295 ชั้น/คอลัมน์ มีปริมาณ TiO_2 1.18 กรัม) พบว่าจำนวนคอลัมน์มากขึ้นจะส่งผลให้ Retention time และจำนวนโฟโตแคตะลิสต์สำหรับการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียเพิ่มขึ้น ในการทดลองจะใช้อัตราการไหลอากาศเสียเท่ากับ 3 l/min ใช้ความเข้มแสง 68 W/m^2 (จำนวนหลอดไฟ 3 หลอด) และควบคุมระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียในอากาศเสียที่ระดับ 300 ppmv ซึ่งทำให้ได้ผลของประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียที่ปริมาณ TiO_2 ต่างๆ ในเวลาการดำเนินการ 2 ชั่วโมง แสดงดังภาพประกอบที่ 4-17



ภาพประกอบที่ 4-17 แสดงประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียที่ปริมาณ TiO_2 ต่างๆ กับเวลาในการดำเนินการโดยใช้ความเข้มแสง 68 W/m^2 (จำนวนหลอดไฟ 3 หลอด) ที่อัตราการไหลอากาศเสีย 3 l/min ที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียในอากาศเสีย 300 ppmv

จากผลการศึกษาพบว่า เมื่อเพิ่มจำนวนของคอลัมน์ซึ่งหมายถึงการเพิ่มปริมาณโฟโตแคตะลิสต์ในระบบ เพิ่มพื้นที่ผิวในการสัมผัสของอากาศเสียกับโฟโตแคตะลิสต์ และเพิ่ม Retention time มีผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียที่สูงขึ้น เนื่องจากโฟโตแคตะลิสต์ชนิด TiO_2 มีจำนวนมากขึ้นส่งผลต่อจำนวนแอคทีฟไซต์ (active sites) บนพื้นผิวของโฟโตแคตะลิสต์ที่มากขึ้น นำไปสู่การสร้างจำนวนไฮดรอกซิลเรดิคัล ($\cdot\text{OH}$) ให้มากขึ้น (Abdollahi et al., 2012) การเพิ่มปริมาณ TiO_2 5.9 กรัม (จำนวนคอลัมน์ 5 คอลัมน์) โดยการติดตั้ง

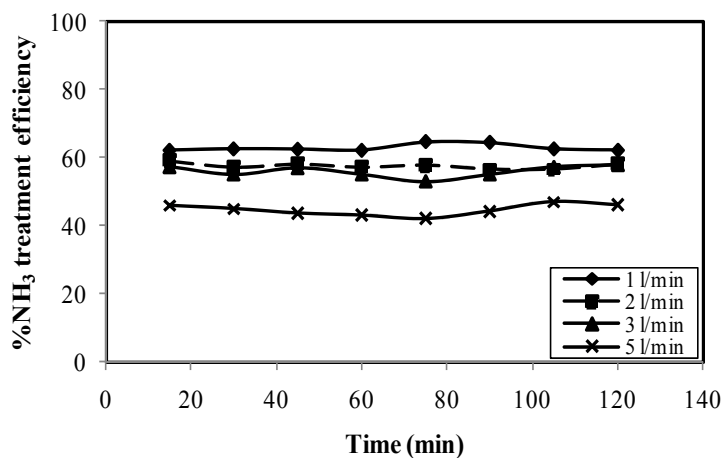
แบบอนุกรมสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการบำบัดแอมโมเนียในเสียจากอากาศได้ถึง 83% ในขณะที่การใช้ปริมาณ TiO_2 1.18 กรัม (จำนวนคอลัมน์ 1 คอลัมน์) ให้ประสิทธิภาพของระบบเป็น 39% ดังผลการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียที่ปริมาณ TiO_2 ต่างๆ แสดงได้ดังภาพประกอบที่ 4-18



ภาพประกอบที่ 4-18 แสดงผลของปริมาณ TiO_2 ต่อประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสีย ด้วยปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติก ใช้ความเข้มแสง 68 W/m^2 (จำนวนหลอดไฟ 3 หลอด) ที่อัตราการไหลอากาศเสีย 3 l/min ที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียในอากาศเสีย 300 ppmv

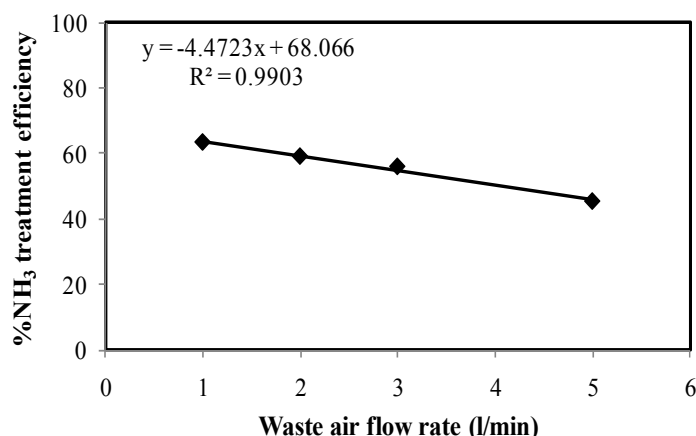
4. ผลของอัตราการไหลอากาศเสียต่อการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสีย

การศึกษาผลของอัตราการไหลอากาศเสียต่อประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนีย โดยใช้ความเข้มแสง 68 W/m^2 (จำนวนหลอดไฟ 3 หลอด) ด้วยจำนวนคอลัมน์ที่ต่อแบบอนุกรมที่มีปริมาณ TiO_2 3.54 กรัม (จำนวนคอลัมน์ 3 คอลัมน์) และควบคุมระดับความเข้มข้นของอากาศเสียที่ปนเปื้อนด้วยแอมโมเนียไว้ที่ระดับ 300 ppmv ผลของประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียที่อัตราการไหลของอากาศเสียต่างๆ กับเวลาในการฉายแสงแสดงดังภาพประกอบที่ 4-19



ภาพประกอบที่ 4-19 แสดงประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียที่อัตราการไหลอากาศเสียต่างๆ กับเวลาดำเนินการโดยใช้ความเข้มแสง 68 W/m^2 (จำนวนหลอดไฟ 3 หลอด) ด้วยปริมาณ TiO_2 3.54 กรัม (จำนวนคอลัมน์ 3 คอลัมน์) ที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียในอากาศเสีย 300 ppmv

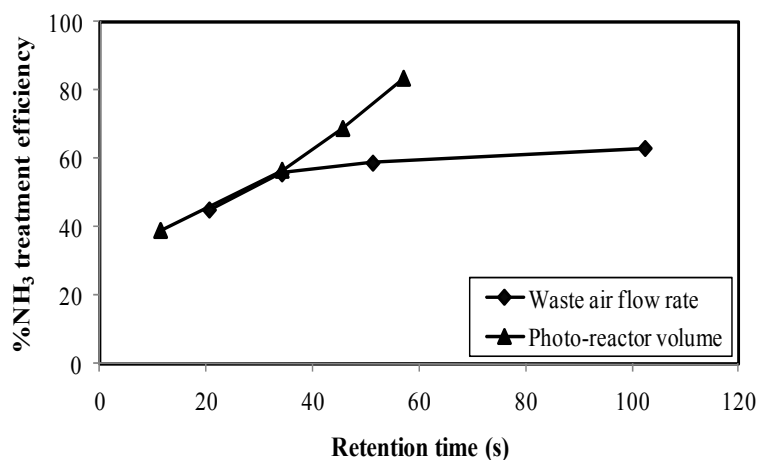
จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศเสียจาก 1 ถึง 5 l/min โดยที่อัตราการไหล 1 l/min ให้ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียสูงสุดที่ 62% ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการไหลอากาศเสียที่สูงขึ้นทำให้ระยะเวลาที่อากาศเสียสัมผัสกับพื้นผิวของโฟโตแคตะลิสต์ลดลง ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพการบำบัดที่ลดลง ดังแสดงผลของค่าเฉลี่ยของอัตราการไหลอากาศเสียต่อประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียไว้ดังภาพประกอบที่ 4-20



ภาพประกอบที่ 4-20 แสดงผลของอัตราการไหลอากาศเสียต่อประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียด้วยปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติกที่มีการไหลของอากาศเสียอย่างต่อเนื่องโดยใช้โฟโตแคตะลิสต์ชนิด TiO_2 ที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียในอากาศเสีย 300 ppmv

5. ผลของเวลาที่อากาศเสียอยู่ในระบบปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติก

เวลาที่อากาศเสียถูกกักเก็บและไหลผ่านระบบปฏิกรณ์มีบทบาทสำคัญในการออกแบบระบบปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติกที่จะนำไปใช้งานจริงในระดับอุตสาหกรรม เวลาที่อากาศเสียอยู่ในระบบ (retention time) ของปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติกแบบไหลต่อเนื่องขึ้นอยู่กับปริมาตรและอัตราการไหล โดยสามารถคำนวณได้จาก $V (l) / Q (s)$: ตัวแปร $V (l)$ คือ ปริมาตรของคอลัมน์ และ $Q (l/s)$ คือ อัตราการไหลอากาศเสีย ผลของ Retention time ในระดับห้องปฏิบัติการที่ปริมาตรของคอลัมน์และอัตราการไหลอากาศเสียต่างๆ สามารถแสดงได้ดังภาพประกอบที่ 4-21 โดยการศึกษาที่ใช้หลอดแบล็คไลท์ที่ให้ความเข้มแสง 68 W/m^2 (จำนวนหลอดไฟ 3 หลอด) ในการทดลอง ด้วยปริมาณ TiO_2 1.18-5.9 กรัม (จำนวนคอลัมน์ 1-5 คอลัมน์) และอัตราการไหลอากาศเสีย 1-5 l/min ที่ระดับความเข้มข้น 300 ppmv ของแอมโมเนียในอากาศเสีย



ภาพประกอบที่ 4-21 แสดงผลของ Retention time ต่อประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียดด้วยปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติกที่ปริมาตรของคอลัมน์และอัตราการไหลอากาศเสียดต่างๆ โดยใช้โฟโตแคตะไลต์ชนิด TiO_2 ที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนีย 300 ppmv

ผลของ Retention time ในปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติกต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของอากาศเสียด พบว่า Retention time เพิ่มขึ้น ที่ปริมาตรคงที่ด้วยการลดอัตราการไหลอากาศเสียด ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียของโฟโตแคตะไลต์ชนิด TiO_2 ในคอลัมน์บรรจุเพิ่มขึ้น ส่วนผล Retention time ต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของคอลัมน์บรรจุ พบว่า Retention time เพิ่มขึ้น เมื่ออัตราการไหลอากาศเสียดคงที่ด้วยการเพิ่มปริมาตรของคอลัมน์บรรจุ ซึ่งหมายถึงการเพิ่มปริมาณ TiO_2 ที่บรรจุลงไปในระบบในเวลาเดียวกัน ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของปริมาตรคอลัมน์บรรจุจึงทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับการเพิ่ม Retention time ในระบบด้วยการลดอัตราการไหลของอากาศเสียด ซึ่งทำให้ได้ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียของระบบเป็น 87% เมื่อเพิ่มเวลาที่อากาศเสียดอยู่ในระบบเป็น 60 วินาที

4.4 ผลการวิเคราะห์ NO_x ในอากาศเสียดที่ผ่านการบำบัด

จากการวิเคราะห์ NO_x ในกระแสอากาศเสียดปนเปื้อนแอมโมเนียที่ผ่านการทำปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกออกซิเดชันเพื่อการบำบัดแอมโมเนียด้วยโฟโตแคตะไลต์ชนิด TiO_2 โดยใช้ Gas detector tube ในการตรวจหาแก๊ส NO_x ดังแสดงวิธีการและผลการตรวจวัดในภาพประกอบ

ที่ 4-22 จากผลการตรวจวัดพบว่า Gas detector tube ไม่มีการเปลี่ยนสีจากสีขาวเป็นสีเขียวอ่อน แสดงให้เห็นว่าไม่พบปริมาณ NO_x ในการทำปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกออกซิเดชันระหว่าง แอมโมเนียกับโฟโตแคตะลิสต์ชนิด TiO₂ ที่เคลือบบนหลอดแก้ว สำหรับบำบัดแอมโมเนียของ ระบบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก แสดงว่าการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกออกซิเดชันของ แอมโมเนียไม่เกิดผลิตภัณฑ์พลอยได้ชนิด NO_x อันจะไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม



ภาพประกอบที่ 4-22 แสดงวิธีการและผลการตรวจสอบปริมาณ NO_x ด้วย Gas detector tube

4.5 ผลการบำบัดแอมโมเนียในปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกโดยเทคนิค Response Surface Methodology (RSM) ในการออกแบบการทดลอง

เทคนิค Response Surface Methodology (RSM) เป็นการรวบรวมข้อมูลทางสถิติ และเทคนิคทางคณิตศาสตร์ เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการออกแบบการทดลองและการหา ภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการ ซึ่งเทคนิค RSM ประกอบด้วยกลุ่มของตัวแปรตามหลักการทาง คณิตศาสตร์และสถิติ ใช้เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลการตอบสนองและตัวแปรอิสระ แผนการทดลองแบบ Central Composite Design (CCD) เป็นการออกแบบการทดลองทุกระดับของ แต่ละปัจจัยห่างจาก Center ของการออกแบบเท่ากัน และทำซ้ำที่จุดกึ่งกลาง แต่ละปัจจัยจะมีระดับ การทดลอง 5 ระดับ ($-\alpha$, -1, 0, 1, α) งานวิจัยนี้จึงนำเทคนิค RSM แบบ CCD มาใช้ศึกษาการ ออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองในการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียจากโรงงานผลิตน้ำยาง ขึ้นด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก

4.5.1 ผลการออกแบบการทดลองและผลตอบสนอง (Response)

จากการศึกษาการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียโดยใช้หลักการทางสถิติด้วยเทคนิค RSM แบบ CCD มาช่วยในการออกแบบการทดลอง ศึกษา 3 ตัวแปร ซึ่งทำให้ได้จำนวนการทดลองที่ประกอบด้วย 17 การทดลอง และทำการออกแบบการทดลองเพิ่มเติมในการทดลองที่ 18-20 เพื่อศึกษาแนวโน้มของตัวแปรอิสระให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ค่าประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียที่ได้จากแต่ละการทดลองแสดงผลดังตารางที่ 4-1 เมื่อนำผลการทดลองมาวิเคราะห์หาสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ (x) ที่ทำการทดลองซึ่งประกอบไปด้วยความเข้มแสง อัตราการไหลอากาศเสีย และปริมาณ TiO_2 ที่ส่งผลกระทบต่อตัวแปรตอบสนอง (y) คือ ค่าประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสีย โดยใช้ Multiple Regression Analysis

4.5.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสีย

จากข้อมูลประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียด้วยโฟโตแคตะลิสต์ชนิด TiO_2 บนตัวกลางหลอดแก้วโดยปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติกที่แสดงดังตารางที่ 4-1 สามารถนำมาวิเคราะห์หาสมการแบบจำลองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียกับตัวแปรที่ทำการศึกษาดูด้วยเทคนิค RSM โดยใช้โปรแกรม Design Expert Software จะได้แบบจำลองของสมการทางคณิตศาสตร์แสดงความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสีย ซึ่งมีรูปแบบสมการแบบ Quadratic model ทำให้ได้แบบจำลองของสมการทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสม ดังแสดงในสมการที่ (4-1)

$$y = 38.33 + 0.39x_1 - 8.04x_2 - 0.44x_3 + 0.06x_1x_2 - 0.09x_1x_3 + 2.18x_3^2 \quad (4-1)$$

เมื่อ y = ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสีย (ร้อยละ)

x_1 = ความเข้มแสง (W/m^2)

x_2 = อัตราการไหลอากาศเสีย (l/min)

x_3 = ปริมาณ TiO_2 (g)

ตารางที่ 4-1 แสดงผลตอบสนองประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียด้วย TiO_2 โดย
 ปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติกที่ภาวะการทดลองต่างๆ จากการออกแบบการทดลองด้วยเทคนิค RSM
 แบบ CCD

