



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (เทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

เทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
สาขา ภาควิชา

เรื่อง การประยุกต์อนุภาคเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ขนาดนาโนเมตร (NZVI) ในการบำบัดเมโทลาคลอร์และไซโคลไนท์

Application of Nano Zero Valent Iron Particle (NZVI) in Treating Metolachlor and Cyclonite

นามผู้วิจัย นางสาวประภัสสร สุนทรโชติ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ตุลวิทย์ สถาปนารู, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์จักรกฤษณ์ มหัจฉริยวงศ์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

()

(รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่..... เดือน..... พ.ศ.....

สิงสิงห์ มตาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การประยุกต์อนุภาคเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ขนาดนาโนเมตร (NZVI)
ในการบำบัดเมโทลาคลอร์และไซโคลไนท์

Application of Nano Zero Valent Iron Particle (NZVI) in Treating Metolachlor and Cyclonite

โดย

นางสาวประภัสสร สุนทรโชติ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2554

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ประภัศร สุนทรโชติ 2554: การประยุกต์อนุภาคเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ขนาดนาโนเมตร (NZVI) ในการบำบัดเมโทคลออร์และไซโครไนท์ ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม) สาขาวิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ศุภวิทย์ สถาปนจารุ, Ph.D. 95 หน้า

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการนำอนุภาคเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ขนาดนาโนเมตร (nano zero valent iron, NZVI) มาบำบัดเมโทคลออร์และไซโครไนท์ ผลการทดลองพบว่าเมื่อนำ NZVI ปริมาณ 1% (w/v) มาบำบัดเมโทคลออร์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 mg/L และเมื่อนำ NZVI ปริมาณ 0.25% (w/v) มาบำบัดไซโครไนท์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 mg/L ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุดโดยมีประสิทธิภาพมากกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ ภายในระยะเวลาสัมผัส 120 นาที จลศาสตร์ของการบำบัดสารทั้งสองสอดคล้องกับสมการ pseudo-first-order โดยค่าคงที่ของการบำบัด (destruction rate constant, k_{obs}) เป็น $0.218 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ และ $3.91 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ สำหรับเมโทคลออร์ และไซโครไนท์ ตามลำดับ การศึกษาผลของค่าความเป็นกรด-ด่าง เกลือของอะลูมิเนียม รวมทั้งสภาวะออกซิเจน (aerobic condition) และสภาวะไร้ออกซิเจน (anaerobic condition) ในการบำบัดเมโทคลออร์และไซโครไนท์โดย NZVI พบว่าประสิทธิภาพของการบำบัดเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างลดลง ($\text{pH } 4 > \text{pH } 7 > \text{pH } 10$) และเมื่อมีการเพิ่มปริมาณเกลือของอะลูมิเนียม ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, AlCl_3) ในการบำบัดสารทั้งสองในสภาวะไร้ออกซิเจนยังให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าการบำบัดในสภาวะไร้ออกซิเจน นอกจากนี้การนำ NZVI กลับมาใช้ใหม่โดยผ่านการล้างและไม่ผ่านการล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกพบไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดทั้งเมโทคลออร์และไซโครไนท์

Prapatsorn Suntornchot 2011: Application of Nano Zero Valent Iron Particle (NZVI) in Treating Metolachlor and Cyclonite. Master of Science (Environmental Technology and Management), Major Field: Environmental Technology and Management, Department of Environmental Science. Thesis Advisor: Assistant Professor Tunlawit Satapanajaru, Ph.D. 95 pages.

These research objective was to study the effectiveness of nano zero valent iron (NZVI) in treating metolachlor and cyclonite. The result had showed that 1% (w/v) of NZVI dose for treating 100 mg/L metolachlor and 0.25% (w/v) of NZVI dose for treating 20 mg/L cyclonite gave the best effectiveness. The efficiency of metolachlor and cyclonite were higher than 70 % within 120 minutes. The destruction of both metolachlor and cyclonite followed pseudo-first-order kinetic reaction. The destruction rate constant (k_{obs}) was $0.218 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ for metolachlor, $3.91 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ for cyclonite. The effect of pH solutions, aluminum salts and aerobic-anaerobic conditions were determined. The effectiveness of treating both chemicals by NZVI enhanced when pH (pH 4 > pH 7 > pH 10) was decreased and aluminium salt ($\text{Al}(\text{SO}_4)_3$, AlCl_3) was added. The effectivenesses of treating metolachlor and cyclonite in anaerobic condition were higher than treating in aerobic condition. In addition, recovery of NZVI by washing of NZVI and non washing NZVI were not able to enhance the destruction efficiencies.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ตุลวิทย์ สถาปนจารุ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาในเรื่องการเรียน การค้นคว้าวิจัย และคำแนะนำด้านต่างๆ ที่เกี่ยวกับงานวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ Professor Dr. Steve D. comfort, The School of Natural Resource Institute of Agriculture and Resource, University of Nebraska Lincoln, USA. ที่ให้ความอนุเคราะห์ให้สถานที่ และเครื่องมือในการวิเคราะห์ตัวอย่าง ตลอดจนให้คำปรึกษา และให้แนะนำในการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักรกฤษณ์ มหัจฉริยวงศ์ หัวหน้าภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และอาจารย์ ดร.ทรรศนีย์ พฤษาสีทธิ อาจารย์ประจำภาควิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความกรุณาเป็นประธานกรรมการ และผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ในการสอบปากเปล่าขั้นสุดท้าย และให้คำแนะนำ ตรวจสอบ และแก้ไขวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ที่สนับสนุนทุนวิจัยโครงการการบำบัดสารมลพิษอินทรีย์โดยใช้อนุภาคโลหะขนาดนาโนที่ยึดติดกับวัสดุที่มีพื้นผิวปรับสภาพประจำปี 2551 และบัณฑิตวิทยาลัยที่สนับสนุนทุนอุดหนุนการค้นคว้า และวิจัยประเภทวิทยานิพนธ์ ระดับบัณฑิตศึกษาประจำปีงบประมาณ 2553 และทุนสนับสนุนการเสนอผลงานวิจัยแบบปากเปล่าในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ ปี 2553

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ น้องสาว และญาติๆ ตลอดจนเพื่อนๆ ปริญญาตรีสิ่งแวดล้อมรุ่นที่ 9 เพื่อนปริญญาโทรุ่นที่ 4 พี่ๆ และน้องๆ ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ตลอดจนเพื่อนและพี่ที่ University of Nebraska Lincoln ที่ให้การสนับสนุนและเป็นที่กำลังใจให้ผู้วิจัยมาโดยตลอด และขอขอบพระคุณผู้ที่ให้ความช่วยเหลือ และให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้ซึ่งมิได้เอ่ยนามในที่นี้ทุกๆ ท่าน

ประภัสสร สุนทรโชติ

กุมภาพันธ์ 2554

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(6)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	45
อุปกรณ์	45
วิธีการ	47
ผลและวิจารณ์	58
สรุปและข้อเสนอแนะ	83
สรุป	83
ข้อเสนอแนะ	83
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	84
ภาคผนวก	92
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	95

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ค่าครึ่งชีวิตและ LD_{50} ของสารปราบศัตรูพืช	7
2	ปริมาณและการนำเข้าของสารอันตราย	13
3	สารกำจัดวัชพืชในกลุ่มฟอสเฟตอินทรีย์ (organophosphorus herbicides)	14
4	สารกำจัดวัชพืชในกลุ่มฟีน็อกซี (phenoxyacetic herbicides)	15
5	สารกำจัดวัชพืชในกลุ่มเบนโซอิก (benzoic acid herbicides)	16
6	สารกำจัดวัชพืชในกลุ่มไดโนโตรอะนิลีน (dinitroaniline herbicides)	17
7	สารกำจัดวัชพืชในกลุ่มเอไมด์ (amide herbicides)	18
8	สารกำจัดวัชพืชในกลุ่มคาร์บาเมตและไทโอคาร์บาเมต (carbamates and thiocarbamates herbicides)	19
9	สารกำจัดวัชพืชในกลุ่มไนทริล (nitrile herbicides)	20
10	สารกำจัดวัชพืชในกลุ่มซิมเมทริคอลไตรอะซีน (symetricaltriazine herbicides)	21
11	สารกำจัดวัชพืชในกลุ่มยูเรีย (urea herbicides)	22
12	สารกำจัดวัชพืชในกลุ่มยูราซิล (uracil herbicides)	23
13	สารกำจัดวัชพืชในกลุ่มไพริดีเนียม (pyrimidium herbicides)	24
14	คุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของเมโทลาคลอร์	25
15	ค่า K_{oc} , K_d ของเมโทลาคลอร์	26
16	สารก่อระเบิดกลุ่มไนทรามิน (nitramine)	29
17	สารก่อระเบิดกลุ่มไนโตรอะโรมาติก (nitroaromatics)	30
18	สารจุดระเบิด	30
19	คุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของไซโครไนท์	32
20	ค่าคงที่การบำบัด (destruction rate constant, k_{obs}) และค่าคงที่จำเพาะการเกิดปฏิกิริยา (specific reaction rate constant, k_{SA}) ของเมโทลาคลอร์โดยใช้ NZVI	62
21	ค่าคงที่การบำบัด (destruction rate constant, k_{obs}) เมโทลาคลอร์โดยใช้ NZVI ปริมาณ 1% (w/v) อะลูมิเนียมซัลเฟต ($Al_2(SO_4)_3$) และอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($AlCl_3$) ปริมาณ 0.05% (w/v) และ 0.1% (w/v)	67

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
22	ค่าคงที่การบำบัด (destruction rate constant, k_{obs}) และค่าคงที่จำเพาะการเกิดปฏิกิริยา (specific reaction rate constant, k_{SA}) เมโทคลอร์ โดยใช้ NZVI ภายใต้สภาวะออกซิเจน (aerobic condition) และสภาวะไร้ออกซิเจน (anaerobic condition)	68
23	ค่าคงที่การบำบัด (destruction rate constant, k_{obs}) และค่าคงที่จำเพาะการเกิดปฏิกิริยา (specific reaction rate constant, k_{SA}) ของไซโครไนท์ โดยใช้ NZVI	72
24	ค่าคงที่การบำบัด (destruction rate constant, k_{obs}) ของการบำบัดไซโครไนท์ โดยใช้ NZVI ปริมาณ 0.25 % (w/v) อะลูมิเนียมซัลเฟต ($Al_2(SO_4)_3$) และ อะลูมิเนียมคลอไรด์ ($AlCl_3$) ปริมาณ 0.05 % (w/v) และ 0.1% (w/v)	78
25	ค่าคงที่การบำบัด (destruction rate constant, k_{obs}) และค่าคงที่จำเพาะการเกิดปฏิกิริยา (specific reaction rate constant, k_{SA}) ของไซโครไนท์ โดยใช้ NZVI ภายใต้สภาวะออกซิเจน (aerobic condition) และสภาวะไร้ออกซิเจน (anaerobic condition)	80

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	สูตรโครงสร้างทางเคมีของ (ก) กรดไพริดีน (ข) พิคอลแรม	17
2	โครงสร้างทางเคมีของเมโทลาคลอร์	25
3	สูตรโครงสร้างทางเคมีของไนโตรกลีเซอรอล	28
4	โครงสร้างทางเคมีของไซโครไนท์	31
5	การใช้อนุภาคเหล็กขนาดนาโนเมตรสำหรับบำบัดของเสียอันตรายที่ปนเปื้อนใน ตัวกลางต่างๆ	39
6	รูปแบบการนำอนุภาคเหล็กขนาดนาโนเมตรมาใช้บำบัดน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนจริง (ก) แนวกำแพงปฏิกิริยา (permeable reactive barrier, PRB) (ข) การใช้โดยตรง (injection well)	39
7	ปฏิกิริยาอันดับศูนย์ (zero order)	41
8	ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (first order) และปฏิกิริยาอันดับสอง (second order)	42
9	(ก) ตู้ปราศจากอากาศ (anaerobic chamber)(ข) อนุภาคเหล็กขนาดนาโนเมตร หลังจากการเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 4,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 40 นาที	47
10	อนุภาคเหล็กขนาดนาโนเมตรหลังจากที่ใช้บำบัดเมโทลาคลอร์และไซโครไนท์	51
11	อนุภาคเหล็กขนาดนาโนเมตร (NANO FER 25S) ที่ได้จากบริษัท Nanoiron,S.R.O.	58
12	(ก) ลักษณะของอนุภาคเหล็กขนาดนาโนเมตร (NANO FER 25S) โดยกล้อง จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) และ (ข) องค์ประกอบของอนุภาคเหล็กขนาดนาโนเมตร(Nanofer 25s)โดย Energy- dispersive X-ray spectroscopy (EDX))	59
13	การบำบัดเมโทลาคลอร์ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 mg/L โดยใช้ NZVI ปริมาณ 0.5 % (w/v) 1% (w/v) และ 5% (w/v)	61
14	การบำบัดเมโทลาคลอร์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 mg/L ที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 4.7 และ 10 โดยใช้ NZVI ปริมาณ 1% (w/v)	64
15	การบำบัดเมโทลาคลอร์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 mg/L โดยใช้ NZVI ปริมาณ 1%(w/v) (ก) อะลูมิเนียมซัลเฟต ($Al_2(SO_4)_3$) และ(ข) อะลูมิเนียมคลอไรด์ ($AlCl_3$) ปริมาณ 0.05% (w/v) และ 0.1% (w/v)	66

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
16	การเกิดปฏิกิริยา dehalogenation (ก) ที่ผิวของเหล็ก (ข) โดยผ่านตัวกลาง (ค) ที่เกี่ยวข้องกับไฮโดรเจน 69
17	การบำบัดไซโครไนท์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 mg/L โดยใช้ NZVI ปริมาณ 0.05 % (w/v) 0.1% (w/v) และ 0.25% (w/v)) 70
18	วิถีทาง (pathway) ของการบำบัดไซโครไนท์โดยอนุภาคเหล็กขนาดนาโนเมตร 71
19	การบำบัดไซโครไนท์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 mg/L ที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 4 7 และ 10 โดยใช้ NZVI ปริมาณ 0.25% (w/v) 75
20	การบำบัดไซโครไนท์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 mg/L โดยใช้ NZVI ปริมาณ 0.25% (w/v) (ก) อะลูมิเนียมซัลเฟต (Al ₂ (SO ₄) ₃) และ (ข) อะลูมิเนียมคลอไรด์ (AlCl ₃) ปริมาณ 0.05% (w/v) และ 0.1% (w/v) 77
21	(ก) การเกิดสนิมเหล็ก และ(ข) การกัดกร่อน ของเหล็ก 78
22	การบำบัด (ก) เมโทคลอร์ที่ความเข้มข้น 100 mg/L โดย RNZVI และ ANZVI ปริมาณ 1% (w/v) และ(ข)ไซโครไนท์ที่ความเข้มข้น 20 mg/L โดย RNZVI และ ANZVI ปริมาณ 0.25% (w/v) 82

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ANZVI	=	Aged Nano Zero Valent Iron
C_0	=	Initial concentration
C	=	Residual concentration
k_{obs}	=	Destruction rate constant
k_{SA}	=	Specific reaction rate
NZVI	=	Nano Zero Valent Iron
RNZVI	=	Recovery Nano Zero Valent Iron

การประยุกต์อนุภาคเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ขนาดนาโนเมตร (NZVI) ในการบำบัดเมโทลาคลอร์และไซคลอนิท

Application of Nano Zero Valent Iron Particle (NZVI) in Treating Metolachlor and Cyclonite

คำนำ

ปัจจุบันทั่วโลกได้สังเกตเห็นและตระหนักในเรื่องของเสียอันตรายที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นในสิ่งแวดล้อม อันจะส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อม และสุขภาพอนามัยของมนุษย์และสิ่งมีชีวิต ซึ่งของเสียอันตรายมีอยู่มากมายหลายประเภท แบ่งเป็นของเสียอันตรายประเภทสารอนินทรีย์ (inorganic pollutant) ที่พบมากมักเป็นสารกลุ่มโลหะหนัก และของเสียอันตรายประเภทสารอินทรีย์ (organic pollutant) ซึ่งมีหลายชนิดที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม อาทิเช่น สารกำจัดศัตรูพืชและสัตว์ สารก่อระเบิด ตัวทำละลาย เป็นต้น โดยของเสียอันตรายประเภทสารอินทรีย์เหล่านี้มักขึ้นอยู่กับพื้นที่บริเวณนั้นหรือบริเวณใกล้เคียง เช่นพื้นที่เกษตรมักพบกลุ่มสารกำจัดศัตรูพืชและสัตว์ พื้นที่อุตสาหกรรมของกองทัพ หรือโรงงานผลิตอาวุธสงครามมักพบกลุ่มสารก่อระเบิด

สารกำจัดศัตรูพืชและสัตว์ (pesticide) เป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ใช้ฆ่า ทำลาย ปร่าบ หรือกำจัดสิ่งมีชีวิต ซึ่งอาจเป็นสัตว์หรือพืชที่มนุษย์ถือว่าเป็นศัตรูพืช และศัตรูของสัตว์หรือพืชที่มนุษย์เลี้ยงหรือปลูกไว้และต้องการป้องกัน โดยจะรวมถึงยาฆ่าแมลง (insecticide) ยากำจัดวัชพืช (herbicide) ยาฆ่าเชื้อรา (fungicide) ยากำจัดหนูและสัตว์จำพวกแพะ (rodenticide) สำหรับในประเทศไทยมีปริมาณและการนำเข้าของสารกำจัดวัชพืชในปริมาณที่มากกว่าสารกำจัดศัตรูพืชชนิดอื่น และมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น (สำนักควบคุมและวัสดุการเกษตร, 2553) การเพิ่มขึ้นของปริมาณสารกำจัดวัชพืช อาจเนื่องมาจากการเพิ่มพื้นที่เพาะปลูกทางการเกษตร เพื่อให้เพียงพอต่อการบริโภคของมนุษย์ จึงทำให้เกิดสารตกค้างในสิ่งแวดล้อมตามมา

สารก่อระเบิด (explosive material) เป็นของแข็งหรือของเหลว หรือสารผสมที่สามารถเกิดปฏิกิริยาทางเคมีด้วยตัวมันเอง ทำให้เกิดก๊าซที่มีความดันและความร้อนอย่างรวดเร็ว ก่อให้เกิดการระเบิดสร้างความเสียหายแก่บริเวณโดยรอบได้ สารก่อระเบิดมีทั้งชนิดไม่รุนแรงเช่น ดอกไม้ไฟ ประทัด ดินปืน เป็นต้น และชนิดที่รุนแรงเช่น สาร 2,4,6-ไตรไนโตรโทลูอิน

(2,4,6-trinitrotoluene; TNT) สารไซโคลไตรเมทิลีนไนทรามิน (cyclotrimethylene-nitramine; RDX) ซึ่งในประเทศสหรัฐอเมริกาพื้นที่ยุทธโภภณ์ของกองทัพเก่ามีการปนเปื้อนของสารก่อระเบิด มากกว่าพื้นที่ชุมชนทั่วไป (globalsecurity, 2010) อาทิเช่น กรมสรรพาวุธของรัฐเนบราสกา (Nebraska Ordnance Plant; NOP) ประเทศสหรัฐอเมริกา พบว่ามีปริมาณการปนเปื้อนของ ไซโครไนท์ในดินมากกว่า 5,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Hundal *et al.*, 1997)

นาโนเทคโนโลยีเป็นเทคโนโลยีใหม่ที่หลาย ๆ ประเทศให้ความสนใจ เนื่องจากสามารถ นำเข้าไปประยุกต์ใช้ได้กับหลาย ๆ ด้าน ไม่ว่าจะเป็นทางด้านอาหาร เสื้อผ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ตลอดจนงานด้านสิ่งแวดล้อมและการบำบัดของเสียอันตราย ซึ่งมีการทดลองใช้อนุภาคเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ขนาดนาโนเมตร (nano zero valent iron, NZVI) ในการบำบัดของเสียอันตรายที่ปนเปื้อน ในสิ่งแวดล้อม อาทิเช่น nitrobenzene (Bai *et al.*, 2009), trichlorobenzene (Zhu *et al.*, 2008), atrazine (Satapanajaru, 2008) เป็นต้น เนื่องจาก NZVI มีขนาดเล็ก พื้นที่ผิวสัมผัส (surface area) ที่ มากกว่าเหล็กขนาดปกติ และยังเป็นตัว reducing agent ที่รุนแรงเมื่อเทียบกับสารเคมีตัวอื่น จึงทำให้ มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง อีกทั้ง NZVI ยังปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อมด้วย (ชีวนันท์, 2552)

งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาการนำ NZVI มาใช้บำบัดสารมลพิษอินทรีย์กลุ่มสารกำจัดศัตรูพืช (herbicide) และสารก่อระเบิด (explosive) และทำการศึกษาผลของค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เกลือ ของอะลูมิเนียม (aluminium salt) รวมทั้งสภาวะที่มีออกซิเจน (aerobic condition) และสภาวะไร้ออกซิเจน (anaerobic condition) ต่อการบำบัดสารมลพิษทั้งสองกลุ่มนี้ เพื่อศึกษาปัจจัยใดมีผลต่อการ บำบัดโดย NZVI หากนำไปใช้ในพื้นที่ที่ปนเปื้อนจริง อีกทั้งยังศึกษาความเป็นไปได้ในการนำ NZVI กลับมาใช้ใหม่เพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่าย และใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างคุ้มค่า

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาประสิทธิภาพของการบำบัดเมโทคลออร์และไซโครไนท์โดยกระบวนการรีดักชัน (reduction) โดย NZVI
2. เปรียบเทียบผลของ NZVI ในการบำบัดเมโทคลออร์และไซโครไนท์ในสถานะที่มีออกซิเจน-สถานะไร้ออกซิเจน ผลของความเป็นกรด-ด่าง และผลของเกลืออะลูมิเนียม
3. ศึกษาประสิทธิภาพของการนำกลับมาใช้ใหม่ของ NZVI ในการบำบัดเมโทคลออร์และไซโครไนท์

การตรวจเอกสาร

1. มลพิษและภาวะมลพิษ

มลพิษ หมายถึง ของเสีย วัตถุอันตราย และมลสารอื่น ๆ รวมทั้งกาก ตะกอน หรือสิ่งตกค้างที่ถูกปล่อยทิ้งจากแหล่งกำเนิดมลพิษ หรือที่มีอยู่ในสิ่งแวดล้อมตามธรรมชาติ ซึ่งก่อให้เกิดผลกระทบต่อคุณภาพสิ่งแวดล้อมหรือเป็นอันตรายต่อสุขภาพอนามัยของประชาชน โดยสารมลพิษนี้รวมถึง รังสี ความร้อน แสง เสียง กลิ่น ความสั่นสะเทือน หรือเหตุรำคาญอื่น ๆ ที่เกิดหรือถูกปล่อย ออกจากแหล่งกำเนิดมลพิษด้วย (กรมควบคุมมลพิษ, 2535)

ภาวะมลพิษ หมายถึง สภาวะที่สิ่งแวดล้อมเปลี่ยนแปลงหรือปนเปื้อนโดยมลพิษซึ่งทำให้คุณภาพของสิ่งแวดล้อมเสื่อมโทรมลง เช่น มลพิษทางน้ำ มลพิษทางอากาศ มลพิษในดิน มลพิษทางเสียง เป็นต้น (กรมควบคุมมลพิษ, 2535)

2. ของเสียอันตราย

2.1 ความหมายของเสียอันตราย

ขยะอันตรายหรือของเสียอันตราย (Hazardous Waste) หมายถึง ของเสียที่มีองค์ประกอบหรือปนเปื้อนหรือมีลักษณะความเป็นอันตรายได้แก่ระเบิดได้ ไวไฟ ก่อให้เกิดปฏิกิริยารุนแรง (ออกซิไดซ์และเปอร์ออกไซด์) มีพิษ ก่อให้เกิดโรค กัมมันตรังสี ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรม กัดกร่อน ก่อให้เกิดการระคายเคือง และอันตรายอย่างอื่นไม่ว่าจะเป็นเคมีภัณฑ์ หรือสิ่งอื่นใดที่อาจทำให้เกิดอันตรายแก่บุคคล สัตว์ พืช ทรัพย์สิน หรือสิ่งแวดล้อม (กรมควบคุมมลพิษ, 2535)

