



รายงานการวิจัย

การศึกษาประสิทธิภาพของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์เพื่อการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อน
สารไตรไนโตรโทลูอิน

(The efficiency of Nanoscale Zinc Oxide (nZnO) for remediation of
Trinitrotoluene (TNT)-contaminated water)



ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การศึกษาประสิทธิภาพของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์เพื่อการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อน
สารไตรไนโตรโทลูอิน

(The efficiency of Nanoscale Zinc Oxide (nZnO) for remediation of
Trinitrotoluene (TNT)-contaminated water)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

อาจารย์ ดร.ราเชนทร์ โกศลวิตร

สาขาวิชากายวิภาคศาสตร์

สำนักวิชาวิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ร่วมวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วราภรณ์ เขียมจิตรพานิช

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2555

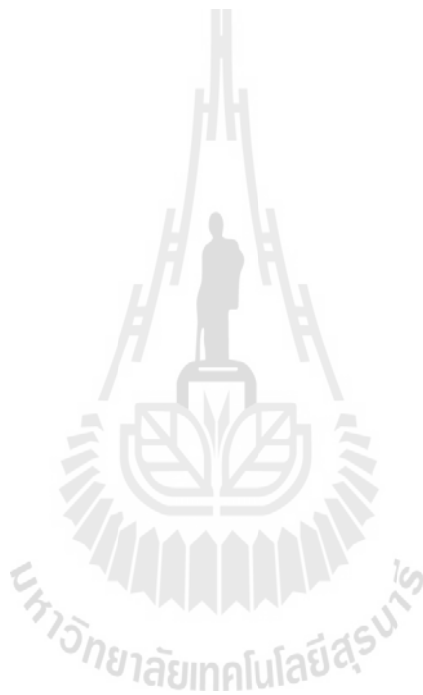
ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กรกฎาคม 2556

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงได้ ต้องขอขอบคุณทุกคนที่เกี่ยวข้อง และหน่วยงานต่างๆ ที่ให้การสนับสนุน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โปรแกรมวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา และ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTECH) ในการใช้เป็นสถานที่ทำวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2555



บทคัดย่อ

การศึกษาประสิทธิภาพของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ เพื่อการบำบัดน้ำปนเปื้อนสารไตรโนโตรโทลูอิน โดยการใช้บำบัดน้ำปนเปื้อนสารไตรโนโตรโทลูอินที่เกิดจากการสังเคราะห์ นำมาบำบัดและทำปฏิกิริยาดำยอนุภาคของนาโนซิงค์ออกไซด์ (nZnO) เพื่อศึกษาปริมาณที่เหมาะสม (Optimum dosages) ในการทำปฏิกิริยา ศึกษาการแปรผันระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา เพื่อกำหนดอัตราการย่อยสลาย และอัตราการการกำจัดเคลื่อนที่ (Kinetic Removal Rate) รวมทั้งศึกษาความสามารถของแสงแดดในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ในการย่อยสลายสารไตรโนโตรโทลูอิน อนุภาคนาโนของนาโนซิงค์ออกไซด์ที่นำมาใช้มีขนาดเล็กกว่า 100 นาโนเมตร ขนาดและรูปร่างของอนุภาคมีความหลากหลาย แต่โดยส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 40-80 นาโนเมตร บางครั้งรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนที่มีขนาดต่างๆ กัน อาจมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางมากกว่า 10 ไมครอนผลการวัดพื้นที่ผิวของอนุภาคนาโนของนาโนซิงค์ออกไซด์พบว่ามีความเฉลี่ย $9.56 \pm 0.04 \text{ m}^2/\text{g}$ และมีความบริสุทธิ์ถึง 99.98 % การศึกษาคำเนินการโดยเติมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ (1,000, 2,000 และ 3,000 ppm) ลงในน้ำปนเปื้อนสารไตรโนโตรโทลูอิน (10 mg/L) หลังจากนั้นวัดปริมาณสารไตรโนโตรโทลูอินที่เหลือ ผลจากทดลองพบว่าประสิทธิภาพของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ในการทำปฏิกิริยากับสารไตรโนโตรโทลูอินที่ปนเปื้อนในน้ำ ไม่สูงมาก และที่ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ 2,000 ppm และ 3,000 ppm มีค่า Removal efficiency ใกล้เคียงกัน (29.20 % และ 29.43 % ตามลำดับ)จากผลการศึกษา Optimum time and Removal efficiency (%) พบว่า ประสิทธิภาพของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ในการทำปฏิกิริยากับสารไตรโนโตรโทลูอินที่ปนเปื้อนในน้ำ แปรผันกับเวลา (10, 20 และ 30 นาที) ในการทำปฏิกิริยา โดยมี Removal efficiency สูงสุดที่ระยะเวลา 30 นาที ที่ 34.35 % เมื่อเปรียบเทียบค่าความสามารถในการกำจัดของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ ภายใต้สภาวะมีแสงแดดเป็นตัวกระตุ้น พร้อมทั้งมีการวัดความเข้มแสง ค่า pH และอุณหภูมิอากาศ ผลการการศึกษา Photocatalytic exposure time and Removal efficiency (%) พบว่า ประสิทธิภาพของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ในการทำปฏิกิริยากับสารไตรโนโตรโทลูอินที่ปนเปื้อนในน้ำ ขึ้นอยู่กับช่วงเวลาในการทำปฏิกิริยา (เช้า, บ่าย และ เย็น) โดยมี Removal efficiency สูงสุดที่ช่วงบ่าย ที่ 71.93 % ในขณะที่ช่วงเช้า และเย็น พบว่ามีค่า Removal efficiency ใกล้เคียงกัน คือ 52.12 % และ 50.99 % ตามลำดับ จากการศึกษาในครั้งนี้สรุปได้ว่าการใช้อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ในการทำปฏิกิริยากับสารไตรโนโตรโทลูอินที่ปนเปื้อนในน้ำอาจมีประสิทธิภาพไม่สูงมาก แต่หากใช้แสงแดดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Photocatalyst) ในการทำปฏิกิริยาสามารถเพิ่ม Removal efficiency ได้

Abstract

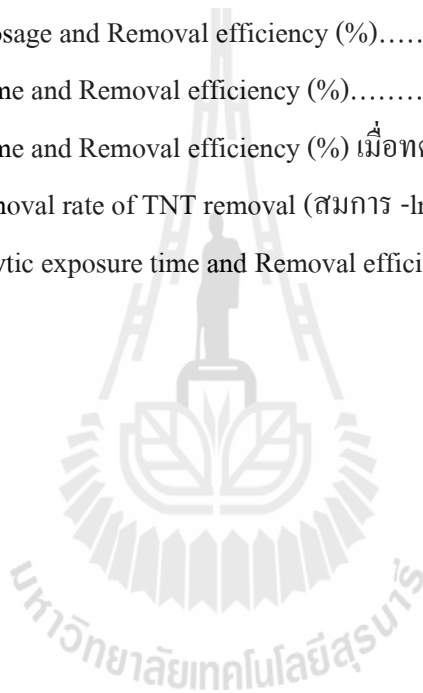
The removal efficiency of Nanoscale Zinc Oxide (nZnO) for remediation of trinitrotoluene (TNT)-contaminated water was studied. These were to determine the optimal dosages of nZnO, removal efficiency or degradation rate, kinetic removal rates and photocatalytic effects on remediation TNT-contaminated water by nZnO. The particle size of nZnO was found between 40-80 nm. Generally, the particles were packed into larger clumping up to 10 μm or more in diameter. The mean surface area of this particle was $9.56 \pm 0.04 \text{ m}^2/\text{g}$ with the purity of 99.98%. The varying concentrations of nZnO were used at 1,000, 2,000 and 3,000 ppm for remediation of TNT-contaminated water with the concentration of 10 mg/L. The results were found that the removal efficiency were similar at 2,000 and 3,000 ppm of nZnO concentrations (29.20 % and 29.43 %, respectively). With regard to the optimal times and removal efficiency, the times were varied at 10, 20 and 30 minutes. The nZnO with the concentration of 2,000 ppm was added to TNT-contaminated water and the mixture was left for required periods of time. It showed that the removal efficiency was increased with times. However, the highest efficiency was found only 34.35 % with the time point of 30 minutes. The photocatalytic effect on remediation of nZnO for TNT-contaminated water was carried out by exposing the mixture of nZnO and TNT-contaminated water to the sun light at three different periods of time (morning, afternoon and evening) for 30 minutes. The light intensity pH and air temperature were also observed and monitored. The results demonstrated that the highest removal efficiency was found at 71.93 % in the afternoon meanwhile those in the morning and evening were 52.12 % and 50.99 % respectively. This study concluded that the remediation of TNT-contaminated water by nZnO can be enhanced under exposure to the sun light as a photocatalyst.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	จ
สารบัญภาพ	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	ช
บทที่ 1 บทนำ	
ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	5
ขอบเขตของการวิจัย	5
ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	5
บทที่ 2 วิธีดำเนินการวิจัย	
เครื่องมือและอุปกรณ์.....	7
สารเคมี.....	7
วิธีดำเนินการวิจัย และวิธีวิเคราะห์ข้อมูล.....	7
บทที่ 3 ผลการวิจัย	
การศึกษาคุณลักษณะและคุณสมบัติของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์.....	10
การศึกษาประสิทธิภาพของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ต่อการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อน สารไตรโนโตรโทลูอิน.....	13
บทที่ 4 บทสรุป	
สรุปผลการวิจัย	21
ข้อเสนอแนะ	22
บรรณานุกรม	23
ประวัติผู้วิจัย	26

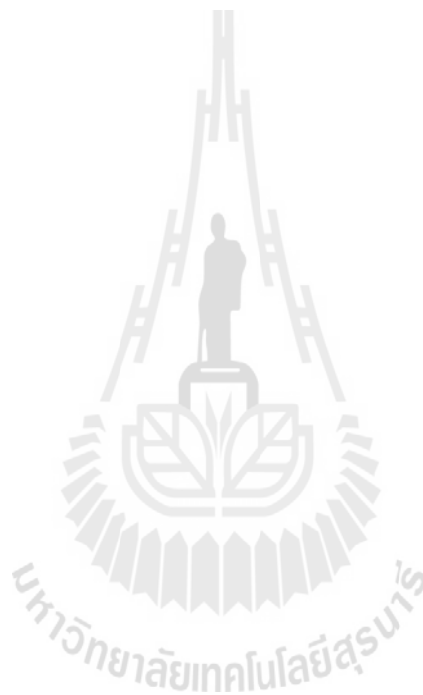
สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 สูตร โครงสร้างของไตรโนโตรโทลูอิน (ทีเอ็นที)	2
ภาพที่ 2 กระบวนการผลิตสารไตรโนโตรโทลูอิน (ทีเอ็นที)	3
ภาพที่ 3 ปฏิกิริยาเคมีในการผลิตสารไตรโนโตรโทลูอิน	3
ภาพที่ 4 การเปลี่ยนรูปสารของสารไตรโนโตรโทลูอิน (ทีเอ็นที) ในสิ่งแวดล้อม.....	4
ภาพที่ 5 ลักษณะรูปร่างและขนาดอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยเครื่อง SEM	11
ภาพที่ 6 ลักษณะรูปร่างและขนาดอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยเครื่อง TEM	13
ภาพที่ 7 แผนภูมิ ของ Optimum dosage and Removal efficiency (%).....	15
ภาพที่ 8 แผนภูมิ ของ Optimum time and Removal efficiency (%).....	17
ภาพที่ 9 แผนภูมิ ของ Optimum time and Removal efficiency (%) เมื่อทดสอบ Linearity.....	18
ภาพที่ 10 แผนภูมิ ของ Kinetic removal rate of TNT removal (สมการ $-\ln(C_e/C_0)=kT$)	19
ภาพที่ 11 แผนภูมิ ของ Photocatalytic exposure time and Removal efficiency (%).....	20



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 แสดงผลของ Optimum dosage and Removal efficiency (%)	13
ตารางที่ 2 แสดงผลของ Optimum time and Removal efficiency (%).....	15
ตารางที่ 3 แสดงผลของ Kinetic removal rate of TNT removal	18
ตารางที่ 4 แสดงผลของ Photocatalytic exposure time and Removal efficiency (%).....	19



คำอธิบายสัญลักษณ์

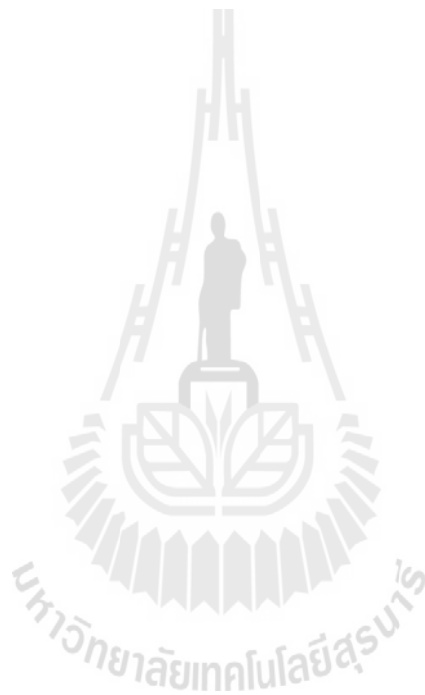
TNT = Trinitrotoluene

nZnO = Nano Zinc Oxide

TEM = Transmission Electron Microscopy

SEM = Scanning Electron Microscopy

ppm = Part Per Million



บทที่ 1

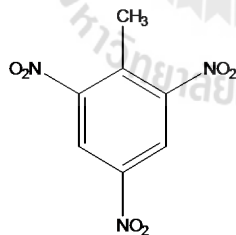
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