Run no.	ตัวแปรอิสระ			NH_3 treatment eff. (%)
	x_1	x_2	x_3	
	ความเข้มแสง (W/m^2)	อัตราการไหลอากาศเสีย (l/min)	ปริมาณ TiO_2 (g)	
1	23	3	3.54	47.40
2	45	4	2.36	35.00
3	45	2	2.36	46.20
4	45	2	4.72	75.30
5	45	4	4.72	60.10
6	68	3	3.54	56.55
7	68	3	3.54	55.77
8	68	1	3.54	63.20
9	68	3	3.54	56.10
10	68	5	3.54	49.78
11	68	3	1.18	49.63
12	68	3	5.9	87.00
13	92	2	4.72	75.60
14	92	4	4.72	73.50
15	92	2	2.36	62.99
16	92	4	2.36	53.00
17	114	3	3.54	70.20
18	68	2	3.54	58.90
19	68	3	4.72	68.80
20	92	3	3.54	58.70

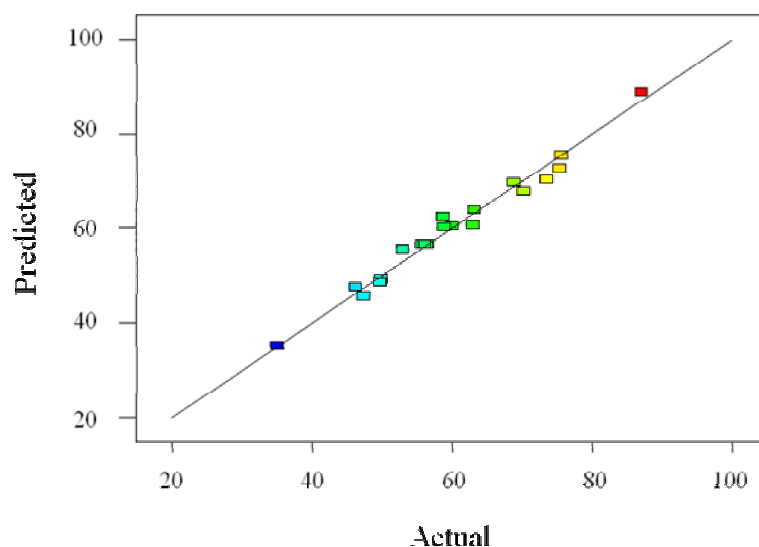
จากสมการ (4-1) แสดงผลของตัวแปรต่อประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งประกอบด้วยตัวแปรความเข้มแสง อัตราการไหลอากาศเสีย ปริมาณ TiO_2 และผลการปฏิสัมพันธ์ (interaction) ของตัวแปรแต่ละตัว สามารถวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของสมการด้วยวิธี ANOVA โดยแสดงผลของรายละเอียดไว้ดังตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 ผลการวิเคราะห์ ANOVA จากความแปรปรวนของแบบจำลองสำหรับบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียด้วยปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติก

Source	Sum of squares	DF	Mean Square	F-value	F-value	Remarks
Model	2809.44	6	468.24	97.66	< 0.0001	significant
x_1	542.19	1	542.19	113.08	< 0.0001	significant
x_2	273.33	1	273.33	57.01	< 0.0001	significant
x_3	1709.47	1	1709.47	356.55	< 0.0001	significant
x_1x_2	25.33	1	25.33	5.28	0.0388	significant
x_1x_3	54.83	1	54.83	11.44	0.0049	significant
x_3^2	243.49	1	243.49	50.78	< 0.0001	significant
Residual	62.33	13	4.79			
Lack of Fit	62.02	11	5.64	36.78	0.0268	significant
Pure Error	0.31	2	0.15			
Correlation Total	2871.77	19				
Standard deviation	2.09					
R^2	0.9783		Adjusted R^2	0.9683		
Predicted R^2	0.9306		Adequate Precision	41.48		

ผลการวิเคราะห์ ANOVA จากความแปรปรวนของแบบจำลองสมการกำลังสอง (quadratic model) ดังแสดงในตารางที่ 4-2 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถอธิบายการ

บำบัดแอมโมเนียภายใต้ช่วงของเงื่อนไขการดำเนินงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ข้อมูลที่ให้ไว้ในตารางนี้แสดงถึงตัวแปรที่ศึกษาทุกตัวที่ปรากฏในสมการมีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียอย่างมีนัยสำคัญ ในทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณาค่า P-value ของตัวทอมแต่ละตัวนั้น ถ้าทอมใดมีค่า P value ต่ำกว่า 0.05 แสดงว่าทอมนั้นมีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนทอมที่มีค่า P-value สูงกว่า 0.10 ถือว่าไม่มีนัยสำคัญจึงต้องตัดทิ้งไป (Korbahti et al., 2008) จากการดำเนินการดังกล่าวทำให้สมการของแบบจำลองที่ได้มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.9783 ($R^2 = 0.9783$) โดยค่า R^2 เป็นค่าสถิติที่แสดงถึงสัดส่วนหรือร้อยละของความผิดพลาดที่แบบจำลองสามารถอธิบายได้จากสมการและเป็นค่าที่มีความสำคัญในการพิจารณาความน่าเชื่อถือของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ กล่าวคือ ค่า R^2 ของการเขียนสมการแบบจำลองควรมากกว่า 0.75 จึงเป็นค่าที่ยอมรับได้ โดยค่า R^2 ที่ดีควรมีค่าเข้าใกล้ 1 ส่วนค่า R^2_{adj} คือค่าที่แสดงสัดส่วนหรือเปอร์เซ็นต์ที่ตัวแปรอิสระมีส่วนในการอธิบายความผันแปรทั้งหมดของตัวแปรตาม ซึ่งเป็นค่าที่วัดความเหมาะสมของแบบจำลองกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง เป็นค่าจากการปรับค่าผลการทดลอง โดยหากมีค่าใกล้เคียงกับค่า R^2 แสดงว่าแต่ละทอมในแบบจำลองที่ได้ล้วนส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อผลตอบสนองของประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียทั้งหมด โดยจากการทดลองพบว่าได้ค่า R^2 และ R^2_{adj} เท่ากับ 0.9783 และ 0.9683 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าค่า R^2_{adj} มีค่าต่ำกว่า R^2 เนื่องจากได้จากการปรับค่าผลการทดลองและค่าจากแบบจำลองให้มีความสัมพันธ์กันมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับเกณฑ์ดังกล่าว เมื่อเปรียบเทียบค่าการทำนายประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียของแบบจำลองสมการเส้นโค้งกับค่าที่ได้จากการทดลองซึ่งแตกต่างกันเพียง 2.17% เท่านั้น โดยแสดงได้ดังภาพประกอบที่ 4-23



ภาพประกอบที่ 4-23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียที่ได้จากค่าทดลองและจากการทำนายของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (4-1)

ภาพประกอบที่ 4-23 แสดงถึงความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียที่ได้จากการทดลองและจากการทำนายโดยใช้สมการที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (4-1) ซึ่งข้อมูลที่ได้มีค่าการกระจายตัวรอบเส้นที่แสดงความสอดคล้องในระดับที่ยอมรับได้ ($R^2 = 0.9783$) แสดงว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้สามารถใช้ทำนายประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียในช่วงตัวแปรที่ศึกษาได้ดี

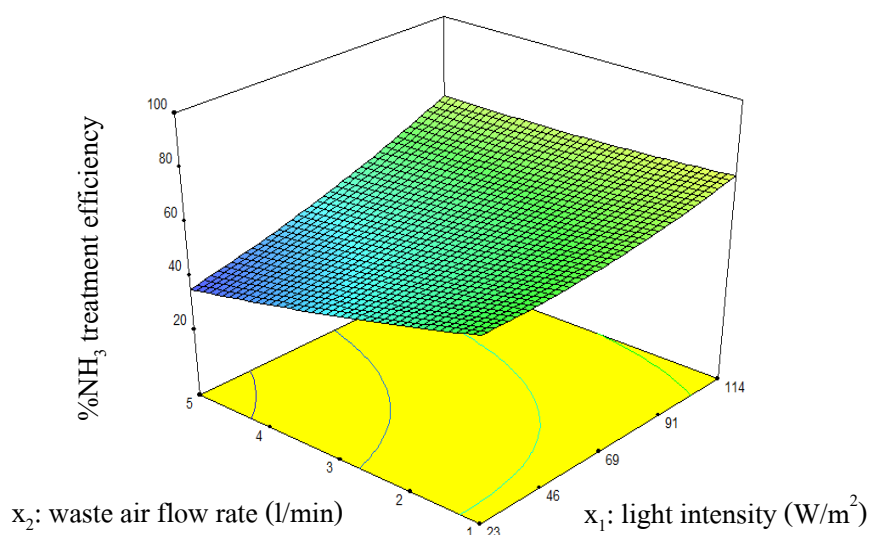
4.5.3 ผลของตัวแปรอิสระต่อประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสีย

ผลการปฏิสัมพันธ์ (interaction) ระหว่างตัวแปรอิสระทั้ง 3 ซึ่งประกอบด้วย ความเข้มแสง อัตราการไหลอากาศเสีย และปริมาณ TiO_2 ต่อประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสีย ที่ประเมินจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ได้นำเสนอในรูปแบบกราฟพื้นผิวตอบสนองมีลักษณะเป็นกราฟ 3 มิติ โดยใช้แบบจำลองที่เหมาะสมจากการวิเคราะห์การถดถอย (regression analysis) แสดงไว้ดังภาพประกอบที่ (4-24)-(4-25) ข้อมูลเหล่านี้แสดงให้เห็นถึงการตอบสนองของตัวแปรที่มีความแตกต่างกัน กราฟพื้นผิวตอบสนองสามารถนำมาใช้ในการอธิบายและระบุ

ผลกระทบของตัวแปรแต่ละตัวในด้านปฏิสัมพันธ์ที่สำคัญระหว่างตัวแปร ซึ่งจะแสดงผลของตัวแปรอิสระครั้งละ 2 ตัว มีรายละเอียดดังนี้

1. ผลของความเข้มแสงและอัตราการไหลอากาศเสีย

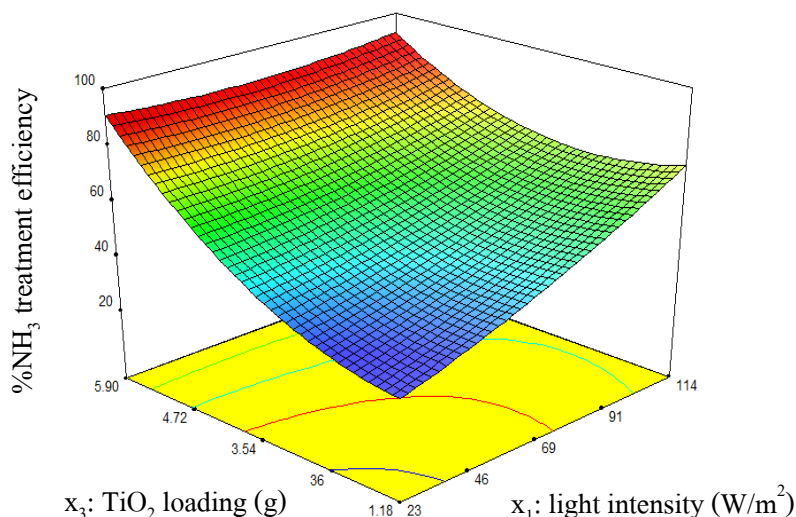
กราฟ 3 มิติ ในภาพประกอบที่ 4-24 แสดงปฏิสัมพันธ์ที่สำคัญระหว่างความเข้มแสง (x_1) และอัตราการไหลอากาศเสีย (x_2) ต่อประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนีย ซึ่งพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญด้วยการเพิ่มความเข้มของแสงและลดอัตราการไหลอากาศเสีย ที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนีย 300 ppmv จากกราฟจะเห็นได้ว่าที่ประสิทธิภาพสูงสุดนั้นต้องใช้ความเข้มแสง 114 W/m² และอัตราการไหลอากาศเสียเป็น 1 l/min ในทำนองเดียวกันเมื่อให้ความเข้มแสงต่ำ (23 W/m²) ที่อัตราการไหลอากาศเสียเดียวกัน จะให้ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียต่ำ โดยธรรมชาติของการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกจะต้องมีการใช้แสงในการเกิดปฏิกิริยา ดังนั้นความเข้มแสงจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างแอมโมเนียกับพื้นผิวของ TiO₂ เพราะคู่อิเล็กตรอนสามารถผลิตได้มากขึ้นโดยพลังงานแสง (Li et al., 2008) โดยหากมีอัตราการไหลของอากาศที่ต่ำด้วยจะยิ่งส่งผลให้มี Retention time ของการเกิดปฏิกิริยาที่สูงขึ้น ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียมากขึ้น



ภาพประกอบที่ 4-24 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสง (x_1) และอัตราการไหลอากาศเสีย (x_2) ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนีย ที่ระดับความเข้มข้น 300 ppmv

2. ผลของความเข้มแสงและปริมาณ TiO_2

ภาพประกอบที่ 4-25 แสดงผลของปฏิสัมพันธ์ของ 2 ตัวแปรระหว่างความเข้มแสงและปริมาณ TiO_2 (x_1, x_3) ที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนีย 300 ppmv จากกราฟแสดงให้เห็นว่าปริมาณ TiO_2 มีปฏิสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสีย พบว่า ค่าสูงสุดในการบำบัดแอมโมเนียเป็น 87% ที่ความเข้มแสง (68 W/m^2) และที่ปริมาณ TiO_2 สูงสุด (5.9 กรัม) อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียลดลงอย่างมีนัยสำคัญที่มีความเข้มแสงต่ำและที่ปริมาณ TiO_2 ต่ำ (1.18 กรัม) เมื่อมีปริมาณ TiO_2 ที่บรรจุในปฏิกรณ์ปริมาณมาก ก็จะนำไปสู่ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียที่สูงขึ้น เนื่องจากมีพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยามากทำให้สามารถรองรับการเกิด $\cdot\text{OH}$ เรดดิคัล ที่ได้จากการฉายแสงได้มาก (Abdollahi et al., 2012) จึงทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียเพิ่มขึ้น จากรูปแสดงให้เห็นชัดเจนว่าประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียขึ้นอยู่กับปริมาณ TiO_2 ที่สูงขึ้นและความเข้มแสงที่สูงขึ้น ดังนั้นปฏิสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงและปริมาณ TiO_2 (x_1, x_3) จึงมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนีย



ภาพประกอบที่ 4-25 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสง (x_1) และปริมาณ TiO_2 (x_3) ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนีย ที่ระดับความเข้มข้น 300 ppmv

4.6 ภาวะที่เหมาะสมของการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียด้วยปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติก

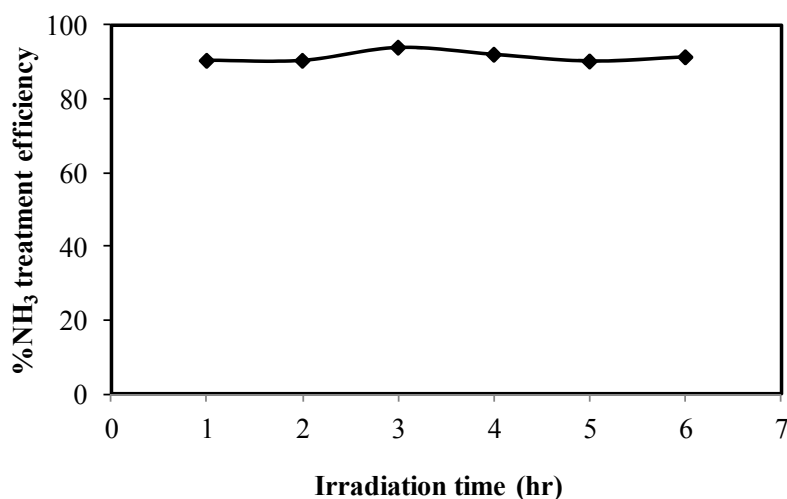
จากสมการแบบจำลอง (4-1) สามารถนำมาใช้ในการทำนายประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียในช่วงของตัวแปรที่ทำการศึกษา โดยสามารถใช้แบบจำลองดังกล่าวในการทำนายภาวะที่เหมาะสมในการดำเนินการได้ ซึ่งสามารถวิเคราะห์หาผลเฉลยของภาวะที่เหมาะสมได้โดยใช้โปรแกรม Design Expert software อันจะทำให้ได้ค่าที่ดีที่สุดที่ทำให้ผลการตอบสนองพื้นผิวหรือประสิทธิภาพการบำบัดได้สูงสุด และสามารถใช้เป็นแนวทางในการกำหนดภาวะการดำเนินการของตัวแปรที่เกี่ยวข้องซึ่งประกอบด้วยความเข้มแสง อัตราการไหลอากาศเสีย และปริมาณ TiO_2 จากการวิเคราะห์ด้วยแนวทางข้างต้น พบว่า ภาวะการทดลองที่เหมาะสม (optimum condition) ที่ได้จากการใช้ TiO_2 ในการบำบัดแอมโมเนียที่ปนเปื้อนในอากาศด้วยปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติก คือ ที่ความเข้มแสง 114 W/m^2 อัตราการไหลอากาศเสีย 1 l/min และปริมาณ TiO_2 5.9 กรัม โดยจะควบคุมระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียให้คงที่ตลอดการทดลองที่ระดับ 300 ppmv ซึ่งจะให้ประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียสูงสุด 91.45% โดยแสดงไว้ดังตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-3 แสดงภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียและเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทำนายด้วยสมการกับผลการทดลอง