2.2 แหล่งที่มาของเสียอันตราย

ของเสียในสิ่งแวดล้อมอาจมีที่มาจากแหล่งธรรมชาติ เกิดขึ้นและถูกปล่อยจากปรากฏการณ์ธรรมชาติ เช่น ภูเขาไฟระเบิด เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการปนเปื้อนที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ ของเสียอาจมีการรั่วไหล หรือปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมแบบที่ตั้งใจ และไม่ตั้งใจ โดยแหล่งที่มาของของเสียอันตรายสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แหล่งหลักดังนี้ (อลิสตา, 2553)

2.2.1 แหล่งที่มาแบบระบุตำแหน่งได้ (point source)

เป็นแหล่งของเสียอันตรายที่สามารถระบุแหล่งที่มาได้อย่างชัดเจน เช่น จุดปล่อยของเสียของอุตสาหกรรม (industrial discharge) เตาเผาขยะอุตสาหกรรม (industrial waste incinerator) ระบบบำบัดของเสีย เป็นต้น

2.2.2 แหล่งที่มาแบบไม่สามารถระบุตำแหน่ง (non-point source)

เป็นแหล่งของเสียอันตรายที่ไม่สามารถระบุได้อย่างชัดเจน เช่น ของเหลวที่ไหลจากแหล่งเกษตรกรรมที่ปนเปื้อนด้วยสารปราบวัชพืชหรือปุ๋ยสังเคราะห์ ตะกอนดินที่มีการปนเปื้อนด้วยสารมลพิษ สารมลพิษในอากาศ การทับถมของฝุ่นผงหรืออนุภาคต่างๆ ในอากาศ เป็นต้น สารมลพิษที่กระจายตัวอยู่ในบริเวณต่างๆ เหล่านี้ไม่สามารถที่จะระบุได้ว่ามาจากแหล่งใด

นอกจากการระบุแหล่งที่มาของของเสียอันตรายตามข้างต้นแล้ว ยังสามารถระบุได้จากแหล่งผลิตหรือแหล่งที่มีการใช้สารในปริมาณมาก โดยของเสียอันตรายที่เกิดขึ้นจากการสังเคราะห์โดยมนุษย์เพื่อใช้ในกิจกรรมต่างๆ แหล่งของการผลิตสารเป็นสถานที่หนึ่งที่เป็นแหล่งกำเนิดหรือแหล่งที่มาของของเสียอันตรายที่สำคัญ นอกจากการผลิตแล้วเมื่อสารถูกขนส่งไปยังแหล่งที่มีการใช้ ไม่ว่าจะเป็นแหล่งเพาะปลูกทางการเกษตร แหล่งอุตสาหกรรมต่างๆ แหล่งการใช้สารเหล่านี้ก็เป็นแหล่งที่มาที่สำคัญแหล่งหนึ่งนำไปสู่การรั่วไหลและการปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม การรั่วไหลของของเสียอันตรายจากกระบวนการผลิตและกระบวนการใช้สารเหล่านี้จึงจัดเป็นแหล่งที่มาที่เกิดขึ้นอย่างไม่ตั้งใจ ภายหลังจากการผลิตและการใช้สารเหล่านี้ในกระบวนการต่างๆ แล้วสารที่เหลือจากกระบวนการส่วนมากจะถูกส่งไปยังระบบบำบัดก่อนปล่อยออกกระบบบำบัดนี้เองจึงจัดเป็นแหล่งที่มาอีกแหล่งหนึ่งที่สำคัญ เนื่องจากเป็นรอยต่อของการปล่อยของเสียสู่สิ่งแวดล้อม ระบบบำบัดจึงมีความสำคัญมากในการรวบรวมสารมลพิษต่างๆ เข้าไว้ด้วยกันจึงทำให้ความเข้มข้นของสารอยู่ในระดับสูง หากกระบวนการบำบัดไม่เหมาะสม หรือไม่มีประสิทธิภาพดีเท่าที่ควร การปล่อยออก (discharge) ของของเสียจากระบบบำบัดจะเป็นการปล่อยของเสียที่มีความเข้มข้นสูงออกสู่สิ่งแวดล้อมโดยตรง ซึ่งเป็นการปล่อยออกแบบตั้งใจและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสิ่งมีชีวิตในสิ่งแวดล้อมนั้นๆ

2.3 ประเภทของเสียอันตราย

เนื่องจากมลพิษเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม (ดิน น้ำ อากาศ) ต่อมนุษย์ และสิ่งมีชีวิตต่างๆ ในสิ่งแวดล้อม ดังนั้นสารมลพิษจึงควรครอบคลุมถึงของเสียอันตราย มูลฝอยติดเชื้อ (infectious waste) และน้ำชะขยะมูลฝอย (leachate) ซึ่งสารเหล่านี้ก็มีอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม และสิ่งมีชีวิตเช่นกันจึงได้มีการแยกของเสียอันตรายเป็นกลุ่มโดยอาศัยเกณฑ์ต่างๆ ดังนี้ (อลิสตา, 2553)

2.3.1 สารมลพิษที่มีความสำคัญ (priority pollutant) สารมลพิษที่มีลักษณะดังต่อไปนี้ จัดว่าเป็นสารมลพิษที่ก่อให้เกิดผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมและสิ่งมีชีวิตสูง สารมลพิษในกลุ่มนี้จะจำแนกจากลักษณะดังนี้

2.3.1.1 ปริมาณของสารมลพิษที่มีการผลิตและปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม สารเคมีบางชนิดพบมากในกระบวนการผลิตของภาคอุตสาหกรรม ซึ่งการใช้และการผลิตสารเคมีในปริมาณมากอาจส่งผลให้มีการรั่วไหลและปนเปื้อนออกสู่สิ่งแวดล้อมผ่านทางกระบวนการบำบัดที่ไม่เหมาะสม และในบางครั้งเกิดจากการรั่วไหลหรืออุบัติเหตุในการขนส่ง ฯลฯ ซึ่งผลที่เกิดขึ้นจะเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม สารเหล่านี้จัดเป็นสารมลพิษที่ถูกปล่อยออกแบบไม่ตั้งใจ ตัวอย่างสารที่มีการผลิตในปริมาณมากและการปนเปื้อนและตกค้างในสิ่งแวดล้อมเช่น สารคลอโรเบนซีน เบนซีน เป็นต้น ในทางตรงกันข้ามการปนเปื้อนตกค้างในสิ่งแวดล้อมของสารประกอบบางชนิดเกิดจากความตั้งใจของมนุษย์ เช่น การปนเปื้อนตกค้างของสารปราบศัตรูพืชในดินซึ่งเกิดจากความตั้งใจใช้ในการเกษตรกรรม เป็นต้น

2.3.1.2 ความคงทนของสารมลพิษเหล่านี้ในสิ่งแวดล้อม (persistent) สารมลพิษที่มีความคงทนสูงในสิ่งแวดล้อมจัดว่าเป็นสารมลพิษที่สามารถก่อให้เกิดผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมได้สูง เนื่องจากความคงทนของสารมลพิษในสิ่งแวดล้อมจะเป็นการเพิ่มโอกาสในการเสี่ยงในการสัมผัส รับเข้าสู่ และสะสมในร่างกายของสิ่งมีชีวิต และก่อให้เกิดผลเสียตามมา นอกจากนี้ความคงทนในสิ่งแวดล้อมสูงยังแสดงถึงความยากต่อการย่อยสลายด้วยกระบวนการทางเคมีและกายภาพ และการที่สารเหล่านี้คงทนในสิ่งแวดล้อมได้นาน จะเป็นการเพิ่มการกระจายตัว และสร้างความเสียหายต่อสิ่งมีชีวิตในสิ่งแวดล้อมได้มากขึ้น โดยค่าความคงทนของสารมลพิษแต่ละชนิดสามารถวัดได้จากค่า residence time หรือค่าครึ่งชีวิต (half life) ตัวอย่างของค่าครึ่งชีวิตของสารกำจัดศัตรูพืชแสดงในตารางที่ 1

เนื่องจากสารมลพิษที่มีความคงทนในสิ่งแวดล้อมสามารถส่งผลกระทบอย่างมากต่อสิ่งมีชีวิตในสิ่งแวดล้อมนั้นๆ และสิ่งแวดล้อมใกล้เคียง ดังนั้น The UN Environmental Program (UNEP) จึงได้จำแนกสารมลพิษที่มีลักษณะสมบัตินี้เป็นกลุ่มของสารมลพิษอีกกลุ่มหนึ่ง ซึ่งเป็นกลุ่มของเสียที่มีความคงทนในสิ่งแวดล้อมและคงทนต่อการย่อยสลายทางเคมี ชีวภาพและกายภาพ ซึ่งเรียกว่า persistent organic pollutants (POPs) ตัวอย่างของสารมลพิษที่มีความคงทนในสิ่งแวดล้อมสูง ได้แก่ สารประกอบคลอรีนและสารที่มีฮาโลเจนเป็นองค์ประกอบ (chlorinated compound / halogenated compounds) ได้แก่ สารปราบศัตรูพืชอัลดริน (aldrin) คลอเดน(chlordane) ดีดีที (DDT) ไดเอลดริน (dieldrin) เฮปตาคลอร์ (heptachlor) ไมเร็กซ์ (mirex) เฮกซะคลอโรเบนซีน (hexachlorobenzene) สาร polychlorinated biphenyl (PCBs) สาร polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins และสาร polychlorinated dibenzofurans เป็นต้น

ตารางที่ 1 ค่าครึ่งชีวิต และ LD₅₀ ของสารปราบศัตรูพืช

สารปราบศัตรูพืช	ประเภทของสารออกฤทธิ์	ค่า LD ₅₀ ต่อสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม (mg/L)	ค่าครึ่งชีวิต (วัน)
คลอไพริฟอส (chlorpyrifos)	สารกำจัดแมลง	135 – 163	10 – 120
พาราไรออน (parathion)	สารกำจัดแมลง	2 – 10	30 -180
ไกลโฟเสต (glyphosate)	สารกำจัดวัชพืช	3,530 – 5,600	30 – 174
ฟินามิฟอส (fenamiphos)	สารกำจัดหนอน	6 -10	28 - 90

ที่มา: Sigh and Walker (2006)

2.3.1.3 การสะสมของสารมลพิษในสิ่งแวดล้อม (bioaccumulation)

เป็นการสะสมของสารมลพิษในสิ่งมีชีวิตโดยการดูดซับไว้ในร่างกายมากกว่าการขับถ่ายสารเหล่านั้นออกมา ดังนั้นหากสารที่มีความคงทนต่อสิ่งแวดล้อมหรือมีค่าครึ่งชีวิตสูงจะส่งผลให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตได้ ตัวอย่างของการสะสมสารมลพิษสู่ร่างกายสิ่งมีชีวิตได้แก่ การทำงานของมนุษย์ในสิ่งมีชีวิตที่ปนเปื้อนด้วยสารมลพิษปรอทในรูปของเมทิลเมอร์คิวรี ซึ่งสารมลพิษนี้

เป็นสารที่ละลายน้ำน้อย และละลายได้ดีในไขมัน ดังนั้นเมื่อนมนุษย์ถูกปนเปื้อนด้วยสารมลพิษนี้ และดูดซับสารนี้เข้าร่างกาย สารมลพิษจะถูกถ่ายโอนไปยังส่วนต่างๆ ของร่างกายรวมทั้งสะสมอยู่ในอวัยวะต่างๆ ของมนุษย์ เช่น ไต ตับ และสมอง การสะสมสารมลพิษนี้ในสมองส่งผลให้เกิดภาวะปรอทเป็นพิษ (mercury poisoning) ก่อให้เกิดความเสียหายต่อระบบประสาทของมนุษย์ในที่สุด

2.3.1.4 ความเป็นพิษของสารมลพิษต่อสิ่งมีชีวิตในสิ่งแวดล้อม (toxicity)

ความเป็นพิษของสารมลพิษส่งผลเสียอย่างร้ายแรงต่อสิ่งมีชีวิตในสิ่งแวดล้อมไม่ว่าจะเป็นมนุษย์ สัตว์ พืช โดยที่ความเป็นพิษของสารมลพิษแต่ละชนิดจะขึ้นอยู่กับปริมาณหรือระดับความเข้มข้นของสารมลพิษที่สิ่งมีชีวิตได้รับ (dose dependent) ความเป็นพิษที่มีต่อมนุษย์สามารถพิจารณาได้จากค่า LD_{50} (lethal dose 50) ซึ่งความเข้มข้นโดยน้ำหนักของสารที่ทำให้สิ่งมีชีวิตที่ตรวจสอบตายในอัตราร้อยละ 50 หน่วยของ LD_{50} คือมิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งหมายถึงมิลลิกรัมสารมลพิษที่ทำให้อัตราการตายของสิ่งมีชีวิตเป็นร้อยละ 50 เมื่อคิดเทียบต่อกิโลกรัมน้ำหนักของสิ่งมีชีวิตนั้นๆ โดยตัวอย่างของค่า LD_{50} ของสารกำจัดศัตรูพืชแสดงในตารางที่ 1 ผลเสียที่เกิดกับสิ่งมีชีวิตจากความเป็นพิษของสารมลพิษอาจเกิดแบบเฉียบพลัน (acute toxicity) หรือส่งผลเสียแบบเรื้อรัง (chronic toxicity)

2.3.2 แหล่งที่มาของสารมลพิษ

การปนเปื้อนของมลพิษในสิ่งแวดล้อมสามารถเกิดได้จากกระบวนการทางธรรมชาติ และกิจกรรมของมนุษย์ ดังนี้

2.3.2.1 กระบวนการทางธรรมชาติ อาทิเช่น

การเกิดไฟป่าที่เกิดจากกระบวนการทางธรรมชาติ เป็นสาเหตุทำให้เกิดการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ชนิดโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (polycyclic aromatic hydrocarbons; PAHs) ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งชนิดหนึ่ง

2.3.2.2 กิจกรรมของมนุษย์ อาทิเช่น

กิจกรรมทางการเกษตร เช่น การใส่สารเคมีบางชนิดลงในดิน หรือการฉีดพ่นสารปราบศัตรูพืช สารฆ่าแมลง เป็นต้น

กระบวนการผลิตของอุตสาหกรรม โดยสารมลพิษมักเกิดในขั้นตอนต่างๆของกระบวนการผลิต ซึ่งหากไม่มีการจัดการที่เหมาะสมหรือเกิดอุบัติเหตุ จะทำให้เกิดการปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมได้

2.3.3 ลักษณะและระดับความเป็นอันตรายของเสียอันตราย

องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมของประเทศสหรัฐอเมริกา (United States Environmental Protection Agency (U.S. EPA), 2004) ได้แบ่งลักษณะสมบัติเบื้องต้นของเสียอันตราย 4 ลักษณะ ได้แก่

2.3.3.1 สมบัติการกัดกร่อน (corrosivity) โดยของเสียอันตรายประเภทนี้มีความเป็นกรดสูง ($\text{pH} < 2$) หรือเป็นด่างสูง ($\text{pH} > 12.5$) โดยจะมีฤทธิ์ในการกัดกร่อนเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตหากสัมผัสโดยตรง และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมหรือระบบภายในร่างกาย โดยสารที่มีคุณสมบัติการกัดกร่อนได้แก่ สารประกอบฮาโลเจน หรือเกลือฮาโลเจน สารฮาโลอิดอินทรีย์ เป็นต้น

2.3.3.2 สมบัติการติดไฟ (ignitability) โดยของเสียอันตรายประเภทนี้เป็นวัตถุหรือเคมีภัณฑ์ที่ไวไฟ และสามารถจุดระเบิดได้ สามารถติดไฟได้ง่ายซึ่งก่อให้เกิดการเผาไหม้ได้ง่าย โดยทั่วไปจะเป็นสารที่มีจุดวาบไฟ (flash point) ต่ำกว่า 60 องศาเซลเซียส สามารถระเหยง่ายที่อุณหภูมิห้อง และความดันบรรยากาศ โดยสารที่มีคุณสมบัติการติดไฟ ได้แก่ ตัวทำละลายอินทรีย์ต่างๆ อะซิโตน เป็นต้น

2.3.3.3 สมบัติการเกิดปฏิกิริยา (reactivity) เป็นของเสียอันตรายที่มีคุณสมบัตินี้มักเป็นสารที่ไม่เสถียร สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ง่ายจึงก่อให้เกิดอันตรายในหลายๆด้าน เช่น เคมีภัณฑ์ออกซิไดซ์ และเคมีภัณฑ์เพอร์ไซด์ สารประกอบที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วและรุนแรงกับอากาศหรือน้ำ เช่น ด่างบางชนิด โลหะซีเซียม (Ce) เป็นต้น

2.3.3.4 สมบัติความเป็นพิษ (toxicity) เป็นของเสียอันตรายที่ก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต ทั้งความเป็นพิษแบบฉับพลัน (immediate หรือ acute toxicity) หรือความเป็นพิษเรื้อรัง (chronic toxicity) โดยสารมลพิษที่มีคุณสมบัติความเป็นพิษที่รุนแรงอาจก่อให้เกิดความเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรมได้

2.3.4 ความคล้ายคลึงของลักษณะสมบัติ เป็นการจำแนกของเสียอันตรายตามลักษณะทางกายภาพ เคมี หรือมลพิษที่เกิดขึ้นจากสิ่งมีชีวิตรวมทั้งสารชีวภาพต่างๆ โดยลักษณะทางกายภาพได้แก่ ความร้อน สี กลิ่น ความเป็นสารกัมมันตรังสี สารแขวนลอย ลักษณะทางเคมีได้แก่ กรด ด่าง เกลือสารปราบศัตรูพืช ธาตุพิษและโลหะหนัก สารอินทรีย์ และลักษณะทางชีวภาพได้แก่ แบคทีเรีย รา ไวรัส เชื้อโรคจากของเสียชุมชน เป็นต้น

2.3.5 ความคล้ายคลึงของโครงสร้างทางเคมี เช่นสายไฮโดรคาร์บอนสายตรง สารอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน เป็นต้น

2.3.6 ผลกระทบของสารมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม เช่นสารมลพิษต่อแหล่งน้ำ ทางอากาศ เป็นต้น

2.3.7 ชนิดของเสียอันตราย

2.3.7.1 ของเสียอันตรายประเภทสารอนินทรีย์ (inorganic pollutant) ที่พบมากมักเป็นสารกลุ่มโลหะหนัก ได้แก่ปรอท ตะกั่ว แคดเมียม ทองแดง สังกะสี แมงกานีส สารหนู และนิเกิล เป็นต้น

2.3.7.2 ของเสียอันตรายประเภทสารมลพิษอินทรีย์ (organic pollutant) มีหลายชนิดที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม อาทิเช่น สารกำจัดศัตรูพืชและสัตว์ สารก่อระเบิด ตัวทำละลาย เป็นต้น โดยสารมลพิษอินทรีย์มักขึ้นอยู่กับพื้นที่บริเวณนั้น หรือบริเวณใกล้เคียง เช่นพื้นที่เกษตรมักพบกลุ่มสารกำจัดวัชพืชและสัตว์ พื้นที่ยุทธโธปกรณ์ของกองทัพ หรือโรงงานผลิตอาวุธสงคราม มักพบกลุ่มสารก่อระเบิด

2.4 การเคลื่อนที่และเส้นทางของเสียอันตราย (อลิสตา, 2553)

ของเสียอันตรายที่ถูกปล่อยออกจากแหล่งต่างๆ ทั้งทางธรรมชาติ แหล่งอุตสาหกรรม แหล่งการเกษตร หรือแหล่งบำบัดของเสียต่างๆ สู่สิ่งแวดล้อมทั้งแบบตั้งใจหรือไม่ตั้งใจ ของเสียอันตรายนั้นจะถูกเรียกว่าสารปนเปื้อน (contaminant) ในสิ่งแวดล้อม สารเหล่านี้จะมีการเคลื่อนที่โดยใช้เส้นทาง (route) หรือวิถี (pathway) ต่างๆ จนกระทั่งมาถึงสิ่งมีชีวิต ซึ่งก่อให้เกิดผลเสียต่อสุขภาพและชีวิตของสิ่งมีชีวิตนั้นๆ โดยการเคลื่อนที่และเส้นทางการเคลื่อนที่ของสาร

มลพิษจนมาถึงสิ่งมีชีวิตนั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ลักษณะและตำแหน่งของแหล่งกำเนิดของสาร (เช่น บนผิวดิน ใต้ดิน แหล่งน้ำ เป็นต้น) สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของสารนั้นๆ (เช่น การระเหย การละลายน้ำ การดูดซับในดิน เป็นต้น) นอกจากนี้การเคลื่อนที่ของสารสู่สิ่งมีชีวิตในสิ่งแวดล้อมยังขึ้นอยู่กับตัวกลาง (transport medium) ต่างๆ ได้แก่ ดิน น้ำ อากาศ และสิ่งมีชีวิตในห่วงโซ่อาหาร

3. สารกำจัดศัตรูพืชและสัตว์ (pesticides)

สารกำจัดศัตรูพืชและสัตว์ (pesticide) อาจเป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ใช้ฆ่า ทำลาย ปร่าบ หรือกำจัดสิ่งมีชีวิตซึ่งอาจเป็นสัตว์หรือพืชที่มนุษย์ถือว่าเป็นศัตรูพืช และศัตรูของสัตว์หรือพืชที่มนุษย์เลี้ยงหรือปลูกไว้ และต้องการป้องกัน ตัวอย่างศัตรูเหล่านี้ได้แก่ ยุง แมลง แมลงทั่วไป เชื้อรา หนู แมลงสาบ ตัวเพลี้ย เป็นต้น ซึ่งสิ่งเหล่านี้เป็นภัยต่อพืชผลที่มนุษย์เพาะปลูกไว้มากที่สุด ดังนั้นสารกำจัดวัชพืชและสัตว์จึงรวมถึง ยาฆ่าแมลง (insecticide) ยากำจัดวัชพืช (herbicide) ยาฆ่าเชื้อรา (fungicide) ยากำจัดหนูและสัตว์จำพวกแทะ (rodenticide) (ศศิธร, 2545) โดยชนิดของสารกำจัดศัตรูพืชและสัตว์แบ่งออกได้ดังนี้ (ศุภมาส, 2545)

3.1 แบ่งโดยสภาพการออกฤทธิ์ภายในและภายนอกเซลล์พืช

3.1.1 สารกำจัดศัตรูพืชและสัตว์ประเภทสัมผัสผิวดิน (contact pesticides) หรือประเภทไม่ดูดซึม (nonsystemic) สารประเภทนี้จะจับอยู่ที่ผิวภายนอกเซลล์พืช ออกฤทธิ์โดยการสัมผัสกับกลุ่มเป้าหมาย

3.1.2 สารกำจัดศัตรูพืชและสัตว์ประเภทดูดซึม (systemic pesticide) ออกฤทธิ์โดยการดูดซึมเข้าสู่เซลล์พืช สารจะถูกดูดซึมเข้าไปในพืช และมีกลไกการออกฤทธิ์ทำลายหลังจากนั้น

3.2 แบ่งโดยโครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของสาร อาทิเช่น

- 3.2.1 กลุ่มคลอโรอินอินทรีย์ (organochlorine)
- 3.2.2 กลุ่มฟอสเฟตอินทรีย์ (organophosphate)
- 3.2.3 กลุ่มกรดคลอโรฟีน็อกซี (chlorophenoxy acid)
- 3.2.4 กลุ่มคาร์บาเมต (carbamate)

3.2.5 กลุ่มไตรอะซีน (triazine)

3.2.6 กลุ่มแทนที่ยูเรีย (substituted urea)