สารเคมีอันตราย ถูกนำมาใช้เพื่อกิจกรรมต่างๆ มากมายทั้งในภาคอุตสาหกรรมและเกษตรกรรม สารเคมีอันตรายเหล่านี้ปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมทั้งในแหล่งน้ำ และดินถือเป็นปัญหาทางสิ่งแวดล้อมซึ่งทั่วโลกตระหนักและให้ความสำคัญรวมทั้งประเทศไทยซึ่งมีการปนเปื้อนของสารอันตรายหลายชนิด อาทิเช่น สารเคมีป้องกันกำจัดศัตรูพืช (pesticide) ของเสียจากขบวนการปิโตรเคมี สารเคมีจากอุตสาหกรรม สารเคมีที่ใช้ในหน่วยงานทหาร เป็นต้น เนื่องจากปัญหานี้ส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของประชาชน เศรษฐกิจ สังคม และทรัพยากรธรรมชาติ ทั้งโดยตรงและโดยอ้อม ไตรไนโตรโทลูอิน (Trinitrotoluene) หรือ ทีเอ็นที (TNT) เป็นหนึ่งในวัตถุระเบิดที่ใช้บ่อยในการใช้ทหารและอุตสาหกรรม (Kraus et al., 1985) ทีเอ็นทีเป็นสารอันตรายในกลุ่มของสารพิษ (Levine et al., 1990a; U.S.DHHS. 1995; U.S.EPA. 1991) นอกจากนี้ U.S.EPA ได้กำหนดให้สารทีเอ็นทีเป็นสารที่น่าก่อเกิดมะเร็งในมนุษย์อีกด้วย (Levine et al., 1990; U.S.DHHS. 1995; U.S.EPA. 1991) ทีเอ็นทีปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำ (Freeman and Colitti, 1982) และปนเปื้อนสู่พื้นดิน (Pennington and Patrick, 1990) จากโรงงานผลิตวัตถุระเบิด หน่วยงานทหารการซ้อมรบ (Kraus et al., 1985) และการสงคราม น้ำ และดินปนเปื้อนสารทีเอ็นทีที่มีความเสี่ยงต่อสุขภาพของประชาชน ผู้ได้รับสัมผัส (Pennington and Patrick, 1990) และอีกทั้งมีพิษต่อสิ่งมีชีวิตอื่นๆ ทั้งสัตว์น้ำและสัตว์บก รวมทั้งมีพิษต่อพืชเช่นกัน(8)ประชาชนที่สัมผัสสารทีเอ็นทีเป็นระยะเวลานานมักจะพบการก่อเกิดโรค โลหิตจาง และมีผลทำให้การทำงานของตับผิดปกติ (Levine et al., 1990a; U.S.DHHS. 1995; U.S.EPA. 1991) การบำบัดสารไตรไนโตรโทลูอินที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมนั้น สามารถทำได้หลายวิธี (Freeman and Colitti, 1982; Hundal et al., 1997; Masciangioli and Zhang, 2003) การเผาทำลายในเตาเผา (Incineration) เป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย การกำจัดหรือบำบัดการปนเปื้อนของสารทีเอ็นทีด้วยวิธีการเผานั้นมีราคาแพงมากและยังก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางอากาศและเสียงนอกจากนี้เทคโนโลยีชีวภาพซึ่งเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในการบำบัดการปนเปื้อนของสารทีเอ็นทีในสิ่งแวดล้อมได้เช่นกัน (Adamia et al., 2006). แม้ว่าเทคโนโลยีชีวภาพจะเป็นเทคโนโลยีที่มีต้นทุนต่ำแต่อย่างไรก็ตามการใช้เทคโนโลยีชีวภาพ เป็นวิธีการที่มักจะเห็นผลสัมฤทธิ์ช้า (Freeman and Colitti, 1982; Hundal et al., 1997; Masciangioli and Zhang, 2003) นาโนเทคโนโลยีเป็นเทคโนโลยีที่ได้รับความสนใจสำหรับการศึกษาในปัจจุบัน (Masciangioli and Zhang, 2003) ไม่ว่าจะเป็นในด้านวิทยาศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์ และในเชิงอุตสาหกรรมเช่นกัน นาโนเทคโนโลยีเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ถูกนำมาใช้เพื่อให้เห็นผลสัมฤทธิ์ในเวลาเร็วกว่าเทคโนโลยีชีวภาพ นาโนเทคโนโลยีคือเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการจัดการ การสร้าง หรือการวิเคราะห์ วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องจักรหรือผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดเล็กมาก ๆ ในระดับนาโนเมตร (ประมาณ 1-100 นาโนเมตร) (El-Shall et al., 1995; Masciangioli and Zhang, 2003). อนุภาคนาโนถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานทางด้านสิ่งแวดล้อม เช่นการนำมาประยุกต์ใช้กับวัสดุต่างๆ การบำบัดสารปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม นาโนซิงค์ออกไซด์

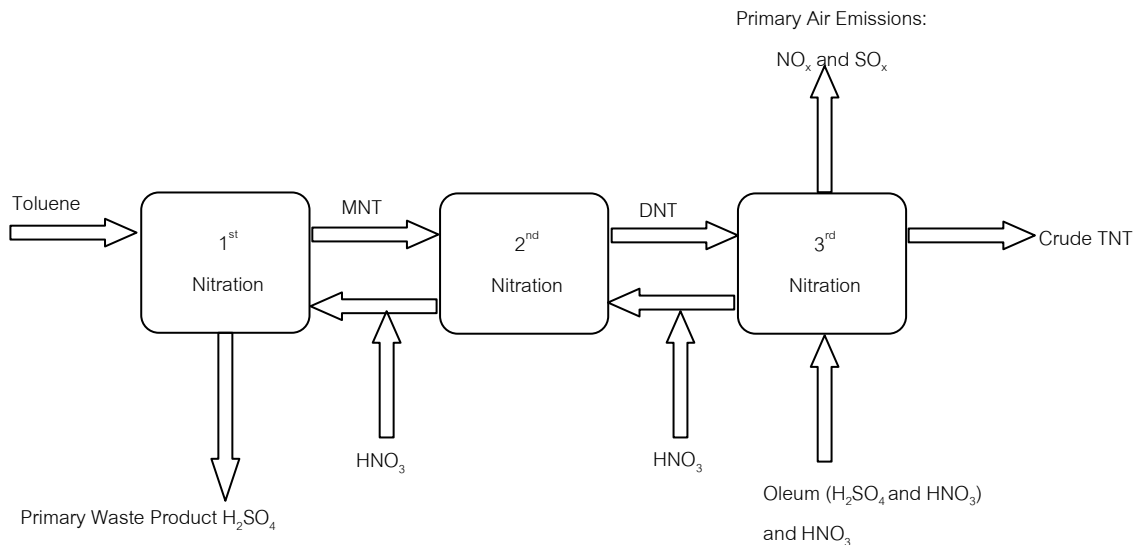
ไซค์ (mZnO) คือ อนุภาคขนาดนาโนของซิงค์ออกไซด์ (El-Shall et al., 1995) ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เป็นสารเคมีที่มีความสามารถในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) และถูกใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาค้ำแสง (Abdullah et al., 2004; El-Shall et al., 1995; Fouad et al., 2006; Spanhel and Anderson, 1991). ซิงค์ออกไซด์ถูกนำมาใช้ในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการบำบัดน้ำเสีย ดังนั้นจึงเป็นที่น่าสนใจศึกษาวิจัยและพัฒนา นาโนเทคโนโลยี และเพื่อทราบถึงศักยภาพและความเป็นไปได้ของการนำนาโนเทคโนโลยีหรือการนำนาโนซิงค์ออกไซด์มาบำบัดและปฏิบัติการแก้ไขแหล่งน้ำที่ปนเปื้อนของสารที่อื่นที่ และนำไปสู่การพัฒนา ระบบบำบัดและปฏิบัติการแก้ไขแหล่งน้ำที่ปนเปื้อนของสารที่อื่นที่ ทั้งนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้จริงในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนของเสียอันตรายในระดับเทศบาลชุมชน และภาคอุตสาหกรรม อีกทั้งเกิดประโยชน์โดยรวมทั้งทางด้านเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อม นำไปสู่การพัฒนาที่ยั่งยืนของประเทศต่อไป

ไตรไนโตรโทลูอิน หรือทีเอ็นที เป็นสารผลึกสีเหลือง เรียวกลายเข็ม ละลายในน้ำได้น้อยแต่จะละลายได้ดีในตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น ether, acetone, benzene และ pyridine เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่า 80.35 °C ดังนั้นจึงสามารถหลอมละลาย TNT โดยใช้ความร้อนจากไอน้ำ ทีเอ็นทีเป็นหนึ่งในวัตถุระเบิดที่ใช้บ่อยในการใช้ทหารและอุตสาหกรรม (Kraus et al., 1985) ทีเอ็นทีเป็นสารอันตรายในกลุ่มของสารพิษ นอกจากนี้ US.EPA ได้กำหนดให้สารทีเอ็นทีเป็นสารที่น่าก่อเกิดมะเร็งในมนุษย์อีกด้วย (ACGIH, 1993; Levine et al., 1990a; U.S.DHHS. 1995; U.S.EPA. 1991) ชื่อในระบบ IUPAC ของทีเอ็นที คือ 2-methyl-1,3,5-trinitrobenzene ทีเอ็นทีเป็นสารประกอบที่มีสูตรเคมีคือ $C_6H_2(NO_2)_3CH_3$ และ สูตรโครงสร้างคือ

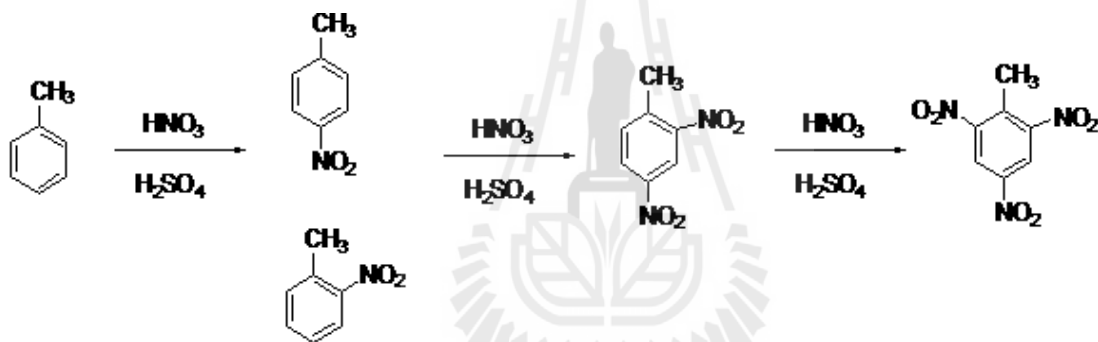


ภาพที่ 1 สูตรโครงสร้างของไตรไนโตรโทลูอิน (ทีเอ็นที)

กระบวนการในการผลิตทีเอ็นที ผลิตจากสารตั้งต้น คือ โทลูอินและกรดไนตริกดังภาพที่ 2 (Kraus et al., 1985)

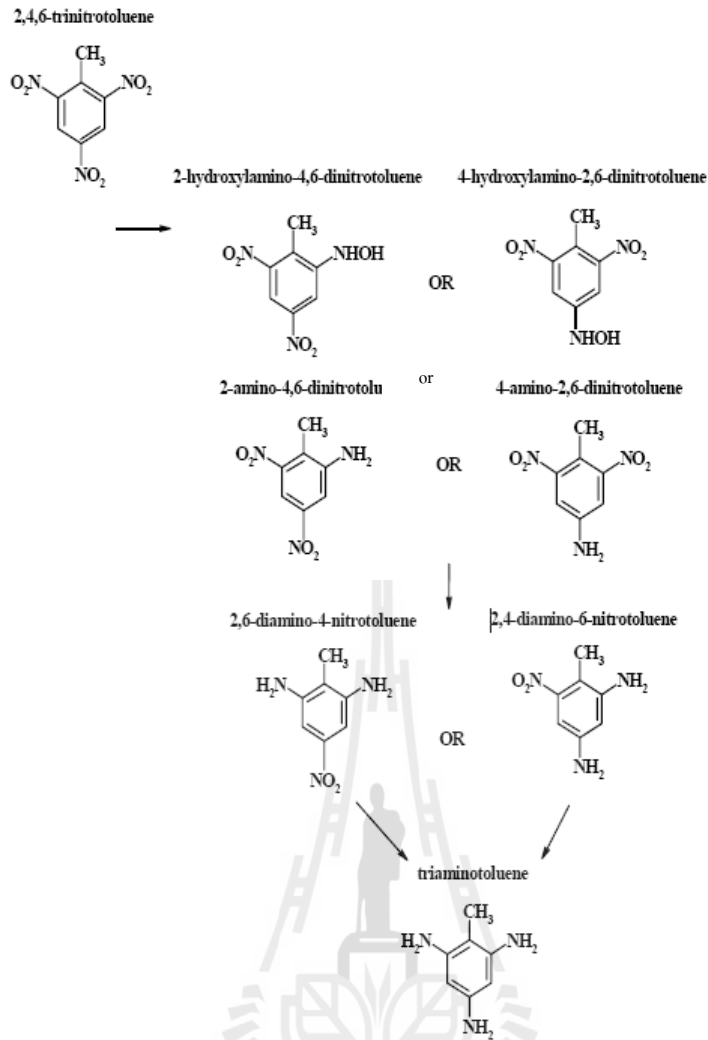


ภาพที่ 2 กระบวนการผลิตสารไตรไนโตรโทลูอิน (ทีเอ็นที) (Kraus et al., 1985)