ความเข้มแสง (W/m^2)	อัตราการไหลอากาศเสีย (l/min)	ปริมาณ TiO_2 (g)	NH_3 treatment efficiency (%)	
			Predicted	Experimental
(x_1)	(x_2)	(x_3)		
114	1	5.9	91.45	90.02

จากการนำภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทำนายผลมาดำเนินการทดลองด้วยระบบการดำเนินการแบบต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง เพื่อทดสอบและยืนยันผลลัพธ์ของประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แสดงดังภาพประกอบที่ 4-26 ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียที่ช่วงเวลาต่างๆ ของการฉาย

แสง จากตารางที่ 4-3 พบว่าผลลัพธ์ของประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้คาดการณ์ไว้ ซึ่งเป็นตัวบ่งบอกถึงความแม่นยำของแบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ และยังเป็นตัวบ่งบอกถึงเสถียรภาพของระบบปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติก เมื่อระยะเวลาผ่านไปถึง 6 ชั่วโมง การใช้โฟโตแคตะไลสต์ชนิด TiO_2 ที่เคลือบบนหลอดแก้วลงบรรจุในปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติกก็ยังสามารถบำบัดแอมโมเนียได้ประสิทธิภาพที่สูง จากผลการศึกษาดังกล่าวจึงเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้บำบัดแอมโมเนียจากโรงงานผลิตน้ำยางข้น และสามารถนำวิธีนี้ไปประยุกต์ใช้กับสารอื่นๆ ที่เป็นมลพิษทางอากาศได้ต่อไป



ภาพประกอบที่ 4-26 ผลการทดสอบหาประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียด้วยปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติกตามภาวะที่เหมาะสม (ความเข้มแสง 114 W/m^2 อัตราการไหลอากาศเสีย 1 l/min และปริมาณ TiO_2 5.9 กรัม)

4.7 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต (Economic analysis)

1. การประมาณค่าพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ในกระบวนการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสีย

การประมาณค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดในกระบวนการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสีย ทำโดยการประเมินจากค่ากำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ในกระบวนการ ประกอบด้วยไฟฟ้าจากหลอดที่เป็นแหล่งกำเนิดแสง แสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้ ตามตารางที่ 4-4

ตารางที่ 4-4 ผลการคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ในกระบวนการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสีย

อุปกรณ์ไฟฟ้า	กำลังไฟฟ้า (กิโลวัตต์)	ระยะเวลาการใช้งาน (ชั่วโมง)	หน่วยการใช้ไฟฟ้า (กิโลวัตต์ชั่วโมง)
หลอดไฟ	0.008	24	0.192
อัตราการใช้ไฟฟ้า	0.192 (หน่วย)		

หมายเหตุ การคำนวณค่าไฟฟ้าเป็นการคำนวณต่อการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียโดยใช้หลอดไฟจำนวน 1 หลอด

ตารางที่ 4-5 อัตราค่าไฟฟ้าประเภทกิจการขนาดเล็ก ซึ่งมีความต้องการพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยในเวลา 15 นาทีสูงสุดต่ำกว่า 30 กิโลวัตต์ โดยต่อผ่านเครื่องวัดไฟฟ้าเครื่องเดียว (การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, 2554)

อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้า	ค่าพลังงานไฟฟ้า (บาทต่อหน่วย)
150 หน่วยแรก (หน่วยที่ 0 - 150)	2.7628
250 หน่วยต่อไป (หน่วยที่ 151 - 400)	3.7362
เกิน 400 หน่วยขึ้นไป (หน่วยที่ 401 เป็นต้นไป)	3.9361

$$\text{Cost} = W \times C \quad (4-2)$$

เมื่อ C = ค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วย (บาทต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง)
 W = หน่วยการใช้ไฟฟ้า (กิโลวัตต์ชั่วโมง)

จากตารางที่ 4-4 ค่าการคำนวณอัตราการใช้ไฟฟ้าในการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียโดยใช้หลอดไฟจำนวน 1 หลอด พบว่า การบำบัดแอมโมเนียเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ใช้ อัตราการใช้ไฟฟ้าเป็น 0.192 หน่วย ซึ่งเมื่อพิจารณาอัตราค่าไฟฟ้าประเภทกิจการขนาดเล็กแสดงดัง ตารางที่ 4-5 พบว่าค่าพลังงานไฟฟ้า 150 หน่วยแรก มีค่าเป็น 2.7628 บาทต่อหน่วย และเมื่อทำการ คำนวณค่าไฟฟ้างวดที่ 4-2 จะได้ $0.192 \times 2.7628 = 0.53$ บาท

2. การประมาณค่าวัตถุดิบทั้งหมดที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แคตะลิสต์เคลื่อนบนหลอดแก้วด้วยวิธีสารแขวนลอย

วัตถุดิบทั้งหมดที่ใช้ในการสังเคราะห์แคตะลิสต์ประกอบด้วย หลอดแก้วทนความร้อน ผง TiO_2 ขนาดอนุภาคนาโน ตัวทำละลายชนิดเอทานอล และ โพลีเอทิลีน ไกลคอล ซึ่งสามารถ แสดงรายละเอียดการคำนวณดังตารางที่ 4-6

ตารางที่ 4-6 ผลของการคำนวณค่าวัตถุดิบทั้งหมดที่ใช้ในการสังเคราะห์แคตะลิสต์ต่อ 250 ชิ้น

วัตถุดิบ	ราคา	ปริมาณที่ใช้	จำนวนเงิน (บาท)
หลอดแก้วทนความร้อน	0.4 (บาท/ชิ้น)	250 ชิ้น	100.00
ผง TiO_2 ขนาดอนุภาคนาโน	135 (บาท/กิโลกรัม)	6 กรัม	0.81
เอทานอล	50 (บาท/ลิตร)	150 มิลลิลิตร	7.50
โพลีเอทิลีน ไกลคอล	4,000 (บาท/กิโลกรัม)	1 กรัม	4.00
ราคารวม	112.31 บาท/250 ชิ้น		

หมายเหตุ การคำนวณนี้ไม่รวมค่าตัดชิ้นงานหลอดแก้ว

จากผลการคำนวณค่าวัตถุดิบจะได้ราคาต้นทุนของแคตะลิสต์เคลื่อนบนหลอดแก้ว ราคา 112.31 บาท ต่อ 250 ชิ้น ซึ่งสามารถนำแคตะลิสต์ที่ได้นี้ไปใช้งานซ้ำได้หลายครั้งจนกว่า แคตะลิสต์จะหลุดลอกออกจากหลอดแก้ว และยังสามารถนำหลอดแก้วไปเคลื่อนแคตะลิสต์ซ้ำได้ อีกหลายรอบ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาทดลองในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียโดยใช้ระบบปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลติก ที่มีคอลัมน์บรรจุด้วยโฟโตแคตะลิสต์ชนิด $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ และ TiO_2 เคลือบบนวัสดุตัวกลางและหลอดไฟที่ให้แสงยูวี โดยทำการทดลองบำบัดแอมโมเนียที่ปนเปื้อนทั้งในของเหลวเพื่อการทดสอบโฟโตแคตะลิสต์เบื้องต้นด้วยชุดปฏิกรณ์แบบแบทช์ (batch reactor) และในอากาศเสียด้วยปฏิกรณ์แบบไหลต่อเนื่อง (continuous-flow reactor) การออกแบบและติดตั้งระบบปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลติก มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนีย ซึ่งต้องคำนึงถึงชนิดของโฟโตแคตะลิสต์ การกระจายแสง และอุณหภูมิของระบบปฏิกรณ์ งานวิจัยนี้ออกแบบระบบปฏิกรณ์ที่ประกอบด้วยคอลัมน์ ที่สร้างขึ้นจากแก้วที่บรรจุด้วยโฟโตแคตะลิสต์และทำการติดตั้งคอลัมน์ตรงส่วนกลางของถังปฏิกรณ์ ที่สร้างขึ้นจากวัสดุสแตนเลสโดยติดตั้งหลอดไฟไว้กับผนังภายในของถังซึ่งล้อมรอบภายนอกคอลัมน์ ทำการควบคุมระบบนี้ที่อุณหภูมิห้องด้วยการป้อนอากาศไหลผ่านถังปฏิกรณ์ ทำการออกแบบการทดลองด้วยเทคนิค RSM แบบ CCD เพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และหาภาวะที่เหมาะสมของการทดลอง โดยสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 การบำบัดแอมโมเนียด้วยโฟโตแคตะลิสต์ชนิด $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$

โฟโตแคตะลิสต์ชนิด $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ เตรียมขึ้นจากวิธีโซล-เจล เพื่อใช้บำบัดแอมโมเนียในอากาศเสีย โดยทำการทดสอบประสิทธิภาพเบื้องต้นของโฟโตแคตะลิสต์ชนิดผง 3 ชนิด คือ TiO_2 , SiO_2 และ $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ ด้วยการบำบัดแอมโมเนียในของเหลวในชุดปฏิกรณ์แบบแบทช์ที่ได้ใช้ความเข้มแสง 92 W/m^2 (จำนวนหลอดไฟ 4 หลอด) พบว่า โฟโตแคตะลิสต์ชนิด

TiO₂-SiO₂ ให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุด จึงทำการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียด้วยชุดปฏิกรณ์แบบไหลต่อเนื่อง และทำการเคลือบโฟโตแคตะลิสต์ชนิด TiO₂-SiO₂ บนตัวกลาง 2 ชนิด คือ เซรามิกโฟมและใยแก้ว พบว่าการใช้ตัวกลางเซรามิกโฟมไม่สามารถบำบัดแอมโมเนียได้ เนื่องจากแสงไม่สามารถส่องผ่านเข้าสู่สัมผัสพื้นผิวโฟโตแคตะลิสต์ภายในตัวกลางเซรามิกได้ การใช้ตัวกลางชนิด ใยแก้วที่บรรจุในคอลัมน์ พบว่าระบบให้ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียมีค่าคงที่ที่ 60% ตลอดช่วงเวลาดำเนินการ 5 ชั่วโมง แต่ตัวกลางชนิดใยแก้วนี้มีข้อเสีย คือ เปราะแตกง่าย ทำให้ไม่เหมาะสำหรับการนำไปใช้งานและสารตั้งต้นของเทคนิคโซลเจลที่ใช้ในการเตรียมโฟโตแคตะลิสต์มีราคาสูง

5.1.2 การบำบัดแอมโมเนียด้วยโฟโตแคตะลิสต์ชนิด TiO₂ ผงเคลือบบนหลอดแก้ว

การพัฒนาเทคนิคการสังเคราะห์โฟโตแคตะลิสต์เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการผลิตทำได้โดยใช้ผง TiO₂ อนุภาคขนาดนาโนผสมกับตัวทำละลายเอทานอลและตัวเชื่อมประสานชนิดโพลีเอทิลีนไกลคอล ทำการเคลือบโฟโตแคตะลิสต์ด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบบนตัวกลางหลอดแก้วขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.8 เซนติเมตร ยาว 2 เซนติเมตร ทำให้ได้โฟโตแคตะลิสต์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวกลางชนิด Raschig ring ที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการสัมผัสของอากาศเสียกับพื้นผิวโฟโตแคตะลิสต์ จากการทดลองบำบัดแอมโมเนียที่ปนเปื้อนในของเหลว พบว่าโฟโตแคตะลิสต์ชนิด TiO₂ เคลือบบนหลอดแก้วไม่เหมาะสำหรับการบำบัดแอมโมเนียที่ปนเปื้อนในของเหลว แต่ระบบให้ประสิทธิภาพสูงถึง 87% สำหรับการบำบัดแอมโมเนียที่ปนเปื้อนในอากาศเสียด้วยการใช้ความเข้มแสง 68 W/m² (จำนวนหลอดไฟ 3 หลอด) อัตราการไหลอากาศเสีย 3 l/min และปริมาณ TiO₂ 5.9 กรัม (จำนวนคอลัมน์ 5 คอลัมน์) ที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนีย 300 ppmv จากการบำบัดแอมโมเนียด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกออกซิเดชันได้เป็นก๊าซ N₂ ที่ไม่มีการปนเปื้อนของ NO_x เกิดขึ้นจากระบบ

การออกแบบการทดลองสำหรับการศึกษาระบบปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติกในการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียใช้เทคนิค RSM แบบ CCD เพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ของตัวแปรอิสระที่ประกอบด้วย ความเข้มแสง อัตราการไหลอากาศเสีย และปริมาณ TiO_2 ต่อประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสีย ทำการวิเคราะห์ทางสถิติด้วย ANOVA เพื่อหาค่าความแปรปรวนของการทดลอง พบว่าปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระที่ทำการศึกษา มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียที่ระดับความเชื่อมั่น 95% $R^2 = 0.9783$ ทำให้ได้ภาวะที่เหมาะสมในการดำเนินการ คือ ที่ความเข้มแสง 114 W/m^2 อัตราการไหลอากาศเสีย 1 ลิตรต่อนาที และปริมาณ TiO_2 5.9 กรัม ที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียในอากาศเสีย 300 ppmv ซึ่งจากการทำนายจะให้ประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียได้สูงสุด 91.45% และมีผลการทดสอบยืนยันผลลัพธ์ของการบำบัดแอมโมเนียเป็น 90.02% ด้วยการทดลองต่อเนื่องด้วยภาวะที่เหมาะสมเป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง ซึ่งใกล้เคียงกับผลการทำนายของแบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ที่ได้

ดังนั้นการใช้โฟโตแคตะลิซิสชนิด TiO_2 ผงอนุภาคนาโนเคลือบบนหลอดแก้ว สามารถบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพในระบบปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติก ซึ่งสามารถนำวิธีนี้ใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาไปสู่การบำบัดอากาศเสียที่ปนเปื้อนแอมโมเนียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำยางข้นและโรงงานอื่นๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรทดสอบหาตัวทำละลายชนิดอื่นมาแทนการใช้เอทานอลในการเตรียมโฟโตแคตะลิสต์ เช่น น้ำ เพื่อลดต้นทุนในการผลิตโฟโตแคตะลิสต์และลดมลพิษจากการระเหยของเอทานอล
2. ควรศึกษาต่อจากผลงานวิจัยนี้เพื่อการประยุกต์ใช้สำหรับการใช้งานจริงในแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อมโดยการบำบัดแอมโมเนียจากโรงงานผลิตน้ำยางข้น
3. ควรนำวิธีการที่ได้จากการศึกษาในงานวิจัยนี้ไปประยุกต์ใช้กับการบำบัดสารที่เป็นมลพิษอื่นๆ ทางอากาศ

เอกสารอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ. 2548. แนวปฏิบัติที่ดีด้านการป้องกันและลดมลพิษอุตสาหกรรมน้ำยางขึ้น. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. Available Online: <http://infofile.pcd.go.th/water/rubbertree.pdf?CFID=3069644&CFTOKEN=78432752>
- กฤษฎาพร สีโต. 2546. โฟโตเฟนตันและ TiO_2 โฟโตแคตะไลติกออกซิเดชันของสีรีแอกทีฟเรด 141. คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. 2554. อัตราค่าไฟฟ้า; ประเภทที่ 2 กิจการขนาดเล็ก. Available Online: <http://www.erc.or.th/ERCWeb2/Upload/Download/PEA-Tariff.pdf>
- ธรรมบุญ ศรีทะวงศ์. 2549. พลังงานไฮโดรเจนจากน้ำด้วยแสงอาทิตย์และตัวเร่งปฏิกิริยา: ปฏิกิริยาแยกโมเลกุลน้ำ. วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. Available Online: <http://www.vcharkarn.com/varticle/420>
- สถาบันสิ่งแวดล้อมไทย. 2545. คู่มือการควบคุมมลพิษในโรงงานน้ำยางขึ้นและการจัดการสิ่งแวดล้อมชุมชน. 16.
- สติดา ไกรลาศ. 2004. มลพิษที่วิศวกรเคมีขอมไม่ได้. สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร. Available Online: http://www.eng.mut.ac.th/Chemical/article_detail.asp?ArticleID=289
- สรรค จิตรไคร์รวณ. 2552. การทำความสะอาดโดยตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์. วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ. หน้า 21-24. Available Online: http://lib3.dss.go.th/fulltext/dss_j/2552_57_179_P21_24.pdf

เสริย์ ตู๊ประกาย. 2549. พื้นฐานกระบวนการโฟโตแคตะไลซิส.