3.3 แบ่งโดยอาศัยกลุ่มเป้าหมาย

3.3.1 สารกำจัดแมลง (insecticide)

3.3.2 สารป้องกันและกำจัดโรคพืช (fungicide)

3.3.3 สารกำจัดวัชพืช (herbicide)

3.3.4 สารกำจัดไร (acaricide)

3.3.5 สารกำจัดหนู (rodenticide)

3.3.6 สารควบคุมการเจริญเติบโตของพืช (plant growth regulators, PGR)

3.3.7 สารกำจัดหอยและหอยทาก (mollussicide)

3.3.8 สารรมควันพิษ (fumigants)

3.3.9 สารกำจัดไส้เดือนฝอย (nematocide)

ในประเทศไทยมีปริมาณ และการนำเข้าของสารกำจัดวัชพืชในปริมาณที่มากกว่าสารกำจัดศัตรูพืชชนิดอื่น และมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่าปี 2550 มีปริมาณการนำเข้าสารกำจัดวัชพืชประมาณ 79,239,127 กก. ปี 2551 มีปริมาณการนำเข้าสารกำจัดวัชพืชประมาณ 68,824,594 กก. ปี 2552 มีปริมาณการนำเข้าสารกำจัดวัชพืชประมาณ 97,956,856 กก. (สำนักควบคุมและวัสดุการเกษตร, 2553) การเพิ่มขึ้นของปริมาณสารกำจัดวัชพืช อาจเนื่องมาจากการเพิ่มพื้นที่เพาะปลูกทางการเกษตร เพื่อให้เพียงพอต่อการบริโภคของมนุษย์ จึงทำให้เกิดสารตกค้างในสิ่งแวดล้อมตามมา

ตารางที่ 2 ปริมาณและการนำเข้าของสารอันตราย

ลำดับ	ประเภท	ปี 2550		ปี 2551		ปี 2552	
		ปริมาณ (กก.)	มูลค่า (บาท)	ปริมาณ (กก.)	มูลค่า (บาท)	ปริมาณ (กก.)	มูลค่า (บาท)
1.	สารกำจัดแมลง (insecticide)	21,589,657.95	3,745,747,849.98	25,331,804.31	4,577,470,388.48	24,680,168.90	3,972,447,198.25
2.	สารป้องกันและกำจัดโรคพืช (fungicide)	10,635,504.30	1,833,182,304.68	11,254,695.82	2,537,027,538.52	10,366,987.08	2,967,933,290.16
3.	สารกำจัดวัชพืช (herbicide)	79,239,127.14	8,914,131,188.14	68,824,594.71	11,487,037,763.36	97,956,856.41	9,338,498,815.25
4.	สารกำจัดไร (acaricide)	446,175.00	111,853,860.00	441,134.00	115,434,023	622,097.24	133,273,180.30
5.	สารกำจัดหนู (rodenticide)	206,660.00	26,131,725	224,490	35,136,564.69	222,490.01	25,784,622.08
6.	สารควบคุมการเจริญเติบโตของพืช (PGR)	-	-	1,875,566.00	211,350,230.79	2,107,459.63	183,017,953.30
7.	สารกำจัดหอยและหอยทาก (mollussicide)	693,205.00	41,716,618.44	792,250.00	61,876,704.00	695,387.50	47,170,497.87
8.	สารรมควันพิษ (fumigants)	1,086,612.00	139,160,427.84	1,132,237.00	154,860,1554.44	942,946.50	147,643,520.35
9.	สารกำจัดไส้เดือนฝอย (nematocide)	-	-	11,010	1,541,686	-	-

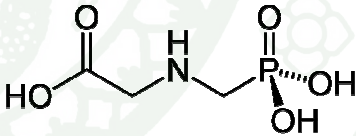
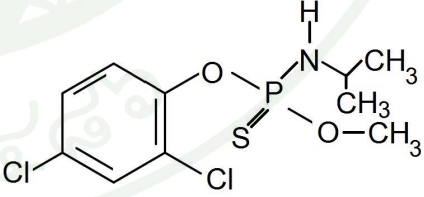
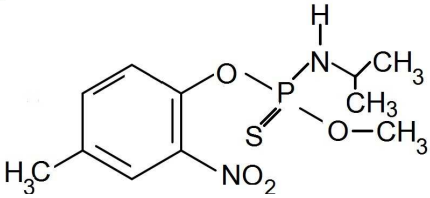
ที่มา: สำนักควบคุมและวัสดุการเกษตร (2553)

4. สารกำจัดวัชพืช (herbicide)

“สารกำจัดวัชพืช” เป็นสารเคมีใด ๆ ก็ตาม ที่นำมาใช้เพื่อฆ่าทำลายหรือยับยั้งการเจริญเติบโตของวัชพืช ไม่ว่าจะเป็นในขณะที่ยังงอกมาแล้วหรือยังเป็นเมล็ดอยู่ ตลอดจนชิ้นส่วนต่างๆ ของวัชพืชที่ขยายพันธุ์ได้ที่อยู่ในดินหรืออยู่บนดิน ซึ่งการควบคุมวัชพืชโดยใช้สารกำจัดวัชพืชเป็นวิธีที่นิยมมากเนื่องจากให้ผลที่รวดเร็ว สามารถทำงานได้ทันกับการเจริญเติบโตของวัชพืช โดยแบ่งตามโครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีได้ดังนี้ (ศุภมาศ, 2545)

4.1 กลุ่มฟอสเฟตอินทรีย์ (organophosphorus herbicides) เป็นกลุ่มของสารอินทรีย์ที่มีฟอสเฟตเป็นองค์ประกอบ ตัวอย่างเช่น ดีเอ็มพีเอ (DMPA), อะมิโปรฟอส (amiprophate) เป็นต้น สำหรับไกรโฟเสต (glyphosate) นั้นใช้ได้กับพืชหลายชนิด และเป็นสารกำจัดวัชพืชที่นิยม โดยใช้เป็นประเภทสัมผัสตายและฉีดพ่นทางใบ สูตรโครงสร้างทางเคมีของกลุ่มฟอสเฟตอินทรีย์แสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สารกำจัดวัชพืชในกลุ่มฟอสเฟตอินทรีย์ (organophosphorus herbicides)

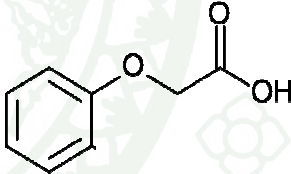
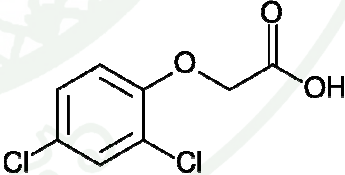
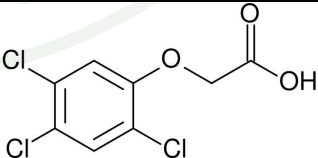
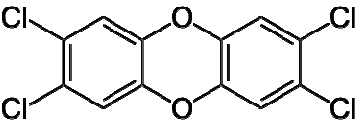
ชื่อสามัญ	สูตรโครงสร้าง
Glyphosate	
DMPA	
amiprophate	

ที่มา: Alan (2010)

4.2 กลุ่มฟีน็อกซี (phenoxyacetic herbicides) เป็นกลุ่มของสารอินทรีย์ที่มีกลุ่มกรดคลอโรฟีน็อกซี (chlorophenoxy acid, COOH) เป็นองค์ประกอบ นิยมใช้ในไร่ข้าวโพดและข้าวสาลี เป็นสารเลือกทำลาย (selective) กับวัชพืชใบกว้างโดยใช้ได้ดีในไร่ธัญพืชและพืชตระกูลถั่ว โดยสารในกลุ่มนี้มีความแตกต่างกันตามชนิดและตำแหน่งของสารที่เข้าไปแทนที่ในวง (ring) และความยาวของลูกโซ่อะลิฟาติก (aliphatic) ว่ามีอะตอมของคาร์บอนจำนวนเท่าใด รูปของสารที่มีจำหน่ายอยู่ในรูปเกลือและเอสเทอร์ ดังแสดงในตารางที่ 4

ความเป็นพิษของ 2,4-ดี (2,4-D) และ 2,4,5-ที (2,4-T) ต่อสัตว์มีไม่มาก ผิวหนังสามารถดูดซึม 2,4 ดี ได้น้อยมาก เมื่อใส่ลงไปในดินจะเสื่อมภายใน 1-4 สัปดาห์ซึ่งแล้วแต่นิคมของดิน ความชื้น อุณหภูมิ และการระบายอากาศของดิน ส่วนได้ออกซิเจนใช้เวลาในการสลายตัวในดินนานมาก จึงเป็นผลให้หลุดรอดเข้าสู่โซ่อาหารในสิ่งแวดล้อมได้

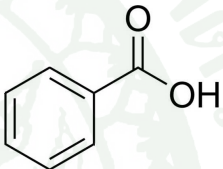
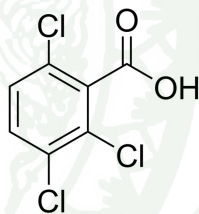
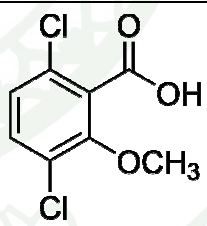
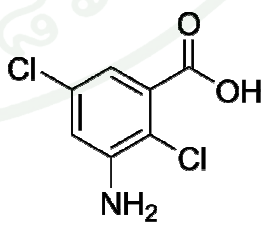
ตารางที่ 4 สารกำจัดวัชพืชในกลุ่มฟีน็อกซี (phenoxyacetic herbicides)

ชื่อสามัญ	สูตรโครงสร้าง
phonixy acid	
2,4-D	
2,4,5-T	
2,3,7,8-Tetrachlorodibenzodioxin	

ที่มา: Alan (2010)

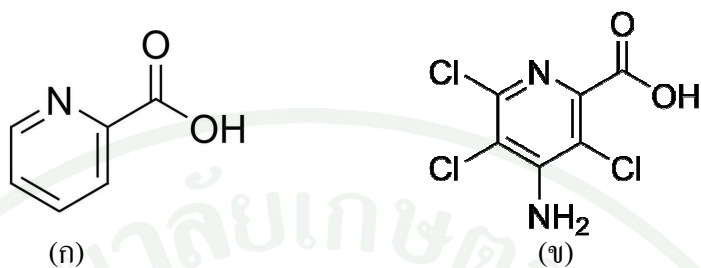
4.3 กลุ่มเบนโซอิก (benzoic acid herbicides) เป็นกลุ่มของสารอินทรีย์ที่มีกรดเบนโซอิก (benzoic acid) เป็นองค์ประกอบ ใช้ในการควบคุมวัชพืชรากลึกข้ามฤดู ตัวอย่างเช่น 2,3,6-ทีบีเอ (2,3,6- TBA) แต่ไคแคมบา (dicamba) และคลอแรมเบน (chloramben) เป็นสารที่เลือกทำลายจึงใช้ในพืชต่างๆได้ เช่น ไคแคมบาใช้ในข้าวโพด ข้าวฟ่าง ข้าวสาลี และในทุ่งหญ้า ส่วนคลอแรมเบนใช้ในพืชผัก เช่น หน่อไม้ฝรั่ง ข้าวโพด ถั่วลิสง มันเทศ ฟักทอง สูตรโครงสร้างทางเคมีของสารกลุ่มเบนโซอิกแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 สารกำจัดวัชพืชในกลุ่มเบนโซอิก (benzoic acid herbicides)

ชื่อสามัญ	สูตรโครงสร้าง
benzoic acid	
2,3,6-TBA	
dicamba	
chloramben	

ที่มา: Alan (2010)

4.4 กลุ่มกรดไพริดีน (pyridine herbicides) เป็นกลุ่มของกรดไพริดีน (pyridine acid) มีพิกลอรแอม (picloram) เป็นสารกำจัดวัชพืชประเภทดูดซึม ใช้ควบคุมวัชพืชใบกว้าง สูตรโครงสร้างทางเคมีของกลุ่มไพริดีนแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 สูตรโครงสร้างทางเคมีของ (ก) กรดไพริดีน (ข) พิกลอรแอม

ที่มา: Alan (2010)

4.5 กลุ่มไดโนโตรอะนิลีน (dinitroaniline herbicides) เป็นกลุ่มสารอินทรีย์ที่มี 2,6-ไดโนโตรอะนิลีน (2,6-dinitroaniline) เป็นองค์ประกอบ สารกำจัดวัชพืชประเภทนี้จะเลือกทำลาย และใช้ควบคุมวัชพืชรากออก การแทนที่ในตำแหน่งที่ 4 ของวงหรือในกลุ่มอะมิโน จะทำให้ได้สารฆ่าวัชพืชนิตต่างๆ ตัวอย่างเช่น ไตรฟลูราลิน (trifluralin) สูตรโครงสร้างทางเคมีของสารกลุ่มไดโนโตรอะนิลีนแสดงในตารางที่ 6

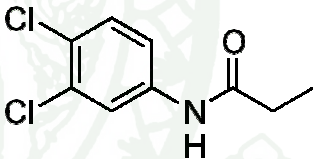
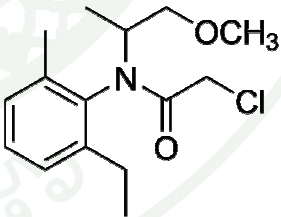
ตารางที่ 6 สารกำจัดวัชพืชในกลุ่มไดโนโตรอะนิลีน (dinitroaniline herbicides)

ชื่อสามัญ	สูตรโครงสร้าง
2,6-dinitroaniline	
trifluralin	

ที่มา: Alan (2010)

4.6 กลุ่มเอมายด์ (amide herbicides) สารกลุ่มนี้พัฒนามากจากกรดเอมายด์ (acid amide) เมื่อกลุ่มไฮดรอกซี (-OH) ของส่วนที่เป็นคาร์บอกซี (-COOH) ถูกแทนที่ด้วยกลุ่มอะมิโน (-NH₂) และหากกลุ่มแอลคิล (กลุ่ม R) เป็นเมทิล (-CH₃) จะมีโครงสร้างคล้ายกรดแอสซิติค จึงเรียกว่า อะเซตามายด์ (acetamide) สารกลุ่มนี้เป็นสารกำจัดวัชพืชประเภทเลือกทำลายสำหรับควบคุมวัชพืช วงศ์หญ้าเป็นส่วนใหญ่ ตัวอย่างเช่น โพรพานิล (propanil) เมโทลาคลอร์ (metolachlor) เป็นต้น สูตรโครงสร้างทางเคมีของสารกลุ่มเอมายด์แสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 สารกำจัดวัชพืชในกลุ่มเอมายด์ (amide herbicides)

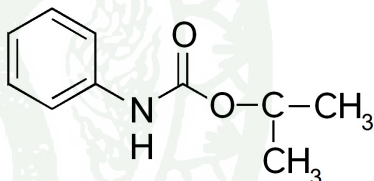
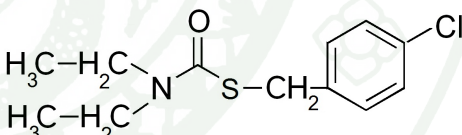
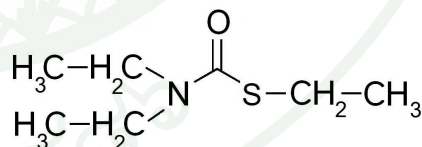
ชื่อสามัญ	สูตรโครงสร้าง
acid amide	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \\ \text{R}-\text{C}-\text{N}-\text{H} \\ \\ \text{H} \end{array}$
propanil	
metolachlor	

ที่มา: Alan (2010)

4.7 กลุ่มคาร์บาเมตและไทโอคาร์บาเมต (carbamates and thiocarbamates herbicides) สารกลุ่มนี้สังเคราะห์จากกรดคาร์บาเมต โดยที่สารทุกชนิดเป็นเอสเทอร์ของกรดคาร์บาเมต และสำหรับกลุ่มไทโอคาร์บาเมต มีอะตอมของกำมะถันเป็นส่วนประกอบของโมเลกุลแทนตำแหน่งกลุ่มไฮดรอกซีของกรดคาร์บาเมต สารกลุ่มคาร์บาเมตเป็นสารกำจัดวัชพืชที่มีผลต่อสภาพแวดล้อมต่ำ เนื่องจากเป็นสารที่มีพิษต่อสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมในระดับต่ำ ตกค้างในดิน

ในช่วงเวลาสั้น เคลื่อนย้ายในดินได้น้อยมาก และสลายตัวได้ด้วยจุลินทรีย์กลุ่มนอกเป้าหมาย ตัวอย่างของสารกำจัดวัชพืชในกลุ่มคาร์บาเมตและไทโอคาร์บาเมตแสดงในตารางที่ 8

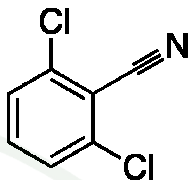
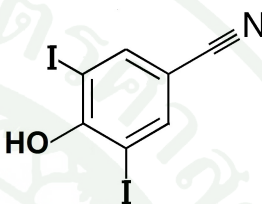
ตารางที่ 8 สารกำจัดวัชพืชในกลุ่มคาร์บาเมตและไทโอคาร์บาเมต (carbamates and thiocarbamates herbicides)

ชื่อสามัญ	สูตรโครงสร้าง
carbamic acid	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \\ \text{HO}-\text{C}-\text{N}-\text{H} \\ \\ \text{H} \end{array}$
ester of carbamic acid	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \\ \text{R3O}-\text{C}-\text{N}-\text{R1} \\ \\ \text{R2} \end{array}$
1. phynylcarbamates (propham)	
2. thiocarbamates (benthiocarb)	
(EPTC)	

ที่มา: Alan (2010)

4.8 กลุ่มไนทริล (nitrile herbicides) โครงสร้างหลักของสารกลุ่มนี้คือวงเพนนิลยึดติดกับกลุ่มไนทริล (C=N) และมีการแทนที่ตำแหน่งภายในวงด้วย OH⁻, Cl⁻, Br⁻ หรือ I⁻ ใช้ในการควบคุมวัชพืชใบกว้างฤดูเดียวที่ใช้ 2,4-ดี แล้วไม่ได้ผล เช่น ไดคลอเบนนิล (dichlobenil) ใช้ในสวนผลไม้เกือบทุกชนิด และไม่ประดับประเภทไม้ยืนต้น สูตรโครงสร้างทางเคมีของสารกลุ่มไนทริลแสดงในตารางที่ 9

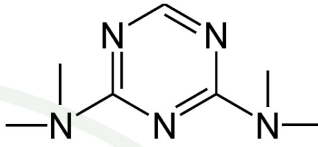
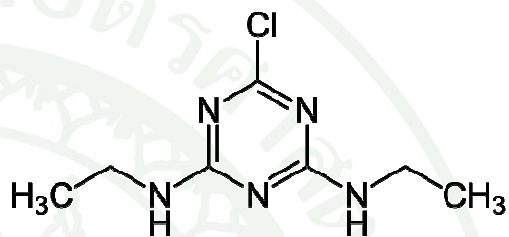
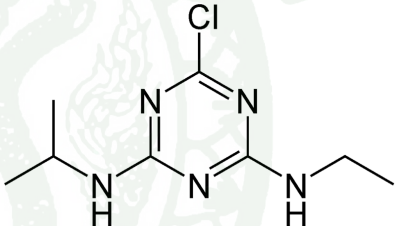
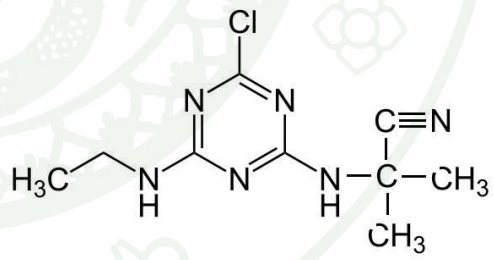
ตารางที่ 9 สารกำจัดวัชพืชในกลุ่มไนทริล (nitrile herbicides)

ชื่อสามัญ	สูตรโครงสร้าง
dichlobanil	
loxynil	

ที่มา: Alan (2010)

4.9 กลุ่มซิมเมทริกอลไตรอะซีน (symetcaltrianzine herbicides) โครงสร้างหลักของสารกลุ่มนี้ประกอบด้วยวงที่มีไนโตรเจนสามอะตอมสลับกับอะตอมคาร์บอน เป็นสารประเภทเลือกทำลายใช้แบบก่อนงอก สามารถควบคุมได้ทั้งวัชพืชใบแคบและใบกว้าง แต่ควบคุมใบกว้างได้ดีกว่าไซมาซีนนิม (simazine) ใช้ในข้าวโพดและสวนผลไม้ แอทราซีน (atrazine) นิยมใช้ในไร่นา ข้าวโพด ข้าวฟ่าง อ้อย สับปะรด และเนื่องจากแอทราซีนตกค้างอยู่ในดินนานมากจึงมีการผลิตไซยานาซีนเพื่อใช้ในข้าวโพดที่ให้ผลตกค้างในดินสั้นกว่า สูตรโครงสร้างทางเคมีของสารกลุ่มซิมเมทริกอลไตรอะซีนแสดงในตารางที่ 10

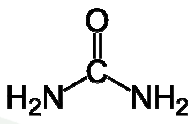
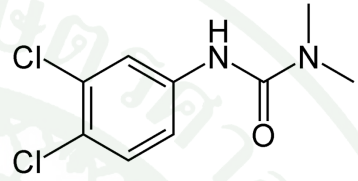
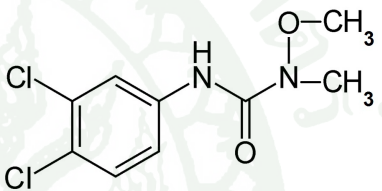
ตารางที่ 10 สารกำจัดวัชพืชในกลุ่มซิมเมตริกอลไตรอะซีน (symetricaltriazine herbicides)

ชื่อสามัญ	สูตรโครงสร้าง
โครงสร้างหลัก	
simazine	
atrazine	
cyanazine	

ที่มา: Alan (2010)

4.10 กลุ่มยูเรีย (urea herbicides) โครงสร้างหลักของสารกลุ่มนี้คือ ปุ๋ยยูเรีย และมีการแทนที่ไฮโดรเจนในกลุ่มอะมิโนแบบต่างๆ เป็นแบบเลือกทำลาย ใช้ได้ทั้งแบบก่อนงอกและหลังงอก ควบคุมใบกว้างและใบแคบ แต่ควบคุมใบกว้างได้ดีกว่า สารจะเข้าทางรากมากกว่าทางใบและลำต้น มีการสลายตัวโดยแสง (photodecomposition) เช่น ไดูรอน (diuron) ใช้ในสวนผลไม้ สับปะรด อ้อย ฝ้าย หน่อไม้ฝรั่ง สำหรับลินูรอนนิยมใช้ในข้าวโพด ข้าวฟ่าง ถั่วเหลือง ฝ้าย และมันฝรั่ง สูตรโครงสร้างทางเคมีของสารกลุ่มยูเรียแสดงในตารางที่ 11

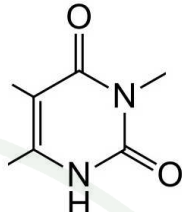
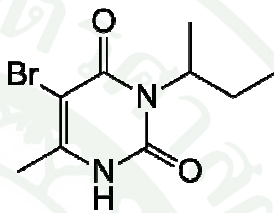
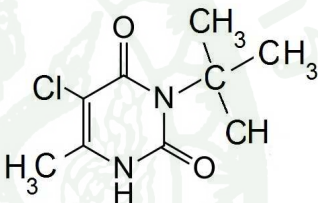
ตารางที่ 11 สารกำจัดวัชพืชในกลุ่มยูเรีย (urea herbicides)

ชื่อสามัญ	สูตรโครงสร้าง
โครงสร้างหลัก	
diuron	
linuron	

ที่มา: Alan (2010)

4.11 กลุ่มยูราซิล (uracil herbicides) โครงสร้างหลักของสารกลุ่มนี้คือ ยูราซิล เป็นสารกำจัดวัชพืชที่ใช้ควบคุมพืชในพื้นที่ที่ไม่มีการเพาะปลูก โดยจะให้ผลดีในพืชวงศ์หญ้าที่มีอายุข้ามปี สูตรโครงสร้างทางเคมีของสารกลุ่มยูราซิลแสดงในตารางที่ 12