ภาพที่ 3 ปฏิกิริยาเคมีในการผลิตสารไตรไนโตรโทลูอิน (ทีเอ็นที) (Kraus et al., 1985)

การเปลี่ยนแปลง (Transformation) ของสารไตรไนโตรโทลูอินในสิ่งแวดล้อมนั้น จะเป็นการดึงเอากลุ่มไนโตร (NO₂) ออกจากโครงสร้างแล้วกลายเป็นอนุพันธ์ของทีเอ็นที ที่มีความเป็นพิษน้อยกว่าทีเอ็นที (ACGIH, 1993) คือ ดีเอ็นที (Dinitrotoluene; DNT) เอดีเอ็นที (Amino-dinitrotoluene; ADNT) ดีเอเอ็นที (Diamino-nitrotoluene; DANT) และ ทีเอที (Triaminotoluene; TAT) (Jain et al., 2004; Nefso et al., 2005; Price et al., 1995; Price et al., 1997; Tan et al., 1992) ดังภาพ



ภาพที่ 4 การเปลี่ยนรูปสารของสารไตรไนโตรโทลูอิน (ทีเอ็นที) ในสิ่งแวดล้อม

นาโนเทคโนโลยี (Nanotechnology) คือ เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการจัดการ การสร้าง หรือการวิเคราะห์ วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องจักรหรือผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดเล็กมากๆ ในระดับนาโนเมตร (ประมาณ 1-100 นาโนเมตร) (El-Shall et al., 1995) รวมถึงการออกแบบหรือการประดิษฐ์เครื่องมือเพื่อใช้สร้างหรือวิเคราะห์วัสดุในระดับที่เล็กมากๆ เช่น การจัดอะตอมและโมเลกุลในตำแหน่งที่ต้องการได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ส่งผลให้โครงสร้างของวัสดุหรืออุปกรณ์มีคุณสมบัติพิเศษขึ้นไม่ว่าทางด้านฟิสิกส์ เคมี หรือชีวภาพ และสามารถนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ได้ (Masciangioli and Zhang, 2003)

อนุภาคขนาดนาโน (Nanoparticles) คือ วัสดุหรืออนุภาคที่มีขนาดในช่วงนาโนเมตร คือระหว่าง 1 ถึง 100 นาโนเมตร (nm) หรือแสดงในรูปของมาตรฐานสากลในรูป 10^{-9} ของเมตรนี้ เมื่อเทียบขนาดสิ่งที่เรามองเห็นเช่นเส้นผม มีขนาดเท่ากับ 80,000 นาโนเมตร หรือ การเปรียบเทียบเซลล์เม็ดเลือดแดงประมาณ 7,000 นาโนเมตร (Masciangioli and Zhang, 2003)

อนุภาคของนาโนหลายชนิดที่ถูกนำมาใช้ในงานทางด้านสิ่งแวดล้อม เช่น การนำอนุภาคเหล็กนาโน (nZVI particles) มาใช้ในการลดปริมาณสารไตรไนโตรโทลูอินในน้ำที่ความเข้มข้น 10 mg/L โดยเตรียมจาก

Stock Standard TNT 100 mg/L (Welch, 2007; Jiamjitpranich et al., 2009; Jiamjitpranich et al., 2010; Jiamjitpranich et al., 2012a; Jiamjitpranich et al., 2012b)

นาโนซิงค์ออกไซด์ (nZnO) คือ อนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เป็นสารเคมีที่มีความสามารถในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) และถูกใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Abdullah et al., 2004) การนำนาโนซิงค์ออกไซด์ (nZnO) มาทำปฏิกิริยากับไตรไนโตรโทลูอีน หรือทีเอ็นที เพื่อหวังผลในการย่อยสลาย และเปลี่ยนรูปของไตรไนโตรโทลูอีน หรือทีเอ็นที ที่มีความเป็นพิษสูงไปสู่อนุพันธ์ของ ทีเอ็นที ที่มีความเป็นพิษน้อยกว่า (Spanhel and Anderson, 1991)

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

วัตถุประสงค์หลัก

เพื่อการประยุกต์ใช้นาโนเทคโนโลยี (อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์, Nano Zinc Oxide; nZnO) ในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนสารไตรไนโตรโทลูอีน (Trinitrotoluene; TNT)

วัตถุประสงค์รอง

1. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพและกำหนดปริมาณที่เหมาะสม (Optimum dosages) ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ในการทำปฏิกิริยา (Degradation) กับสารไตรไนโตรโทลูอีนที่ปนเปื้อนในน้ำ
2. เพื่อกำหนดอัตราการย่อยสลาย (Degradation rate) และอัตราการกำจัดเคลื่อนที่ (Kinetic Removal Rate) ของสารไตรไนโตรโทลูอีนในน้ำโดยอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์
3. เพื่อศึกษาความสามารถในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ในการย่อยสลายสารไตรไนโตรโทลูอีนในน้ำ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การศึกษาประสิทธิภาพของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์การบำบัดน้ำปนเปื้อนสารไตรไนโตรโทลูอีนเป็นการวิจัยในระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory-scale) โดยการใช้ น้ำปนเปื้อนสารไตรไนโตรโทลูอีนที่เกิดจากการสังเคราะห์ นำมาบำบัดและทำปฏิกิริยาด้วยอนุภาคของนาโนซิงค์ออกไซด์ ซึ่งการวิจัยนี้จะแปรผันปริมาณของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ใช้ เพื่อประเมิน และกำหนดปริมาณที่เหมาะสม (Optimum dosages) ในการทำปฏิกิริยา แปรผันระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา เพื่อกำหนดอัตราการย่อยสลาย (Degradation rate or Removal efficiency) และ อัตราการกำจัดเคลื่อนที่ (Kinetic Removal Rate) การทดลองภายใต้สภาวะที่มีแสงและไม่มีแสงเพื่อศึกษาความสามารถในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ในการย่อยสลายสารไตรไนโตรโทลูอีนในน้ำ

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. ประโยชน์ในการพัฒนาองค์ความรู้ใหม่ ในการประยุกต์ใช้นาโนเทคโนโลยี (อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์; Nano Zinc Oxide; nZnO) ในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนสารไตรไนโตรโทลูอีน

- (Trinitrotoluene; TNT) ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้กับหน่วยงานที่ผลิตน้ำที่มีการปนเปื้อนสารไตรไนโตรโทลูอิน เช่น โรงงานอุตสาหกรรม กรมสรรพวุธ โรงเรียนฝึกทหาร และหน่วยงานทหาร
2. เป็นการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและป้องกันสุขภาพอนามัยของประชาชน นอกจากนี้ยังช่วยลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมและทำให้เกิดการพัฒนาทรัพยากรที่ยั่งยืน
 3. แก้ปัญหาในการดำเนินงานของหน่วยงานที่ทำการวิจัย: ทำให้เพิ่มศักยภาพในการผลิตผลงานวิจัยและพัฒนาศักยภาพของนักวิจัย
 4. เป็นองค์ความรู้ในการวิจัยต่อไป: ได้รับองค์ความรู้ใหม่ในการการประยุกต์ใช้นาโนเทคโนโลยี (อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์; Nano Zinc Oxide; nZnO) ในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนสารไตรไนโตรโทลูอิน (Trinitrotoluene; TNT)
 5. บริการความรู้แก่ประชาชน: การเผยแพร่ผลงานวิจัยที่ได้จะเป็นการกระตุ้นให้ประชาชนเห็นความสำคัญและประโยชน์ของการเทคโนโลยีนาโนมาใช้ฟื้นฟูสภาพสิ่งแวดล้อม
 6. บริการความรู้แก่ภาคธุรกิจ: สถานประกอบการหรือธุรกิจอุตสาหกรรมสามารถนำองค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยไปประยุกต์ใช้ในสถานประกอบการ
 7. เป็นประโยชน์ต่อประชากรกลุ่มเป้าหมาย: ทั้งนี้เพื่อความเป็นดีอยู่ดีและสุขภาพที่ดีของประชาชนอย่างยั่งยืน การเผยแพร่ผลงานวิจัยที่ได้และให้ความรู้แก่ประชาชนจะทำให้ประชาชนตระหนักถึงปัญหาสิ่งแวดล้อมและการแก้ไขปัญหามลพิษสิ่งแวดล้อม
 8. เผยแพร่ในวารสารภายในประเทศและระดับนานาชาติ และช่วยให้ประเทศไทยมีแนวทางการพัฒนาการบำบัดและการปฏิบัติการแก้ไขน้ำที่ปนเปื้อนของสารเคมีอันตราย

บทที่ 2

วิธีดำเนินการวิจัย

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. Transmission Electron Microscopy (TEM) JEOL รุ่น JEM-2010
2. Scanning Electron Microscopy (SEM) JEOL รุ่น JCM-6010 LV
3. QuantaChome Autosorb analyzer รุ่น Autosorb I
4. X-ray Fluorescence Energy Dispersive Spectrometer รุ่น XGT-5200 (XRF)
5. GC-ECD (Hewlett Packard 5890 series II)
6. Vortex mixer
7. Lux Meter: Didicon LX-50
8. Thermometer
9. pH meter: Index ID 1000
10. PTFE syringe filter (0.4 μm)
11. Volumetric flask
12. Beakers
13. Petri disks
14. Aluminum foil

สารเคมี

1. 2, 4, 6-Trinitrotoluene: Supelco Analytical
2. Nano Zinc Oxide: nZnO: SIGMA-ALDRICH
3. DI water
4. Acetronitrite

วิธีดำเนินการวิจัย และวิธีวิเคราะห์ข้อมูล

การศึกษาประสิทธิภาพของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์การบำบัดน้ำปนเปื้อนสารไตรโนโตรโทลูอิน เป็นการวิจัยในระดับห้องปฏิบัติการ (Lab-scale) โดยการใช้น้ำปนเปื้อนสารไตรโนโตรโทลูอินที่เกิดจากการสังเคราะห์ นำมาบำบัดและทำปฏิกิริยาดัวยอนุภาคของนาโนซิงค์ออกไซด์ วิธีการดำเนินการวิจัยมีดังนี้

1. การศึกษาคุณสมบัติของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์

คุณสมบัติของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่จะนำมาใช้ในการวิจัยบรรจุขวดขนาดน้ำหนัก 10 กรัมของบริษัท SIGMA-ALDRICH คุณลักษณะที่ทำการศึกษได้แก่

1.1. ลักษณะรูปร่างของอนุภาคนาโนทั้งภาคตัดขวางและสามมิติ โดยการตรวจสอบด้วย Transmission Electron Microscopy (TEM) JEOL รุ่น JEM-2010 และ Scanning Electron Microscopy (SEM) JEOL รุ่น JCM-6010 LV

1.2. ศึกษาพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาของอนุภาคนาโน โดยศึกษาพื้นที่ผิว BET surface area ด้วยเครื่อง QuantaChome Autosorb analyzer รุ่น Autosorb I

1.3. ศึกษาความบริสุทธิ์ของอนุภาคนาโน โดยตรวจวัดด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence Energy Dispersive Spectrometer รุ่น XGT-5200 (XRF)

2. การศึกษาประสิทธิภาพของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์การบำบัดน้ำปนเปื้อนสารไตรไนโตรโทลูอีน

การเตรียมน้ำตัวอย่างที่ปนเปื้อนสารไตรไนโตรโทลูอีน เตรียมโดยใช้ สารมาตรฐานของสารไตรไนโตรโทลูอีน (2, 4, 6-Trinitrotoluene: Supelco Analytical) โดยเตรียมให้ได้ Stock Standard TNT 100 mg/L(ppm) โดยใช้ตัวทำละลาย Acetonitrile เพื่อใช้ในการเตรียมให้ได้ความเข้มข้นที่ต้องการในการทดลองโดยการเติมน้ำกลั่น (DI Water) ให้ได้ความเข้มข้น 10 mg/L ใช้เป็นตัวอย่างน้ำปนเปื้อนสารไตรไนโตรโทลูอีน

2.1 การศึกษาประสิทธิภาพและกำหนดปริมาณที่เหมาะสม (Optimum dosages) ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ในการทำปฏิกิริยา (Degradation) กับสารไตรไนโตรโทลูอีนที่ปนเปื้อนในน้ำ