Available Online: <http://www.eng.ru.ac.th/envi/aj/EVE410/photocatalytic.pdf>

Abdollahi, Y., Abdullah, A., Zainal, Z. and Yusof, N. 2012. Photocatalytic Degradation of *p*-Cresol by Zinc Oxide under UV Irradiation. International Journal of Molecular Sciences. 13, 302-315.

Amini, M., Younesi, H., Bahramifar, N., Lorestani, A. Z., Ghorbani, F., Daneshi, A. and Sharifzadeh, M. 2008. Application of response surface methodology for optimization of lead biosorption in an aqueous solution by *Aspergillus niger*. Journal of Hazardous Materials. 154, 694–702.

Arslan, I. and Balcioglu, I. 1999. Degradation of Commercial Reactive Dyestuffs by Heterogenous and Homogenous Advance Oxidation Processes: A Comparative Study. Dyes and Pigment. 43, 95-108.

Benedix, R., Dehn, F., Quaas, J. and Orgass, M. 2000. Application of Titanium Dioxide Photocatalysis to Create Self-Cleaning Building Materials. Lacer. 5, 157-167.

Boulinguez, B., Bouzaza, A., Merabet, S. and Wolbert, D. 2008. Photocatalytic degradation of ammonia and butyric acid in plug-flow reactor: Degradation kinetic modeling with contribution of mass transfer. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry. 200, 254–261.

Guillard, C., Beaugiraud, B., Dutriez, C., Herrmann, J. M., Jaffrezic, H., Renault, N. J. and Lacroix, M. 2002. Physicochemical Properties and Photocatalytic Activities of TiO₂ Film Prepared by Sol-Gel Methods. Applied Catalysis B : Environmental. 39, 331-342.

- Hung, C. H., Chiang, P. C., Yuan, C. and Chou, C. Y., 2001. Photocatalytic Degradation of Azo Dye in TiO₂ Suspended Solution. *Water Science & Technology*. 43, 313-320.
- Jo, W., Park, J. and Chun, H. 2002. Photocatalytic destruction of VOCs for in-vehicle air cleaning. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 148, 109–119.
- Kim, D. J., Hahn, S. H., Oh, S. H. and Kim, E. J. 2002. Influence of Calcinations Temperature on Structure and Optical Properties of TiO₂ Thin Films Prepared by Sol-Gel Dip Coating. *Materials Letter*. 57, 355-360.
- Korbahti, K. B. and Tanyolac, A. 2008. Electrochemical treatment of simulated textile wastewater with industrial components and Levafix Blue CA reactive dye: Optimization through response surface methodology. *Journal of Hazardous Materials*. 151, 422–431.
- Li, Y., Sun, S., Ma, M., Ouyang, Y. and Yan, W. 2008. Kinetic study and model of the photocatalytic degradation of rhodamine B (RhB) by a TiO₂-coated activated carbon catalyst: Effects of initial RhB content, light intensity and TiO₂ content in the catalyst. *Chemical Engineering Journal*. 142, 147–155.
- Ozaki, H., Fujimoto, N., Iwamoto, S. and Inoue, M. 2007. Photocatalytic activities of NH₃-treated titanias modified with other elements. *Applied Catalysis B: Environmental*. 70, 431-436.
- Pichat, P., Disdier, J., Hoang V. C., Mas, D., Doutailler, G. and Gaysse, C. 2000. Purification/Deodorization of Indoor Air and Gaseous Effluents by TiO₂ Photocatalysis. *Catalysis Today*. 63, 363-369.

- Rahimpour, M. R. and Asgari, A. 2008. Modeling and simulation of ammonia removal from purge gases of ammonia plants using a catalytic Pd-Ag membrane reactor. *Journal of Hazardous Materials*. 153, 557-565.
- Raupp, G., Alexiadis, A., Hossain, M. and Changrani, R. 2001. First-principles modeling, scaling laws and design of structured photocatalytic oxidation reactors for air purification. *Catalysis Today*. 69, 41–49.
- Rodrigues, C. C., Moraes, D., Nóbrega, S. W. and Bardoza, M. G. 2007. Ammonia adsorption in fixed bed of activated carbon. *Bioresource Technology*. 98, 886-891.
- Shahsavani, D. and Grimvall, A. 2009. An adaptive design and interpolation technique for extracting highly nonlinear response surfaces from deterministic models. *Reliability Engineering and System Safety*. 94, 1173–1182.
- Su, C., Hong, B. Y. and Tseng, C. M. 2004. Sol-gel preparation and photocatalysis of titanium dioxide. *Catalysis Today*. 96, 119-126.
- Teramura, K., Tanaka, T., Yamazoe, S., Arakaki, K. and Funabiki T. 2004. Kinetic study of photo-SCR with NH₃ over TiO₂. *Applied Catalysis B: Environmental*. 53, 29–36.
- Vincent, G., Marquaire, P.M. and Zahraa, O. 2008. Abatement of volatile organic compounds using an annular photocatalytic reactor: Study of gaseous acetone. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 197, 177–189.

- Vorontsov, A. V., Kozlov, D. V., Smirniotis, P. G. and Parmon, V. N. 2005. TiO₂ Photocatalytic Oxidation: III. Gas-Phase Reactors. *Kinetics and Catalys.* 46, 437–444.
- Yamazoe, S., Okumura, T. and Tanaka, T. 2007. Photo-oxidation of NH₃ over various TiO₂. *Catalysis Today.* 120, 220–225.
- Yang, J., Li, D., Wang, X., Yang, X. and Lu, L. 2002. Rapid synthesis of nanocrystalline TiO₂/SnO₂ binary oxides and their photoinduced decomposition of methyl orange. *Journal of Solid State Chemistry.* 165, 193-198.
- Yoon, K.H., Noh, S.J., Kwon, C.H. and Muhammed, M. 2006. Photocatalytic behavior of TiO₂ thin films prepared by sol–gel process. *Journal of Materials Chemistry and Physics.* 95, 79-83.
- Yu, J., Zhao, X. and Zhao, Q. 2000. Effect of surface structure on photocatalytic activity of TiO₂ thin films prepared by sol-gel method. *Thin Solid Films.* 379, 7-14.
- Yu, J., Zhao, X. and Zho, Q. 2001. Photocatalytic Activity of Nanometer TiO₂ Thin Films Prepared by The Sol-Gel Method. *Materials Chemistry and Physics.* 69, 25-29.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์ความเข้มข้นของแอมโมเนียในอากาศเสีย

วิเคราะห์ความเข้มข้นของแอมโมเนียในอากาศเสียด้วยการไทเทรต ซึ่งทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) โดยดูดซึมก๊าซแอมโมเนียด้วยสารละลายกรดบอริก ในอิมพิงเจอร์ที่มีปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่อัตราการไหล 0.54 l/min เป็นระยะเวลา 3 นาที แสดงปฏิกิริยาดังสมการที่ (1)



เมื่อนำสารละลาย $\text{NH}_4\text{H}_2\text{BO}_{3(l)}$ ไปไทเทรตกับกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.02 โมลาร์ จะได้สมการที่ (2)



ซึ่งความเข้มข้นของ $\text{NH}_4\text{H}_2\text{BO}_3$ สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (3)

$$V_{\text{NH}_4\text{H}_2\text{BO}_3} \times M_{\text{NH}_4\text{H}_2\text{BO}_3} = V_{\text{HCl}} \times M_{\text{HCl}} \quad (3)$$

เมื่อ

$$V_{\text{NH}_4\text{H}_2\text{BO}_3} = \text{ปริมาตรของแอมโมเนียมบอเรต (ml)}$$

$$M_{\text{NH}_4\text{H}_2\text{BO}_3} = \text{ความเข้มข้นของแอมโมเนียมบอเรต (mol/l)}$$

$$V_{\text{HCl}} = \text{ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริก (ml)}$$

$$M_{\text{HCl}} = \text{ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (mol/l)}$$

หลังจากคำนวณค่าความเข้มข้นของ $\text{NH}_4\text{H}_2\text{BO}_3$ แล้ว สามารถนำมาคำนวณหามวลของแอมโมเนียในสารละลายที่ถูกดูดซึมไว้ โดยใช้สมการที่ (4)

$$m_{\text{NH}_3} = M_{\text{NH}_4\text{H}_2\text{BO}_3} \times V_{\text{NH}_4\text{H}_2\text{BO}_3} \times PM_{\text{NH}_3} \quad (4)$$

เมื่อ m_{NH_3} = มวลของแอมโมเนีย (mg)
 PM_{NH_3} = มวลโมเลกุลของแอมโมเนีย (g/mol)

หลังจากคำนวณมวลของแอมโมเนียแล้วสามารถนำมาคำนวณหาค่าความเข้มข้นของแอมโมเนียในกระแสก๊าซผสม ซึ่งเป็นการหามวลโดยปริมาตรของการดูดซึมในสารละลายกรดบอริก ตามสมการที่ (5)

$$C_{NH_3} = \frac{m_{NH_3}}{Q_T \times t_b} \quad (5)$$

เมื่อ C_{NH_3} = ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (mg/l, ppm)
 Q_T = อัตราการไหลของก๊าซผสม (l/min)
 t_b = เวลาในการดูดซึม (min)

ในมลพิษทางอากาศจะรายงานในหน่วยความเข้มข้นเป็น Parts per million (ppm) ซึ่งหมายถึงหน่วยของ Parts per million by volume (ppmv) หรือ by mole แสดงไว้ดังสมการที่ (6)

$$1 \text{ ppm} = \frac{V_n \text{ } 1 \mu\text{g gas}}{M \text{ } 1 \text{ l air}} \quad (6)$$

ในการคำนวณความเข้มข้นในเงื่อนไขที่มีสภาพอุณหภูมิและความดันอื่นๆ จะใช้กฎแก๊สสมบรณ์แบบ (ideal gas law) ดังสมการที่ (7)

$$V_n = \frac{V}{n} = R \frac{T}{P} \quad (7)$$

เมื่อ V_n = ปริมาตร โดยโมลของแก๊สในอุดมคติ (dm^3/mol)
 M = มวลโมเลกุลของแก๊ส (g/mol)
 n = จำนวนโมล (mol)
 R = ค่าคงที่ของแก๊ส ($0.08206 \text{ dm}^3 \text{ atm mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$)
 T = อุณหภูมิ (K)
 P = ความดัน (atm)

ตัวอย่างการคำนวณความเข้มข้นของแอมโมเนียในอากาศเสีย

- หาค่า $M_{NH_4H_2BO_3}$ จากสมการที่ (3)

$$50 \text{ ml} \times M_{NH_4H_2BO_3} = 0.98 \text{ ml} \times 0.02 \text{ mol/l}$$

$$M_{NH_4H_2BO_3} = 0.000392 \text{ mol/l}$$

- หาค่า m_{NH_3} จากสมการที่ (4)

$$m_{NH_3} = 0.000392 \text{ mol/l} \times 50 \text{ ml} \times 17.03 \text{ g/mol}$$

$$= 0.333788 \text{ mg}$$

- หาค่า C_{NH_3} จากสมการที่ (5)

$$C_{NH_3} = \frac{0.333788 \text{ mg}}{\left(0.54 \frac{\text{l}}{\text{min}}\right)(3 \text{ min})}$$

$$= 0.206 \text{ mg/l} \text{ หรือ } 0.206 \times 10^3 \mu\text{g/l}$$

- กำหนดเป็นหน่วยความเข้มข้นต่อปริมาตรได้จากสมการที่ (6) และ (7)

จากสมการที่ (7)

$$V_n = 24.87 \text{ dm}^3/\text{mol}$$

จากสมการที่ (6) สามารถคำนวณหาความเข้มข้นของแอมโมเนียในกระแสแก๊สได้ดังนี้

$$\text{ความเข้มข้นของแอมโมเนีย} = \frac{24.87 \text{ dm}^3/\text{mol}}{17.03 \text{ g/mol}} (0.206 \times 10^3 \mu\text{g/l})$$

$$= 300 \text{ ppmv}$$

ดังนั้นความเข้มข้นของแอมโมเนียที่คำนวณได้คือ 300 ppmv

ภาคผนวก ข

ข้อมูลการบำบัดแอมโมเนียด้วยแคตะลิสต์ชนิด $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ และ TiO_2

ตาราง ข-1 ผลบำบัดแอมโมเนียที่ปนเปื้อนในของเหลวกับเวลาในรอบการใช้แคตะลิสต์ครั้งที่ 1 ที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียในของเหลว 100 ppm ใช้หลอดยูวี ที่ความเข้มแสง 92 W/m^2 (จำนวน 4 หลอด)

เวลา (นาที)	ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนีย (%) ของแคตะลิสต์ต่างๆ		
	TiO_2	SiO_2	$\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$
0	0.0	0.0	0.0
20	36.7	30.0	40.0
40	54.8	45.2	61.3
60	75.9	69.0	79.3
80	96.7	93.3	100.0

ตาราง ข-2 ผลบำบัดแอมโมเนียที่ปนเปื้อนในของเหลวกับเวลาในรอบการใช้แคตะลิสต์ครั้งที่ 2 ที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียในของเหลว 100 ppm ใช้หลอดยูวี ที่ความเข้มแสง 92 W/m^2 (จำนวน 4 หลอด)

เวลา (นาที)	ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนีย (%) ของแคตะลิสต์ต่างๆ		
	TiO_2	SiO_2	$\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$
0	0.0	0.0	0.0
20	22.6	19.4	29.0
40	38.7	32.3	45.2
60	50.0	33.3	60.0
80	60.0	40.0	70.0

ตาราง ข-3 ผลบำบัดแอมโมเนียที่ปนเปื้อนในของเหลวกับเวลาในรอบการใช้แคตะลิสต์ครั้งที่ 3 ที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียในของเหลว 100 ppm ใช้หลอดยูวี ที่ความเข้มแสง 92 W/m² (จำนวน 4 หลอด)

เวลา (นาที)	ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนีย (%) ของแคตะลิสต์ต่างๆ		
	TiO ₂	SiO ₂	TiO ₂ -SiO ₂
0	0.0	0.0	0.0
20	19.4	16.1	32.3
40	25.8	22.6	51.6
60	33.3	30.0	60.0
80	45.2	32.3	71.0

ตาราง ข-4 ผลการบำบัดก๊าซแอมโมเนียในอากาศเสียกับเวลาโดยใช้แคตะลิสต์ชนิด TiO₂-SiO₂ ที่เคลือบบนตัวกลางเซรามิก 8 ชั้น ใช้หลอดยูวี ที่ความเข้มแสง 92 W/m² (จำนวน 4 หลอด) อัตราการไหลของอากาศเสีย 1 l/min ที่ระดับความเข้มข้น 100 ppmv

เวลา (นาที)	ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนีย (%)
20	55.56
40	62.50
60	50.00
80	44.43
100	11.11
120	0.00

ตาราง ข-5 ผลการบำบัดก๊าซแอมโมเนียโดยใช้แคตะลิสต์ชนิด $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ เคลือบบนตัวกลางใยแก้วกับเวลา ใช้หลอดยูวี ที่ความเข้มแสง 92 W/m^2 (จำนวน 4 หลอด) ที่อัตราการไหลของอากาศเฉลี่ย 1 l/min