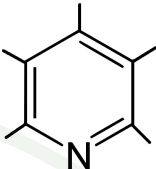
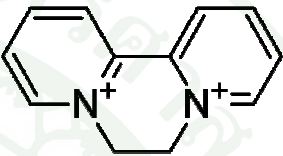
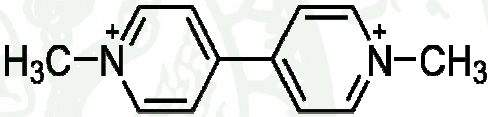
ตารางที่ 12 สารกำจัดวัชพืชในกลุ่มยูราซิล (uracil herbicides)

ชื่อสามัญ	สูตรโครงสร้าง
โครงสร้างหลัก	
bromacil	
terbacil	

ที่มา: Alan (2010)

4.12 กลุ่มไบไพริดีเลียม (pyrimidium herbicides) โครงสร้างหลักของสารกลุ่มนี้คือไพริดีน เป็นสารประเภทสัมผัสพืชตายและไม่เลือกทำลาย เช่น พาราควอต (paraquat) ควบคุมได้ทั้งวัชพืชใบแคบและใบกว้างที่มีอายุฤดูเดียว ไคควอต (diquat) นิยมใช้สำหรับวัชพืชน้ำเป็นส่วนใหญ่ นอกจากใช้พาราควอตในการกำจัดวัชพืชแล้ว ยังนิยมใช้ฉีดให้ใบพืชแห้งก่อนการเก็บเกี่ยว โดยทั้งพาราควอตและไคควอตถูกอนุภาคดินเหนียวดูดยึดติดไว้ได้ดี จึงไม่พบว่าสารเคมีทั้งสองสูตรควบคุมวัชพืชได้เมื่อลงสู่พื้นดิน โดยสูตรโครงสร้างทางเคมีของกลุ่มไบไพริดีเลียมแสดงในตารางที่ 13

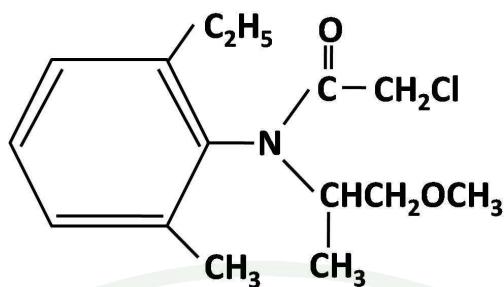
ตารางที่ 13 สารกำจัดวัชพืชในกลุ่มไพโรอิดิเลียม (pyrimidium herbicides)

ชื่อสามัญ	สูตรโครงสร้าง
โครงสร้างหลัก (pyridine)	
diquat	
paraquat	

ที่มา: Alan (2010)

เมโทลาคลอร์ (metolachlor)

เมโทลาคลอร์ หรือเรียกชื่อทางการค้าว่า Dual, Dual 8E, Bicep, Cycle หรือ Derby เป็นต้น เป็นสารกำจัดวัชพืชกลุ่มกรดเอไมด์ (acid amides) หรือคลอโรอะเซทานิไมด์ (chloroacetanilide) มีลักษณะโครงสร้างทางเคมีดังแสดงในภาพที่ 2 สูตรโมเลกุลคือ $C_{15}H_{22}ClNO_2$ เมโทลาคลอร์มีลักษณะเป็นของเหลวสีขาว และไม่มีกลิ่น สามารถละลายน้ำได้มาก แสดงในตารางที่ 14 นิยมใช้คลุกกลงไปในดินก่อนทำการปลูกพืช สามารถควบคุมวัชพืชพวกวงศ์หญ้าและวัชพืชพวกใบกว้างได้ดี ลักษณะอาการที่พืชได้รับพิษ ต้นกล้าบิดเบี้ยวโค้งงอ ใบอัดแน่นม้วนงอ ใช้ควบคุมวัชพืชในพื้นที่ปลูกข้าวโพด ถั่วเหลือง ฝ้าย ทานตะวัน และปอ เป็นต้น (William, 1994)



ภาพที่ 2 โครงสร้างทางเคมีของเมโทคลอร์

ตารางที่ 14 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเมโทคลอร์

คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี	รายละเอียด
สูตรโมเลกุล	$C_{15}H_{22}ClNO_2$
น้ำหนักโมเลกุล	283.80
ลักษณะทางกายภาพ	เป็นของเหลวสีขาว หรือสี tan ไม่มีกลิ่น
ความหนาแน่น	1.117 g/mL ที่ 20 °C
จุดหลอมเหลว	-40 °C
จุดเดือด	286 °C ที่ 760 mm Hg และ 100 °C ที่ 0.001 mm Hg
ความดันไอ	1.3×10^{-5} mm Hg ที่ 20 °C, 3.1×10^{-5} mm Hg ที่ 25 °C, 4.9×10^{-4} mm Hg ที่ 50 °C, 0.0053 mm Hg ที่ 75 °C, 0.041 mm Hg ที่ 100 °C, 0.24 mm Hg ที่ 125 °C
Henry's law constant	2.4×10^{-8} atm.m ³ /mol ที่ 25 °C
สภาพการละลาย	ละลายน้ำ 488 mg/mL ที่ 20 °C ละลายใน organic solvent ชนิดต่างๆ ที่ 25 °C เช่น สารละลาย acetone, benzene, ethanol, methanol, toluene, xylene และ hexane เป็นต้น
K_{ow}	794 ที่ 25 °C
ชื่อทางการค้า	Dual, Pennant, Bicep, Cycle, Derby(Ciba), Broadstrike

ที่มา: William (1994)

พฤติกรรมในพืช (William, 1994)

ลักษณะอาการที่พืชได้รับพิษ ต้นกล้าบิดเบี้ยวโค้งงอ ใบอัดแน่นม้วนงอ สำหรับใบที่ออกมาใหม่จะมีรอยขุ่น

การดูดซึมและการเคลื่อนย้าย (absorption/translocation) การดูดซึมเมโทลาคลอร์ส่วนมากจะดูดซึมไว้ที่เนื้อเยื่อส่วนต่างๆ และเคลื่อนย้ายผ่านทางท่อลำเลียงน้ำ (xylem) หรือทางท่อลำเลียงอาหาร (phloem) ขึ้นอยู่กับชนิดของวัชพืช เช่น วัชพืชใบกว้างจะมีการดูดซึมผ่านที่บริเวณใบเลี้ยง (hypocotyl) และเคลื่อนย้ายผ่านทางท่อลำเลียงน้ำ

กลไกการทำลาย (mechanism of action) เป็นสารกำจัดวัชพืชและสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืช สามารถเข้าสู่พืชได้โดยการซึมผ่านทางใบ สารจะออกฤทธิ์เฉพาะจุดที่ฉีดพ่น และสารนี้จะมีผลต่อการสังเคราะห์รงควัตถุพวกคาโรทีนอยด์ด้วย

พฤติกรรมในดิน (William, 1994)

การดูดซับ (adsorption) ของเมโทลาคลอร์ในดิน โดยส่วนมากอยู่ในดินเหนียวหรือดินที่มีสารอินทรีย์ (organic matter) เป็นองค์ประกอบปริมาณมาก โดยค่า soil organic carbon sorption coefficient; K_{oc} และ soil sorption coefficient; K_d จะแตกต่างกันไปตามลักษณะดินและปริมาณสารอินทรีย์ในดิน ดังแสดงในตารางที่ 15

ตารางที่ 15 ค่า K_o และ K_d ของเมโทลาคลอร์ในดินชนิดต่างๆ

คุณลักษณะของดิน	K_{oc}	K_d
Clay (0.5% OM, 42% clay, pH 5.9)	66.7	1.869
Sand (0.9% OM, 2.2% clay, pH 6.5)	21.6	0.108
Sandy loam (5% OM, 9.2% clay, pH 5.9)	74.4	2.157
Loam (1.2% OM, 11.2% clay, pH 7.6)	110.4	0.773

ที่มา: William (1994)

การเปลี่ยนรูป (transformation) ของเมโทคลออร์ โดยการเปลี่ยนรูปของเมโทคลออร์ด้วยกระบวนการย่อยสลายด้วยแสง (photodegradation) ในดิน sandy loam ที่อุณหภูมิ 20 °C มีค่า half-life เป็น 8 วัน และในน้ำที่อุณหภูมิ 8-45 °C มีค่า half-life เป็น 70 วัน นอกจากนี้การเปลี่ยนรูปของเมโทคลออร์ด้วยกระบวนการชีวภาพ (biodegradation) ในดิน sandy loam ที่อุณหภูมิ 25 °C ในสภาวะที่มีอากาศ และไม่มีอากาศมีค่า half-life เป็น 67 และ 81 วันตามลำดับ

ข้อมูลความเป็นพิษ (William, 1994)

เมื่อนำเมโทคลออร์ชนิด technical grade ไปทดสอบความพิษทางปากกับหนูมีค่า median lethal dose 50; LD₅₀ เป็น 2,877 mg/kg นำไปทดสอบทางผิวหนังกับกระต่ายมีค่า median lethal dose 50; LD₅₀ มากกว่า 2,000 mg/kg และเมื่อนำไปทดสอบทางระบบหายใจกับหนูที่เวลา 4 ชั่วโมง มีค่า median lethal concentration 50; LC₅₀ มากกว่า 4.3 mg/kg หากมนุษย์ได้รับสัมผัสหรือกินเข้าไปจะมีอาการระคายเคืองจนถึงเสียชีวิตได้

เมื่อนำเมโทคลออร์ทางการค้า (Dual 8E) ไปทดสอบความพิษทางปากกับหนูมีค่า median Lethal dose 50; LD₅₀ เป็น 2,500 - 2690 mg/kg นำไปทดสอบทางผิวหนังกับกระต่ายมีค่า (median Lethal dose 50) LD₅₀ มากกว่า 5,000 mg/kg และเมื่อนำไปทดสอบทางระบบหายใจกับหนูที่เวลา 4 ชั่วโมง มีค่า (median lethal concentration 50); LC₅₀ มากกว่า 2.45 mg/L หากมนุษย์ได้รับสัมผัสหรือกิน เข้าไปจะมีอาการระคายเคือง จนถึงเสียชีวิตได้

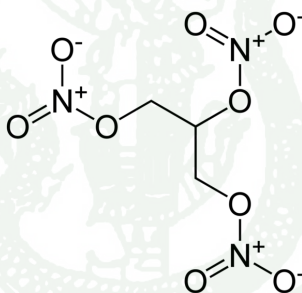
5. สารก่อระเบิด (explosive material)

การระเบิดเป็นการเกิดปฏิกิริยาที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วมาก จากของแข็งหรือของเหลวไปเป็นก๊าซ ซึ่งก๊าซที่เกิดขึ้นมีความดันเกิดค่อนข้างสูง ทำให้เกิดการระเบิดอย่างรุนแรงได้ สารก่อระเบิดที่มักพบบ่อยคือสารกลุ่มอะโรมาติก (aromatic) หรือ อะลิฟาติก (aliphatic) ที่มีกลุ่มไนโตรเจนประกอบอยู่ด้วย โดยในการทำให้เกิดระเบิดต้องใช้ความดันสูง หรือความเสียดทานหรือกระแสไฟฟ้า โดยแบ่งสารก่อระเบิดออกเป็น 2 กลุ่มดังนี้ (เกรียงศักดิ์, 2546)

5.1 สารก่อระเบิดชนิดไม่รุนแรง เช่น พวงดอกไม้เพลิง ประทัด ดินปืน เป็นต้น โดยสารเหล่านี้มีความรุนแรงประมาณ 80 m/s แต่อาจทำให้เกิดอันตรายต่อคนได้

5.2 สารก่อระเบิดชนิดรุนแรง เป็นสารก่อระเบิดที่มีความเสถียรมากกว่าชนิดไม่รุนแรง แต่เมื่อเกิดการระเบิดขึ้นจะมีความอันตรายมากถึง 6,400 m/s โดยได้ทำการแบ่งประเภทของสารก่อระเบิดชนิดรุนแรงไว้ดังนี้

5.2.1 กลุ่มอะลิฟาติกไนเตรตเอสเทอร์ (aliphatic nitrate esters) เป็นสารก่อระเบิดชนิดรุนแรงมาก โดยผลิตจากสารโพลีไฮดริกแอลกอฮอล์ (polyhydric alcohols) เช่น กลีเซอรอล (glycerol) หรือ pentaerythritol ทำปฏิกิริยากับกรดไนตริกเข้มข้น จะได้สารระเบิดไนโตรกลีเซอรอล (nitroglycerin) และ pentaerythritol tetranitrate โดยสารระเบิดไนโตรกลีเซอรอล มีสูตรทางเคมี ดังภาพที่ 3 เป็นสารที่ไม่เสถียร เกิดระเบิดขึ้นมาได้ง่าย ดังนั้นเวลาเก็บจึงต้องมีการเก็บไว้ในตัวดูดซับเพื่อให้เสถียร เช่น เก็บไว้ในภาชนะที่มีขี้เลื่อย หรือสารเฉื่อยอื่นๆ สำหรับสารระเบิด pentaerythritol tetranitrate เป็นสารที่นิยมนำมาเป็นตัวจุดระเบิด มีความรุนแรงมาก ในบางครั้งอาจนำมาผสมกับสาร 2,4,6-ไตรไนโตรโทลูอีน (2,4,6-trinitrotoluene; TNT) และสารไซโคลไตรเมทิลีนไนทรามิน (cyclotrimethylene-nitramine; RDX) เพื่อช่วยลดผลกระทบ ทำให้มีความเสถียรมากขึ้น

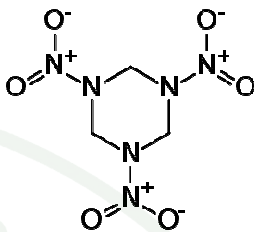
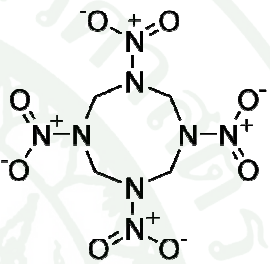
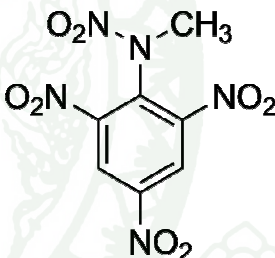


ภาพที่ 3 สูตรโครงสร้างทางเคมีของไนโตรกลีเซอรอล

ที่มา: Globalsecurity (2010)

5.2.2 กลุ่มไนทรามิน (nitramine) เป็นสารระเบิดที่มีกลุ่ม NO_2 จับกับอะตอมของไนโตรเจน สารในกลุ่มนี้ได้แก่ cyclotrimethylenetrinitramine (RDX) cyclotetramethylenetetranitramine (HMX) และ 2,4,6-trinitrophenylmethylnitramine (Tetryl) โดยสูตรโครงสร้างทางเคมีของสารกลุ่มนี้แสดงในตารางที่ 16 ซึ่งสาร RDX และ HMX ใช้เป็นวัตถุระเบิดในการทหารสำหรับสาร Tetryl ใช้เป็นสารจุดระเบิด

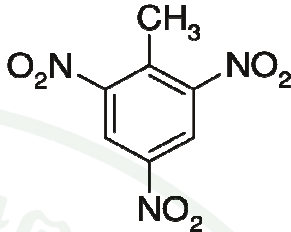
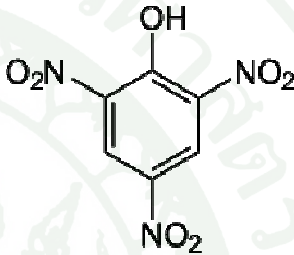
ตารางที่ 16 สารก่อระเบิดกลุ่มไนทรามิน (nitramine)

ชื่อสามัญ	สูตรโครงสร้าง
RDX หรือ cyclotrimethylenetrinitramine	
HMX หรือ cyclotetramethylenetetranitramine	
Tetryl หรือ 2,4,6-trinitrophenylmethylnitramine	

ที่มา: Globalsecurity (2010)

5.2.3 กลุ่มไนโตรอะโรมาติก (nitro aromatics) เป็นสารที่มีคุณสมบัติระเบิดได้รุนแรงมาก เป็นสารพิษมาก และอยู่ในสภาพแวดล้อมได้ยาวนาน สารในกลุ่มนี้มี 2,4,6-trinitrotoluene (TNT) ซึ่งถูกย่อยสลายได้ทางชีวภาพในสภาพไร้อากาศ และ 2,4,6-trinitrophenol (TNP) เป็นสารระเบิดที่มีความรุนแรงมากในอดีตใช้ในการทหาร แต่ปัจจุบันไม่ได้ใช้แล้ว สูตรโครงสร้างทางเคมีของสารกลุ่มไนโตรอะโรมาติกแสดงในตารางที่ 16

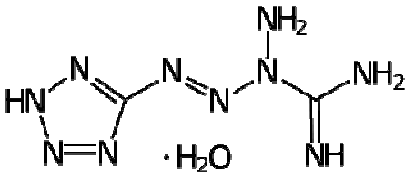
ตารางที่ 16 สารก่อระเบิดกลุ่มไนโตรอะโรมาติก (nitro aromatics)

ชื่อสามัญ	สูตรโครงสร้าง
TNT หรือ 2,4,6-trinitrotoluene	
Picric acid (TNP) หรือ 2,4,6-trinitrophenol	

ที่มา: Globalsecurity (2010)

5.2.4 สารจู่ระเบิด เป็นสารที่มีความไวต่อความร้อน ต่อแรงเสียดทาน ต่อการกระแทก หรือต่อพลังงานไฟฟ้าสถิต โดยทำหน้าที่จู่ระเบิด ซึ่งสารนี้ได้แก่ mercury fulminate, tetrazene, 2-diazo-4, 6-dinitrophenol เป็นต้น โดยสูตร โครงสร้างทางเคมีของสารจู่ระเบิดแสดงในตารางที่ 18

ตารางที่ 18 สารจู่ระเบิด

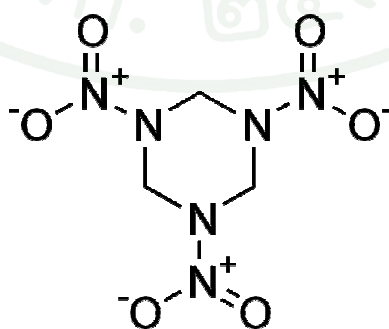
ชื่อสามัญ	สูตรโครงสร้าง
mercury(II) fulminate	$\text{Hg}(\text{ONC})_2$
picric acid (TNP) หรือ 2,4,6-trinitrophenol	

ที่มา: Globalsecurity (2010)

ไซโครไนท์ (cyclonite)

ไซโครไนท์ หรือ hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine (Royal Demolition Explosives; RDX) เป็นสารกลุ่มไนทรามิน (nitramines) มี NO_2 จับกับอะตอมของไนโตรเจนดังแสดงในภาพที่ 4 สูตรโมเลกุลคือ $\text{C}_6\text{H}_6\text{N}_6\text{O}_6$ ไซโครไนท์มีลักษณะเป็นผลึกสีขาว มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำ (ละลายน้ำ 60 mg/L ที่ 25 °C) ค่าคงที่ของการดูดซับระหว่างสารปนเปื้อนในรูปของเหลวกับดินค่อนข้างต่ำ ($K_d = 1.2 \text{ L/kg}$, $\log K_{oc} = 2$) จึงพบการปนเปื้อนของไซโครไนท์ได้ทั้งในดิน น้ำ และน้ำใต้ดิน โดยคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีแสดงในตารางที่ 19

ไซโครไนท์สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ทั้งในครัวเรือนและทางทหารโดยในทางครัวเรือน ไซโครไนท์ถูกนำมาเป็นส่วนผสมในการผลิตดอกไม้ไฟ เชื้อเพลิงสำหรับปรุงอาหาร หรือเป็นส่วนผสมของสารกำจัดหนู (rodenticide) ส่วนในทางทหารค่อนข้างที่จะมีการใช้ในปริมาณมากเนื่องจากเป็นส่วนผสมสำหรับผลิตเชื้อจรวดกระเบิด ลูกกระสุนปืน ในสหรัฐอเมริกาอนุญาตให้ใช้ไซโครไนท์ได้เฉพาะในพื้นที่ยุทธโประณ์ของกองทัพเท่านั้น ส่งผลให้พื้นที่ยุทธโประณ์ของกองทัพเก่ามีการปนเปื้อนของสารมากกว่าพื้นที่ชุมชน (globalsecurity, 2010) ตัวอย่างเช่น ในพื้นที่ที่เคยเป็นกรมสรรพากรของรัฐเนบราสกา (Nebraska Ordnance Plant; NOP) ประเทศสหรัฐอเมริกา พบว่ามีปริมาณการปนเปื้อนของไซโครไนท์ในดินมากกว่า 5,000 mg/kg และเมื่อทำการตรวจวัดบ่อน้ำดื่มภายในพื้นที่ และบริเวณใกล้เคียงพื้นที่กรมสรรพากร พบว่าการปนเปื้อนของไซโครไนท์ 4 บ่อจากบ่อน้ำที่ทำการตรวจวัด 24 บ่อ (Hundal *et al.*, 1997) จากผลการตรวจสอบพบว่าไซโครไนท์สามารถปนเปื้อนได้ทั้งในดิน และน้ำใต้ดิน นอกจากนี้ยังน้ำเสียที่มาจากอุตสาหกรรมผลิตไซโครไนท์ (pink water) เมื่อไหลลงสู่แม่น้ำ ลำคลอง ก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต รวมทั้งมนุษย์ด้วย (Pischa *et al.*, 2006)



ภาพที่ 4 โครงสร้างทางเคมีของไซโครไนท์

ตารางที่ 19 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของไซโครไนท์

คุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมี	รายละเอียด
สูตรโมเลกุล	$C_6H_6N_6O_6$
น้ำหนักโมเลกุล	222.15
ลักษณะทางกายภาพ	ผลึกสีขาว
ความหนาแน่น	1.83 g/mL ที่ 20 °C
จุดหลอมเหลว	205 °C
จุดเดือด	286 °C ที่ 760 mm Hg และ 100 °C ที่ 0.001 mm Hg
ความดันไอ	4.03×10^{-9} mm Hg ที่ 25 °C
Henry's law constant	1.96×10^{-11} atm-m ³ /mole ที่ 25 °C
สภาพการละลาย	ละลายน้ำ 60 mg/L ที่ 25 °C
Log K _{ow}	0.81-0.87 ที่ 25 °C
L _{og}	2
K _{oc}	1.2 L/kg ที่ 25 °C

ที่มา: ดัดแปลงจาก Rosenblatt *et al.* (1991) และ Haderlein *et al.* (1996)

พฤติกรรมในดิน

การดูดซับและการคาย (adsorption and desorption) ของไซโครไนท์ในดิน โดยปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนในดิน (organic carbon; OC) มีบทบาทสำคัญต่อการดูดซับและการคายตัว ค่า soil organic carbon sorption coefficient; K_{oc} ของไซโครไนท์อยู่ประมาณ 2 (Rosenblatt *et al.*, 1991)

การสลายตัวโดยกระบวนการทางชีวภาพ (biodegradation) ของไซโครไนท์ พบว่าในสถานะที่ไม่มีอากาศไซโครไนท์ถูกย่อยสลายได้มากกว่าในสถานะที่มีอากาศ (Rosenblatt *et al.*, 1991)

Spanggord *et al.* (1980) ทำการศึกษาเปรียบเทียบการย่อยสลายของตะกอนดินที่ปนเปื้อนไซโครไนท์โดยใช้จุลินทรีย์ภายใต้สถานะที่มีอากาศและไม่มีอากาศ พบว่าในสถานะที่ไม่มีอากาศ

ความเข้มข้นของไซโครไนท์ลดลงจาก 10 mg/L เป็น 0.1 mg/L ภายในเวลา 10 วัน ขณะการย่อยสลายไซโครไนท์ต้องใช้ระยะเวลาจนถึง 20 วัน ถึงจะทำให้ความเข้มข้นของไซโครไนท์ลดลงและลดได้เพียง 6 mg/L เท่านั้น

ข้อมูลความเป็นพิษ

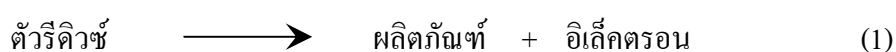
เมื่อนำไซโครไนท์ไปทดสอบความเป็นพิษทางปากกับหนูมีค่า median lethal dose 50; LD₅₀ เป็น 59 mg/kg เมื่อหนูได้รับไซโครไนท์ความเข้มข้นสูงจะส่งผลให้เกิดความผิดปกติในส่วนของตับและอวัยวะ ในน้ำสำหรับบริโภคน้ำไม่ควรมีความเข้มข้นของไซโครไนท์เกิน 0.1 mg/L หากได้รับในปริมาณมากจะส่งผลต่อระบบสมอง ตับ ไต และหัวใจได้ ในน้ำดื่ม (McLellan *et al.*, 1988).