การกำหนดปริมาณที่เหมาะสม (Optimum dosage) ของอนุภาคนาโน โดย การแปรผันปริมาณของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 1,000, 2,000 และ 3,000 mg/L หรือ ppm ใช้ในการทำปฏิกิริยากับสารที่เอินที ในน้ำปนเปื้อนสารไตรไนโตรโทลูอีนเป็นระยะเวลา 20 นาที ในขณะที่ตัวอย่างควบคุม (Controls) จะไม่เติมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ โดยเติมลงในภาชนะ Petri disk หลัจากนั้นวัดปริมาณที่เอินทีที่เหลือหลังจากการทำปฏิกิริยาด้วย GC-ECD (Hewlett Packard 5890 series II) เพื่อหาค่าปริมาณของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เหมาะสม (Optimum dosage) เพื่อใช้ค่าปริมาณดังกล่าวในการทดลองต่อไป ผลการทดลองดำเนินการ 3 ซ้ำ การทดลองในขั้นนี้ดำเนินการไม่ให้ตัวอย่างโดนแสงโดยการห่อหุ้มภาชนะด้วยกระดาษฟอยล์ (Aluminum foil)

ผลการทดลองแสดงในรูปแบบแผนภูมิเป็นค่าเฉลี่ย (mean) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) โดยนำเสนอในรูปแบบของ Degradation และ Removal efficiency

2.2 กำหนดอัตราการย่อยสลาย (Degradation rate) และอัตราการกำจัดเคลื่อนที่ (Kinetic Removal Rate) ของสารไตรไนโตรโทลูอีนในน้ำโดยอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์

เพื่อศึกษา Optimum time ในรูปของ Degradation rate และศึกษาอัตราการกำจัดเคลื่อนที่ (Kinetic Removal Rate) ที่เหมาะสม ปริมาณอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ใช้ ความเข้มข้น 2,000 ppm ใช้ในการทำปฏิกิริยากับสารที่เอ็นที ในน้ำปนเปื้อนสารไตรไนโตรโทลูอินเป็นระยะเวลาที่แตกต่างกัน โดยตัวอย่างจะห่อหุ้มด้วยกระดาษฟอยล์ (Aluminum foil) การทดลองเริ่มต้นด้วยเติมน้ำปนเปื้อนสารไตรไนโตรโทลูอิน 10 mg/L ลงในภาชนะ Petri disk 10 ml หลังจากนั้นเติมนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์เพื่อให้ได้ความเข้มข้น 2,000 ppm แล้วเขย่าเบาๆ ในสภาพที่ไม่โดนแสงแดดเป็นระยะเวลา 10, 20 และ 30 นาที หลังจากนั้นวัดปริมาณที่เอ็นทีที่เหลือหลังจากการทำปฏิกิริยาด้วย GC-ECD (Hewlett Packard 5890 series II) เพื่อหาค่าปริมาณของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ ผลการทดลองดำเนินการ 3 ซ้ำ

ผลการทดลองแสดงเป็นค่าเฉลี่ย (mean) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ในรูปแผนภูมิ ค่าเฉลี่ย (mean) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) โดยนำเสนอในรูปของ Degradation rate และ Removal efficiency สำหรับอัตราการกำจัดเคลื่อนที่ (Kinetic Removal Rate) แสดงในรูปแผนภูมิ $-\ln(Ce/Co)$

2.3 การศึกษาความสามารถของแสงแดดในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ ในการย่อยสลายสารไตรไนโตรโทลูอินในน้ำ

อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 2,000 ppm ใช้ในการทำปฏิกิริยากับสารที่เอ็นที ในน้ำปนเปื้อนสารไตรไนโตรโทลูอินเป็นระยะเวลา 30 นาที ในขณะที่ตัวอย่างควบคุม (Controls) จะห่อหุ้มด้วยกระดาษฟอยล์ (Aluminum foil) เติมน้ำปนเปื้อนสารไตรไนโตรโทลูอินลงในภาชนะ Petri disk 10 ml หลังจากนั้นเติมนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์เพื่อให้ได้ความเข้มข้น 2,000 ppm แล้วเขย่าเบาๆ ในสภาพที่ไม่โดนแสงแดดเป็นระยะเวลา 30 นาที หลังจากนั้นวัดปริมาณที่เอ็นทีที่เหลือหลังจากการทำปฏิกิริยาด้วย GC-ECD (Hewlett Packard 5890 series II) เพื่อหาค่าปริมาณของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ ผลการทดลองดำเนินการ 3 ซ้ำ การทดสอบความสามารถของแสงแดดในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ในการย่อยสลายสารไตรไนโตรโทลูอิน โดยการทดสอบภายใต้แสงแดดเทียบกับภาวะที่บดแสง (Controls) ในระยะเวลาและปริมาณสารที่เท่ากัน โดยทำการทดลองภายใต้แสงแดดเป็นเวลานาน 30 นาทีใน 3 ช่วงเวลา ได้แก่ เช้า (ระหว่าง 9-10 น.) บ่าย (ระหว่าง 12-13 น.) และเย็น (ระหว่าง 16-17 น.) พร้อมทั้งวัดความเข้มแสง (Light intensity) ด้วยเครื่องวัดความเข้มแสง (Lux meter) ทุก 5 นาที วัดค่า pH และวัดอุณหภูมิอากาศ ขณะทำการทดลองแต่ละช่วงเวลา เพื่อเปรียบเทียบค่าความสามารถในการย่อยสลายของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ ภายใต้สภาวะมีแสง และไม่มีแสงเป็นตัวกระตุ้น ผลการทดลองแสดงในรูปแผนภูมิ เป็นค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Mean and SD)

บทที่ 3

ผลการวิจัย

การศึกษาประสิทธิภาพของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์การบำบัดน้ำปนเปื้อนสารไตรโนโตรโทลูอินเป็นการวิจัยในระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory-scale) โดยการใช้ น้ำปนเปื้อนสารไตรโนโตรโทลูอินที่เกิดจากการสังเคราะห์ นำมาบำบัดและทำปฏิกิริยาดำเนินการด้วยอนุภาคของนาโนซิงค์ออกไซด์ ซึ่งการวิจัยนี้จะแปรผันปริมาณของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ใช้ เพื่อประเมินและกำหนดกำหนดปริมาณที่เหมาะสม (Optimum dosage) ในการทำปฏิกิริยา แปรผันระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา เพื่อกำหนดอัตราการย่อยสลาย (Degradation rate or Removal efficiency) และ อัตราการกำจัดเคลื่อนที่ (Kinetic Removal Rate) การทดลองภายใต้สภาวะที่มีแสงและไม่มีแสงเพื่อศึกษาความสามารถในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสงอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ในการย่อยสลายสารไตรโนโตรโทลูอินในน้ำ

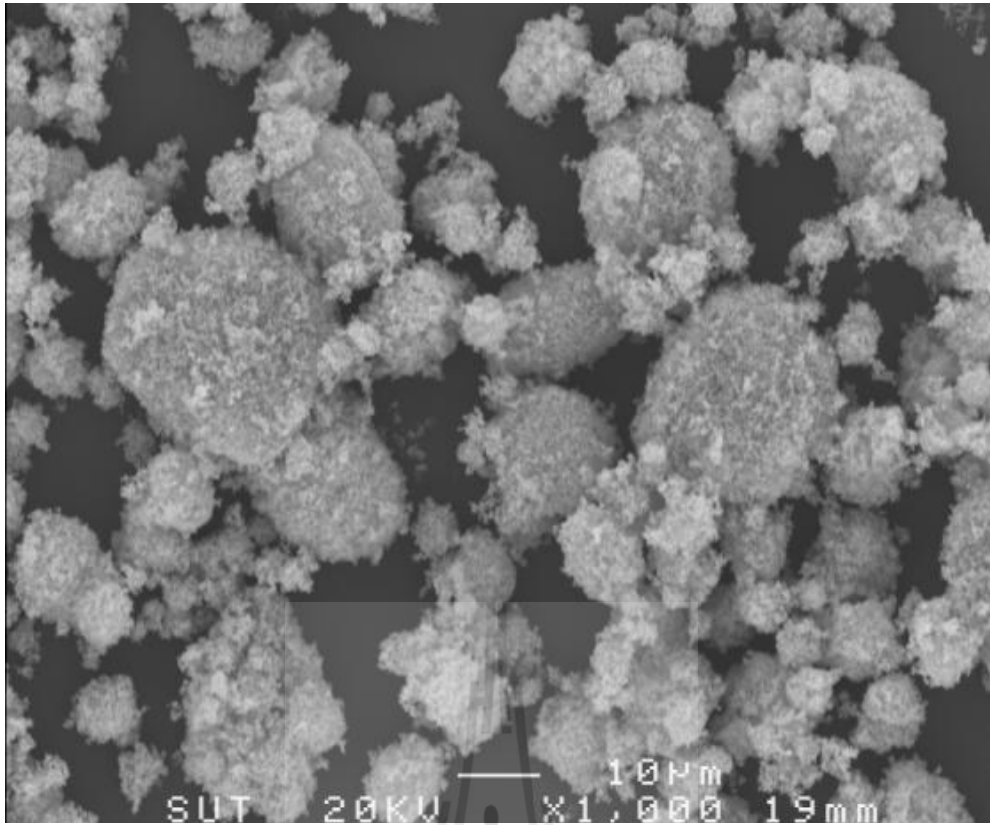
จัดเตรียมเครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี ที่ใช้ในการดำเนินการศึกษางานวิจัยการประยุกต์ใช้นาโนเทคโนโลยี (อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์, Nano Zinc Oxide, nZnO) ในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนสารไตรโนโตรโทลูอิน (Trinitrotoluene) จัดเตรียมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ในการศึกษาคุณลักษณะและคุณสมบัติของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์เพื่อเป็นการยืนยันว่าอนุภาคของซิงค์ออกไซด์มีขนาดของอนุภาคอยู่ในขนาดนาโนสเกล ผลการวิจัยมีรายละเอียดดังนี้

1. การศึกษาคุณลักษณะและคุณสมบัติของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์

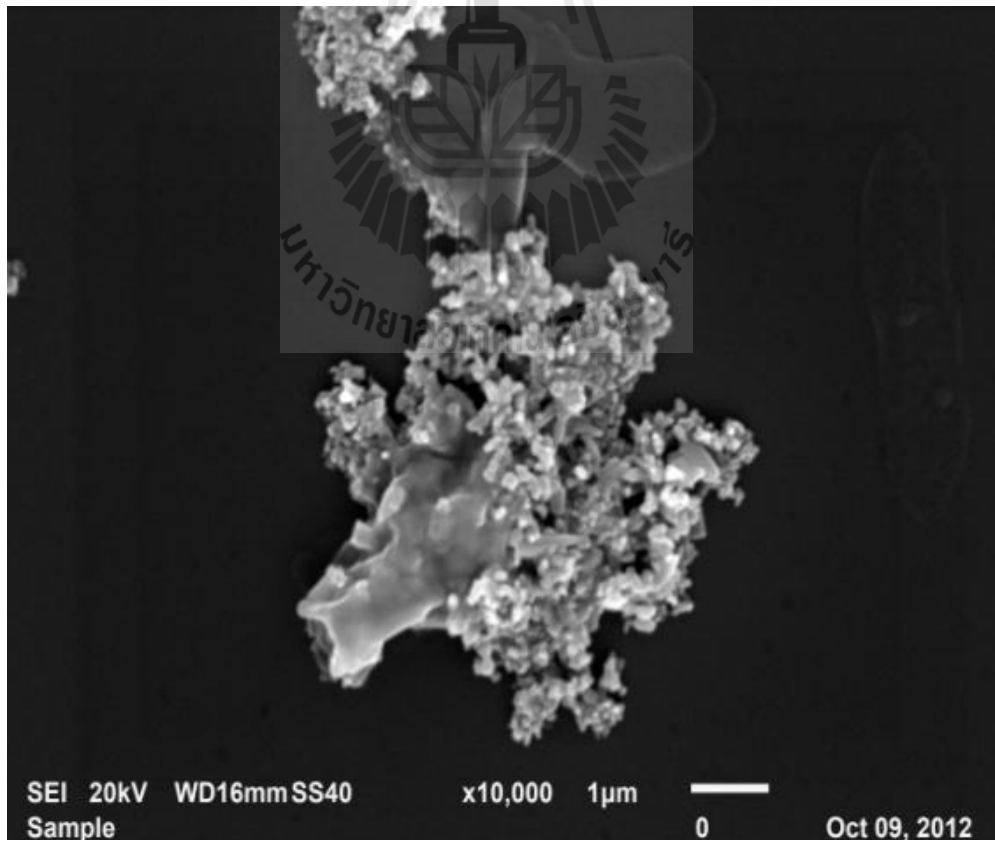
คุณสมบัติของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่จะนำมาใช้ในการวิจัยเป็นลักษณะผงสีขาวละเอียด คุณลักษณะที่ทำการศึกษาได้แก่