เวลา (นาที)	ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนีย (%)	
	100 ppmv	200 ppmv
20	57.1	58.5
40	61.9	68.3
60	76.2	61.0
80	61.9	54.8
100	65.0	64.3
120	60.0	61.0
140	69.6	58.1
160	65.2	62.8
180	65.2	62.8
200	65.0	62.5
220	62.5	63.4
240	61.9	60.0
260	61.9	54.5
280	57.1	55.0
300	68.2	48.8

ตาราง ข-6 ผลการบำบัดแอมโมเนียในของเหลวโดยการใช้หลอดไฟ 2 ชนิดที่เวลาต่างๆ ในระบบปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติกแบบแบทช์

เวลา (นาที)	ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนีย (%)	
	Blacklight lamp	UV lamp
0	0	0
10	62.5	57.47
20	62.5	58.62
30	64.77	60.23
40	64.77	60.23
50	64.77	60.23
60	65.9	59.55
80	64.77	62.5
100	64.05	61.36
120	65.9	60.23

ตาราง ข-7 ผลการบำบัดแอมโมเนียในของเหลวด้วยระบบปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติกแบบแบทช์ที่ปริมาณ TiO_2 เคลือบบนหลอดแก้วต่างๆ เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง ที่ระดับความเข้มข้น 300 ppm เมื่อมีการฉายแสงจากหลอดแบล็คไลท์ที่ความเข้มแสง 92 W/m^2 (จำนวน 4 หลอด)

ปริมาณ TiO_2 (กรัม)	ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนีย (%)
10.7	25.38
20.7	34.01
30.4	64.44
40.4	70.43

ตาราง ข-8 ผลการบำบัดแอมโมเนียในของเหลวด้วยระบบปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติกแบบแบทช์ ที่ระดับความเข้มข้นแอมโมเนียต่างๆ ใช้ ปริมาณ TiO_2 30 กรัม เป็นแคตะลิสต์และฉายแสงจากหลอดแบล็คไลท์ที่ความเข้มแสง 92 W/m^2 (จำนวน 4 หลอด) ดำเนินการทดลอง 2 ชั่วโมง

ความเข้มข้นของ แอมโมเนีย (ppmv)	ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนีย (%)
100	86.92
300	64.44
500	46.08
700	22.65

ตาราง ข-9 ผลการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเทียบกับเวลาในการดำเนินการด้วยการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง โดยการใช้แคตะลิสต์ชนิด TiO_2 เคลือบบนหลอดแก้ว ในระบบปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติกแบบไหลต่อเนื่อง

เวลาในการฉายแสง (นาที)	ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนีย (%)		
	ใช้ซ้ำครั้งที่ 1	ใช้ซ้ำครั้งที่ 2	ใช้ซ้ำครั้งที่ 3
15	57.1	57.4	57.1
30	56.0	60.4	54.9
45	54.0	56.0	56.8
60	55.0	56.0	54.9
75	55.0	54.9	52.8
90	57.9	52.7	54.9
105	57.1	55.4	57.1
120	55.0	59.6	57.7

ตาราง ข-10 ผลการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียที่ความเข้มแสงต่างๆ กับเวลาในการดำเนินการ โดยใช้ปริมาณ TiO_2 3.54 กรัม (จำนวนคอลัมน์ 3 คอลัมน์) อัตราการไหลอากาศเสีย 3 l/min ที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียในอากาศเสีย 300 ppmv

เวลาในการฉายแสง (นาที)	ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนีย (%)			
	ความเข้มแสง 23 (W/m^2)	ความเข้มแสง 68 (W/m^2)	ความเข้มแสง 92 (W/m^2)	ความเข้มแสง 114 (W/m^2)
15	47.6	57.1	60.0	68.6
30	46.4	56.0	60.0	68.6
45	48.0	54.0	59.0	72.0
60	45.0	55.0	63.2	73.5
75	47.4	55.0	63.2	73.5
90	47.6	57.9	60.0	70.0
105	47.6	57.1	60.0	68.6
120	47.6	55.0	60.0	67.3

ตาราง ข-11 ผลของความเข้มแสงต่อประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียด้วยปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติก ใช้ปริมาณ TiO_2 3.54 กรัม (จำนวนคอลัมน์ 3 คอลัมน์) อัตราการไหลอากาศเสีย 3 l/min ที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียในอากาศเสีย 300 ppmv

ความเข้มแสง (W/m^2)	ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนีย (%)
23	47.4
68	56.1
92	58.7
114	70.2

ตาราง ข-12 ผลการบำบัดแอมโมเนียที่ปริมาณ TiO_2 ต่างๆ กับเวลาในการดำเนินการโดยใช้ความเข้มแสง 68 W/m^2 (จำนวนหลอดไฟ 3 หลอด) ที่อัตราการไหลอากาศเสีย 3 l/min ที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียในอากาศเสีย 300 ppmv

เวลาในการฉายแสง (นาที)	ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนีย (%)			
	ปริมาณ TiO_2 1.18 g	ปริมาณ TiO_2 3.54 g	ปริมาณ TiO_2 4.72 g	ปริมาณ TiO_2 5.90 g
15	38.0	57.4	67.3	86.0
30	39.2	60.4	70.6	86.0
45	36.5	56.0	71.4	81.1
60	40.0	56.0	70.0	82.7
75	42.8	54.9	68.6	76.0
90	40.0	52.7	65.4	84.6
105	35.8	55.4	69.2	82.7
120	39.2	59.6	68.0	81.1

ตาราง ข-13 ผลของปริมาณ TiO_2 ต่อประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียด้วยปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติก ใช้ความเข้มแสง 68 W/m^2 (จำนวนหลอดไฟ 3 หลอด) ที่อัตราการไหลอากาศเสีย 3 l/min ที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียในอากาศเสีย 300 ppmv

ปริมาณ TiO_2 (g)	ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนีย (%)
1.18	38.90
3.54	56.55
4.72	68.80
5.90	83.50

ตาราง ข-14 ผลบำบัดแอมโมเนียที่อัตราการไหลอากาศเสียต่างๆกับเวลาดำเนินการโดยใช้ความเข้มแสง 68 W/m² (จำนวนหลอดไฟ 3 หลอด) ด้วยปริมาณ TiO₂ 3.54 กรัม (จำนวนคอลัมน์ 3 คอลัมน์) ที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียในอากาศเสีย 300 ppmv

เวลาในการฉายแสง (นาที)	ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนีย (%)			
	อัตราการไหล 1 l/min	อัตราการไหล 2 l/min	อัตราการไหล 3 l/min	อัตราการไหล 5 l/min
15	62.0	59.0	57.1	45.8
30	62.4	57.0	54.9	44.9
45	62.3	58.0	56.8	43.6
60	62.0	57.0	54.9	43.0
75	64.5	57.7	52.8	42.0
90	64.3	56.4	54.9	44.2
105	62.4	56.4	57.1	46.9
120	62.0	58.0	57.7	46.0

ตาราง ข-15 ผลของอัตราการไหลอากาศเสียต่อประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียด้วยปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติกที่มีการไหลของอากาศเสียอย่างต่อเนื่องโดยใช้โฟโตแคตะลิสต์ชนิด TiO₂ ที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียในอากาศเสีย 300 ppmv

อัตราการไหลอากาศเสีย (1 l/min)	ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนีย (%)
1	63.20
2	58.90
3	55.77
5	45.20

ตาราง ข-16 ผลของ Retention time ต่อประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกที่ปริมาณของคอลลอยด์และอัตราการไหลอากาศเสียต่างๆ โดยใช้โฟโตแคตะไลสต์ชนิด TiO_2 ที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนีย 300 ppmv

จำนวนคอลลอยด์ (คอลลอยด์)	ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนีย (%)	Retention time (sec.)
1	38.90	11.39
3	56.55	34.18
4	68.80	45.57
5	83.50	56.96

ตาราง ข-17 ผลของ Retention time ต่อประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกที่ปริมาณของคอลลอยด์และอัตราการไหลอากาศเสียต่างๆ โดยใช้โฟโตแคตะไลสต์ชนิด TiO_2 ที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนีย 300 ppmv

อัตราการไหล (l/min)	ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนีย (%)	Retention time (sec.)
1	63.20	102.49
2	58.90	51.27
3	55.77	34.18
5	45.20	20.51

ภาคผนวก ค

ข้อมูลการบำบัดแอมโมเนียด้วยการออกแบบโดยเทคนิค RSM

ตาราง ค-1 ผลบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสีย ที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนีย 300 ppmv ใช้ความเข้มแสง 23 W/m² อัตราการไหลอากาศเสีย 3 l/min และปริมาณ TiO₂ 3.54 g

เวลาในการ เก็บตัวอย่าง (นาที)	ปริมาตรที่ได้จากการไทเทรต ด้วย 0.02 M HCl (ml)		ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (ppmv)		ประสิทธิภาพ การบำบัด (%)
	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	
0	1.00	-	307.04	-	-
15	1.05	0.55	322.39	168.87	47.62
30	1.40	0.75	429.85	230.28	46.43
45	1.35	0.50	414.50	153.52	62.96
60	0.95	0.60	291.69	184.22	36.84
75	0.95	0.50	291.69	153.52	47.37
90	1.05	0.55	322.39	168.87	47.62
105	1.05	0.55	322.39	168.87	47.62
120	1.05	0.55	322.39	168.87	47.62
					47.40

ตาราง ค-2 ผลบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสีย ที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนีย 300 ppmv ใช้
ความเข้มแสง 45 W/m² อัตราการไหลอากาศเสีย 4 l/min และปริมาณ TiO₂ 2.36 g

เวลาในการ เก็บตัวอย่าง (นาที)	ปริมาตรที่ได้จากการไทเทรต ด้วย 0.02 M HCl (ml)		ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (ppmv)		ประสิทธิภาพ การบำบัด (%)
	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	
0	0.98	-	300.90	-	-
15	0.96	0.62	294.76	190.36	35.42
30	1.00	0.64	307.04	196.50	36.00
45	1.06	0.66	325.46	202.64	37.74
60	1.02	0.66	313.18	202.64	35.29
75	0.98	0.68	300.90	208.79	30.61
90	0.98	0.64	300.90	196.50	34.69
105	1.10	0.72	337.74	221.07	34.55
120	1.06	0.68	325.46	208.79	35.85
					35.00

ตาราง ค-3 ผลบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสีย ที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนีย 300 ppmv ใช้
ความเข้มแสง 45 W/m² อัตราการไหลอากาศเสีย 2 l/min และปริมาณ TiO₂ 2.36 g

เวลาในการ เก็บตัวอย่าง (นาที)	ปริมาตรที่ได้จากการไทเทรต ด้วย 0.02 M HCl (ml)		ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (ppmv)		ประสิทธิภาพ การบำบัด (%)
	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	
0	1.00	-	307.04	-	-
15	1.05	0.6	322.39	184.22	42.86
30	1.05	0.55	322.39	168.87	47.62
45	1.05	0.55	322.39	168.87	47.62
60	1.00	0.55	307.04	168.87	45.00
75	1.00	0.55	307.04	168.87	45.00
90	1.20	0.75	368.44	230.28	37.50
105	1.10	0.6	337.74	184.22	45.45
120	1.00	0.5	307.04	153.52	50.00
					46.20

ตาราง ค-4 ผลบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสีย ที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนีย 300 ppmv ใช้
ความเข้มแสง 45 W/m² อัตราการไหลอากาศเสีย 2 l/min และปริมาณ TiO₂ 4.72 g

เวลาในการ เก็บตัวอย่าง (นาที)	ปริมาตรที่ได้จากการไทเทรต ด้วย 0.02 M HCl (ml)		ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (ppmv)		ประสิทธิภาพ การบำบัด (%)
	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	
0	1.02	-	313.18	-	-
15	1.08	0.28	331.60	85.97	74.07
30	1.00	0.24	307.04	73.69	76.00
45	1.08	0.26	331.60	79.83	75.93
60	1.08	0.26	331.60	79.83	75.93
75	1.10	0.32	337.74	98.25	70.91
90	1.00	0.26	307.04	79.83	74.00
105	0.98	0.22	300.90	67.55	77.55
120	0.98	0.22	300.90	67.55	77.55
					75.30

ตาราง ค-5 ผลบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสีย ที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนีย 300 ppmv ใช้
ความเข้มแสง 45 W/m² อัตราการไหลอากาศเสีย 4 l/min และปริมาณ TiO₂ 4.72 g

เวลาในการ เก็บตัวอย่าง (นาที)	ปริมาตรที่ได้จากการไทเทรต ด้วย 0.02 M HCl (ml)		ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (ppmv)		ประสิทธิภาพ การบำบัด (%)
	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	
0	1.02	-	313.18	-	-
15	1.02	0.42	313.18	128.96	58.82
30	1.02	0.42	313.18	128.96	58.82
45	1.00	0.42	307.04	128.96	58.00
60	0.98	0.38	300.90	116.67	61.22
75	1.00	0.40	307.04	122.81	60.00
90	0.98	0.36	300.90	110.53	63.27
105	0.98	0.36	300.90	110.53	63.27
120	1.04	0.44	319.32	135.10	57.69
					60.10

ตาราง ค-6 ผลบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสีย ที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนีย 300 ppmv ใช้ ความเข้มแสง 68 W/m² อัตราการไหลอากาศเสีย 3 l/min และปริมาณ TiO₂ 3.54 g

เวลาในการ เก็บตัวอย่าง (นาที)	ปริมาตรที่ได้จากการไทเทรต ด้วย 0.02 M HCl (ml)		ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (ppmv)		ประสิทธิภาพ การบำบัด (%)
	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	
0	1.04	-	319.32	-	-
15	1.08	0.46	331.60	141.24	57.41
30	0.96	0.38	294.76	116.67	60.42
45	1.00	0.44	307.04	135.10	56.00
60	1.00	0.44	307.04	135.10	56.00
75	1.02	0.46	313.18	141.24	54.90
90	1.10	0.52	337.74	159.66	52.73
105	1.12	0.50	343.88	153.52	55.36
120	1.04	0.42	319.32	128.96	59.62
					56.55

ตาราง ค-7 ผลบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสีย ที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนีย 300 ppmv ใช้
ความเข้มแสง 68 W/m² อัตราการไหลอากาศเสีย 3 l/min และปริมาณ TiO₂ 3.54 g

เวลาในการ เก็บตัวอย่าง (นาที)	ปริมาตรที่ได้จากการไทเทรต ด้วย 0.02 M HCl (ml)		ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (ppmv)		ประสิทธิภาพ การบำบัด (%)
	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	
0	1.04	-	319.32	-	-
15	0.98	0.42	300.90	128.96	57.14
30	1.02	0.46	313.18	141.24	54.90
45	1.02	0.44	313.18	135.10	56.86
60	1.02	0.46	313.18	141.24	54.90
75	1.06	0.50	325.46	153.52	52.83
90	1.02	0.46	313.18	141.24	54.90
105	0.98	0.42	300.90	128.96	57.14
120	1.04	0.44	319.32	135.10	57.69
					55.77

ตาราง ค-8 ผลบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสีย ที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนีย 300 ppmv ใช้ ความเข้มแสง 68 W/m² อัตราการไหลอากาศเสีย 1 l/min และปริมาณ TiO₂ 3.54 g

เวลาในการ เก็บตัวอย่าง (นาที)	ปริมาตรที่ได้จากการไทเทรต ด้วย 0.02 M HCl (ml)		ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (ppmv)		ประสิทธิภาพ การบำบัด (%)
	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	
0	1.00	-	307.04	-	-
15	1.26	0.58	386.87	178.08	53.97
30	1.20	0.5	368.44	153.52	58.33
45	1.06	0.4	325.46	122.81	62.26
60	1.00	0.38	307.04	116.67	62.00
75	0.98	0.32	300.90	98.25	67.35
90	0.98	0.34	300.90	104.39	65.31
105	1.06	0.42	325.46	128.96	60.38
120	1.00	0.38	307.04	116.67	62.00
					63.20

ตาราง ค-9 ผลบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสีย ที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนีย 300 ppmv ใช้ ความเข้มแสง 68 W/m² อัตราการไหลอากาศเสีย 3 l/min และปริมาณ TiO₂ 3.54 g