กรณีที่มนุษย์ได้รับไซโครไนท์โดยการสูดดมเป็นระยะเวลา 0.5-3 ชั่วโมงจะทำให้เกิดการ
มีเนื้องอกเยื่อหุ้มสมอง คลื่นไส้ อาเจียน จนถึงหมดสติได้ (Yinon, 1990)

6. เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ (zero valent iron)

ในปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน (ปฏิกิริยารีดอกซ์) จะมีสารหนึ่งทำหน้าที่เป็นผู้ให้อิเล็กตรอนซึ่งเรียกสารนี้ว่าเป็นตัวรีดิวซ์ (reducing agent) และเรียกอีกสารหนึ่งที่ทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอนว่าเป็นตัวออกซิไดส์ (oxidizing agent) โดยสามารถแบ่งปฏิกิริยารีดอกซ์ออกเป็นสองส่วนได้ครึ่งปฏิกิริยา (half reaction) สองปฏิกิริยา คือ ครึ่งปฏิกิริยารีดักชัน (ครึ่งปฏิกิริยาที่มีการรับอิเล็กตรอน) และครึ่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน (ครึ่งปฏิกิริยาที่มีการให้อิเล็กตรอน) ดังแสดงในสมการที่ 1 และสมการที่ 2

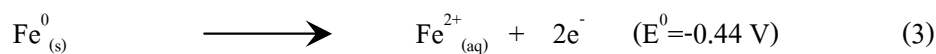
ครึ่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน



ครึ่งปฏิบัติการวัดก้น

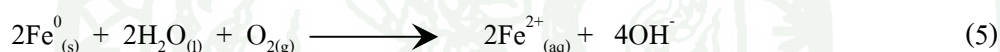


สมการศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานรีดักชันของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์

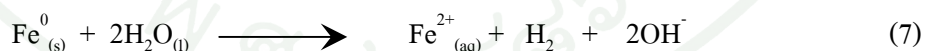


ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานรีดักชัน (standard reduction potential) เท่ากับ -0.44 V โดยที่เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ (zero valent iron) มีคุณสมบัติเป็นตัวให้อิเล็กตรอนที่รุนแรง (strong reducing agent) เพื่อทำลายโครงสร้างหรือเปลี่ยนรูปสารมลพิษอินทรีย์ ดังแสดงในสมการที่ 3

ในสภาวะที่ไม่มีตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรงจะเกิดครึ่งปฏิกิริยารีดักชันสองอันที่ควบคู่ไปกับสมการที่ 3 ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยากัดกร่อนโดยตัวมันเองในน้ำ หากมีออกซิเจนละลายในน้ำ (สมการที่ 4) เป็นผลให้เกิดการกัดกร่อนอย่างรวดเร็ว (สมการที่ 5)



การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของเฟอร์รัส (Fe^{2+}) กับออกซิเจน จะทำให้เกิดเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์หรือสนิมเหล็ก อย่างไรก็ตามเมื่อมีน้ำเพียงอย่างเดียวก็สามารถทำให้เกิดการกัดกร่อนภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนได้ ดังสมการที่ 6 และ 7

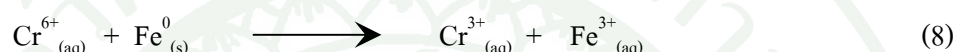


ผลของปฏิกิริยาจากสมการที่ 5 และ 7 ในสภาวะที่มีการเพิ่มค่าความเป็นกรด-ด่าง และมีบัพเฟอร์อย่างอ่อน แม้ว่าจะพิจารณาผลกระทบภายใต้ภาวะไร้ออกซิเจนแต่ก็ยังเกิดการกัดกร่อนได้อย่างรวดเร็ว เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดการตกตะกอนของเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) เคลือบที่ผิวของโลหะ ทำให้เกิดการยับยั้งปฏิกิริยาได้

สำหรับสภาวะแวดล้อมที่มีออกซิเจนต่ำเช่น ในแหล่งน้ำบาดาล หรือดิน สารมลพิษจะเป็นตัวรับอิเล็กตรอน (electron acceptor) แทนออกซิเจน และทำให้สารมลพิษเหล่านั้นเกิดการ

เปลี่ยนแปลงโครงสร้าง (transformation) ซึ่งผลิตภัณฑ์ (products) ส่วนใหญ่ที่ได้จากปฏิกิริยาเหล่านี้จะมีความเป็นพิษน้อยกว่าสารตั้งต้นและง่ายต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์ในสิ่งแวดล้อม (Satapanajaru, 2002) สำหรับกระบวนการรีดักชัน โดยการใช้โลหะเหล็กเป็นตัวให้อิเล็กตรอนสามารถนำไปใช้กับมลสารได้หลายชนิด อาทิเช่น

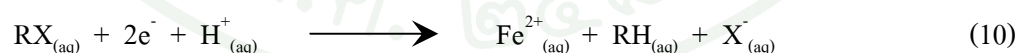
6.1 มลสารที่เป็นไอออนของโลหะหนัก เช่น Hg^{2+} , Ni^{2+} และ Cd^{2+} เป็นต้น ตัวอย่างของกระบวนการ อาทิเช่น การเปลี่ยนรูป hexavalent chromium (Cr^{6+}) ซึ่งมีความเป็นพิษสูง ให้อยู่ในรูปของ trivalent chromium (Cr^{3+}) ที่มีความเป็นพิษน้อยลง (Ponder *et al.*, 2000) แสดงในสมการที่ 8



6.2 มลสารที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ เช่น nitrate, TNT และ N-nitrosodimethylamine เป็นต้น ตัวอย่างของกระบวนการ อาทิเช่น การลดลงของสารประกอบไนโตรอะโรมาติก (nitroaromatic reduction) (Xin *et al.*, 2010) แสดงในสมการที่ 9



6.3 มลสารที่เป็นสารอินทรีย์ที่มีหมู่ฮาโลเจนเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ ตัวทำละลายที่ใช้ในอุตสาหกรรม เช่น chloform, trichlorobenzene และ dibromochloromethane เป็นต้น และสารกำจัดศัตรูพืช เช่น DDT, lindane และ endosulfan เป็นต้น ตัวอย่างของกระบวนการ อาทิเช่น การลดหมู่ฮาโลเจน (reductive dehalogenation) ของสารอินทรีย์ที่มีหมู่ฮาโลเจนเป็นองค์ประกอบ (Gilham and O'Hannesin, 1994) ดังแสดงในสมการที่ 10



โลหะเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดสารมลพิษที่ปนเปื้อนหลายลักษณะ เช่น การฟื้นฟูพื้นที่ที่ปนเปื้อนสารกำจัดศัตรูพืชในน้ำใต้ดิน (Eykolt and Davenport, 1998) การใช้กำแพงปฏิกิริยา (permeable reactive barrier) (Georgios *et al.*, 2006) และการบำบัดในตรรกแบบคอลัมน์ (Westerhoff and James, 2003) เป็นต้น รูปแบบของโลหะเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ที่ใช้งานคือ โลหะเหล็กจากอุตสาหกรรมหรืออนุภาคเหล็กขนาดไมโครเมตร แต่ปัญหาที่เกิดขึ้นคือ อนุภาคเหล็กที่มีขนาดใหญ่นั้นยากต่อการเคลื่อนย้ายออกจากพื้นที่เมื่อเสร็จสิ้นการบำบัดแล้ว

จึงได้มีการใช้โลหะเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ที่มีขนาดเล็กกลอง หรือ NZVI ซึ่งมีพื้นที่ผิว (surface area) มากกว่าเหล็กขนาดปกติประมาณ 10-1,000 เท่า (Lien and Zhang, 2001) รวมทั้งมีความเหมาะสมสำหรับการฟื้นฟูสภาพแวดล้อมที่มีการปนเปื้อนแบบในพื้น (in situ remediation) โดยไม่จำเป็นต้องนำ NZVI ออกมาจากพื้นที่หลังเสร็จสิ้นการบำบัดแล้ว อีกทั้งโลหะเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ยังไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม และไม่มีผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์และสิ่งมีชีวิตต่างๆ

7. นาโนเทคโนโลยี

7.1 ความหมายของนาโนเทคโนโลยี

นาโนเทคโนโลยี หมายถึง เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสร้าง การสังเคราะห์ วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องจักรหรือผลิตภัณฑ์ซึ่งมีขนาดเล็กมากในระดับนาโนเมตร เทียบเท่ากับระดับอนุภาคของโมเลกุลหรืออะตอม รวมถึงการออกแบบหรือการใช้เครื่องมือสร้างวัสดุที่อยู่ในระดับที่เล็กมาก หรือการเรียงอะตอมและโมเลกุลในตำแหน่งที่ต้องการได้อย่างแม่นยำและถูกต้อง ทำให้โครงสร้างของวัสดุหรือสารมีคุณสมบัติพิเศษไม่ว่าทางด้านฟิสิกส์ เคมี หรือชีวภาพ (ศูนย์นาโนเทคโนโลยี, 2547)

7.2 สาขาย่อยของนาโนเทคโนโลยี

นาโนเทคโนโลยีเกี่ยวข้องกับหลายสาขาวิชา (หวน พันธุพันธ์, 2549) อาทิเช่น

7.2.1 นาโนอิเล็กทรอนิกส์ (nano electronics) มีการวิจัยและพัฒนานาโนอิเล็กทรอนิกส์ในหลายแง่มุม ทั้งจากกลุ่มนักวิจัยในมหาวิทยาลัย จากห้องปฏิบัติการของหน่วยงานในภาครัฐและในภาคเอกชน มีการค้นคว้าตั้งแต่ระดับของสมบัติโมเลกุลเดี่ยว การประกอบเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ การสร้างวงจรอย่างง่าย ๆ ไปจนถึงการพัฒนา “นาโนคอมพิวเตอร์” หรือคอมพิวเตอร์ขนาดจิ๋วและการทำคอมพิวเตอร์ที่เร็วขึ้นล้านเท่า เป็นต้น

7.2.2 นาโนเคมี (nano chemistry) กำเนิดขึ้นตั้งแต่ปี ค.ศ. 1985 เมื่อศาสตราจารย์ ริชาร์ดสมอลลีย์ ภาควิชาเคมี มหาวิทยาลัยไรซ์ รัฐเท็กซัส ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้ค้นพบฟูลเลอร์ลีน และพัฒนาไปเป็นท่อนาโน ตลอดจนเฟืองนาโน อันเป็นต้นกำเนิดของเครื่องจักรนาโนหรือจุลจักรกลที่มีการศึกษากันอย่างกว้างขวางอยู่ในปัจจุบัน ตัวอย่างผลงานจากนาโนเคมีอีกหนึ่ง

ตัวอย่างคือ คอนกรีตชนิดหนึ่งใช้เทคโนโลยีนาโน โดยผลิตภัณฑ์ดังกล่าวสามารถทำปฏิกิริยากับมลภาวะที่เกิดจากรถยนต์ เช่น ไนโตรเจนไดออกไซด์ ประเทศอังกฤษได้เริ่มมีการใช้เทคโนโลยีนี้ในการสร้างถนนและอุโมงค์ต่างๆ เพื่อลดมลภาวะบนท้องถนน และขณะเดียวกันเทคโนโลยีนาโนทำให้อนุภาคคอนกรีตมีขนาดเล็กมาก ฝุ่น และแบคทีเรีย ไม่สามารถฝังตัวในเนื้อคอนกรีตได้ ทำให้อาคารที่ใช้คอนกรีตชนิดนี้ดูใหม่เสมอ และยังคงไม่สะสมเชื้อโรค

7.2.3 นาโนเทคโนโลยีชีวภาพ (nano biotechnology) เช่น การสร้างอาหารที่ไม่มีวันหมด การรักษาโรคมะเร็งโดยการดื่มเพียงน้ำผลไม้ที่มีหุ่นยนต์จิ๋วแบบที่มองไม่เห็น การใช้หุ่นยนต์นาโนในการป้องกันเชื้อโรค ซ่อมแซมผนังเซลล์ รักษาอาการไขมันอุดตันในเส้นเลือด หรือการสร้างหุ่นยนต์นาโนที่สามารถเคลื่อนที่ในกระแสเลือดเพื่อเข้าทำลายเชื้อโรคหรือเซลล์มะเร็งในร่างกายโดยไม่ต้องมีการผ่าตัดที่เสี่ยงอันตราย สำหรับในประเทศไทยจะเน้นทางด้านสร้างเสริมสุขภาพอนามัยเป็นหลัก เนื่องจากเมืองไทยมีพืชพันธุ์ธัญญาหารที่อุดมสมบูรณ์ ประกอบกับมีนักวิทยาศาสตร์ไทยที่มีความสามารถในการเพาะเลี้ยงอาหาร โปรตีนที่มีคุณค่าระดับ โมเลกุล

7.2.4 นาโนวิศวกรรม (nano engineering) เช่น การใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเต็มที่ การสร้างท่อนาโน (nano tube) แล้วอาจจะดัดแปลงนำมาใช้เป็นเกียร์และแบบริ้ง สำหรับส่งกำลัง ในทางวิศวกรรมเครื่องกลระดับ โมเลกุล

7.2.5 วัสดุนาโน (nano material) เรียกกันว่า “วัสดุสุดจิ๋ว” หรือ “วัสดุซูเปอร์จิ๋ว” คือเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างที่มีขนาดเล็กกว่า 100 นาโนเมตร หรือเป็นการรวมตัวกันของอะตอมเป็นกลุ่มก้อนที่มีขนาดเล็กกว่า 100 นาโนเมตร และมีขนาดเล็กกว่าขนาดของอนุภาคทั่วไป 10,000 เท่า โดยที่วัสดุนาโนสามารถแบ่งได้เป็นผลึกนาโน (nano crystalline) และอนุภาคนาโน (nano particle) โดยก้อนหรือปริมาตรผลึกนาโนจะประกอบด้วยเม็ดผลึก (grain sizes) ที่มีขนาดช่วงสเกลการวัดอยู่ในระดับนาโนถึงประมาณ 100 นาโนเมตร ขณะที่อนุภาคนาโนมีเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำกว่า 100 นาโนเมตร ดังนั้นก้อนหรือปริมาตรของวัสดุที่เป็นผลึกนาโนจึงเกิดขึ้นจากการรวมกลุ่มกันของอนุภาคนาโน

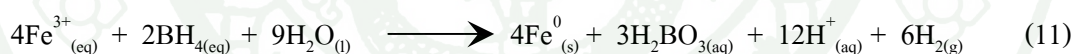
คุณลักษณะเฉพาะที่สำคัญอย่างหนึ่งของอนุภาคนาโนคือ มีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวและปริมาตรค่อนข้างสูง สัดส่วนพื้นที่ผิวของอะตอมที่สูงมาก ทำให้อนุภาคนาโนมีคุณสมบัติที่แตกต่างไปจากก้อนปริมาตรของวัสดุในขนาดใหญ่ (สุภกรณ์ และคณะ, 2549)

8. อนุภาคเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ขนาดนาโนเมตร (nano zero valent iron, NZVI)

นาโนเทคโนโลยีถูกนำมาประยุกต์ใช้ในหลายด้านรวมทั้งงานด้านสิ่งแวดล้อมและการบำบัดของเสียอันตราย การใช้ NZVI จึงเป็นหนึ่งในนาโนเทคโนโลยีที่ถูกนำมาในการบำบัดของเสียอันตรายที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม เช่น trichloroethene (TCE) (Wang and Zhang, 1997; Lien and Zhang, 2001; Liu *et al.*, 2005), polychlorinated biphenyls (PCBs) (Wang and Zhang, 1997; Varanasi *et al.*, 2007), p-chlorophenol (Cheng *et al.*, 2006) และกลุ่มสารกำจัดศัตรูพืช เช่น atrazine (Satapanajaru *et al.*, 2008) เป็นต้น เนื่องจากอนุภาคเหล็กขนาดนาโนเมตรมีขนาดเล็ก มีพื้นที่ผิว (surface area) และพื้นที่ปฏิกิริยา (surface reactivity) ที่มากกว่าอนุภาคเหล็กปกติ ประมาณ 10-1000 เท่า จึงให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูง และใช้ปริมาณน้อย

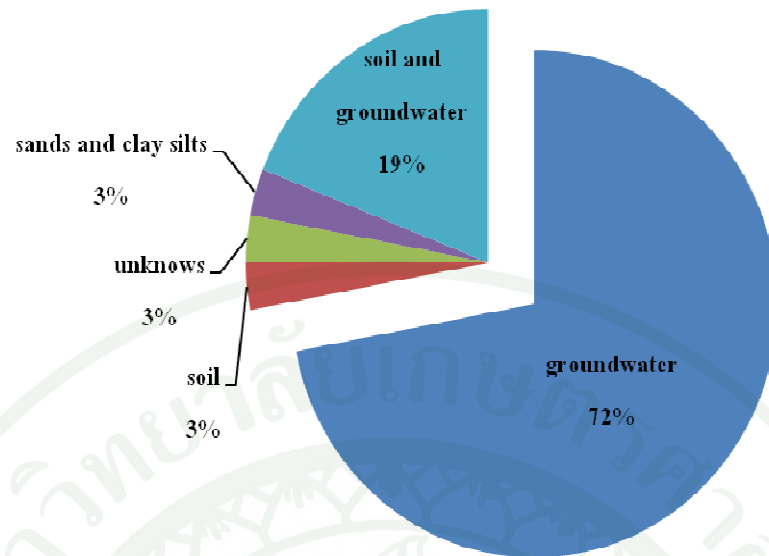
8.1 การสังเคราะห์ NZVI

การสังเคราะห์ทำได้โดยการเติมสารละลาย NaBH_4 ความเข้มข้น 0.25 M ลงในสารละลาย $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ความเข้มข้น 0.045 M อัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร ผสมสารละลายทั้งสองชนิดที่อุณหภูมิห้องพร้อมกับเป่าก๊าซไนโตรเจน (N_2 99.995%) ที่ใช้เวลาประมาณ 5 นาที (Lien and Zhang, 2001) จะเกิดตะกอนของ NZVI ดังแสดงในสมการที่ 11



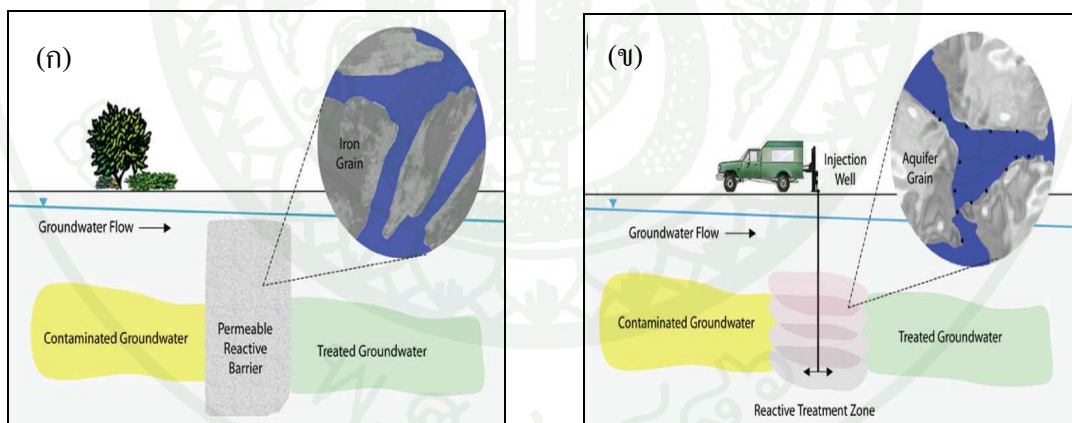
8.2 การประยุกต์ใช้ NZVI

NZVI ถูกนำมาใช้สำหรับการบำบัดของเสียอันตรายที่ปนเปื้อนทั้งในดิน น้ำ และน้ำใต้ดิน ซึ่งในประเทศสหรัฐอเมริกาอนุญาตให้นำมาบำบัดน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนถึงร้อยละ 73 ของพื้นที่ที่มีการใช้ NZVI (U.S.EPA., 2005) ดังแสดงในภาพที่ 4 โดยนำมาเป็นแนวกำแพงปฏิกิริยา (permeable reactive barrier, PRB) หรือใช้โดยตรง (injection well) ดังแสดงในภาพที่ 5 ซึ่งการใช้ NZVI ในการบำบัดใช้ระยะเวลาเพียง 2-3 เดือน ใช้งบประมาณเพียง 300,000 ยูโร น้อยกว่าการใช้เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ขนาดปกติที่ใช้เวลาในการบำบัดนานนับปี และใช้งบประมาณถึง 1,460,000 ยูโร (Muller and Bearnd, 2010)



ภาพที่ 5 การใช้ NZVI สำหรับบำบัดของเสียอันตรายที่ปนเปื้อนในตัวกลางต่างๆ

ที่มา: ดัดแปลงจาก United States Environmental Protection Agency (2005)



ภาพที่ 6 รูปแบบการนำ NZVI มาใช้บำบัดน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนจริง

(ก) แนวกำแพงปฏิกิริยา (permeable reactive barrier, PRB)

(ข) การใช้โดยตรง (injection well)

ที่มา: ดัดแปลงจาก Tranyek and Johnson (2006)

9. จลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยา (kinetic reaction rate)

จลศาสตร์ (kinetic) หรืออัตราการเกิดปฏิกิริยาอาจอธิบายได้ด้วยกฎของกิริยา (law of action) ที่ระบุว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยานั้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารตั้งต้น (ฉัตรเพชร, 2553) ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปทั่วไปดังสมการที่ 12

$$\frac{dC_A}{dt} = -kf(C_A, C_B, \dots) \quad (12)$$

โดยความสัมพันธ์นี้เรียกว่ากฎของอัตรา (rate law) ได้แก่อัตราของปฏิกิริยาที่ขึ้นกับผลคูณระหว่าง k (ที่แปรผันตามอุณหภูมิ) และฟังก์ชันของความเข้มข้นของสารตั้งต้นทำปฏิกิริยา $f(C_A, C_B, \dots)$ โดยสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการที่ 13

$$\frac{dC_A}{dt} = -kC_A^\alpha C_B^\beta \quad (13)$$

เลขยกกำลังเหนือความเข้มข้นของสารตั้งต้นเรียกว่า อันดับของปฏิกิริยา (reaction order) ซึ่งในสมการ 13 นั้นเรียกว่ามีอันดับที่ α สำหรับสาร A และอันดับที่ β สำหรับสาร B ซึ่งอันดับปฏิกิริยารวมได้แก่ $n = \alpha + \beta$ โดยอันดับรวมของปฏิกิริยาหรืออันดับสำหรับสารใดๆ ไม่จำเป็นต้องเป็นจำนวนเต็ม แต่โดยทั่วไปการบำบัดสารมลพิษมักมีอันดับของปฏิกิริยาเป็นเลขจำนวนเต็ม หากปฏิกิริยานั้นมีสารตั้งต้นเพียงชนิดเดียวก็จะเป็นดังสมการที่ 14

$$\frac{dC_A}{dt} = -kC^n \quad (14)$$

โดย C = ความเข้มข้นของสารตั้งต้น และ n = อันดับ

9.1 ปฏิกิริยาอันดับศูนย์ (zero order)