1.1 ลักษณะรูปร่างของอนุภาคนาโนทั้งภาคตัดขวางและสามมิติ โดยการตรวจสอบด้วย Transmission Electron Microscopy (TEM) และ Scanning Electron Microscopy (SEM)

ผลการศึกษาจากภาพถ่ายด้วยเครื่อง SEM พบว่า อนุภาคนาโนของนาโนซิงค์ออกไซด์มีขนาดเล็กกว่า 100 นาโนเมตร แต่รวมตัวเป็นกลุ่มก้อนที่มีขนาดต่างๆ กัน อาจมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางมากกว่า 10 ไมครอน ส่วนใหญ่จะอยู่ระหว่าง 5-10 ไมครอน (ดังภาพที่ 5) ผลการศึกษาจากภาพถ่ายด้วยเครื่อง TEM ได้ผลในลักษณะเดียวกันพบว่า อนุภาคนาโนของนาโนซิงค์ออกไซด์มีขนาดเล็กกว่า 100 นาโนเมตร แต่รวมตัวเป็นกลุ่มก้อนที่มีขนาดต่างๆ กัน ขนาดอนุภาคมีความหลากหลาย แต่โดยส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 40-80 นาโนเมตร (ดังภาพที่ 6) และจากภาพ TEM แสดงให้เห็นลักษณะของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์มีความหลากหลายในรูปร่างเช่นกัน โดยส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นทรงเหลี่ยม เช่น แปดเหลี่ยม หกเหลี่ยม สี่เหลี่ยม ทรงกระบอก และทรงแคบรูป

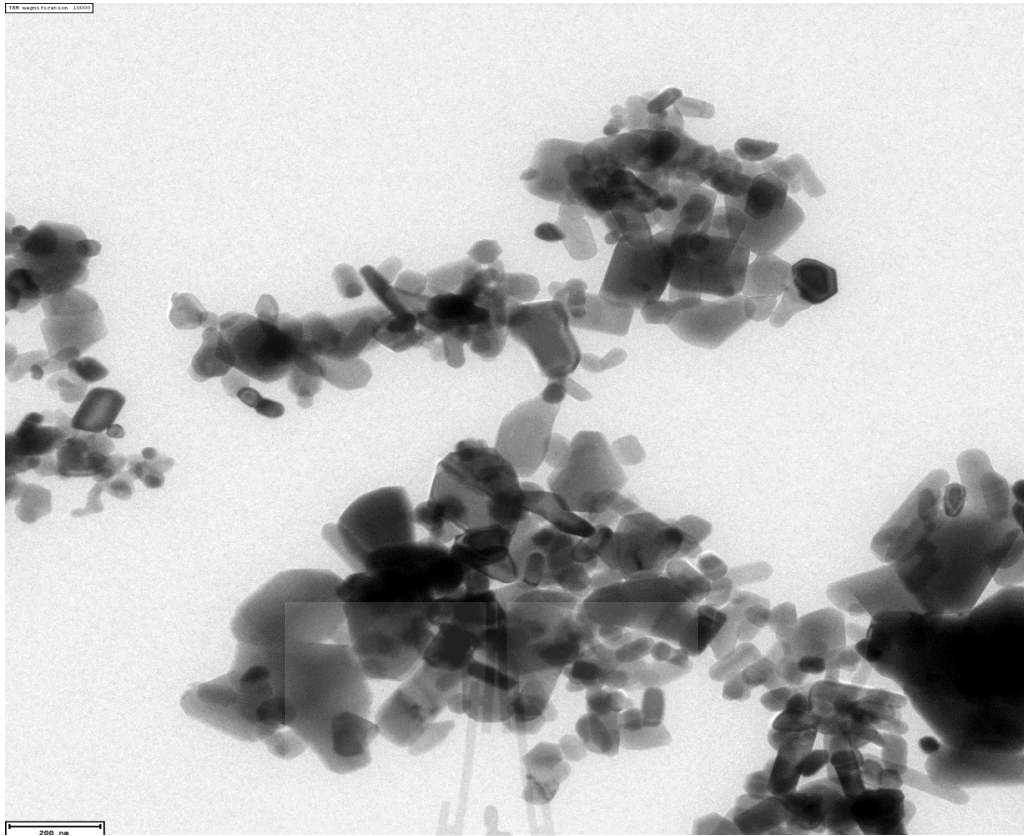


(ก)

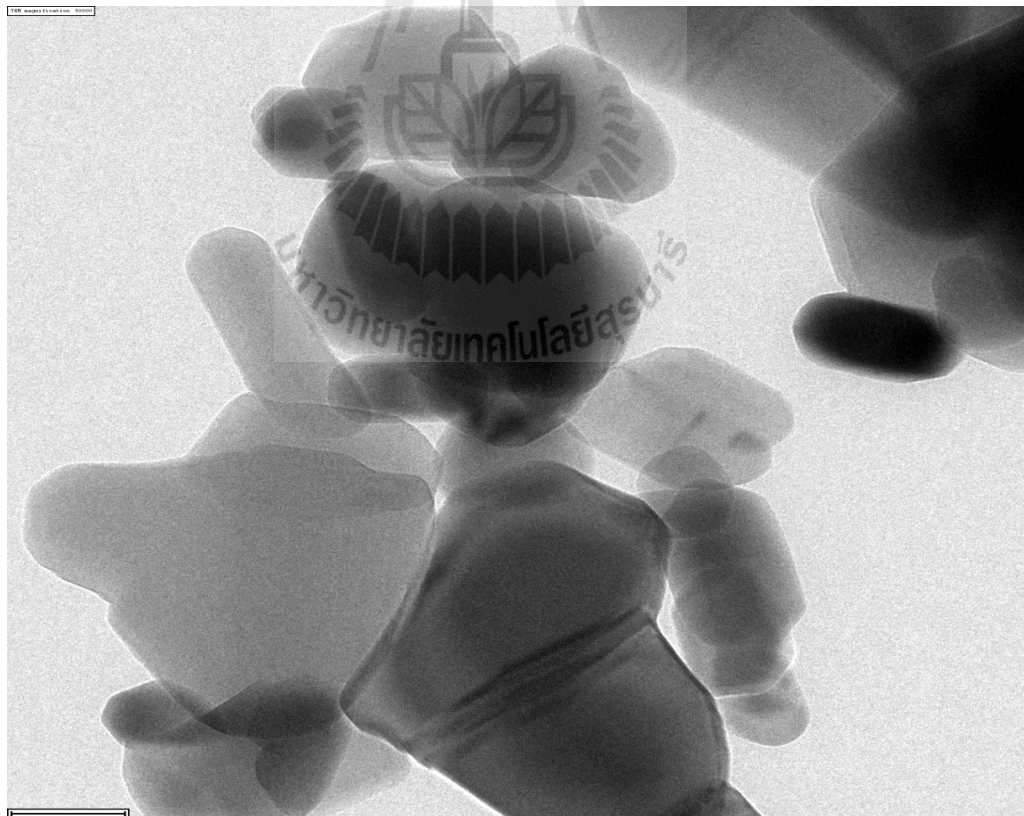


(ข)

ภาพที่ 5 ลักษณะรูปร่างและขนาดอนุภาคนาโนซึ่งสกัดด้วยเครื่อง SEM (ก) กำลังขยาย x 1,000 (ข) กำลังขยาย x 10,000



(ก)



(ข)

ภาพที่ 6 ลักษณะรูปร่างและขนาดอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์เครื่อง TEM (ก) กำลังขยาย x 10,000 (ข) กำลังขยาย x 50,000

1.2 ศึกษาพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาของอนุภาคนาโน โดยศึกษาพื้นที่ผิว BET surface area ผลการวัดพื้นที่ผิวของ อนุภาคนาโนของนาโนซิงค์ออกไซด์พบว่ามีค่าเฉลี่ย $9.56 \pm 0.04 \text{ m}^2/\text{g}$

1.3 ศึกษาความบริสุทธิ์ของอนุภาคนาโน โดยตรวจวัดด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) ผลการตรวจวัดพบว่า อนุภาคนาโนของนาโนซิงค์ออกไซด์มีความบริสุทธิ์ถึง 99.98 %

2. การศึกษาประสิทธิภาพของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ต่อการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนสารไตรไนโตรโทลูอิน

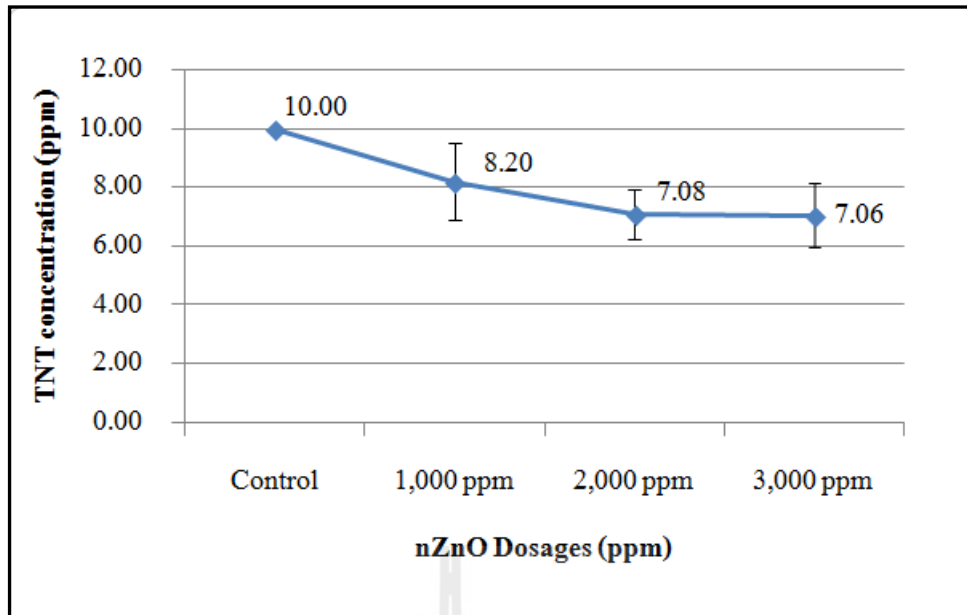
การเตรียมน้ำตัวอย่างที่ปนเปื้อนสารไตรไนโตรโทลูอิน เตรียมโดยการใช้ สารมาตรฐานของสารไตรไนโตรโทลูอิน มาเตรียมให้ได้ความเข้มข้นที่ต้องการ คือ 10 mg/L โดยเตรียมจาก Stock Standard TNT 100 mg/L เพื่อใช้เป็นตัวอย่างน้ำปนเปื้อนสารไตรไนโตรโทลูอิน

2.1 การศึกษาประสิทธิภาพ และกำหนดปริมาณที่เหมาะสม

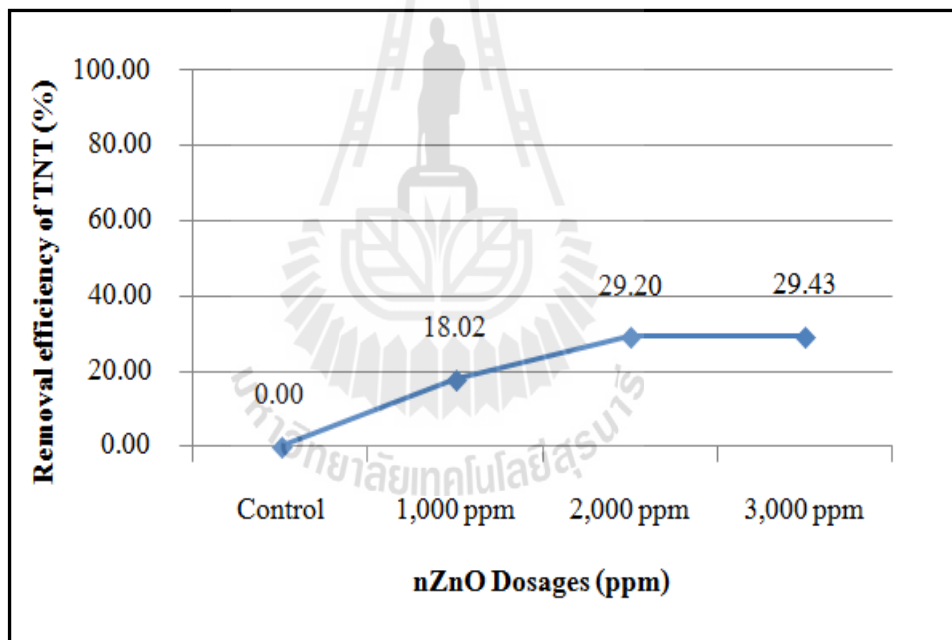
การศึกษาประสิทธิภาพและกำหนดปริมาณที่เหมาะสม (Optimum dosages) ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ในการทำปฏิกิริยากับสารไตรไนโตรโทลูอินที่ปนเปื้อนในน้ำ การกำหนดปริมาณที่เหมาะสม (Optimum dosages) ของอนุภาคนาโน โดย การแปรผันปริมาณของอนุภาคนาโนที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากับสารที่เอ็นที และตรวจสอบปริมาณที่เอ็นทีที่เหลือ ค่าปริมาณของอนุภาคนาโนที่สามารถกำจัดสารที่เอ็นทีได้มาก ในเวลาและสภาวะแวดล้อมเดียวกัน คือ ค่าปริมาณที่เหมาะสม (Optimum dosages) ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 1 และแผนภูมิที่ 7

nZnO Dosages (ppm)	TNT Concentration (ppm)			Average concentration (ppm)	SD	Removal efficiency of TNT (%)
	Rep1	Rep2	Rep3			
Control	10.00	10.00	10.00	10.00	0.0000	0.00
1000	7.41	7.47	9.72	8.20	1.3180	18.02
2000	6.23	7.05	7.96	7.08	0.8632	29.20
3000	7.15	5.91	8.11	7.06	1.1023	29.43