เวลาในการ เก็บตัวอย่าง (นาที)	ปริมาตรที่ได้จากการไทเทรต ด้วย 0.02 M HCl (ml)		ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (ppmv)		ประสิทธิภาพ การบำบัด (%)
	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	
0	1.05	-	322.39	-	-
15	1.05	0.45	322.39	138.17	57.14
30	1.05	0.4	322.39	122.81	61.90
45	1.00	0.5	307.04	153.52	50.00
60	1.00	0.45	307.04	138.17	55.00
75	1.00	0.45	307.04	138.17	55.00
90	0.95	0.4	291.69	122.81	57.89
105	1.05	0.45	322.39	138.17	57.14
120	1.00	0.45	307.04	138.17	55.00
					56.10

ตาราง ค-10 ผลบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสีย ที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนีย 300 ppmv ใช้
ความเข้มแสง 68 W/m² อัตราการไหลอากาศเสีย 5 l/min และปริมาณ TiO₂ 3.54 g

เวลาในการ เก็บตัวอย่าง (นาที)	ปริมาตรที่ได้จากการไทเทรต ด้วย 0.02 M HCl (ml)		ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (ppmv)		ประสิทธิภาพ การบำบัด (%)
	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	
0	0.98	-	300.90	-	-
15	1.00	0.50	307.04	153.52	50.00
30	1.00	0.52	307.04	159.66	48.00
45	0.98	0.46	300.90	141.24	53.06
60	0.98	0.46	300.90	141.24	53.06
75	1.02	0.54	313.18	165.80	47.06
90	1.04	0.56	319.32	171.94	46.15
105	1.02	0.54	313.18	165.80	47.06
120	1.00	0.50	307.04	153.52	50.00
					49.78

ตาราง ค-11 ผลบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสีย ที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนีย 300 ppmv ใช้
ความเข้มแสง 68 W/m² อัตราการไหลอากาศเสีย 3 l/min และปริมาณ TiO₂ 1.18 g

เวลาในการ เก็บตัวอย่าง (นาที)	ปริมาตรที่ได้จากการไทเทรต ด้วย 0.02 M HCl (ml)		ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (ppmv)		ประสิทธิภาพ การบำบัด (%)
	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	
0	1.02	-	313.18	-	-
15	1.00	0.52	307.04	159.66	48.00
30	1.00	0.50	307.04	153.52	50.00
45	0.98	0.46	300.90	141.24	53.06
60	1.02	0.54	313.18	165.80	47.06
75	1.02	0.54	313.18	165.80	47.06
90	1.00	0.50	307.04	153.52	50.00
105	1.00	0.52	307.04	159.66	48.00
120	1.00	0.50	307.04	153.52	50.00
					49.63

ตาราง ค-12 ผลบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสีย ที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนีย 300 ppmv ใ้
ความเข้มแสง 68 W/m² อัตราการไหลอากาศเสีย 3 l/min และปริมาณ TiO₂ 5.9 g

เวลาในการ เก็บตัวอย่าง (นาที)	ปริมาตรที่ได้จากการไทเทรต ด้วย 0.02 M HCl (ml)		ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (ppmv)		ประสิทธิภาพ การบำบัด (%)
	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	
0	0.98	-	300.90	-	-
15	1.00	0.12	307.04	36.84	88.00
30	1.00	0.12	307.04	36.84	88.00
45	0.98	0.10	300.90	30.70	89.80
60	0.98	0.10	300.90	30.70	89.80
75	1.02	0.12	313.18	36.84	88.24
90	1.04	0.14	319.32	42.99	86.54
105	1.02	0.12	313.18	36.84	88.24
120	1.00	0.14	307.04	42.99	86.00
					87.00

ตาราง ค-13 ผลบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสีย ที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนีย 300 ppmv ใช้ ความเข้มแสง 92 W/m² อัตราการไหลอากาศเสีย 2 l/min และปริมาณ TiO₂ 4.72 g

เวลาในการ เก็บตัวอย่าง (นาที)	ปริมาตรที่ได้จากการไทเทรต ด้วย 0.02 M HCl (ml)		ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (ppmv)		ประสิทธิภาพ การบำบัด (%)
	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	
0	1.04	-	319.32	-	-
15	1.08	0.22	331.60	67.55	79.63
30	0.96	0.20	294.76	61.41	79.17
45	1.00	0.26	307.04	79.83	74.00
60	1.00	0.22	307.04	67.55	78.00
75	1.02	0.28	313.18	85.97	72.55
90	1.10	0.32	337.74	98.25	70.91
105	1.12	0.30	343.88	92.11	73.21
120	1.04	0.24	319.32	73.69	76.92
					75.60

ตาราง ค-14 ผลบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสีย ที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนีย 300 ppmv ใช้
ความเข้มแสง 92 W/m² อัตราการไหลอากาศเสีย 4 l/min และปริมาณ TiO₂ 4.72 g

เวลาในการ เก็บตัวอย่าง (นาที)	ปริมาตรที่ได้จากการไทเทรต ด้วย 0.02 M HCl (ml)		ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (ppmv)		ประสิทธิภาพ การบำบัด (%)
	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	
0	1.02	-	313.18	-	-
15	1.04	0.30	319.32	92.11	71.15
30	1.00	0.28	307.04	85.97	72.00
45	1.00	0.26	307.04	79.83	74.00
60	0.96	0.22	294.76	67.55	77.08
75	0.98	0.24	300.90	73.69	75.51
90	1.10	0.32	337.74	98.25	70.91
105	1.00	0.28	307.04	85.97	72.00
120	0.98	0.24	300.90	73.69	75.51
					73.50

ตาราง ค-15 ผลบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสีย ที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนีย 300 ppmv ใช้
ความเข้มแสง 92 W/m² อัตราการไหลอากาศเสีย 2 l/min และปริมาณ TiO₂ 2.36 g

เวลาในการ เก็บตัวอย่าง (นาที)	ปริมาตรที่ได้จากการไทเทรต ด้วย 0.02 M HCl (ml)		ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (ppmv)		ประสิทธิภาพ การบำบัด (%)
	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	
0	1.00	-	307.04	-	-
15	1.00	0.38	307.04	116.67	62.00
30	1.00	0.38	307.04	116.67	62.00
45	1.00	0.36	307.04	110.53	64.00
60	1.05	0.36	322.39	110.53	65.71
75	1.05	0.40	322.39	122.81	61.90
90	0.95	0.34	291.69	104.39	64.21
105	0.95	0.36	291.69	110.53	62.11
120	1.00	0.38	307.04	116.67	62.00
					62.99

ตาราง ค-16 ผลบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสีย ที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนีย 300 ppmv ใช้ ความเข้มแสง 92 W/m² อัตราการไหลอากาศเสีย 4 l/min และปริมาณ TiO₂ 2.36 g

เวลาในการ เก็บตัวอย่าง (นาที)	ปริมาตรที่ได้จากการไทเทรต ด้วย 0.02 M HCl (ml)		ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (ppmv)		ประสิทธิภาพ การบำบัด (%)
	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	
0	0.98	-	300.90	-	-
15	0.96	0.46	294.76	141.24	52.08
30	1.00	0.48	307.04	147.38	52.00
45	1.06	0.48	325.46	147.38	54.72
60	1.02	0.52	313.18	159.66	49.02
75	0.98	0.42	300.90	128.96	57.14
90	0.98	0.44	300.90	135.10	55.10
105	1.10	0.56	337.74	171.94	49.09
120	1.06	0.48	325.46	147.38	54.72
					53.00

ตาราง ค-17 ผลบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสีย ที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนีย 300 ppmv ใช้
ความเข้มแสง 114 W/m² อัตราการไหลอากาศเสีย 3 l/min และปริมาณ TiO₂ 3.54 g

เวลาในการ เก็บตัวอย่าง (นาที)	ปริมาตรที่ได้จากการไทเทรต ด้วย 0.02 M HCl (ml)		ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (ppmv)		ประสิทธิภาพ การบำบัด (%)
	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	
0	1.00	-	307.04	-	-
15	1.05	0.32	322.39	98.25	69.52
30	1.02	0.32	313.18	98.25	68.63
45	1.00	0.28	307.04	85.97	72.00
60	0.98	0.28	300.90	85.97	71.43
75	0.98	0.26	300.90	79.83	73.47
90	1.00	0.30	307.04	92.11	70.00
105	1.02	0.32	313.18	98.25	68.63
120	1.04	0.34	319.32	104.39	67.31
					70.20

ตาราง ค-18 ผลบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสีย ที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนีย 300 ppmv ใช้
ความเข้มแสง 68 W/m² อัตราการไหลอากาศเสีย 2 l/min และปริมาณ TiO₂ 3.54 g

เวลาในการ เก็บตัวอย่าง (นาที)	ปริมาตรที่ได้จากการไทเทรต ด้วย 0.02 M HCl (ml)		ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (ppmv)		ประสิทธิภาพ การบำบัด (%)
	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	
0	1.02	-	313.18	-	-
15	1.04	0.42	319.32	128.96	59.62
30	0.90	0.34	276.33	104.39	62.22
45	0.92	0.94	282.47	288.61	-2.17
60	1.06	0.42	325.46	128.96	60.38
75	1.04	0.44	319.32	135.10	57.69
90	1.10	0.48	337.74	147.38	56.36
105	1.10	0.48	337.74	147.38	56.36
120	1.00	0.40	307.04	122.81	60.00
					58.90

ตาราง ค-19 ผลบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสีย ที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนีย 300 ppmv ใ้
ความเข้มแสง 68 W/m² อัตราการไหลอากาศเสีย 3 l/min และปริมาณ TiO₂ 4.72 g

เวลาในการ เก็บตัวอย่าง (นาที)	ปริมาตรที่ได้จากการไทเทรต ด้วย 0.02 M HCl (ml)		ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (ppmv)		ประสิทธิภาพ การบำบัด (%)
	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	
0	1.04	-	319.32	-	-
15	1.10	0.36	337.74	110.53	67.27
30	1.02	0.30	313.18	92.11	70.59
45	0.98	0.28	300.90	85.97	71.43
60	1.00	0.30	307.04	92.11	70.00
75	1.02	0.32	313.18	98.25	68.63
90	1.10	0.38	337.74	116.67	65.45
105	1.04	0.32	319.32	98.25	69.23
120	1.00	0.32	307.04	98.25	68.00
					68.80

ตาราง ค-20 ผลบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสีย ที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนีย 300 ppmv ใช้
ความเข้มแสง 92 W/m² อัตราการไหลอากาศเสีย 3 l/min และปริมาณ TiO₂ 3.54 g

เวลาในการ เก็บตัวอย่าง (นาที)	ปริมาตรที่ได้จากการไทเทรต ด้วย 0.02 M HCl (ml)		ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (ppmv)		ประสิทธิภาพ การบำบัด (%)
	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	
0	1.00	-	307.04	-	-
15	1.00	0.40	307.04	122.81	60.00
30	1.00	0.40	307.04	122.81	60.00
45	1.00	0.45	307.04	138.17	55.00
60	0.95	0.35	291.69	107.46	63.16
75	0.95	0.35	291.69	107.46	63.16
90	1.20	0.55	368.44	168.87	54.17
105	1.10	0.50	337.74	153.52	54.55
120	1.00	0.40	307.04	122.81	60.00
					58.70

ตาราง ค-21 ผลการทดสอบหาประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียด้วยปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติกตามภาวะที่เหมาะสม (ความเข้มแสง 114 W/m² อัตราการไหลอากาศเสีย 1 l/min และปริมาณ TiO₂ 5.9 กรัม)

เวลาในการ เก็บตัวอย่าง (นาที)	ปริมาตรที่ได้จากการไทเทรต ด้วย 0.02 M HCl (ml)		ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (ppmv)		ประสิทธิภาพ การบำบัด (%)
	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	
0	1.00	-	307.04	-	-
1	1.02	0.12	313.18	36.84	88.24
2	1.02	0.10	313.18	30.70	90.20
3	0.96	0.08	294.76	24.56	91.67
4	0.98	0.10	300.90	30.70	89.80
5	1.00	0.10	307.04	30.70	90.00
6	1.02	0.10	313.18	30.70	90.20
					90.02

ภาคผนวก ง

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่จากวิทยานิพนธ์



PROCEEDINGS OF



18th REGIONAL SYMPOSIUM on CHEMICAL ENGINEERING

(RSCE2011)

Innovation and Sustainability for a Rapidly Changing World
27th - 28th OCTOBER 2011, HO CHI MINH CITY, VIETNAM



ORGANIZED BY HO CHI MINH CITY UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

AMMONIA TREATMENT BY TiO₂-SiO₂ UNDER UV LIGHT IRRADIATION USING PHOTOCATALYTIC REACTOR

PRUKRAYA PONGYEELA¹, LEK SIKONG², JUNTIMA CHUNGSIRIPORN^{1*}

¹Department of Chemical Engineering, ²Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat-Yai, Songkhla 90112, Thailand

Corresponding author: juntima.c@psu.ac.th

Received October 1, 2011

ABSTRACT

The contaminated ammonia (NH₃) in wastewater and waste air without any treatment has affected to human health and environment. Ammonia is a substance of NO_x pollutant that can effect to global warming. Therefore objective of this research was to study for ammonia treatment in wastewater and waste air using photocatalytic reactor with UV light irradiation. The titanium dioxide and silicon dioxide mixing (TiO₂-SiO₂) was prepared by sol-gel method. Dip coating was performed for coating the catalyst on fiberglass as using in the waste air treatment system. The UV lamps emitted UV-A radiation within a range of 315–400 nm with a power consumption of 8 W per lamp. The result showed that the photocatalytic oxidation (PCO) reaction had effectively removed NH₃ from wastewater using the TiO₂-SiO₂ catalyst powder. For the waste air treatment, the photocatalytic reactor was constructed by installing a glass column (4 cm internal diameter and 30 cm height) at central of chamber. 4 UV lamps were fixed inside the chamber wall and cooled down by air flow throught the chamber. Optimum conditions for NH₃ treatment in waste air by PCO reaction at NH₃ concentration of 100-200 ppm was 1 l/min air flow rate and 32 W with four UV lamps. Ammonia removal efficiency from the optimum condition was approximately about 60%.

Keywords: Ammonia, Photocatalytic oxidation, TiO₂-SiO₂, Sol-gel

1. INTRODUCTION

In present, many industries use large quantities of ammonia as a chemical in the processes [1]. These lead to ammonia contamination in both water and air that threaten to human health, animals, vegetation, and environment [2]. Those are significant problem to be solved urgently. Many researchs have beeb studied on the ammonia treatment by using various techniques depending on concentration and loading capacity. Purposes of the treatment may be the healing process to new applications or degradation of the pollutants.

Photocatalytic system is one of the treatment technologies for the removal of both organic and inorganic pollutants from contaminated air and water [3]. Photocatalytic oxidation of ammonia to nitrogen is a potentially available method in order to reduce the ammonia pollution proceeds at room temperature in the atmospheric pressur. Photocatalytic system consists of catalyst and light source in photoreactor. Photocatalyst must have properties of photo-active operating in the wavelength range of UV light. TiO₂ photocatalyst has high efficiency due to it cannot be damaged by light and can be regenerated. Doping SiO₂ in TiO₂ increases the acidity which induces increasing hydroxyl content in the composite film [4].

In this work, the treatment of ammonia (NH_3) in waste water and waste air were studied using the photocatalytic reactor. TiO_2 - SiO_2 mixing preparing by sol-gel method were used as photocatalyst. Dip coating was performed for coating the photocatalyst on fiberglass as using in the waste air treatment system. The UV lamps emitted UV-A radiation within a range of 315–400 nm with a power consumption of 8 W per lamp. The NH_3 treatment in wastewater was tested in laboratory scale of batch system using catalyst powder. For the waste air treatment, the photocatalytic reactor was constructed in the stainless steel chamber with 4 UV lamps.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 Raw material

Titanium (IV) isopropoxide (TTIP, $\text{Ti}(\text{OCH}(\text{CH}_3)_2)_4$; 99.95%, Fluka) and tetraethyl orthosilicate (TEOS, $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$; 98%, Fluka) were used as precursors for preparation of TiO_2 - SiO_2 photocatalyst. Ethanol (95%; Commercial) and 2-Propanol (99.5%; JUNSEI Japan) were used as solvent. Fiberglass is a small fiber that produce from the melted glass. It was purchased from Qingdao rocky industry.