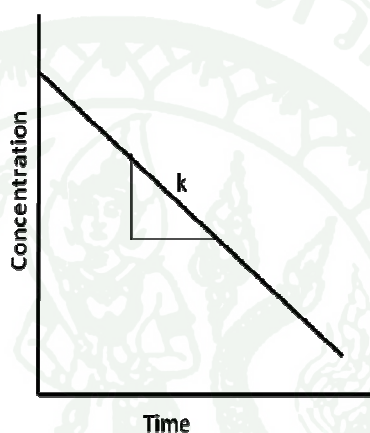
ปฏิกิริยาอันดับศูนย์ หรือ $n = 0$ อาจเขียนได้ดังสมการที่ 15

$$\frac{dC_A}{dt} = -k \quad (15)$$

โดยที่ k มีหน่วยเป็น $M/L^3/T$ ซึ่งหาก $C = C_0$ ที่ $t = 0$ สมการที่ 15 จะถูกอินทิเกรตเป็น

$$C = C_0 - kt \quad (16)$$

ซึ่งกราฟความสัมพันธ์ของปฏิกิริยาอันดับศูนย์เป็นไปดังภาพที่ 7 ซึ่งหมายถึงอัตราการย่อยสลายของสารตั้งต้นมีค่าคงที่กับเวลา เมื่อพล็อตความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารมลพิษและเวลาจะได้กราฟเส้นตรง



ภาพที่ 7 ปฏิกิริยาอันดับศูนย์ (zero order)

9.2 ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (first order)

ปฏิกิริยาอันดับศูนย์ หรือ $n = 1$ อาจเขียนได้ดังสมการที่ 17

$$\frac{dC_A}{dt} = -kC \quad (17)$$

โดยที่ k มีหน่วยเป็น T^{-1} ซึ่งหาก $C = C_0$ ที่ $t = 0$ สมการที่ 18 จะถูกอินทิเกรตเป็น

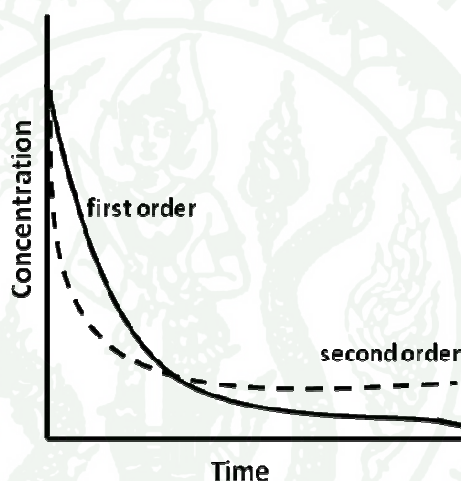
$$\ln C - \ln C_0 = -kt \quad (18)$$

หรือ

$$C = C_0 e^{-kt} \quad (19)$$

จากสมการข้างต้น อัตราการย่อยสลายจะแปรผันตามความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่ ช่วงเวลาก่อนหน้านั้น อัตราการย่อยสลายจะลดลงเมื่อเวลาผ่านไป ดังภาพที่ 8 ซึ่งจะเห็นว่า กราฟแสดงความเข้มข้นจะเข้าใกล้ศูนย์เมื่อเวลาผ่านไป และกราฟระหว่าง $\ln c$ เมื่อเทียบกับเวลา t จะเป็นกราฟเส้นตรงที่มีความชัน $= -k$ (สมการที่ 18) ค่า $\ln c$ ลดลงเมื่อเวลา t ผ่านไป และเมื่อ ปริมาณ C หกไปครึ่งหนึ่ง เวลา t เรียกว่า ครึ่งเวลา ($t_{1/2}$) ซึ่งหมายถึงเวลาที่ต้องใช้เพื่อให้ความเข้มข้นหรือปริมาณของสารมลพิษเหลือครึ่งหนึ่งของปริมาณสารเดิม ดังสมการที่ 20

$$C = \frac{C_0}{2} \quad (20)$$



ภาพที่ 8 ปฏิกริยาอันดับหนึ่ง (first order) และปฏิกริยาอันดับสอง (second order)

9.3 ปฏิกริยาอันดับสอง

ปฏิกริยาอันดับสอง หรือ $n = 2$ อาจเขียนได้ดังสมการที่ 21

$$\frac{dC_A}{dt} = -kC^2 \quad (21)$$

โดยที่ k มีหน่วยเป็น $L^3 / M / T$ ซึ่งหาก $c = c_0$ ที่ $t = 0$ สมการที่ 21 จะถูกอินทิเกรต เป็น

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_0} + kt \quad (22)$$

ซึ่งในสมการอันดับสองนี้ กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C$ เทียบกับเวลา t ก็จะเป็นเส้นตรง โดยอัตราการย่อยสลายจะแปรผันตามความเข้มข้นของสารตั้งต้นในช่วงเวลาก่อนหน้า และจะเห็นว่ากราฟความเข้มข้นจะเข้าใกล้ศูนย์เมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้น แต่กราฟของอัตราการย่อยสลายอันดับสองนี้จะมีส่วนโค้งมากกว่ากราฟของอัตราการย่อยสลายอันดับหนึ่ง (ภาพที่ 8)

9. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Lee and Craig (2004) ศึกษาการดูดซับและกำจัดอะลาคลอร์ และเมโทลาคลอร์ที่ปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน โดยใช้ green sand ซึ่งเป็นฝุ่นผงทรายที่เกิดจากกระบวนการทำแบบหล่อขึ้นรูปชิ้นส่วนโลหะ โดย green sand จะมีอนุภาคเหล็กและสารอินทรีย์คาร์บอนเป็นองค์ประกอบ ทำการเปรียบเทียบกับการใช้ผงเหล็กในการกำจัดอะลาคลอร์ และเมโทลาคลอร์พบว่า green sand ให้ค่าคงที่จำเพาะการเกิดปฏิกิริยา (specific reaction rate, k_{SA}) เป็น 7.9 และ 5.5 $L/m^2 \cdot h$ ตามลำดับ ซึ่งให้ผลที่ใกล้เคียงกับการใช้ผงเหล็กที่ให้ค่าคงที่จำเพาะการเกิดปฏิกิริยาเป็น 7.1 และ 5.1 $L/m^2 \cdot h$ ตามลำดับ

Shea *et al.* (2004) ศึกษาการฟื้นฟูดินที่ปนเปื้อนสารกำจัดศัตรูพืชโดยใช้เหล็กวาเลนดัมสน์ โดยดินที่นำมาทดลองมีปริมาณของเมโทลาคลอร์ 2,000 mg/kg อะลาคลอร์ 79 mg/kg แอนทราซีน 150 mg/kg และ เพนดิเมทาลีน 40 mg/kg พบว่าเมื่อทำการฟื้นฟูด้วยเหล็กวาเลนดัมสน์เพียงอย่างเดียวปริมาณความเข้มข้นของ เมโทลาคลอร์ อะลาคลอร์ แอนทราซีน และ เพนดิเมทาลีน ลดลง 60 เปอร์เซ็นต์ ภายในระยะเวลาสัมผัส 90 วัน และเมื่อเพิ่ม 2% (w/w) $Al_2(SO_4)_3$ พบว่าปริมาณความเข้มข้นของเมโทลาคลอร์, อะลาคลอร์, แอนทราซีน และ เพนดิเมทาลีน ลดลงมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ภายใน ภายในระยะเวลาเวลาสัมผัส 90 วัน

Jong *et al.* (2007) ศึกษาการใช้เกลือคลอไรด์ (chloride salt) และเกลือโบรไมด์ (bromide salt) ร่วมกับเหล็กวาเลนดัมสน์ในการบำบัด hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine (RDX), octahydro-1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetrazine (HMX), 2,4,6-trinitrotoluene (TNT) พบว่าอัตราการสลายตัวที่สภาวะเดียวกันของ TNT สูงสุด รองลงมาเป็น RDX และ HMX ตามลำดับ ทั้ง RDX และ HMX มีโครงสร้างที่คล้ายกันแต่เนื่องจาก HMX มีความเสถียรมากกว่าและความสามารถในการละลายน้ำน้อยกว่า RDX จึงได้ทดลองเพิ่ม NaBr และ $CaCl_2$ ความเข้มข้น 5 mmol ที่เวลาระยะเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าเมื่อมีบำบัดต่อไปจนถึง 32 ชั่วโมงทั้ง RDX และ HMX ถูกกำจัดหมด

และพบว่าความเป็นกรด-ด่างของ CaCl_2 ($\text{pH} = 7.5$) น้อยกว่า NaBr ($\text{pH} = 9.5$) ซึ่งค่าความเป็นกรด-ด่างที่ลดลงจะช่วยเพิ่มอัตราการกร่อนที่ผิวหน้าเหล็กได้อีกทางหนึ่ง

Xin *et al.* (2010) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดน้ำเสียที่ปนเปื้อน 2,4,6-trinitrotoluene (TNT) โดยอนุภาคเหล็กขนาดนาโนเมตร (nano zero-valent iron) พบว่า TNT ถูกกำจัดได้มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้ NZVI ปริมาณ 5 g/L ความเข้มข้นของ TNT เป็น 80 mg/L ความเป็นกรด-ด่าง และอุณหภูมิเริ่มต้นของสารละลายเป็น 4 และ 40 °C และพบว่าค่าคงที่ของการบำบัด (k_{obs}) เป็น 0.31 h^{-1}

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง

- 1.1 บีกเกอร์ (beaker) ขนาด 50, 100, 250, 500 ml
- 1.2 ขวดวัดปริมาตร (volumetric flasks) ขนาด 5, 100, 1000 ml
- 1.3 กระบอกตวง (graduated cylinder) ขนาด 100 มิลลิลิตร, 50 ml
- 1.4 ตู้ปราศจากก๊าซออกซิเจน (anaerobic chamber)
- 1.5 เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH meter)
- 1.6 เครื่องกวนสาร (magnetic stirrer)
- 1.7 เครื่องเขย่า (shaker)
- 1.8 เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง (analytic balance)
- 1.9 เครื่องเหวี่ยงสารละลาย (centrifuge)
- 1.10 กระดาษชั่งสาร (weighting papers)
- 1.11 หลอดปั่นเหวี่ยง (centrifuge tube) ขนาด 1.5, 50 ml
- 1.12 ไมโครปิเปต (micropipet) ขนาด 1-5 ml
- 1.13 ไมโครปิเปตทิป (micropipet tips) ขนาด 1-5 ml
- 1.14 ขวดลดความดัน (suction flask)
- 1.15 กรวยบุชเนอร์ (buchner funnel)
- 1.16 เครื่องกรองสุญญากาศ (suction pump)
- 1.17 ขวดฉีดน้ำกลั่น (wash bottle)
- 1.18 แท่งแก้วคน (stirring rod)
- 1.19 ช้อนตักสาร (spatula)
- 1.20 หลอดหยดสาร (dropper)
- 1.21 กระดาษกรอง (paper filter) ยี่ห้อ Whatman เบอร์ 41
- 1.22 กระดาษกรองเซลลูโลส (cellulose filter)
- 1.23 ขวดเก็บตัวอย่าง (HPLC vials) ขนาด 1.5 ml
- 1.24 แท่งแม่เหล็ก (magnetic)

2. สารเคมี

2.1 อนุภาคเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ขนาดนาโนเมตร (nano zero valent iron, NZVI) (Nanofer 25S) จาก NANOIRON, S.R.O. (Czech Republic)

2.2 เมโทลาคอร์ (Metolacolor-Dual 8E) 84.6% จาก Syngenta, Greenboro, NC

2.3 ไซโคไนท์ (RDX) 90%

2.4 อะลูมิเนียมซัลเฟต ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) ยี่ห้อ Aldrich Chemical Co.

2.5 อะลูมิเนียมคลอไรด์ (AlCl_3) ยี่ห้อ Aldrich Chemical Co.

2.6 กรดซัลฟิวริกเข้มข้น ($\text{Conc. H}_2\text{SO}_4$) ยี่ห้อ Fisher Scientific Co Ltd.

2.7 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ยี่ห้อ Aldrich Chemical Co.

2.8 กรดไฮโดรคลอริก (Conc. HCl) ยี่ห้อ Aldrich Chemical Co.

2.9 อะซิโตนไทรล์ (acetone) เกรดวิเคราะห์ HPLC ยี่ห้อ EMD

2.10 น้ำปราศจากไอออน (ultra pure water) สำหรับวิเคราะห์โดยเครื่อง HPLC

2.11 ก๊าซไนโตรเจน (nitrogen gas) ร้อยละ 99.995

2.12 ก๊าซฮีเลียมผสมก๊าซไนโตรเจนในอัตราส่วนร้อยละ 95:5

3. เครื่องมือวิเคราะห์หัตถสารอินทรีย์

3.1 เครื่อง High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น SPD M20A

3.2 คอลัมน์ 4.6- by 250 Hybersil gold

3.3 คอลัมน์ Keystone betasil NA

4. เครื่องมือวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคเหล็กขนาดนาโนเมตร

เครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM) ยี่ห้อ Philips รุ่น XL30 & EDAX

วิธีการ

1. การศึกษาข้อมูลและเก็บรวบรวมข้อมูล

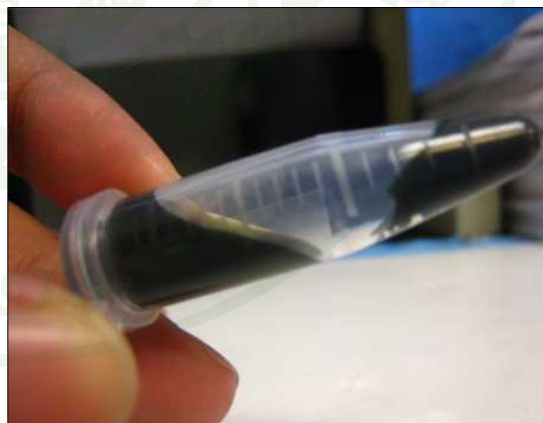
ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยเพื่อใช้เป็นแนวทางในการดำเนินการ และพัฒนางานวิจัยให้สามารถนำไปใช้ในการฟื้นฟูพื้นที่ที่ปนเปื้อนจริงได้ เช่น การหาข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำ NZVI มาบำบัดสารมลพิษอินทรีย์

2. การเตรียม NZVI

เตรียม NZVI (Nanofer 25s) ที่ได้จาก Nanoiron, S.R.O. (Czech Republic) ภายในตู้ปราศจากก๊าซออกซิเจน (anaerobic chamber) (ภาพที่ 9(ก)) โดยก่อนใช้ตู้ปราศจากก๊าซออกซิเจนต้องทำการไล่ก๊าซออกซิเจนที่อยู่ภายในตู้ออก แล้วจึงอัดก๊าซไนโตรเจนเข้าไปแทนที่อากาศที่ถูกไล่ออก ทำซ้ำ 2 ครั้ง และทำการไล่ก๊าซไนโตรเจนออก อัดก๊าซฮีเลียมผสมก๊าซไนโตรเจน 95 เปอร์เซ็นต์เข้าแทนที่ เมื่อได้ตู้ที่ปราศจากก๊าซออกซิเจนแล้วจึงนำ NZVI มาเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 4,000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 40 นาที NZVI ที่อยู่บนของหลอดเหวี่ยงถูกนำมาใช้สำหรับการทดลอง (ภาพที่ 9(ข))



(ก)



(ข)

ภาพที่ 9 (ก) ตู้ปราศจากอากาศ (anaerobic chamber)

(ข) NZVI หลังจากการเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 4,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 40 นาที

3. การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยา (morphology) ของ NZVI

นำ NZVI ที่เตรียมได้จากข้อ 2 มาทำให้แห้งโดยเป่าด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2 99.995%) จนแห้ง เก็บไว้ในถุงซิปล็อค และเติมก๊าซไนโตรเจนเพื่อป้องกันการออกซิไดซ์ แล้วจึงนำไปทำการศึกษาโดยเครื่อง Philips รุ่น XL30 & EDAX ที่ศักย์ไฟฟ้า 15 KV เพื่อวิเคราะห์

3.1 ลักษณะของ NZVI โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Scanning Electron Microscope, SEM)

3.2 องค์ประกอบของ NZVI โดย Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX)

4. การวิเคราะห์ผลสารอินทรีย์โดยเครื่อง High-Performance Liquid Chromatography (HPLC)

4.1 การวิเคราะห์เมโทลาคลอร์

วิเคราะห์ความเข้มข้นของเมโทลาคลอร์โดยเทคนิค HPLC (High Performance Liquid Chromatography) ใช้คอลัมน์ 4.6 - by 250 Hybersil gold, photodiode array detector ความยาวคลื่น 220 นาโนเมตร mobile phase เป็นอะซิโตนไนโตรส (ACN) ต่อน้ำ (50:50) และ flow rate 1.0 ml/min และระยะเวลาในการวิเคราะห์สาร (retention time) เป็น 20 นาที

4.2 การวิเคราะห์ไซโครไนท์

วิเคราะห์ความเข้มข้นของไซโครไนท์โดยเทคนิค HPLC (High Performance Liquid Chromatography) ใช้คอลัมน์ Keystone betasil NA, photodiode array detector ความยาวคลื่น 220 นาโนเมตร mobile phase เป็นอะซิโตนไนโตรส ต่อน้ำ (50:50) flow rate 1.0 ml/min และระยะเวลาในการวิเคราะห์สาร (retention time) เป็น 10 นาที

5. การเตรียมสารมลพิษอินทรีย์

5.1 การเตรียมเมโทลาคลอร์เข้มข้น 100 mg/L

ปิเปต Metolaclo-Dual 8E (84.6%) ปริมาณ 0.12 ml ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 1,000 ml แล้วจึงเติมน้ำปราศจากไอออนจนถึงขีดปริมาตร จะได้เมโทลาคลอร์ความเข้มข้น 100 mg/L

5.2 การเตรียมไซโครไนท์เข้มข้น 20 mg/L

ชั่งไซโครไนท์ (90%) ปริมาณ 0.022 g เติมน้ำปราศจากไอออนประมาณ 250 ml จากนั้นจึงนำไปทำละลายด้วยเครื่องกวนสารละลาย (magnetic stirrer) แล้วนำไปใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 1,000 ml ปรับปริมาตรโดยน้ำปราศจากไอออนจนถึงขีดปริมาตร จะได้ไซโครไนท์ความเข้มข้น 20 mg/L

6. การเตรียมสารละลายกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl)

6.1 สารละลายกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) เข้มข้น 0.5 M

ปิเปตกรดซัลฟิวริกเข้มข้น (34%) 4.47 ml ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 ml แล้วจึงเติมน้ำปราศจากไอออนจนถึงขีดปริมาตร จะได้สารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.5 M

6.2 สารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.01%

ปิเปตกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (36.5 - 38%) 4.17 ml ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 ml แล้วจึงเติมน้ำปราศจากไอออนจนถึงขีดปริมาตร จะได้สารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.01%

6.3 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 0.5 M

ห้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 2 g ละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน ใส่ในขวดวัดปริมาตร ขนาด 100 mL แล้วจึงเติมน้ำปราศจากไอออนจนถึงขีดปริมาตร จะได้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.5 M

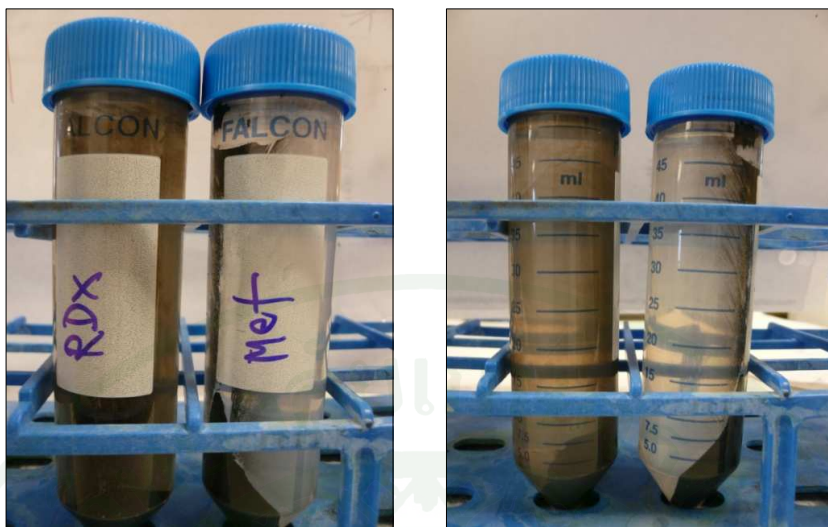
7. การนำกลับมาใช้ใหม่ของ NZVI

7.2 อนุภาคเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ขนาดนาโนเมตรที่ผ่านการล้างด้วยกรด (recovery nano zero valent iron, RNZVI)

การล้าง NZVI ทำภายในตู้ที่ปราศจากออกซิเจน (anaerobic chamber) โดยนำ NZVI ที่ผ่านการบำบัด และปั่นเหวี่ยงแยกสารมลพิษอินทรีย์ออก (ภาพที่ 10) ปริมาณ 1 g มาเติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.01% ปริมาตร 100 ml เขย่าสารละลายด้วยเครื่องเขย่า 15 นาที แล้วล้างออกด้วยน้ำที่ปราศจากไอออน จากนั้นจึงแยก NZVI ออกจากสารละลายโดยการเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 4,000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 40 นาที RNZVI ที่อยู่นั่นของหลอดเหวี่ยงถูกนำมาใช้สำหรับการทดลอง

7.1 อนุภาคเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ขนาดนาโนเมตรที่ไม่ผ่านการล้างด้วยกรด (aged nano zero valent iron, ANZVI)

การเตรียม ANZVI ทำภายในตู้ที่ปราศจากออกซิเจน (anaerobic chamber) โดยนำ NZVI ที่ผ่านการบำบัดมาปั่นเหวี่ยงแยกสารมลพิษอินทรีย์ออก แล้วล้างออกด้วยน้ำที่ปราศจากไอออน จากนั้นจึงแยก ANZVI ออกจากสารละลายโดยการเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 4,000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 40 นาที ANZVI ที่อยู่นั่นของหลอดเหวี่ยงถูกนำมาใช้สำหรับการทดลอง



ภาพที่ 10 NZVI หลังจากที่ใช้บำบัดเมโทคลอร์และไซโครไนท์

8. การบำบัดเมโทคลอร์โดย NZVI

8.1 ศึกษาปริมาณ NZVI ที่มีผลต่อการบำบัดเมโทคลอร์

ทำการทดลองบำบัดเมโทคลอร์ปริมาตร 100 ml ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 mg/L โดยใช้ NZVI ปริมาณ 0.5, 1 และ 5%(w/v) ทำซ้ำจำนวน 3 ขวด เขย่าสารละลายด้วยเครื่องเขย่า เก็บตัวอย่างที่เวลา 0 10 20 30 40 50 60 80 100 และ 120 นาที ตามลำดับ นำตัวอย่างที่ได้ไปเหวี่ยงที่ความเร็ว 14,000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 5 นาที ทำซ้ำ 2 ครั้ง เพื่อแยกตะกอนเหล็ก จากนั้นนำไปวัดด้วยเครื่อง High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) นำค่าที่ได้มาสร้างกราฟเพื่อหาความเข้มข้นที่เหลืออยู่ และคำนวณหาค่าคงที่ของการบำบัด (destruction rate constant, k_{obs}) เมโทคลอร์

8.2 ศึกษาผลของค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ต่อการบำบัดเมโทคลอร์