ตารางที่ 1 แสดงผลของ Optimum dosage and Removal efficiency (%)



(ก)



(ข)

ภาพที่ 7 แผนภูมิ ของ Optimum dosage (ก) และ Removal efficiency (%) (ข)

จากผลการศึกษา Optimum dosage และ Removal efficiency (%) แสดงในตารางที่ 1 และภาพที่ 7 พบว่า ประสิทธิภาพของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ในการทำปฏิกิริยากับสารไตรโนโตรโทลูอินที่ปนเปื้อนในน้ำ ไม่สูงมาก และพบว่า ที่ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ 2,000 ppm และ 3,000 ppm มีค่า Removal efficiency ใกล้เคียงกัน (29.20 และ 29.43 ตามลำดับ) ในขณะที่ความเข้มข้นของ อนุภาคนาโน

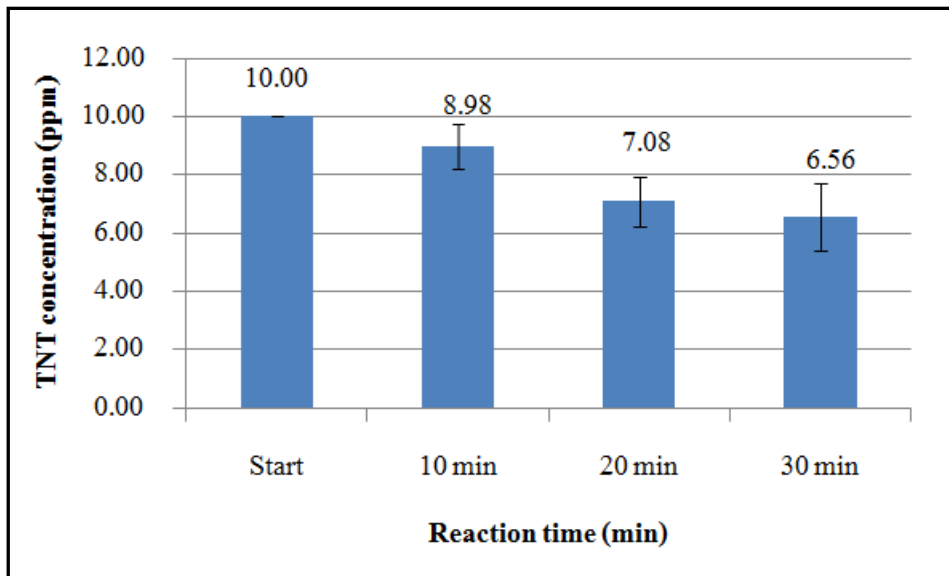
ซิงค์ออกไซด์ 1,000 ppm พบว่า มีค่า Removal efficiency แค่ 18.02 % เท่านั้น ถ้าต้องการเพิ่ม Removal efficiency อาจต้องเพิ่มปริมาณ อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ มากกว่า 3,000 ppm ซึ่งอาจจะมากเกินไป ไม่คุ้มค่าในการลงทุน จึงควรศึกษาการใช้วิธีอื่นๆ เพิ่มเติมในการเพิ่มประสิทธิภาพของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ในการทำปฏิกิริยากับสารไตรไนโตรโทลูอินที่ปนเปื้อนในน้ำ เช่น การใช้แสงแดด เป็นตัว Photocatalyst และในการทดลองการเพิ่มประสิทธิภาพของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ในการทำปฏิกิริยากับสารไตรไนโตรโทลูอินที่ปนเปื้อนในน้ำ เลือกใช้ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ ที่ 2,000 ppm ในการศึกษาในหัวข้อ 2.2 และ 2.3

2.2 การศึกษาอัตราการย่อยสลาย (Degradation rate) และอัตราการกำจัดเคลื่อนที่ (Kinetic Removal Rate) ของสารไตรไนโตรโทลูอินในน้ำโดยอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์

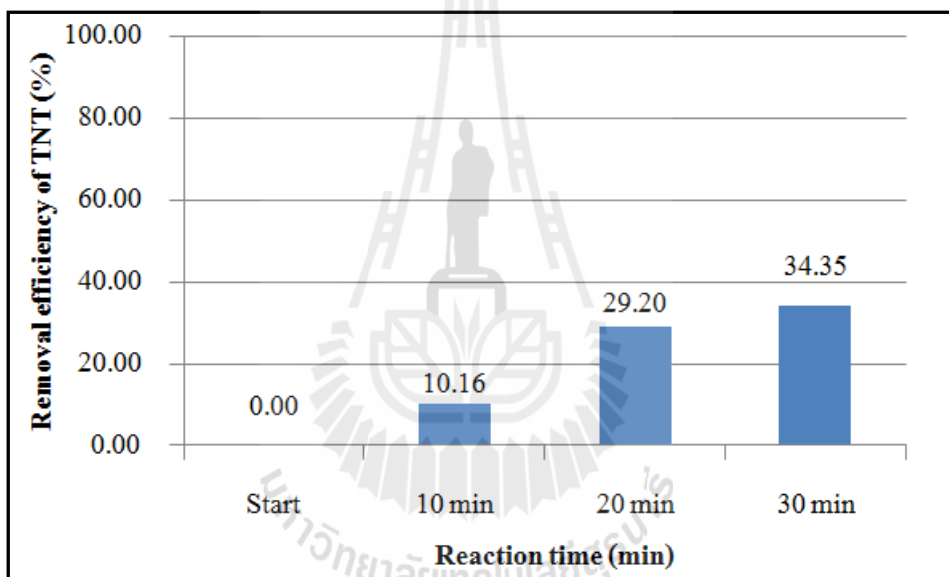
การศึกษาอัตราการย่อยสลาย (Degradation rate or Removal efficiency) และอัตราการกำจัดเคลื่อนที่ (Kinetic Removal Rate) ของสารไตรไนโตรโทลูอินในน้ำโดยอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ โดยเลือกใช้ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ ที่ 2,000 ppm ในการศึกษาการทำปฏิกิริยา โดยจะมีการแปรผันของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาของอนุภาคนาโนและสารที่เอ็นที โดยศึกษาระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 10, 20 และ 30 นาที ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 2, 3 และแผนภูมิที่ 8, 9 และ 10

Reaction time (min)	TNT Concentration (ppm)			Average concentration (ppm)	SD	Removal efficiency of TNT (%)
	Rep1	Rep2	Rep3			
Start	10.00	10.00	10.00	10.00	0.0000	0.00
10	8.86	8.29	9.80	8.98	0.7580	10.16
20	6.23	7.05	7.96	7.08	0.8632	29.20
30	7.07	5.25	7.31	6.56	1.1457	34.35

ตารางที่ 2 แสดงผลของ Optimum time and Removal efficiency (%)



(ก)

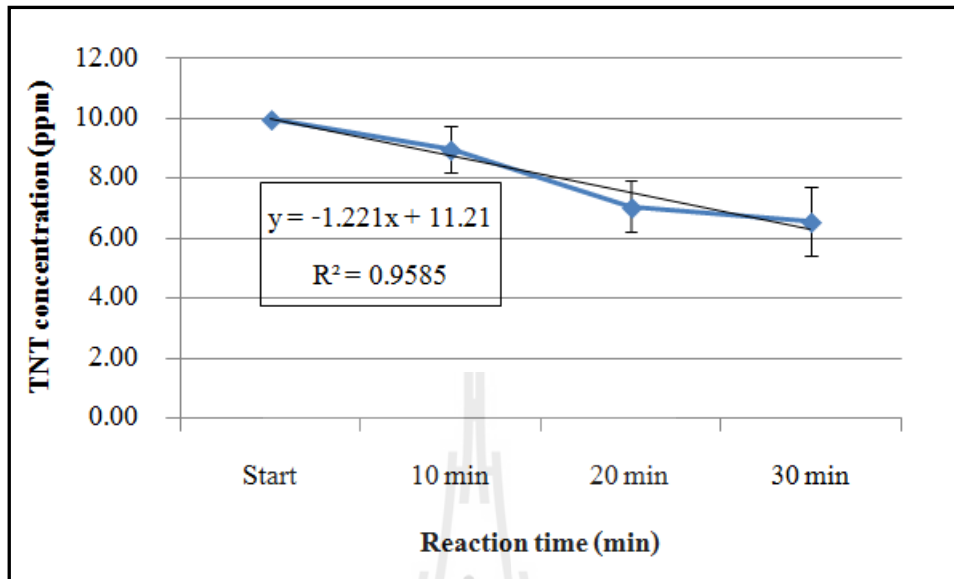


(ข)

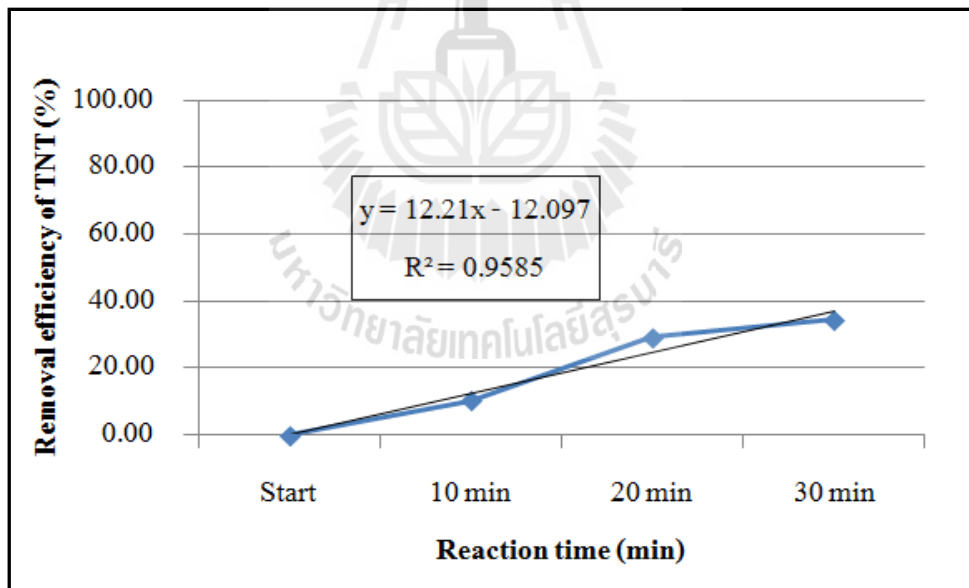
ภาพที่ 8 แผนภูมิ ของ Optimum time (ก) and Removal efficiency (%) (ข)

จากผลการศึกษา Optimum time ในรูปของ Degradation rate และ Removal efficiency (%) แสดงในตารางที่ 2 และภาพที่ 8 พบว่า ประสิทธิภาพของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ในการทำปฏิกิริยากับสารไตรโทโรโทลูอินที่ปนเปื้อนในน้ำ แปรผันกับเวลาในการทำปฏิกิริยา โดยมี Removal efficiency สูงสุดที่ระยะเวลา 30 นาที ที่ 34.35 % ซึ่งอาจถือได้ว่าไม่สูงมาก เมื่อเทียบกับการใช้ Nanoparticles ตัวอื่นๆ เช่น nZVI (Nano Zero Valent Iron) ถ้าต้องการเพิ่ม Removal efficiency อาจต้องเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยานานกว่า 30 นาที ซึ่งอาจจะนานเกินไป และถือได้ว่ามีประสิทธิภาพต่ำเนื่องจากการใช้เวลานานในการทำปฏิกิริยา จึงควรศึกษาการใช้แสงแดด เป็นตัว Photocatalyst และในการทดลองการเพิ่มประสิทธิภาพของ

อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ในการทำปฏิกิริยากับสารไตรไนโตรโทลูอินที่ปนเปื้อนในน้ำโดยใช้แสงแดดเป็นตัว Photocatalyst ในการศึกษาครั้งนี้เลือกใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 30 นาที



(ก)



(ข)