2.2 Synthesis of TiO_2 - SiO_2 photocatalyst

TiO_2 - SiO_2 Photocatalyst was prepared via a conventional sol-gel method. The precursors for the TiO_2 - SiO_2 sol were titanium tetraisopropoxide (TTIP) and tetraethoxysilane (TEOS). The 2-Propanol was used as solvent for TiO_2 sol preparation. Then the solution was stirred magnetically for 15 min at room temperature and adjusted pH to 3.5 by addition 2 M hydrochloric acid. The TiO_2 sol was obtained by continuous stirring for 1 hr. The SiO_2 sol was prepared in a similar manner. The TEOS was firstly dissolved in ethanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) followed by stirring and adding 2 M of hydrochloric acid. Then distilled water was added to the solution during stirred for hydrolysis reaction that was flowed under atmospheric pressure and cooled at a rate of $10^\circ\text{C}/\text{min}$ then maintained for 1 h to obtain SiO_2 sol. The TiO_2 - SiO_2 solution were then mixed with 1:1 ratios of SiO_2 and TiO_2 solution [5]. This solution was divided into 2 parts: (1) the sol was then coated on fiberglass by dip coating method and dried at 100°C for 1 h for three times dip coating before calcined at 500°C for 2 h, and (2) the solution was subsequently at room temperature to form gel then dried it at 100°C for 1 h. Following by calcined at 500°C for 2 h that performed in air flowing under atmospheric pressure and cooled at a rate of $10^\circ\text{C}/\text{min}$ [6].

2.3 Treatment of NH_3

In the ammonia treatment will be divided into two parts: the treatment of ammonia in wastewater and in waste air using of the TiO_2 - SiO_2 catalyst. The waste water treatment used the powder catalyst and waste air used the coated fiberglass with catalyst.

2.3.1. Treatment of NH_3 in wastewater

The NH_3 treatment in wastewater was tested in laboratory scale of batch system. The photocatalytic reactor was a glass bottles with 2 cm inside diameter, 8.5 cm column height. The NH_3 contaminated water was simulated for this test. The preparation of ammonia contaminated water was 25% w/w NH_3 solution. Catalysts was used 0.2 g for adding in a vessel that contained 25 ml the wastewater. The NH_3 concentration in water was tested and measured by titration method.

2.3.2. Treatment of NH_3 in waste air

The TiO_2 - SiO_2 catalyst was coated on 5 grams fiberglass and then packed into a glass column after that set up in the photocatalytic reactor. The system was tested in laboratory scale of continuous down flow fixed-bed column. The reactor consists of glass reactor and stainless steel chamber for

install UV lamp. The 4 lamps was used in this work. The UV lamps emitted UV-A radiation with a power consumption of 8 W per lamp. The Cooling by air flow was used in this reactor to reduce temperature in the reactor when experiments were start. The diagram of NH_3 contaminated waste air and photocatalytic system are demonstrated in *Figure 1*. The photocatalytic reactor was a glass with 4 cm internal diameter, 30 cm column height as shown in *Figure 2*.

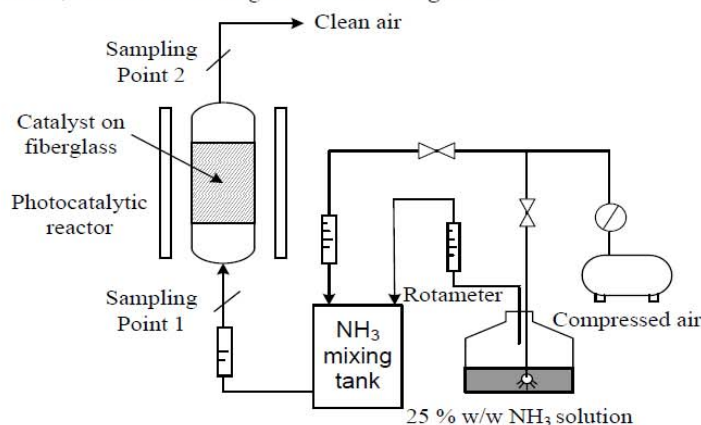


Figure 1. Schematic diagram of NH_3 contaminated waste air treatment system by photocatalytic.



Figure 2. Experimental glass column containing fiberglass coated with catalyst.

The NH_3 contaminated air stream was simulated for the test by passing air flow from air compressor through a NH_3 reservoir. The 25% w/w NH_3 solution was filled in the reservoir to pick up vaporized NH_3 gas and moisture to mix with the air stream at room temperature (28-29°C). The mixing stream was flowed through the NH_3 mixing tank for continuously and steady flow to the photocatalytic reactor. The concentrations of gaseous mixture (air and ammonia) were determined by titration.

2.4 Ammonia removal efficiency evaluation

Titration was used to determine NH_3 concentration. The NH_3 gaseous mixture was bubbled through a 25 ml cold boric acid solution for 2 min. Following by the addition of mix indicator (1% bromocresol green and methyl red) solution. It is then titrated by hydrochloric acid until it is green [2]. After the NH_3 removal efficiency (% *eff*) was calculated by equation (1) through concentration of NH_3 in inlet and outlet stream.

$$\% NH_3 \text{ eff} = \frac{c_i - c_f}{c_i} \times 100 \quad (1)$$

where $\% NH_3 \text{ eff}$ is a percentage of the NH_3 removal efficiency, c_i and c_f were the NH_3 concentration in water at initial and final point of photocatalytic reactor, respectively. Unit of the NH_3 concentration is part per million (ppm).

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Effect of catalyst type on NH_3 Treatment in wastewater

Figure 3. shows performance of photocatalysts on the NH_3 treatment efficiency at each operating time by using new catalysts in batch scale photoreactor. The experiments were performed using three types of catalyst: TiO_2 , SiO_2 and TiO_2 with SiO_2 . Simulated wastewaters with NH_3 concentration of 100 ppm were constantly used. The result shows that the NH_3 treatment efficiency was increased by increasing in irradiation time for all kind of catalysts. The NH_3 treatment efficiency in wastewater was 100% at 80 minutes the irradiation time.

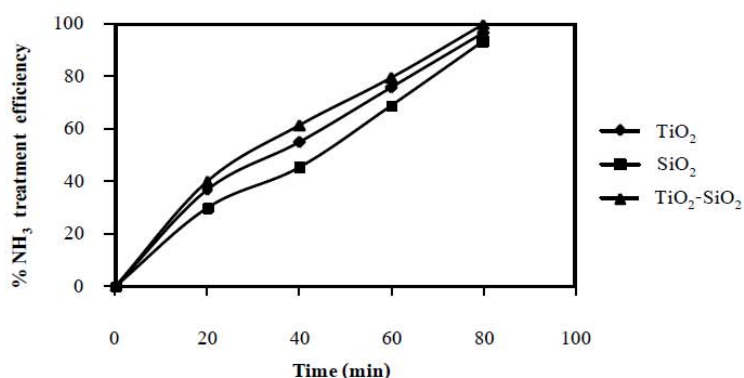


Figure 3. NH_3 treatment efficiency in wastewater at various times using new catalysts.

Performance of photocatalysts on the NH_3 treatment efficiency by after 3 times catalysts using in batch scale photoreactor as shown in *Figure 4.* The result shows that the TiO_2 with SiO_2 catalyst type can be used for the NH_3 treatment in wastewater with 70% efficiency at the irradiation time of 80 minutes that was better than TiO_2 and SiO_2 catalyst type. Because the doped SiO_2 in TiO_2 increased acidity that can induce to the increasing in hydroxyl content in the composite film. The 3rd using of TiO_2-SiO_2 results that the removal efficiencies is lower than 1st using about 30%. Because the catalyst was treated the ammonia by absorption which does not remove the ammonia at the first time using. On the other hand, the second and third time using of catalyst can be confirmed the ammonia removal with the ammonia removal efficiency in the same way. The NH_3 treatment efficiency with SiO_2 catalyst was similarly to the using of TiO_2 catalyst because they have the same properties as a semiconductor.

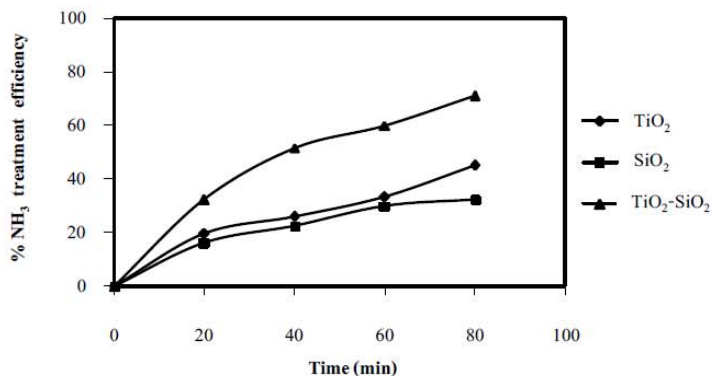


Figure 4. NH₃ treatment efficiency at 100 ppm concentration wastewater.

3.2 Result of NH₃ treatment in waste air

From the experiment, the sufficient amount of catalyst was coated on the fiber glass as the media then it was used for ammonia treatment via the photocatalytic reaction. The coated fiber glass was laid down at the proper position in reactor to radiate the light through the catalyst film. The most important thing for the photocatalytic reaction is capability of light that penetrate through fiber glass. Therefore the media type for catalyst coating is necessary for the photocatalytic reaction. The efficiency of coated fiber glass was shown in Figure 5.

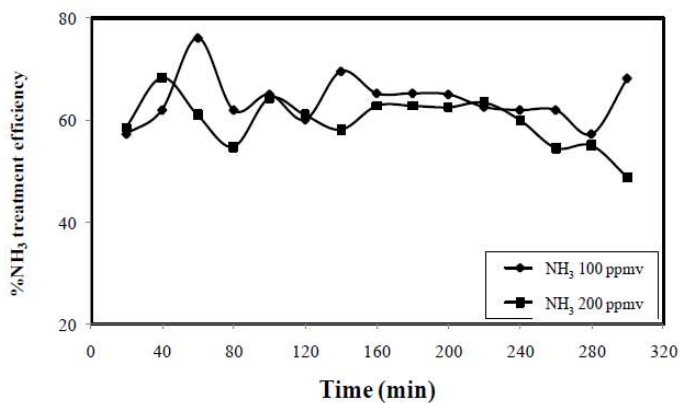


Figure 5. Effect of time on the ammonia treatment efficiency using 1 L/min flow rate of mixture gas.

The ammonia treatment efficiency in waste air by the photocatalytic reaction was stable when it was operated at 100 and 200 ppm ammonia concentration for 5 hours. The NH₃ treatment was achieved to 60% efficiency. The TiO₂ and SiO₂ can be regenerated by UV light after it was used for ammonia treatment.

3.2.1 Characterization of the TiO_2 catalysts

Sample of TiO_2 catalysts from the calcining process of $500\text{ }^\circ\text{C}$ for 2 h was used to coating on the fiberglass surfaces. Figure 6. presents the SEM of TiO_2 coated fiberglass surface. This photograph can be ensured that TiO_2 can be coated on fiberglass.

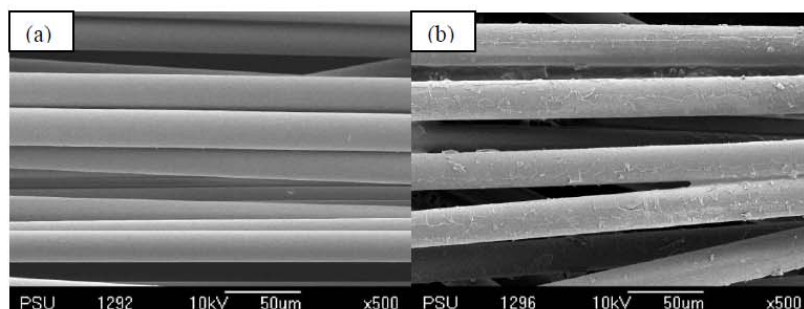


Figure 6. SEM photograph (500 x) of TiO_2 uncoated surface (a) and TiO_2 coated on fiberglass(b).

4. CONCLUSION

The TiO_2 - SiO_2 catalyst was effectively prepared by sol-gel method and dip coating for using in photocatalytic reactor. The ammonia treatment was performed for both wastewater and waste air. The batch system was used for the wastewater treatment by the photocatalyst powder. The ammonia treatment in wastewater was found 100% efficiency at 80 minutes irradiation time. The continuous system was used for the waste air treatment by the coated fiberglass as catalyst. The optimum conditions for NH_3 treatment in waste air by PCR reaction at NH_3 concentration of 100-200 ppm was 1 l/min air flow rate and 32 W with four UV lamps. The ammonia removal efficiency from optimum condition was approximately about 60%.

5. ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are grateful to the National Research University provided the funding for this research. The authors also thank the Department of chemical Engineering, Faculty of Engineering, and Graduated school of prince of Songkla University for their support.

REFERENCES

- [1] S. Yamazoe, T. Okumura, T. Tanaka, Photo-oxidation of NH_3 over various TiO_2 , *Catalysis Today* 120 (2007) 220–225.
- [2] C.C. Rodrigues, D. Moraes, W. No'brega, M.G. Barboza, Ammonia adsorption in a fixed bed of activated carbon, *Bioresource Technology* 98 (2007) 886–891.
- [3] M.S. Vohra, S.M. Selimuzzaman, M.S. Al-Suwaiyan, NH_4^+ - NH_3 removal from simulated wastewater using UV- TiO_2 photocatalysis: effect of co-pollutants and pH, *Environmental Technology* (2010) 641–654.
- [4] L. Sikong, K. Kooptarnond, S. Niyomwas, J. Damchan, Photoactivity and hydrophilic property of SiO_2 and SnO_2 co-doped TiO_2 nano-composite thin films, *Songklanakarin J. Sci. Technol.* (2010) 413-418.
- [5] S. Vives, C. Meunier, Mixed SiO_2 - TiO_2 (1:1) sol-gel films on mild steel substrates: Sol composition and thermal treatment effects, *Surface & Coatings Technology* 202 (2008) 2374–2378.

- [6] P. Novotna , J. Krysa, J. Maixner, P. Kluson, P. Novak, Photocatalytic activity of sol-gel TiO₂ thin films deposited on soda lime glass and soda lime glass precoated with a SiO₂ layer, *Surface & Coatings Technology* (2010) 2570–2575.



The 10th International PSU Engineering Conference (IPEC-10)

May 14 - 15, 2012



Faculty of Engineering
Prince of Songkla University
<http://www.ipec10.eng.psu.ac.th>



Removal of NH₃ in waste air using coated TiO₂ Photocatalyst in continuous photo-reactor

Prukraya Pongyeela¹ Lek Sikong² and Juntima Chungsiriporn^{1*}
Department of Chemical Engineering¹, Department of Mining and Materials Engineering²,
Faculty of Engineering, Prince of Songkla University,
Hat Yai, Songkhla 90112
E-mail: juntima.c@psu.ac.th *

Abstract

The treatment of NH₃ contaminated in waste air was studied using photocatalytic reactor. The TiO₂ photocatalyst was prepared by dissolved TiO₂ powder in ethanol and coated on glass tube medium. The thin films TiO₂ coated media was packed in continuous flow treatment system with UV light irradiation. The NH₃ treatment efficiency in continuous mode of fixed bed column were studied on the number of UV light (1-5 lamps), the catalyst packed column (1-5 column), and waste air flow rate (1-5 l/min). The NH₃ concentration of waste air used in the photocatalytic reactor was constantly controlled at 300 ppmv. The results illustrated that all parameters play an important role in the treatment of NH₃. The NH₃ treatment efficiency of the photocatalytic system was increased with increasing in the TiO₂ loading and number of lamp and decreasing flow rates. The gas retention time depends on waste air flow rate and photo-reactor volume by inversely proportional to the gas flow rate and direct variation to photo-reactor volume. These results can be applied as guidance in the NH₃ treatment in industrial scale.

Keywords: NH₃, Titanium dioxide, Photocatalytic, UV light, Photoreactor

1. Introduction

Ammonia is an odorous and toxic gas produced from several sources including wastewater treatment plants, composting plants, chemical and manufacturing industries, and livestock farm. The chemical processes have used ammonia gas as reactant in large quantities and high concentrations. These lead to ammonia contamination in both water and air that threaten to human health, animals, vegetation, and environment. The ammonia is regulated based on both unpleasant odor and health-related concerns [1]. To control malodor and protect the health of people working in animal farms and the industries that use ammonia, waste gases containing ammonia are required to be treated in an efficient and viable process.