เตรียมเมโทคลอร์ปริมาตร 100 ml ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 mg/L ซึ่งมีความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นเป็น 5.37 จากนั้นจึงปรับค่าความเป็นกรด-ด่างด้วยกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) 0.5 M หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 0.5 M ที่เตรียมได้จากข้อ 6 ให้ได้ความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 4 7 และ 10 จากนั้นจึงเติม NZVI 1%(w/v) ทำซ้ำจำนวน 3 ขวด เขย่าสารละลายด้วยเครื่องเขย่า เก็บตัวอย่างที่เวลา 0 10 20 30 40 50 60 80 100 และ 120 นาที ตามลำดับ นำตัวอย่างที่ได้ไปเหวี่ยงที่

ความเร็ว 14,000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 5 นาที ทำซ้ำ 2 ครั้งเพื่อแยกตะกอนหลัก จากนั้นนำไปวัดด้วยเครื่อง High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) นำค่าที่ได้มาสร้างกราฟเพื่อหาความเข้มข้นที่เหลืออยู่ และคำนวณหาค่าคงที่ของการบำบัด (destruction rate constant, k_{obs}) เมโทลาคลอร์

8.3 ศึกษาผลของเกลืออะลูมิเนียม (Al-Salt) ต่อการบำบัดเมโทลาคลอร์

ศึกษาผลของเกลืออะลูมิเนียมโดยใช้อะลูมิเนียมซัลเฟต ($Al_2(SO_4)_3$) และอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($AlCl_3$) 0.05 และ 0.1% (w/v) โดยเติมเกลื่อดังกล่าวลงในขวดรูปชมพู่แล้วเติมเมโทลาคลอร์ปริมาตร 100 ml ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 mg/L NZVI ปริมาณ 1% (w/v) ทำซ้ำจำนวน 3 ขวด เขย่าสารละลายด้วยเครื่องเขย่า เก็บตัวอย่างที่เวลา 0 10 20 30 40 50 60 80 100 และ 120 นาที ตามลำดับ นำตัวอย่างที่ได้ไปเหวี่ยงที่ความเร็ว 14,000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 5 นาที ทำซ้ำ 2 ครั้งเพื่อแยกตะกอนหลัก จากนั้นนำไปวัดด้วยเครื่อง High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) นำค่าที่ได้มาสร้างกราฟเพื่อหาความเข้มข้นที่เหลืออยู่ และคำนวณหาค่าคงที่ของการบำบัด (destruction rate constant, k_{obs}) เมโทลาคลอร์

8.4 ศึกษาผลของสภาวะออกซิเจน (aerobic condition) และสภาวะไร้ออกซิเจน (anaerobic condition) ต่อการบำบัดเมโทลาคลอร์

8.4.1 ผลของสภาวะออกซิเจน

ทำการทดลองบำบัดเมโทลาคลอร์ปริมาตร 100 ml ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 mg/L โดยใช้ NZVI ปริมาณ 0.5, 1 และ 5% (w/v) ทำซ้ำจำนวน 3 ขวด เขย่าสารละลายด้วยเครื่องเขย่า เก็บตัวอย่างที่เวลา 0 10 20 30 40 50 60 80 100 และ 120 นาที ตามลำดับ นำตัวอย่างที่ได้ไปเหวี่ยงที่ความเร็ว 14,000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 5 นาที ทำซ้ำ 2 ครั้งเพื่อแยกตะกอนหลัก จากนั้นนำไปวัดด้วยเครื่อง High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) นำค่าที่ได้มาสร้างกราฟเพื่อหาความเข้มข้นที่เหลืออยู่ และคำนวณหาค่าคงที่ของการบำบัด (destruction rate constant, k_{obs}) เมโทลาคลอร์

8.4.2 ผลของสภาวะไร้ออกซิเจน

การทดลองนี้ทำภายในตู้ปราศจากก๊าซออกซิเจน (anaerobic chamber) โดยเตรียมเมโทคลอรัปรีมาตร 100 ml ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 mg/L และใช้ NZVI ปริมาณ 0.5, 1 และ 5% (w/v) ทำซ้ำจำนวน 3 ขวด เขย่าสารละลายด้วยเครื่องเขย่า เก็บตัวอย่างที่เวลา 0 5 10 20 30 40 50 60 80 100 และ 120 นาที ตามลำดับ นำตัวอย่างที่ได้ไปเหวี่ยงที่ความเร็ว 14,000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 5 นาที ทำซ้ำ 2 ครั้งเพื่อแยกตะกอนหลัก โดยทำการทดลองภายนอกตู้ปราศจากออกซิเจน (anaerobic chamber) จากนั้นนำออกมาวัดด้วยเครื่อง High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) นำค่าที่ได้มาสร้างกราฟเพื่อหาความเข้มข้นที่เหลืออยู่ และคำนวณหาค่าคงที่ของการบำบัด (destruction rate constant, k_{obs}) เมโทคลอรั

9. การบำบัดไซโครไนท์โดย NZVI

9.1 ศึกษาปริมาณ NZVI ที่มีผลต่อการบำบัดไซโครไนท์

ทำการทดลองบำบัดไซโครไนท์ปริมาตร 100 ml ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 mg/L โดยใช้ NZVI ปริมาณ 0.05, 0.1 และ 0.25% (w/v) ทำซ้ำจำนวน 3 ขวด เขย่าสารละลายด้วยเครื่องเขย่า เก็บตัวอย่างที่เวลา 0 5 10 20 30 40 50 60 80 100 และ 120 นาที ตามลำดับ นำตัวอย่างที่ได้ไปเหวี่ยงที่ความเร็ว 14,000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 5 นาที ทำซ้ำ 2 ครั้งเพื่อแยกตะกอนหลัก จากนั้นนำไปวัดด้วยเครื่อง High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) นำค่าที่ได้มาสร้างกราฟเพื่อหาความเข้มข้นที่เหลืออยู่ และคำนวณหาค่าคงที่ของการบำบัด (destruction rate constant, k_{obs}) ไซโครไนท์

9.2 ศึกษาผลการค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ต่อการบำบัดไซโครไนท์

เตรียมไซโครไนท์ปริมาตร 100 ml ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 mg/L ซึ่งมีความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นเป็น 6.65 จากนั้นจึงปรับค่าความเป็นกรด-ด่างด้วย กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) 0.5 M หรือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 0.5 M ที่เตรียมได้จากข้อ 6 ให้ได้ความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 4 7 และ 10 จากนั้นจึงเติม NZVI ปริมาณ 0.25 % (w/v) ทำซ้ำจำนวน 3 ขวด เขย่าสารละลายด้วยเครื่องเขย่า เก็บตัวอย่างที่เวลา 0 5 10 20 30 40 50 60 80 100 และ 120 นาที ตามลำดับ นำตัวอย่างที่ได้ไปเหวี่ยงที่ความเร็ว 14,000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 5 นาที ทำซ้ำ 2 ครั้งเพื่อแยกตะกอนหลัก จากนั้นนำไปวัด

ด้วยเครื่อง High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) นำค่าที่ได้มาสร้างกราฟเพื่อหาความเข้มข้นที่เหลืออยู่ และคำนวณหาค่าคงที่ของการบำบัด (destruction rate constant, k_{obs}) ไชโครไนท์

9.3 ศึกษาผลของเกลืออะลูมิเนียม (Al-Salt) ต่อการบำบัด ไชโครไนท์

ศึกษาผลของเกลืออะลูมิเนียมโดยใช้อะลูมิเนียมซัลเฟต ($Al_2(SO_4)_3$) และอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($AlCl_3$) ในปริมาณ 0.05 และ 0.1% (w/v) โดยเติมเกลือดังกล่าวลงในขวดรูปชมพู่ แล้วเติม ไชโครไนท์ ปริมาตร 100 ml ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 mg/L NZVI ปริมาณ 0.25% (w/v) ทำซ้ำจำนวน 3 ขวด เขย่าสารละลายด้วยเครื่องเขย่า เก็บตัวอย่างที่เวลา 0 5 10 20 30 40 50 และ 60 นาที ตามลำดับ นำตัวอย่างที่ได้ไปเหวี่ยงที่ความเร็ว 14,000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 5 นาที ทำซ้ำ 2 ครั้ง เพื่อแยกตะกอนเหลือ จากนั้นนำไปวัดด้วยเครื่อง High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) นำค่าที่ได้มาสร้างกราฟเพื่อหาความเข้มข้นที่เหลืออยู่ และคำนวณหาค่าคงที่ของการบำบัด (destruction rate constant, k_{obs}) ไชโครไนท์

9.4 ศึกษาผลของสภาวะออกซิเจน (aerobic condition) และสภาวะไร้ออกซิเจน (anaerobic condition) ต่อการบำบัด ไชโครไนท์

9.4.1 ผลของสภาวะออกซิเจน

ทำการทดลองบำบัด ไชโครไนท์ ปริมาตร 100 ml ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 mg/L โดยใช้ NZVI ปริมาณ 0.05, 0.1 และ 0.25% (w/v) ทำซ้ำจำนวน 3 ขวด เขย่าสารละลายด้วยเครื่องเขย่าเก็บตัวอย่างที่เวลา 0 5 10 20 30 40 50 60 80 100 และ 120 นาที ตามลำดับ นำตัวอย่างที่ได้ไปเหวี่ยงที่ความเร็ว 14,000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 5 นาที ทำซ้ำ 2 ครั้ง เพื่อแยกตะกอนเหลือ จากนั้นนำไปวัดด้วยเครื่อง High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) นำค่าที่ได้มาสร้างกราฟเพื่อหาความเข้มข้นที่เหลืออยู่ และคำนวณหาค่าคงที่ของการบำบัด (destruction rate constant, k_{obs}) ไชโครไนท์

9.4.2 ผลของสภาวะไร้ออกซิเจน

การทดลองนี้ทำภายในตู้ปราศจากก๊าซออกซิเจน โดยเตรียมไซโครไนท์ ปริมาตร 100 ml ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 mg/L และใช้ NZVI ปริมาณ 0.05, 0.1 และ 0.25% (w/v) ทำซ้ำจำนวน 3 ขวด เขย่าสารละลายด้วยเครื่องเขย่า เก็บตัวอย่างที่เวลา 0 5 10 20 30 40 50 60 80 100 และ 120 นาที ตามลำดับ นำตัวอย่างที่ได้ไปเหวี่ยงที่ความเร็ว 14,000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 5 นาที ทำซ้ำ 2 ครั้งเพื่อแยกตะกอนเหลือ โดยทำการทดลองภายนอกตู้ปราศจากออกซิเจน (anaerobic chamber) จากนั้นนำออกมาวัดด้วยเครื่อง High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) นำค่าที่ได้มาสร้างกราฟเพื่อหาความเข้มข้นที่เหลืออยู่ และคำนวณหาค่าคงที่ของการบำบัด (destruction rate constant, k_{obs}) ไซโครไนท์

10. การบำบัดสารมลพิษอินทรีย์โดยใช้ NZVI ที่นำกลับมาใช้ใหม่

10.1 การบำบัดสารมลพิษอินทรีย์โดยใช้ RNZVI

10.1.1 การบำบัดเมโทลาคลอร์โดยใช้ RNZVI

การทดลองบำบัดเมโทลาคลอร์ปริมาตร 100 ml ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 mg/L เติม RNZVI ที่เตรียมจากข้อ 7.1 ปริมาณ 1% (w/v) ทำซ้ำจำนวน 3 ขวด เขย่าสารละลายด้วยเครื่องเขย่า เก็บตัวอย่างที่เวลา 0 20 40 60 80 และ 120 นาที ตามลำดับ นำตัวอย่างที่ได้ไปเหวี่ยงที่ความเร็ว 14,000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 5 นาที ทำซ้ำ 2 ครั้งเพื่อแยกตะกอนเหลือ จากนั้นนำไปวัดด้วยเครื่อง High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) นำค่าที่ได้มาสร้างกราฟเพื่อหาความเข้มข้นที่เหลืออยู่ และคำนวณหาค่าคงที่ของการบำบัด (destruction rate constant, k_{obs}) เมโทลาคลอร์

10.1.2 การบำบัดไซโครไนท์โดยใช้ RNZVI

ทำการทดลองบำบัดไซโครไนท์ปริมาตร 20 ml ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 mg/เดิม RNZVI ที่เตรียมจากข้อ 7.1 ปริมาณ 0.25% (w/v) ทำซ้ำจำนวน 3 ขวด เขย่าสารละลายด้วยเครื่องเขย่า เก็บตัวอย่างที่เวลา 0 20 40 60 80 และ 120 นาที ตามลำดับ นำตัวอย่างที่ได้ไปเหวี่ยงที่ความเร็ว 14,000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 5 นาที ทำซ้ำ 2 ครั้งเพื่อแยกตะกอนเหลือ จากนั้นนำไปวัด

ด้วยเครื่อง High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) ยี่ห้อ Shimadzu นำค่าที่ได้มาสร้างกราฟเพื่อหาความเข้มข้นที่เหลืออยู่ และคำนวณหาค่าคงที่ของการบำบัด (destruction rate constant, k_{obs}) ไชโครไนท์

10.2 การบำบัดสารมลพิษอินทรีย์โดยใช้ ANZVI

10.2.1 การบำบัดเมโทคลอร์โดยใช้ ANZVI

ทำการทดลองบำบัดเมโทคลอร์ปริมาตร 100 ml ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 mg/L เดิม ANZVI ที่เตรียมจากข้อ 7.2 ปริมาณ 1% (w/v) ทำซ้ำจำนวน 3 ขวด เขย่าสารละลายด้วยเครื่องเขย่า เก็บตัวอย่างที่เวลา 0 20 40 60 80 และ 120 นาที ตามลำดับ นำตัวอย่างที่ได้ไปเหวี่ยงที่ความเร็ว 14,000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 5 นาที ทำซ้ำ 2 ครั้ง เพื่อแยกตะกอนเหล็ก จากนั้นนำไปวัดด้วยเครื่อง High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) ยี่ห้อ Shimadzu นำค่าที่ได้มาสร้างกราฟเพื่อหาความเข้มข้นที่เหลืออยู่ และคำนวณหาค่าคงที่ของการบำบัด (destruction rate constant, k_{obs}) เมโทคลอร์

10.2.2 การบำบัดไชโครไนท์โดยใช้ ANZVI

ทำการทดลองบำบัดไชโครไนท์ ปริมาตร 20 ml ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 mg/L เดิม ANZVI ที่เตรียมจากข้อ 7.2 ปริมาณ 0.25% (w/v) ปริมาณ 0.25 % (w/v) ทำซ้ำจำนวน 3 ขวด เขย่าสารละลายด้วยเครื่องเขย่า เก็บตัวอย่างที่เวลา 0 20 40 60 80 และ 120 นาที ตามลำดับ นำตัวอย่างที่ได้ไปเหวี่ยงที่ความเร็ว 14,000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 5 นาที ทำซ้ำ 2 ครั้งเพื่อแยกตะกอนเหล็ก จากนั้นนำไปวัดด้วยเครื่อง High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) นำค่าที่ได้มาสร้างกราฟเพื่อหาความเข้มข้นที่เหลืออยู่ และคำนวณหาค่าคงที่ของการบำบัด (destruction rate constant, k_{obs}) ไชโครไนท์

11. สถานที่ทำการทดลอง

ห้องปฏิบัติการชั้น 8 อาคารวิทยาสุคนธ์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
บางเขน

Dr. Steve Comfort's laboratory The School of Natural Resource, Institute of Agriculture
and Resource, University of Nebraska Lincoln, USA

12. ระยะเวลาที่ทำการวิจัย

เดือนเมษายน พ.ศ. 2552 ถึง เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2553

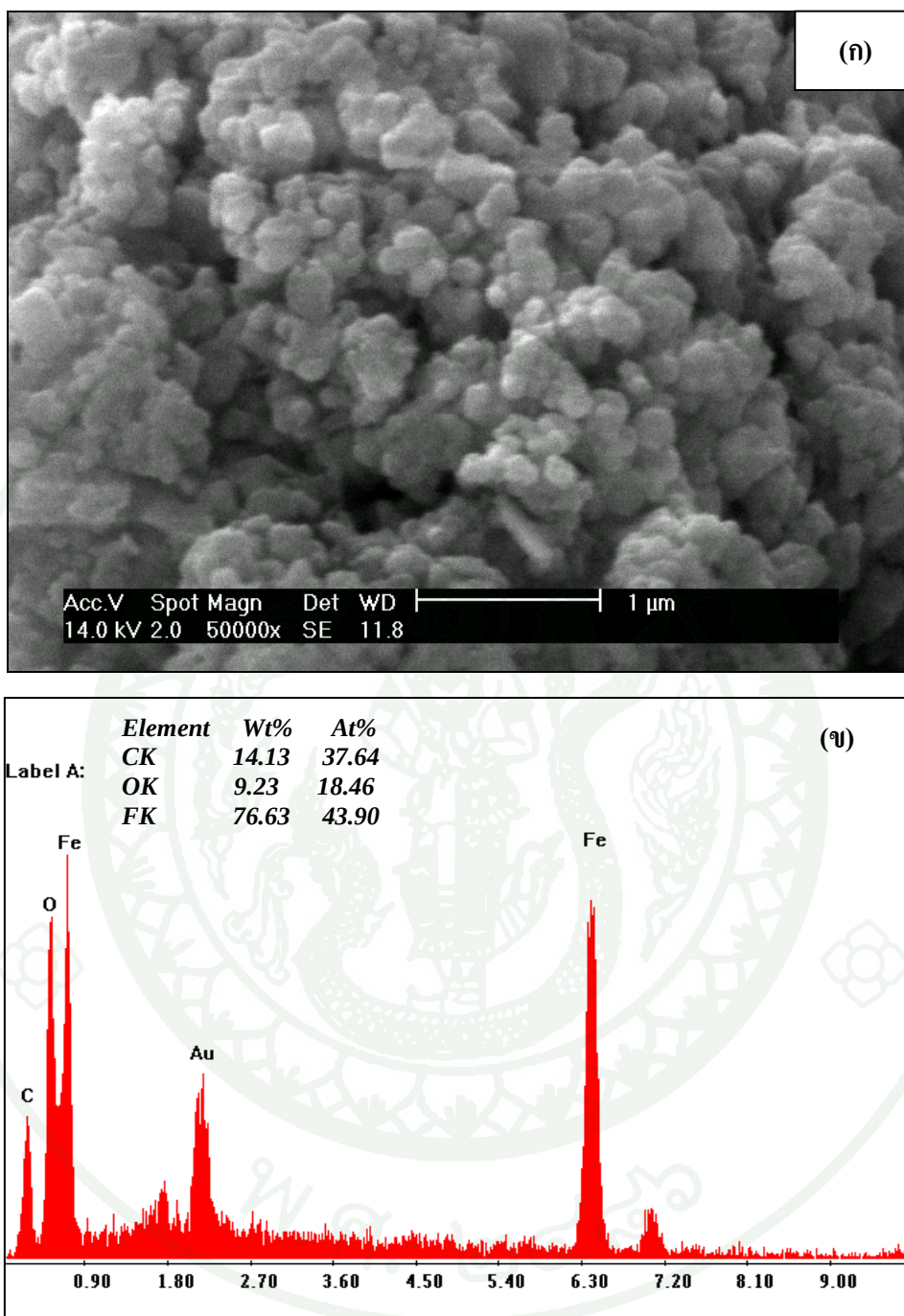
ผลและวิจารณ์

1. ลักษณะทางสัณฐานวิทยา (morphology) ของ NZVI

อนุภาคเหล็กขนาดนาโนเมตร (NANOFER 25S) ที่ได้จากบริษัท Nanoiron, S.R.O. (Czech Republic) มีลักษณะเป็นของแข็งสีดำขนาดเล็กกระจายตัวอยู่ในสารอินทรีย์เพื่อรักษาสภาพและป้องกันการออกซิไดซ์ของ NZVI ก่อนใช้งาน (ภาพที่ 11) เมื่อนำ NZVI ไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) (ภาพที่ 12(ก)) พบว่ามีลักษณะเป็นก้อนกลมจับตัวกันเป็นกลุ่มอันเนื่องมาจากคุณสมบัติทางแม่เหล็กของเหล็ก (magnetic property) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Sun *et al.* (2006) ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ NZVI ที่ได้จากการสังเคราะห์โดยใช้สารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์และโซเดียมโบโรไฮไดรด์ พบว่า 90 เปอร์เซ็นต์ของ NZVI มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 100 นาโนเมตร และจับตัวกันเป็นกลุ่มคล้ายสายโซ่ต่อกัน และเมื่อทำการวิเคราะห์ธาตุโดยเครื่อง Energy Dispersive X-ray Analyzer (EDX) พบว่าองค์ประกอบโดยส่วนมากของ NZVI ประกอบด้วยเหล็กปริมาณ 76.63% (w/v) (ภาพที่ 12(ข)) และจาก technical data sheet ของ NANOFER 25S (ภาคผนวก ก) พบว่า 50 เปอร์เซ็นต์ของ NZVI มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 50 นาโนเมตร มีพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) ประมาณ $25 \text{ m}^2/\text{g}$ และมีองค์ประกอบหลักเป็นเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ (Fe^0)



ภาพที่ 11 อนุภาคเหล็กขนาดนาโนเมตร (NANOFER 25S) ที่ได้จากบริษัท Nanoiron, S.R.O.