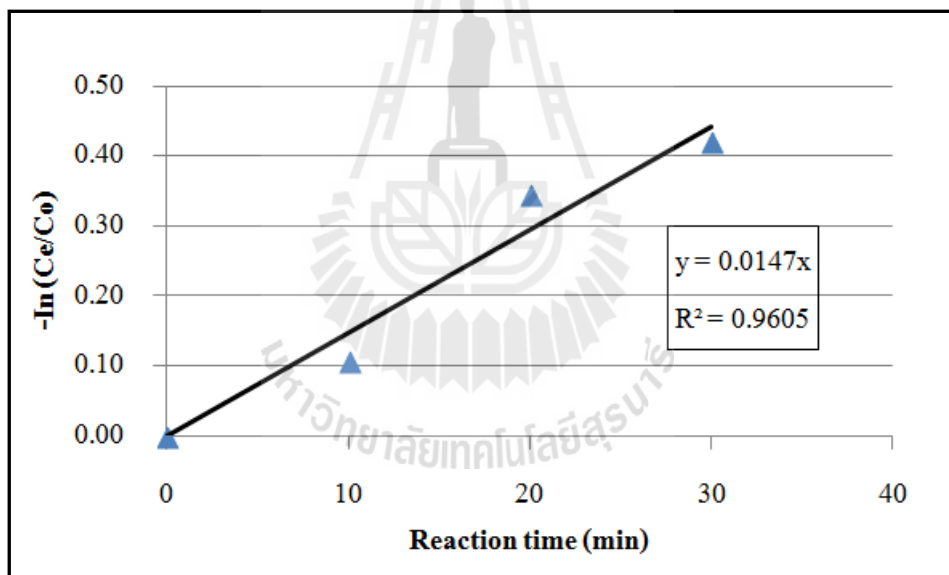
ภาพที่ 9 แผนภูมิ ของ Optimum time (ก) และ Removal efficiency (%) (ข) เมื่อทดสอบ Linearity

จากผลการศึกษา Optimum time ในรูปของ Degradation rate และ Removal efficiency (%) แสดงในภาพที่ 9 พบว่า ประสิทธิภาพของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ในการทำปฏิกิริยากับสารไตรไนโตรโทลูอิน ที่ปนเปื้อนในน้ำ แปรผันกับเวลาในการทำปฏิกิริยามีความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linearity) โดยมีค่า Correlation coefficients (R^2) = 0.9585 อัตราการกำจัดสารมีความสัมพันธ์กันเป็นเชิงเส้นระหว่างตัวแปรต้นกับตัวแปร

ตามซึ่งมีค่า R^2 เข้าใกล้ 1 (0.9585) แสดงให้เห็นว่าหากต้องการเพิ่ม Removal efficiency อาจจะได้โดยการเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยา แต่อาจไม่เป็นวิธีการที่เหมาะสมมากนัก หากต้องเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยานานเกินไป

Reaction time (min)	Influent (C_o)	Effluent (C_e)	C_e/C_o	$-\ln(C_e/C_o)$
Start	10.00	10.00	1.0000	0.0000
10	10.00	8.98	0.8984	0.1071
20	10.00	7.08	0.7080	0.3453
30	10.00	6.56	0.6565	0.4208

ตารางที่ 3 แสดงผลของ Kinetic removal rate of TNT removal



ภาพที่ 10 แผนภูมิ ของ Kinetic removal rate of TNT removal (สมการ $-\ln(C_e/C_o)=kT$)

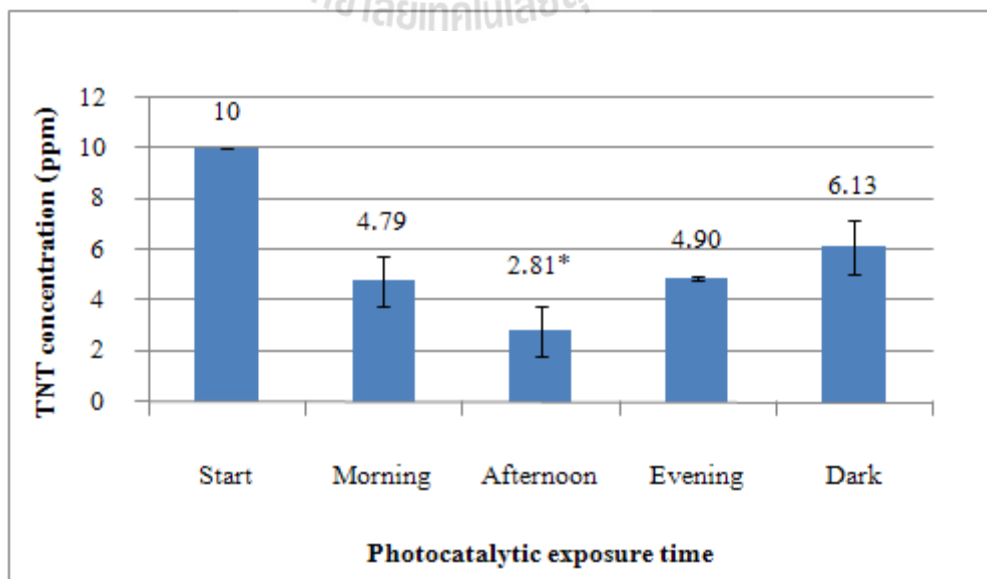
จากผลการศึกษา Optimum time and Removal efficiency (%) สามารถนำมาหาค่า Kinetic removal rate of TNT removal ได้จาก สมการ $-\ln(C_e/C_o)=kT$ จากผลการทดลองที่แสดงในตารางที่ 3 และภาพที่ 10 พบว่า ค่า Kinetic removal rate (k) = 0.0147 min^{-1} ค่าความเชื่อมั่น 96.05 % แสดงว่าอัตราการกำจัดสารมีความสัมพันธ์กันเป็นเชิงเส้นระหว่างตัวแปรต้นกับตัวแปรตามซึ่งมีค่า R^2 เข้าใกล้ 1 (0.9605)

2.3 การศึกษาความสามารถของแสงแดดในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ในการย่อยสลายสารไตรไนโตรโทลูอินในน้ำ

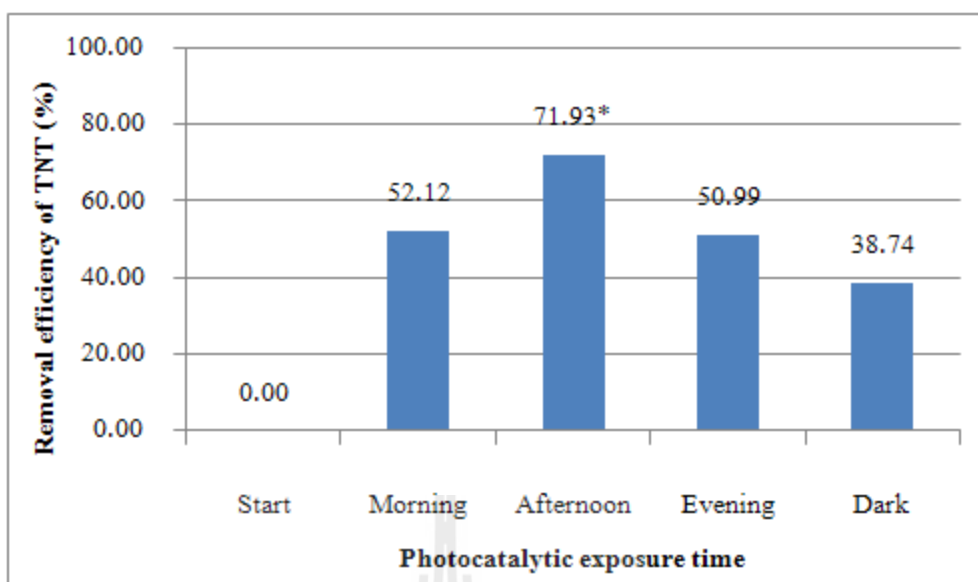
การทดสอบความสามารถของแสงแดดในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ในการย่อยสลายสารไตรไนโตรโทลูอิน โดยการทดสอบภายใต้แสงแดดตามธรรมชาติกับภาวะที่บดแสง ในระยะเวลา ปริมาณสารที่เท่ากัน เพื่อเปรียบเทียบค่าความสามารถในการกำจัดของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ภายใต้สภาวะมีแสงแดดเป็นตัวกระตุ้น ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4 และแผนภูมิที่ 11 ช่วง pH ของสารละลายในระหว่างการทดลองจะอยู่ในช่วง 6.1-8.0

Photocatalytic exposure time (30 min)	TNT Concentration (ppm)			Light Intensity (x100 Lux)	Air Temp (°C)	Average concentration (ppm)	SD	Removal efficiency of TNT (%)
	Rep1	Rep2	Rep3					
Start	10.00	10.00	10.00	-	25	10.00	0.0000	0.00
Morning	3.85	5.78	4.73	383-470	33	4.79	0.9685	52.12
Afternoon	2.07	3.89	2.45	770-838	41	2.81	0.9596	71.73
Evening	4.90	4.85	4.96	368-827	35	4.90	0.0533	50.99
Dark	6.21	5.02	7.14	-	25	6.13	1.0634	38.74

ตารางที่ 4 แสดงผลของ Photocatalytic exposure time and Removal efficiency (%)



(ก)



(ข)

ภาพที่ 11 แผนภูมิ ของ TNT concentration (ก) และ Removal efficiency (%) (ข)

* แสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเทียบกับชุดทดสอบภายใต้ภาวะไม่มีแสง

ความสามารถของแสงแดดในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ ในการย่อยสลายสารไตรโนโตรโทลูอิน โดยการทดสอบภายใต้แสงแดดในระยะเวลา 30 นาที ในแต่ละช่วงเวลาในการทำปฏิกิริยา โดยใช้ปริมาณอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ 2,000 ppm เพื่อเปรียบเทียบค่าความสามารถในการกำจัดของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ภายใต้สภาวะมีแสงแดดเป็นตัวกระตุ้น การศึกษาผลของ Photocatalytic exposure time ต่อ TNT concentration และ Removal efficiency (%) แสดงในตารางที่ 4 และภาพที่ 11 พบว่าประสิทธิภาพของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ในการทำปฏิกิริยากับสารไตรโนโตรโทลูอินที่ปนเปื้อนในน้ำขึ้นอยู่กับช่วงเวลาในการทำปฏิกิริยา (เช้า, บ่าย และเย็น) โดยมี Removal efficiency สูงสุดที่ช่วงบ่าย (12-13 น) ที่ 71.93 % ในขณะที่ช่วงเช้า และเย็น พบว่ามีค่า Removal efficiency ใกล้เคียงกัน คือ 52.12 % และ 50.99 % ตามลำดับ และผลการทดลองพบว่าหากไม่มีแสงแดดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ พบว่ามีค่า Removal efficiency แค่ 38.74 % เท่านั้น จากการศึกษาในครั้งนี้อาจสรุปได้ว่าแสงแดดสามารถเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Photocatalyst) ในการทำปฏิกิริยาระหว่างอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์กับสารไตรโนโตรโทลูอิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเวลาในช่วงบ่าย ที่มีความเข้มแสงมากกว่าช่วงเวลาอื่น

บทที่ 4

บทสรุป

สรุปผลการวิจัย

การศึกษาประสิทธิภาพของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์การบำบัดน้ำปนเปื้อนสารไตรโนโตรโทลูอิน โดยการใช้น้ำปนเปื้อนสารไตรโนโตรโทลูอินที่เกิดจากการสังเคราะห์ นำมาบำบัดและย่อยสลายด้วยอนุภาคของนาโนซิงค์ออกไซด์ (nZnO) วัตถุประสงค์ในการวิจัยในครั้งนี้ เพื่อศึกษาปริมาณที่เหมาะสม (Optimum dosages) ในการทำปฏิกิริยา แปรผันระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา เพื่อกำหนดอัตราการย่อยสลาย (Degradation rate or Removal efficiency) และ อัตราการกำจัดเคลื่อนที่ (Kinetic Removal Rate) รวมทั้งศึกษาความสามารถของแสงแดดในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ในการย่อยสลายสารไตรโนโตรโทลูอินในน้ำ

ผลการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน พบว่า อนุภาคนาโนของนาโนซิงค์ออกไซด์ที่นำมาใช้ มีขนาดเล็กกว่า 100 นาโนเมตร ขนาดและรูปร่างของอนุภาคมีความหลากหลาย แต่โดยส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 40-80 นาโนเมตร บางครั้งรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนที่มีขนาดต่างๆ กัน อาจมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางมากกว่า 10 ไมครอน ผลการวัดพื้นที่ผิวของอนุภาคนาโนของนาโนซิงค์ออกไซด์พบว่ามีค่าเฉลี่ย $9.56 \pm 0.04 \text{ m}^2/\text{g}$ และมีความบริสุทธิ์ถึง 99.98%

การศึกษาประสิทธิภาพของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์การบำบัดน้ำปนเปื้อนสารไตรโนโตรโทลูอิน การเตรียมน้ำตัวอย่างที่ปนเปื้อนสารไตรโนโตรโทลูอิน เตรียมโดยใช้สารมาตรฐานของสารไตรโนโตรโทลูอิน (2, 4, 6-Trinitrotoluene) ใช้เป็นตัวอย่งน้ำปนเปื้อนสารไตรโนโตรโทลูอิน ความเข้มข้น 10 mg/L การศึกษาดำเนินการโดยเติมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ทิ้งไว้ในระยะเวลาที่ต้องการ หลังจากนั้นวัดปริมาณสารไตรโนโตรโทลูอินที่เหลือ