There are many technologies that were used for the ammonia in waste air treatment, such as catalytic

oxidation, biological filtration, liquid absorption, and solid adsorption [2]. Photocatalytic oxidation of ammonia to nitrogen is a potentially available method in order to reduce the ammonia pollution proceeds at room temperature and atmospheric pressure. Photocatalytic system consists of catalyst with photo-active properties and light source in the wavelength range of UV light. Titanium dioxide (TiO₂) has been used as a catalyst for the UV induced photocatalysis of pollutants. Almost any organic pollutants and many of the inorganic pollutants produced by agricultural, textile, petrochemical, metallurgical, and many other industries can be completely destroyed or separated. Anatase TiO₂ nanoparticles has shown higher photocatalytic activity than rutile TiO₂. Glass is an interesting medium for using as a supporter of TiO₂ catalytic species since it is economical and corrosion resistant. TiO₂ can effectively be coated on the glass by dip coating method [3].

The aim of this research was to study the effect of operating parameters on photocatalytic reactor using TiO₂ photocatalyst for the treatment of NH₃ in waste air. The catalyst was coated on cylindrical glass and packed in the continuous down flow fixed-bed column system with UV light irradiation. The controlled parameters of NH₃ treatment system by photocatalytic reactor consisting of number of UV lamps (1-5 lamps), number of catalytic column (1-5 column) and waste air flow rate (1-5 l/min) were evaluated on NH₃ treatment efficiency.

2. Materials and methods

2.1 Reagents and chemicals

Titanium dioxide (TiO₂) nanocrystallites powder (AR grade, Carlo Erba, Milano, Italy), was characterized as anatase phase (white color). Ethanol (95%; Commercial) was used as solvent. UV lamps (8W, F20T12-BLB, USA) with a wavelength of 345-400 nm were a light source for photocatalytic performing in this work.

2.2 Catalyst preparation

Catalyst was prepared by dissolving 6 g of TiO₂ powder in 150 ml of ethanol. After vigorously stirring

for 2 h at room temperature, polyethylene glycol (PEG) was added to the solutions and served as precursor solutions for binder. Hydrolysis reaction occurred during stirring to achieve TiO₂ sol. Glass tubes (8 mm diameter and 2 cm height) were used as the medium for TiO₂ thin film coating. The TiO₂ film was formed on the medium by dip coating method using the precursor solutions at ambient atmosphere. Then it was dried at 100°C for 1 h and calcined at 600°C for 2 h. It performed in air flowing and cooled down at a rate of 10°C/min to complete the step and get TiO₂ catalyst media. The TiO₂ powder and coated glass tubes were shown in Figure 1.

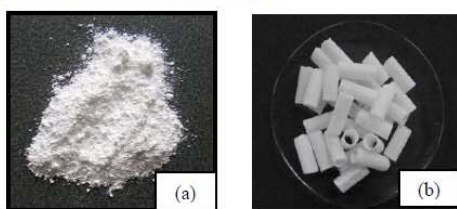


Figure 1. TiO₂ powder (a) and TiO₂ on glass tubes catalysts (b).

2.3 Photocatalytic reactor

The glass column with 5 cm internal diameter and 32 cm column height was used for photocatalytic reactor. The TiO₂ catalyst on glass tube medium was packed in the glass columns as shown in Figure 2. The columns were installed and used for NH₃ contaminated waste air treatment in the photocatalytic system. (220 g of catalyst per column)

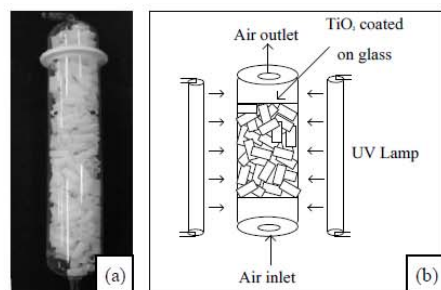


Figure 2. Glass column of photocatalytic reactor with packing media (a) and diagram of the column (b).

2.4 Photocatalytic Experimental set up

The photocatalytic system with TiO₂ on glass medium was set up by laboratory scale. Continuous down flow fixed-bed glass columns were installed in stainless steel chamber. UV lights of 1 to 5 lamps were vertically fixed inside of the chamber wall. The UV lamps were chosen at 345-400 nm of wavelength (power consumption of 8 W per lamp). The air stream was flowed through the reactor chamber to reduce the system temperature. The diagram of NH₃

contaminated waste air and photocatalytic system are demonstrated in Figure 3.

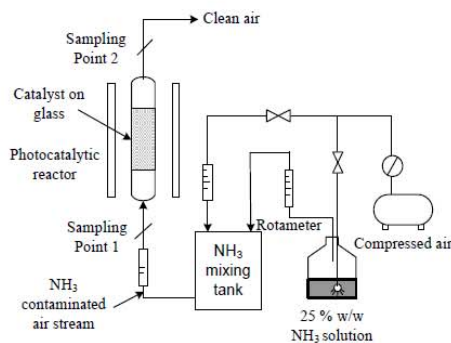


Figure 3. Schematic diagram of NH₃ contaminated waste air treatment system by photocatalytic reactor.

The NH₃ contaminated air stream was generated for NH₃ treatment testing by photocatalytic system. Air flow from air compressor was passed through a NH₃ reservoir (25% w/w) to pick up vaporized NH₃ gas and moisture at room temperature (28-29°C). The mixed stream was continuously flowed through the NH₃ mixing tank and steady flow to the photocatalytic reactor. The waste air contaminated with NH₃ at concentration of 300 ppmv was constantly used to investigate for the system capacity.

2.4.1 Operating parameters

Operating parameters of the photocatalytic system consisting of number of UV light (1-5 lamps), the catalyst packed column (1-5 column), and waste air flow rate (1-5 l/min) were varied and controlled. In the experiments, air samples from inlet and outlet streams of the photocatalytic reactor columns were taken by air sampling pump and absorbed in boric acid bottle for 3 min and waste air flow rate of 0.54 l/min. The air samples were taken to measure for the concentration every 15 min until 2 h. The NH₃ concentration of gaseous mixture was tested and measured by titration method [4].

2.4.2 Evaluation of the result

The NH₃ treatment efficiency (% *eff*) by the photocatalytic performing was recorded and calculated by equation (1) through concentration of NH₃ in inlet and outlet stream.

$$\%eff = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \times 100 \quad (1)$$

Where % *eff* is a percentage of the NH₃ treatment efficiency. C_{in} and C_{out} were the NH₃ concentration in waste air at inlet and outlet point of photocatalytic reactor, respectively. Unit of the NH₃ concentration is part per by volume (ppmv).

3. Results and discussion

3.1 Stability of TiO₂ catalyst on NH₃ Treatment

TiO₂ photocatalyst were used for treatment of NH₃ in contaminated waste air at NH₃ concentration of 300 ppmv. The TiO₂ catalyst was in the form of thin film coated on the glass tube and packed in the glass column. The stability of catalyst on NH₃ treatment using photocatalytic reactor was investigated by plotting between %NH₃ treatment efficiency and irradiation time shown in Figure 4. Experimental condition of 3 l/min waste air flow rate and 3 catalytic columns were performed by repeating for 3 times at the same environment. Efficiencies of the NH₃ treatment were monitored for consistency of the system every 15 minutes for 2 hours.

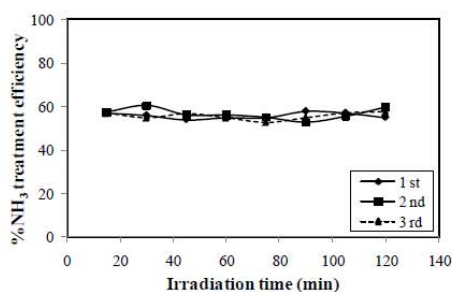


Figure 4. NH₃ in waste air treatment efficiency versus irradiation time using continuous TiO₂ photo-reactor.

The results showed that the TiO₂ coated catalyst can effectively performed for NH₃ treatment with constant efficiency along operating time of 2 hours. After three repeating operations, the similar performance with 60% efficiency was found. It indicates for stability of the TiO₂ coated catalysts packed in the photo-reactor column. That is because the catalysts can be regenerated with high activity by the UV light after reacted with NH₃ in wasted air.

3.1.1 Effects of UV light irradiation

The 1-5 UV lights were vertically fixed inside the stainless chamber around the photo-reactor column. The effect of UV light irradiation on photocatalytic performing was studied by varying the number of UV lamps that can implies for intensity of the light source. The UV light intensity was an important parameter for NH₃ treatment using TiO₂ photocatalyst in the photo-reactor. The curve of NH₃ treatment efficiency versus irradiation time was manifested in Figure 5.

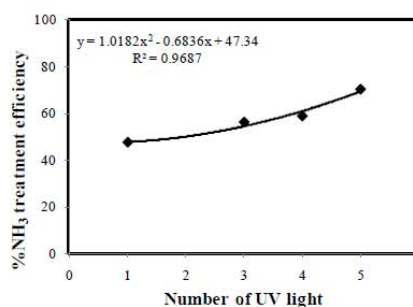


Figure 5. Effect of UV light irradiation on NH₃ treatment from waste air by continuous photocatalytic reactor.

The results indicated that the increasing in the irradiation intensity by increasing the number of UV lamps enhanced the NH₃ treatment efficiency. Light intensity is a major factor in photocatalytic reactions, because electron-hole pairs can be produced by light energy [5]. There were more photons per unit time and unit area at higher light intensity. Thus the chances of photon activation on photocatalyst surface was also increased. Therefore, 5 lamps was the strongest effect to the treatment of NH₃ in waste air. In case of turn off the UV light irradiation the treatment of NH₃ in the waste air was not occurred with 0% treatment efficiency.

3.1.2 Effects of photo-reactor column

The coated TiO₂ catalyst media was prepared and loaded in the photo-reactor column for the treatment of NH₃ in waste air. The amount of catalyst according of number of column using was a parameter for the NH₃ treatment testing. In this experimental part, 3 l/min the waste air flow rate, 3 lamps of UV light, and the 300 ppmv NH₃ concentration was constantly controlled. The photocatalytic treatment of NH₃ was monitored by varying for the number of columns (1-5 columns) with irradiation time as shown in Figure 6.

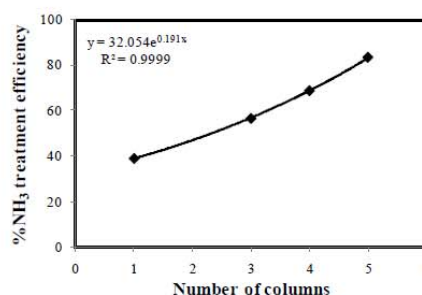


Figure 6. Effect of NH₃ treatment by photocatalytic reactor with varies column.

The increasing in the number of column means the higher quantity of TiO_2 photocatalyst particles loaded in the system. Using more columns as photo-reactor has effected to higher efficiency of NH_3 removal from waste air. The TiO_2 photocatalyst has various number of active sites on the surface and leaded to $\cdot\text{OH}$ generation. The increasing in the amount of active sites according to increasing the TiO_2 photocatalyst loading has consequently leaded to enhance the production of $\cdot\text{OH}$ radicals [6]. Increasing the number of photo-reactor column to 5 columns can increase the efficiency of NH_3 removal from waste air up to 83%.

3.1.3 Effects of waste air flow rate

The effect of waste air flow rate on the NH_3 treatment efficiency was studied using 3 lamps of black light lamp and 3 photo-reactor columns. The effect of waste air flow rate on NH_3 treatment efficiency at 300 ppmv of NH_3 concentration was manifested in Figure 7.

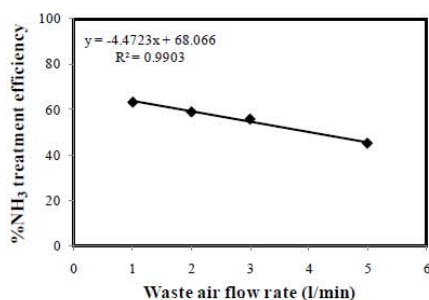


Figure 7. Effect of waste air flow rate on NH_3 treatment efficiency (%) by the TiO_2 photocatalytic system.

The result demonstrated that NH_3 treatment efficiency was decreased when waste air flow rate was increased from 1 to 5 l/min. At 1 l/min waste air flow rate provides the maximum NH_3 treatment efficiency. In consequence of higher waste air flow rate, the contact time between NH_3 in waste air and catalyst surface was reduced. The reaction time between NH_3 in waste air and catalyst was very fast thus the system provided very low treatment efficiency.

3.2 Effects of retention time on NH_3 treatment

Retention time of the gas stream in the continuous photo-reactor of this work depended largely on waste air flow rate and number of columns (photo-reactor volume). Retention time has an important role in scale-up of photocatalytic reactor to actual use in industries. The effects of retention time according to waste air flow rate and photo-reactor volume were studied by introducing 300 ppmv concentration of NH_3 in waste air to the system as shown in Figure 8.

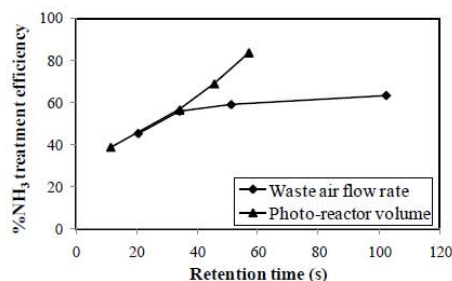


Figure 8. Effect of gas retention time on NH_3 treatment efficiency in the photocatalytic reactor.

Retention time = V/Q : V (l) is the volume of the photo-reactor; Q (l/s) is the gas flow rate; V/Q (s) is the gas retention time of the photoreactor. The result demonstrated that the treatment efficiency of the TiO_2 photocatalyst in photo-reactor decreased significantly with decreasing retention time. Increasing in volume of the photo-reactor has increased the amount of TiO_2 catalyst containing in the system. Then the increasing in retention time according to the photo-reactor volume has more effected to the NH_3 removal efficiency. Treatment efficiency of 83% was achieved when increased the retention time by increasing the volume of photo-reactor at 60 sec. However, the gas retention time has inversely proportional to the gas flow rate. At lower gas flow rate could longer the gas retention time and increase the NH_3 removal efficiency of the photocatalytic system.

4. Conclusions

The removal of NH_3 in waste air using coated TiO_2 photocatalyst in continuous photo-reactor was investigated. The TiO_2 photocatalyst was effectively synthesized and stable for the treatment of NH_3 . The influences of the number of UV light, photo-reactor column, and waste air flow rate in NH_3 treatment were measured. The treatment of NH_3 using the photocatalyst was found to be significantly affected by all parameters. The NH_3 treatment efficiency was increasing up to 80% at 3 lamps UV light irradiation, 5 photo-reactor columns, and 3 l/min waste air flow rate at 300 ppmv of NH_3 concentration. The results of this study would be used as a guide for the further design and operation of industrial-scale systems.

Acknowledgments

The authors are grateful to the National Research University provided the funding for this research. The authors also thank the Department of chemical Engineering, Faculty of Engineering, and Graduated school of Prince of Songkla University for their support.

References

- [1] Sakuma, T., Jinsiriwanit, S., Hattori, T. and Deshusses M. 2008. Removal of ammonia from contaminated air in a biotrickling filter. Denitrifying bioreactor combination system. *Water research*, Vol. 42, pp. 4507–4513.
- [2] Guo, X.J., Tak, J.K. and Johnson, R.L. 2009. Ammonia removal from air stream and biogas by a H₂SO₄ impregnated adsorbent originating from waste wood-shavings and biosolids. *J Hazard Mater*, Vol. 15.
- [3] Ergün, O., Karslıoğlu, O., Yılmaz, A. and Uner, D. 2007. Preparation and Characterization of Ordered TiO₂ Photocatalysts: Films and Mesoporous Structures. *Turk J Chem*, Vol. 31, pp. 501–508.
- [4] C. C. Rodrigues, D. Moraes, S. W. Nóbrega, and M. G. Bardoza, Ammonia adsorption in a fixed bed of activated carbon. *Bioresource Technology*, 2007. Vol. 98, pp. 886-891.
- [5] Li, Y., Sun, S., Ma, M., Ouyang, Y. and Yan, W. 2008. Kinetic study and model of the photocatalytic degradation of rhodamine B (RhB) by a TiO₂-coated activated carbon catalyst: Effects of initial RhB content, light intensity and TiO₂ content in the catalyst. *Chemical Engineering Journal*, Vol. 142, pp. 147–155.
- [6] Abdollahi, Y., Abdullah, A., Zainal, Z. and Yusof, N. 2012. Photocatalytic Degradation of *p*-Cresol by Zinc Oxide under UV Irradiation. *International Journal of Molecular Sciences*, Vol. 13, pp. 302-315.