การศึกษาประสิทธิภาพและกำหนดปริมาณที่เหมาะสม (Optimum dosages) ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ในการย่อยสลายสารไตรโนโตรโทลูอินที่ปนเปื้อนในน้ำการกำหนดปริมาณที่เหมาะสม (Optimum dosage) ของอนุภาคนาโนโดย การแปรผันปริมาณของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 1,000, 2,000 และ 3,000 ppm ใช้ในการทำปฏิกิริยากับสารที่เอ็นที เป็นระยะเวลา 20 นาที หลังจากนั้นตรวจสอบปริมาณที่เอ็นทีที่เหลือหลังจากการทำปฏิกิริยา เพื่อหาค่าปริมาณของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เหมาะสม (Optimum dosage) เพื่อใช้ค่าปริมาณดังกล่าวในการทดลองต่อไป

จากผลการศึกษา Optimum time ในรูปของ Degradation rate และ Removal efficiency (%) และ อัตราการกำจัดเคลื่อนที่ (Kinetic Removal Rate) โดยการใช้ค่าความเข้มข้นที่เหมาะสมของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (Optimum dosage) มาใช้ในการทำปฏิกิริยา โดยจะมีการแปรผันของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 10, 20 และ 30 นาที

ผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ในการทำปฏิกิริยากับสารไตรโนโตรโทลูอินที่ปนเปื้อนในน้ำ ไม่สูงมาก และพบว่า ที่ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ 2,000 ppm และ 3,000 ppm มีค่า Removal efficiency ใกล้เคียงกัน (29.20 % และ 29.43 % ตามลำดับ) ในขณะที่ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ 1,000 ppm พบว่า มีค่า Removal efficiency แค่ 18.02 % เท่านั้น ถ้าต้องการเพิ่ม Removal efficiency อาจต้องเพิ่มปริมาณอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ มากกว่า 3,000 ppm จากผลการศึกษา Optimum time and Removal efficiency (%) พบว่า ประสิทธิภาพของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ในการทำปฏิกิริยากับสารไตรโนโตรโทลูอินที่ปนเปื้อนในน้ำ แปรผันกับเวลา (10, 20 และ 30 นาที) ในการทำปฏิกิริยา โดยมี Removal efficiency สูงสุดที่ระยะเวลา 30 นาที ที่ 34.35 % เมื่อเปรียบเทียบค่าความสามารถในการกำจัดของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ภายใต้สภาวะมีแสงแดดเป็นตัวกระตุ้น การศึกษาผลของ Photocatalytic exposure time ต่อ TNT concentration และ Removal efficiency (%) พบว่า ประสิทธิภาพของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ในการทำปฏิกิริยา กับสารไตรโนโตรโทลูอินที่ปนเปื้อนในน้ำ ขึ้นอยู่กับช่วงเวลาในการทำปฏิกิริยา (เช้า, บ่าย และเย็น) โดยมี Removal efficiency สูงสุดที่ช่วงบ่าย ที่ 71.93 % ในขณะที่ช่วงเช้า และเย็น พบว่ามีค่า Removal efficiency ใกล้เคียงกัน คือ 52.12 % และ 50.99 % ตามลำดับ จากการศึกษาในครั้งนี้สรุปได้ว่าการใช้อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ในการทำปฏิกิริยา กับสารไตรโนโตรโทลูอินที่ปนเปื้อนในน้ำอาจมีประสิทธิภาพไม่สูงมาก แต่หากใช้แสงแดดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Photocatalyst) ในการทำปฏิกิริยาสามารถเพิ่ม Removal efficiency ได้ถึง 71.93 %

ข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัยในครั้งนี้ ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในการเพิ่มประสิทธิภาพของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ในการย่อยสลายสารไตรโนโตรโทลูอินที่ปนเปื้อนในน้ำ ดังนี้

1. ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในการเพิ่มประสิทธิภาพของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ในการย่อยสลายสารไตรโนโตรโทลูอินที่ปนเปื้อนในดิน
2. ควรมีการศึกษาถึงผลของความเข้มของแสงแดดที่เพิ่มขึ้น ต่อประสิทธิภาพของ อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ ในการย่อยสลายสารไตรโนโตรโทลูอินที่ปนเปื้อนในน้ำ และดิน
3. ควรมีการศึกษาถึงผลของแสง ultraviolet โดยใช้หลอดกำเนิดแสง ultraviolet ต่อประสิทธิภาพของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ในการย่อยสลายสารไตรโนโตรโทลูอินที่ปนเปื้อนในน้ำ และดิน
4. ควรมีการศึกษาถึงผลของ Catalysts ตัวอื่นๆ เช่น KCl, NaCl เป็นต้น ต่อประสิทธิภาพของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ในการย่อยสลายสารไตรโนโตรโทลูอินที่ปนเปื้อนในน้ำ และดิน
5. ควรนำผลการวิจัยไปประยุกต์ใช้จริงหรือทดลองภาคสนามเพิ่มเติมได้ในเบื้องต้น ในกรณีเกิดการปนเปื้อนสารไตรโนโตรโทลูอิน ทั้งจากการซ่อมรถปกติ หรือจากอุบัติเหตุจากการระเบิด

บรรณานุกรม

Abdullah M., Shibamoto S. and Okuyama K. (2004). Synthesis of ZnO/SiO₂ nanocomposites emitting specific Luminescence color. *Optical Materials*, 26, 95-100.

ACGIH. (1993). Threshold limit values and biological exposure indices for 1993-1994. American Conference of Governmental Industrial Hygienists. Cincinnati, OH.

Adamia G., Ghogoberidze M., Graves D., Khatisashvili G., Kvesitadze G., Lomidze E., Ugrekhelidze D. and Zaalishvili G. (2006). Absorption, distribution, and transformation of TNT in higher plants. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 64, 136-145.

El-Shall M.S., Graiver D. and Pernisz U. (1995). Synthesis and characterization of nanoscale zinc oxide particles: I. Laser vaporization/condensation technique. *NanoStructured Materials*, 6, 297-300.

Fouad O.A., Ismail A.A., Zaki Z.I. and Mohamed R.M. (2006). Zinc oxide thin films prepared by thermal evaporation deposition and its photocatalytic activity. *Applied Catalysis B: Environmental*, 62, 144-149.

Freeman D.J. and Colitti O.A. (1982). Removal of explosives from load-assemble-pack wastewater (pink water) using surfactant technology. *Proc Ind Waste Conf.*, 36, 383-394.

Hundal L.S., Singh J., Bier E.L., Shea P.J., Comfort S.D. and Powers WL. (1997). Removal of TNT and RDX from water and soil using Iron metal. *Environmental Pollution*, 97, 55-64.

Jain M.R., Zinjarde S.S., Deobagkar D.D. and Deobagkar D.N. (2004). 2,4,6-Trinitrotoluene transformation by a tropical marine yeast *Yarrowia Lipolytica* NCIM 3589. *Marine Pollution Bulletin* 49, 783-788.

Jiamjitranich, W., Polprasert, C., and Parkpian, P. (2009). Risk management program and technology application of hazardous substances at Chulachomklao Royal Military Academy (CRMA) and Military bases: In case of trinitrotoluene (TNT). *CRMA Annual Conference*, Chulachomklao Royal Military Academy, Nakhon Nayok, Thailand.

Jiamjitranich, W., Polprasert, C., Parkpian, P., Delaune, R.D. and Jugsujinda, A. (2010). Environmental factors influencing remediation of TNT-contaminated water and soil with nanoscale zero-valent iron particles. *J. Environ. Sci. Health. A: Toxic/Hazard. Sub. Environ. Eng.*, 45(3), 263-274.

Jiamjitranich, W., Polprasert, C., Parkpian, P. and Kosanlavit R. (2012a). Enhanced Phytoremediation Efficiency of TNT-Contaminated Soil by Nanoscale Zero Valent Iron, *International*

Proceedings of Chemical, Biological & Environmental Engineering: Environment and Industrial Innovation, 35, 82-86.

Jiamjitranich, W., Polprasert, C., Parkpian, P. Laurent F., and Kosanlavit R. (2012b). The tolerance efficiency of *Panicum maximum* and *Helianthus annuus* in TNT-contaminated soil and nZVI-contaminated soil, *J. Environ. Sci. Health. A: Toxic/Hazard. Sub. Environ. Eng.*, 47(11), 1506-1513.

Kanga K.H., Limb D.M. and Shin H. (2006). Oxidative-coupling reaction of TNT reduction products by manganese oxide. *Water Research*, 40, 903-910.

Kraus D.L., Henchy C.D., Keirn M.A., *et al.* (1985). U.S. Department of Defense Superfund implementation at a former TNT manufacturing facility. 6th National Conference on Management of Uncontrolled Hazardous Waste Sites, Nov. 4-6. Washington DC, Silver Spring, MD: Hazardous Materials Control Research Institute.

Levine B.S., Furedi E.M., Gordon D.E., *et al.* (1990a). Toxic interactions of the munitions compounds TNT and RDX in F344 rats. *Fundam Appl Toxicol.*, 15, 373-380.

Masciangioli T. and Zhang W.X. (2003). Environmental technologies at the Nanoscale. *Environmental Science & Technology*, March 1, 102-108.

Nefso E.K., Burns S.E. and McGrath C.J. (2005). Degradation kinetics of TNT in the presence of six mineral surfaces and ferrous iron. *Journal of Hazardous Materials B123*, 79-88.

Pennington J.C. and Patrick W.H. Jr. (1990). Adsorption and desorption of 2,4,6-trinitrotoluene by soils. *J Environ Qual.*, 19, 559-567.

Price C.B., Brannon J.M. and Hayes C.A. (1995). Transformation of 2,4,6-trinitrotoluene under controlled Eh/pH conditions. Technical Report IRRP-95-5, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.

Price C.B., Brannon J.M. and Hayes C.A. (1997). Effect of redox potential and pH on TNT transformation in soil-water slurries. *Journal of Environmental Engineering* 123, 988-992.

Spanhel L. and Anderson M.A. (1991). New route to prepare ultrafine ZnO particles and its reaction mechanism. *J. Am. Chem. Soc.*, 113, 2826.

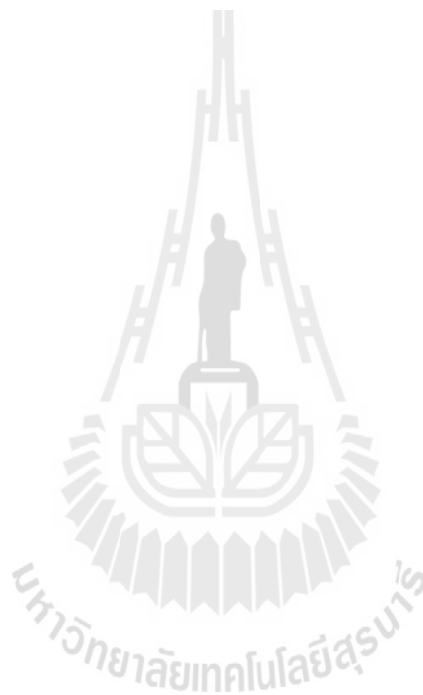
Tan E.L., Ho C.H., Griest W.H., *et al.* (1992). Mutagenicity of trinitrotoluene and its metabolites formed during composting. *Journal of Toxicology and Environmental Health*, 36, 163-175.

U.S.Army. (1980). Environmental fate of RDX and TNT. Final Report, Contract no. DAMD-17-77-C-7026. Frederick, MD: U.S. Army Medical Research and Development Command, Fort Detrick.

U.S.DHHS. (1995). Toxicological profile for 2,4,6-Trinitrotoluene. U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, Agency for Toxic Substance and Disease Registry.

U.S.EPA. (1991). Integrated Risk Information System (IRIS). Risk Estimate for Carcinogenicity and Reference Dose for Oral Exposure for 2,4,6-Trinitrotoluene. Online file, Office of Health and Environmental Assessment, Cincinnati, OH.

Welch R.E. (2007). Reduction of 2,4,6-Trinitrotoluene with nanoscale zero valent iron. The Russ College of Engineering and Technology, Ohio University. Ohio.



ประวัตินักวิจัย

อาจารย์ ดร. ราชนทร์ โกศลวิตร ทำงานในตำแหน่งอาจารย์ประจำสาขาวิชาชีววิทยา ระหว่างปี พ.ศ. 2544-2555 ปัจจุบันทำงานในตำแหน่งอาจารย์สังกัดสาขาวิชากายวิภาคศาสตร์ สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำเร็จการศึกษาระดับ Ph.D จาก School of Medicine, Dentistry and Biomedical Sciences, Queen's University of Belfast, U.K., M.Sc in Medical Sciences, Glasgow University, U.K, B.Sc in Agricultural Technology, Faculty of Science and Technology, Nakhon Ratchasima Rajabhat University, M.Eng in Nuclear Technology, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, B.Sc in Radiological Technology, Faculty of Associated Medical Science, Chiang Mai University อาจารย์ ดร. ราชนทร์ โกศลวิตร เคยดำรงตำแหน่งรองผู้อำนวยการเทคโนโลยีสุรนารี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ระหว่างปี พ.ศ. 2549-2552 และเคยดำรงตำแหน่งรองผู้อำนวยการ และผู้อำนวยการศูนย์นวัตกรรมและเทคโนโลยีการศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ระหว่างปี พ.ศ. 2552-2555