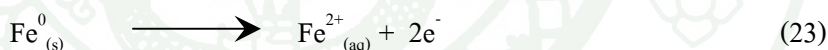


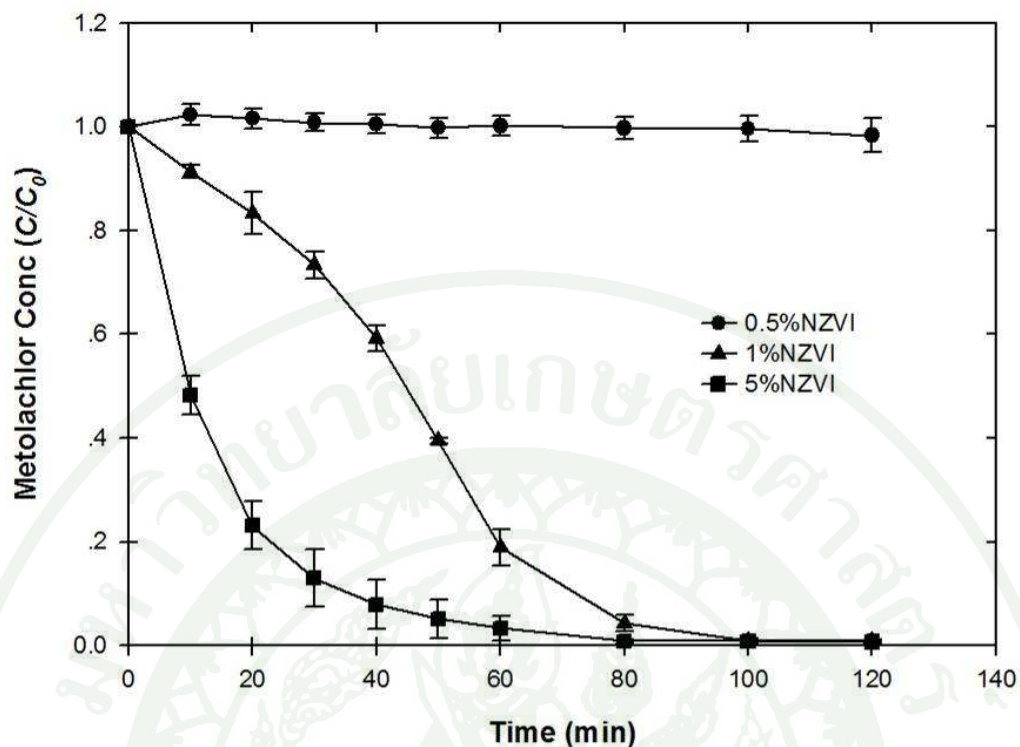
ภาพที่ 12 (ก) ลักษณะของอนุภาคเหล็กขนาดนาโนเมตร (NANOfer 25S) โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) และ (ข) องค์ประกอบของอนุภาคเหล็กขนาดนาโนเมตร (NANOfer 25S) โดย Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX)

2. การบำบัดเมโทคลออร์โดย NZVI

2.1 ผลของปริมาณ NZVI ต่อการบำบัดเมโทคลออร์

การบำบัดเมโทคลออร์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 mg/L โดยใช้ NZVI ปริมาณ 0.5% (w/v) 1% (w/v) และ 5% (w/v) พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ NZVI ทำให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มขึ้น โดยประสิทธิภาพในการบำบัดเมโทคลออร์เป็น 100 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้ NZVI ปริมาณ 1% (w/v) และ 5% (w/v) โดยใช้ระยะเวลาสัมผัส 120 นาที ดังแสดงในภาพที่ 13 เนื่องจาก NZVI มีขนาดเล็ก พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่าง NZVI กับสารมลพิษมีมาก จึงทำให้เกิดปฏิกิริยารุนแรง กับมลสารอินทรีย์ (Li *et al.*, 2006) โดยสารกลุ่มคลอโรอะเซทานิมาด์ เช่น เมโทคลออร์ ได้รับอิเล็กตรอน (e^-) จากปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) ของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ ดังสมการที่ 23 และทำปฏิกิริยา hydrogenolysis ที่ chloroacetyl group ได้ผลิตภัณฑ์เป็น acetyl group ($R-COCH_3$) และคลอไรด์ไอออน (Cl^-) ดังสมการที่ 24 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยารีดักชันของเมโทคลออร์โดยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์คือ 2-ethyl,6-methyl-N-(methoxyprop-2-yl) acetilide (Chester *et al.*, 1989) โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยา dechlorination ของ NZVI จะเป็นสัดส่วนที่ขึ้นกับปริมาณ และพื้นที่ผิวของเหล็ก ซึ่งปฏิกิริยารีดักชันที่เกิดขึ้นมักเป็นการถ่ายทอดอิเล็กตรอนที่ผิวหน้าของเหล็ก (Sayles *et al.*, 1997)





ภาพที่ 13 การบำบัดเมโทลาลอร์ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 mg/L โดยใช้ NZVI ปริมาณ 0.5 % (w/v) 1% (w/v) และ 5% (w/v)

จลศาสตร์ของการบำบัดเมโทลาลอร์สอดคล้องกับสมการ pseudo-first-order (สมการที่ 25) โดยค่าคงที่ของการบำบัด (destruction rate constant, k_{obs}) เมื่อใช้ NZVI ปริมาณ 0.5 % (w/v) 1% (w/v) และ 5% (w/v) เป็น 0.002×10^{-3} 0.218×10^{-3} และ $0.699 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ ตามลำดับ (ตารางที่ 20) เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดซึ่งมีปริมาณของ NZVI แตกต่างกัน สามารถทำได้โดยการปรับค่า (normalization) ให้อยู่ในรูปที่เปรียบเทียบกันได้ โดยใช้สมการการหาค่าคงที่จำเพาะการเกิดปฏิกิริยา (specific reaction rate, k_{SA}) (สมการที่ 26 และ 27) (Johnson *et al.*, 1996)

$$-\frac{d[\text{Metolachlor}]}{dt} = k_{\text{obs}} [\text{Metolachlor}] \quad (25)$$

$$-\frac{d[\text{Metolachlor}]}{dt} = k_{\text{SA}} \rho_a [\text{Metolachlor}] \quad (26)$$

หรือ

$$(k_{\text{SA}}) = (k_{\text{obs}}) / \rho_a \quad (27)$$

โดยที่	k_{SA}	คือ	ค่าคงที่จำเพาะของการบำบัด (specific reaction rate)
	k_{obs}	คือ	ค่าคงที่การบำบัด (removal kinetic removal) (min^{-1})
	ρ_a	คือ	พื้นที่ผิวจำเพาะของ NZVI ในสารละลาย หรือ specific surface area (m^2/L)

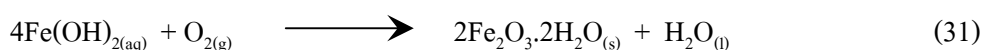
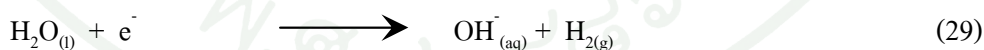
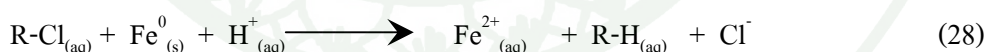
ตารางที่ 20 ค่าคงที่การบำบัด (destruction rate constant, k_{obs}) และค่าคงที่จำเพาะการเกิดปฏิกิริยา (specific reaction rate constant, k_{SA}) ของเมโทคลอโรโดยใช้ NZVI

ปริมาณ NZVI	ค่าคงที่การบำบัด (destruction rate constant, k_{obs}) ($\times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$)	ค่าคงที่จำเพาะการเกิดปฏิกิริยา (specific reaction rate constant, k_{SA}) ($\times 10^{-5} \text{ L/min.m}^2$)
0.5% (w/v)	0.002	0.16
1% (w/v)	0.218	8.72
5% (w/v)	0.699	5.59

จากตารางที่ 20 พบว่าค่าคงที่จำเพาะการเกิดปฏิกิริยา (specific reaction rate, k_{SA}) โดย NZVI ปริมาณ 1% (w/v) เป็น $8.72 \times 10^{-5} \text{ L/min.m}^2$ ขณะที่ค่าคงที่จำเพาะการเกิดปฏิกิริยาโดย NZVI ปริมาณ 0.5% (w/v) และ 5% (w/v) เป็น 0.16×10^{-5} และ $5.59 \times 10^{-5} \text{ L/min.m}^2$ ซึ่งการใช้ NZVI ปริมาณ 1% (w/v) ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด เนื่องจากการเพิ่มปริมาณ NZVI ที่มากขึ้นเป็นการเพิ่มความหนาแน่นของ NZVI ในสารมลพิษและเกิดการเกาะกลุ่ม (agglomeration) ซึ่งมีผลต่อการลดลงของพื้นที่ผิวปฏิกิริยาของ NZVI (Deng *et al.*, 2000) สอดคล้องกับงานวิจัย Wang and Zhang (1997) รายงานค่าคงที่จำเพาะการเกิดปฏิกิริยาโดย NZVI เป็น $3.0 \times 10^{-3} \text{ L/m}^2.\text{h}$ ขณะที่ค่าคงที่จำเพาะการเกิดปฏิกิริยาโดยเหล็กขนาดไมโครสเกลเป็น $1.0 \times 10^{-3} \text{ L/m}^2.\text{h}$ ซึ่งการใช้ NZVI ให้ประสิทธิภาพสูงกว่าการบำบัดด้วยเหล็กขนาดไมโครสเกล เนื่องจาก NZVI มีพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) และพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยา (surface reactivity) สูงกว่าเหล็กขนาดไมโครสเกล

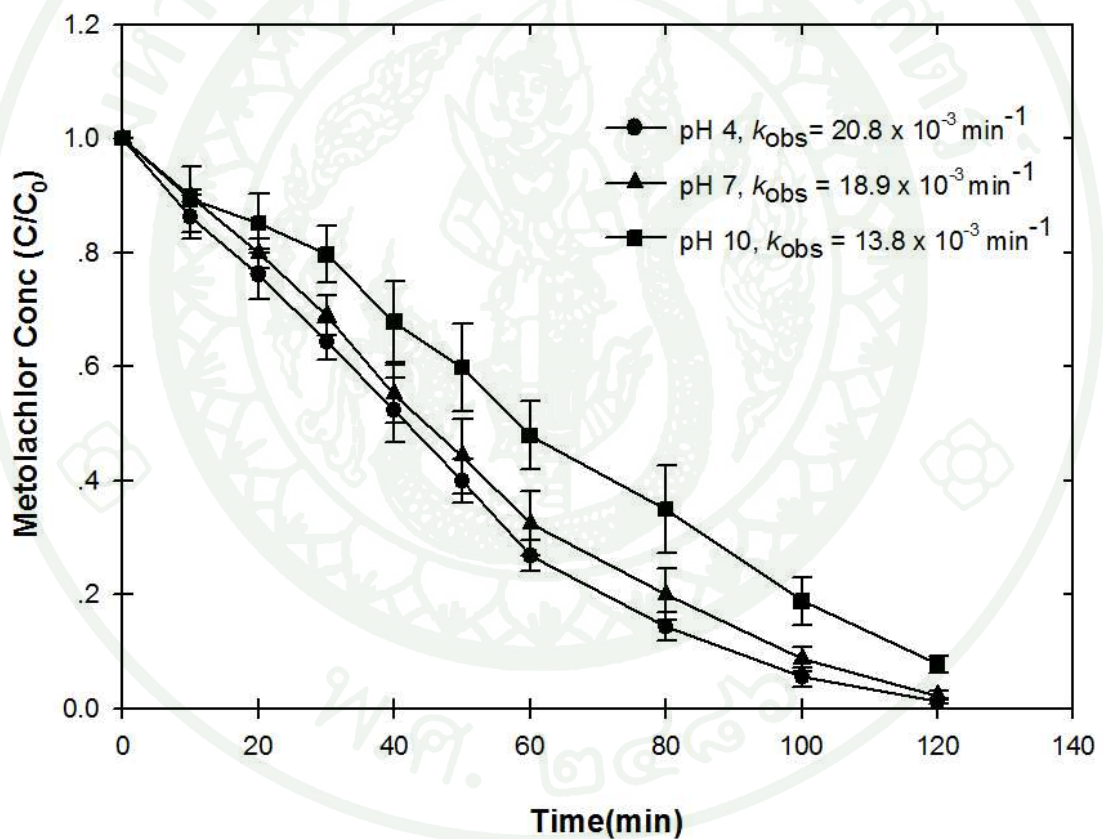
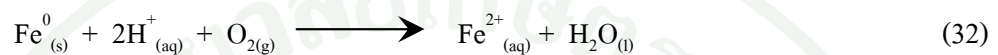
2.2 ผลของค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ต่อการบำบัดเมโทลาคลอร์

การบำบัดเมโทลาคลอร์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 mg/L ที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 4.7 และ 10 โดยใช้ NZVI ปริมาณ 1% (w/v) พบค่าคงที่ของการบำบัด (destruction rate constant, k_{obs}) เป็น 20.8×10^{-3} , 18.9×10^{-3} และ $13.8 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ ตามลำดับ ดังภาพแสดงในภาพที่ 14 จลศาสตร์ของการบำบัดเมโทลาคลอร์สอดคล้องกับสมการ pseudo-first-order โดยประสิทธิภาพในการบำบัดลดลงเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้น เนื่องจากอิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากผิวของ NZVI และเกิดปฏิกิริยา dechlorination กับเมโทลาคลอร์ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) คลอไรด์ไอออน (Cl^-) และหมู่แอลคิล (R-H) (สมการที่ 28) นอกจากนี้ยังเกิดอิเล็กตรอน (e^-) จากอนุภาคเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ ซึ่งสามารถไปออกซิไดซ์โมเลกุลของน้ำดังสมการที่ 29 ซึ่งไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ที่เกิดขึ้นจะทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างในระบบสูงขึ้น และเมื่อในสารละลายมีค่าความเป็นกรด-ด่างที่สูงส่งผลให้ไฮดรอกไซด์ไอออนทำปฏิกิริยากับเฟอร์รัสไอออนได้เหล็กไฮดรอกไซด์ (iron hydroxide) ดังสมการที่ 30 จากนั้นเหล็กไฮดรอกไซด์จึงทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่ละลายในน้ำเกิดตะกอนของเหล็กออกไซด์ (iron oxide) หรือสนิม (rust) ของเหล็กดังสมการที่ 31 (Wang, 1994) ตะกอนเหล็กออกไซด์ที่เกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าจะขัดขวางการทำปฏิกิริยา dechlorination ที่ผิวหน้าของ NZVI (Matheson and Tratnyek, 1994) การทดลองของ Satapanajaru *et al.* (2003a,b) รายงานว่าเมื่อค่าความเป็นกรด-เบสเพิ่มสูง พบเหล็กไฮดรอกไซด์หรือเหล็กออกไซด์ เช่น goethite ($\text{FeO}(\text{OH})$) อยู่ที่ผิวของเหล็กทำให้เกิดการขวางกั้นการทำปฏิกิริยาระหว่างเมโทลาคลอร์กับเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลง



ขณะที่การลดลงของค่าความเป็นกรด-ด่างส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มขึ้นเนื่องจากการลดค่าความเป็นกรด-ด่างจะทำให้มีปริมาณโปรตอน (H^+) ที่มากขึ้น ซึ่งโปรตอนจะทำปฏิกิริยากับอนุภาคเหล็กและออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (dissolved oxygen)

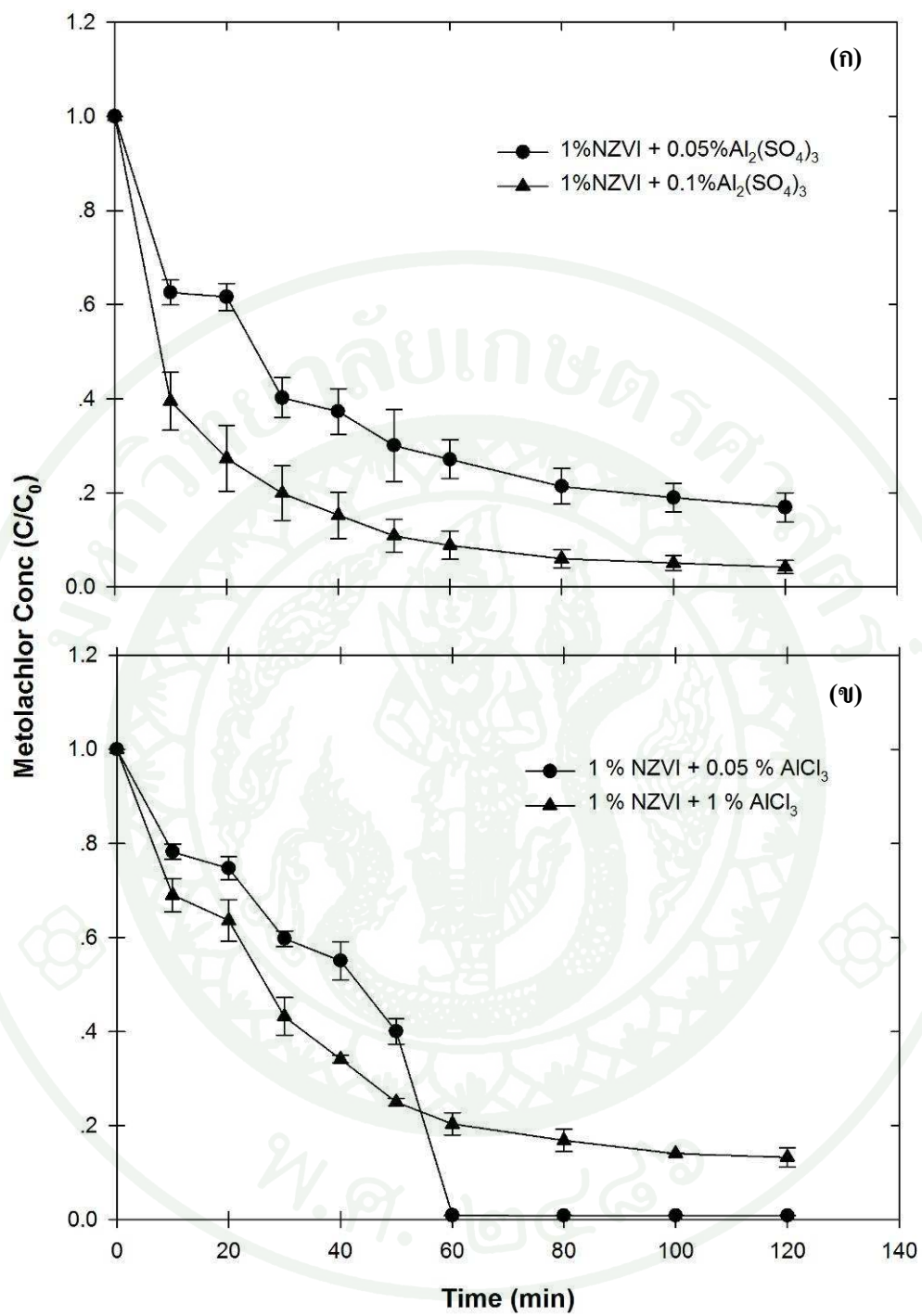
อย่างรวดเร็ว ดังสมการที่ 32 ในสถานะที่สารละลายมีความเป็นกรดมาก ความเป็นกรดของสารละลายจะช่วยล้างสิ่งปนเปื้อนหรือสิ่งสกปรกที่อยู่ผิวของเหล็กให้หลุดออก (acid washing) (Yang and Lee, 2005) จึงทำให้ NZVI สัมผัสกับเมโทลาลคลอร์ได้อย่างทั่วถึง นอกจากนี้ยังลดการเกิดเหล็กออกไซด์ หรือเหล็กไฮดรอกไซด์ที่เคลือบอยู่บนผิวหน้าของเหล็ก (Dombek *et al*, 1999) ดังนั้นจึงเป็นการเพิ่มพื้นที่ปฏิกิริยา (surface reactivity) ในการทำปฏิกิริยาระหว่างเมโทลาลคลอร์กับ NZVI ทำให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น



ภาพที่ 14 การบำบัดเมโทลาลคลอร์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 mg/L ที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 4 7 และ 10 โดยใช้ NZVI ปริมาณ 1% (w/v)

2.3 ผลของเกลือของอะลูมิเนียม (Al-Salt) ต่อการบำบัดเมโทลาคลอร์

การบำบัดเมโทลาคลอร์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 mg/L โดยใช้ NZVI 1% (w/v) อะลูมิเนียมซัลเฟต ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) และอะลูมิเนียมคลอไรด์ (AlCl_3) ปริมาณ 0.05% (w/v) และ 0.1% (w/v) พบว่าการบำบัดโดยใช้เกลือของอะลูมิเนียมทั้งสองชนิดมีลักษณะเป็นไปในแนวทางเดียวกัน โดยเมื่อเพิ่มปริมาณเกลือจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 15 โดยการใช้อะลูมิเนียมซัลเฟต หรืออะลูมิเนียมคลอไรด์ร่วมกับ NZVI ยังส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงมากกว่าการใช้ NZVI เพียงอย่างเดียว จลศาสตร์ของการบำบัดเมโทลาคลอร์โดยการใช้อินนุภาคเหล็กร่วมกับเกลืออะลูมิเนียมทั้งสองชนิดสอดคล้องกับสมการ pseudo-first-order โดยค่าคงที่ของการบำบัด (destruction rate constant, k_{obs}) เป็น 20.4×10^{-3} และ $60.0 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ เมื่อใช้อะลูมิเนียมซัลเฟต 0.05% (w/v) และ 0.1% (w/v) ตามลำดับ และค่าคงที่ของการบำบัดเป็น 20.72×10^{-3} และ $24.38 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ เมื่อใช้อะลูมิเนียมคลอไรด์ 0.05% (w/v) และ 0.1% (w/v) ตามลำดับ ค่าคงที่ของการบำบัดสูงขึ้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณเกลือของอะลูมิเนียม ดังแสดงในตารางที่ 21 โดยเกลือของอะลูมิเนียมจะช่วยลดการเกิดฟิล์มของเหล็กออกไซด์บนผิวของโลหะ (iron passivation) (Farrell *et al.*, 1999) Satapanajaru *et al.* (2003b) ได้ทำการศึกษาการเพิ่มอัตราการทำลายเมโทลาคลอร์โดยใช้เกลือของอะลูมิเนียมและไอออนระหว่างการทำบำบัดด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ และวัดปริมาณความเข้มข้นระหว่างอะลูมิเนียมไอออนกับเฟอร์รัสไอออนพบว่าปริมาณความเข้มข้นของอะลูมิเนียมไอออน (Al^{3+}) ลดลง ขณะที่ปริมาณความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) สูงขึ้นอย่างรวดเร็ว อะลูมิเนียมไอออนเป็นตัว induce ให้เกิดเฟอร์รัสไอออน ซึ่งเฟอร์รัสไอออนเป็นสาร reductant ที่สำคัญของการเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนรูปสารมลพิษประเภท chlorinated (Amonette *et al.*, 2000) เมื่อทำการเปรียบเทียบผลของอะลูมิเนียมซัลเฟต กับ อะลูมิเนียมคลอไรด์ในปริมาณ 0.05% (w/v) พบว่าในสถานะที่มีการเติมอะลูมิเนียมซัลเฟต ให้ค่าคงที่ของการบำบัดที่มากกว่าสถานะที่มีการเติมอะลูมิเนียมคลอไรด์ เนื่องจากซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) ช่วยลดการเกิด passivation และช่วยเพิ่มการกัดกร่อนของอนุภาคเหล็กบริเวณออกไซด์ที่อยู่ผิว (Reardon, 1995) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Satapanajaru (2002) ศึกษาการบำบัดเมโทลาคลอร์ที่ปนเปื้อนในน้ำโดยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ขนาดไมโครสเกล พบค่าคงที่ของการบำบัดเป็น 0.431 และ 0.360 h^{-1} เมื่อใช้อะลูมิเนียมซัลเฟต 0.5% (w/v) และอะลูมิเนียมคลอไรด์ 0.5% (w/v) ตามลำดับ ดังนั้นการเพิ่มเกลือของอะลูมิเนียมจึงมีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดเมโทลาคลอร์



ภาพที่ 15 การบำบัดเมโทลาคลอร์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 mg/L โดยใช้ NZVI ปริมาณ 1%(w/v)
 (ก) อะลูมิเนียมซัลเฟต ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) และ(ข) อะลูมิเนียมคลอไรด์ (AlCl_3) ปริมาณ 0.05%
 (w/v) และ 0.1% (w/v)

ตารางที่ 21 ค่าคงที่การบำบัด (destruction rate constant, k_{obs}) เมโทคลอโรโดยใช้ NZVI ปริมาณ 1% (w/v) อะลูมิเนียมซัลเฟต ($Al_2(SO_4)_3$) และอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($AlCl_3$) ปริมาณ 0.05% (w/v) และ 0.1% (w/v)

ปริมาณเกลืออะลูมิเนียม		ค่าคงที่การบำบัด (destruction rate constant, k_{obs}) ($\times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$)
อะลูมิเนียมซัลเฟต ($Al_2(SO_4)_3$)	0.05% (w/v)	20.40
	0.1% (w/v)	60.00
อะลูมิเนียมคลอไรด์ ($AlCl_3$)	0.05% (w/v)	20.72
	0.1% (w/v)	24.38

2.4 ผลของสภาวะออกซิเจน (aerobic condition) และสภาวะไร้ออกซิเจน (anaerobic condition) ต่อการบำบัดเมโทคลอโร

การบำบัดเมโทคลอโรที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 mg/L โดยใช้ NZVI ปริมาณ 0.5% (w/v) 1% (w/v) และ 5% (w/v) ภายใต้สภาวะออกซิเจน พบว่าค่าคงที่จำเพาะการเกิดปฏิกิริยา (specific reaction rate constant, k_{SA}) เป็น 0.17×10^{-5} 8.72×10^{-5} และ 5.59×10^{-5} L/min.m² โดยใช้ อนุภาคเหล็กขนาดนาโนเมตร 0.5% (w/v) 1% (w/v) และ 5% (w/v) ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 22 ประสิทธิภาพการบำบัดลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ NZVI มากกว่า 1%(w/v) เนื่องจากในสภาวะออกซิเจน NZVI เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนและน้ำได้เป็นเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) และไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) (สมการที่ 33) ไฮดรอกไซด์ไอออนทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายเพิ่มขึ้น และทำให้เกิดการตกตะกอนของเหล็กไฮดรอกไซด์อยู่ที่ผิวโลหะยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง NZVI กับเมโทคลอโร ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณของ NZVI จึงมีผลทำให้เกิดเหล็กไฮดรอกไซด์เพิ่มมากขึ้นในการบำบัดเมโทคลอโร



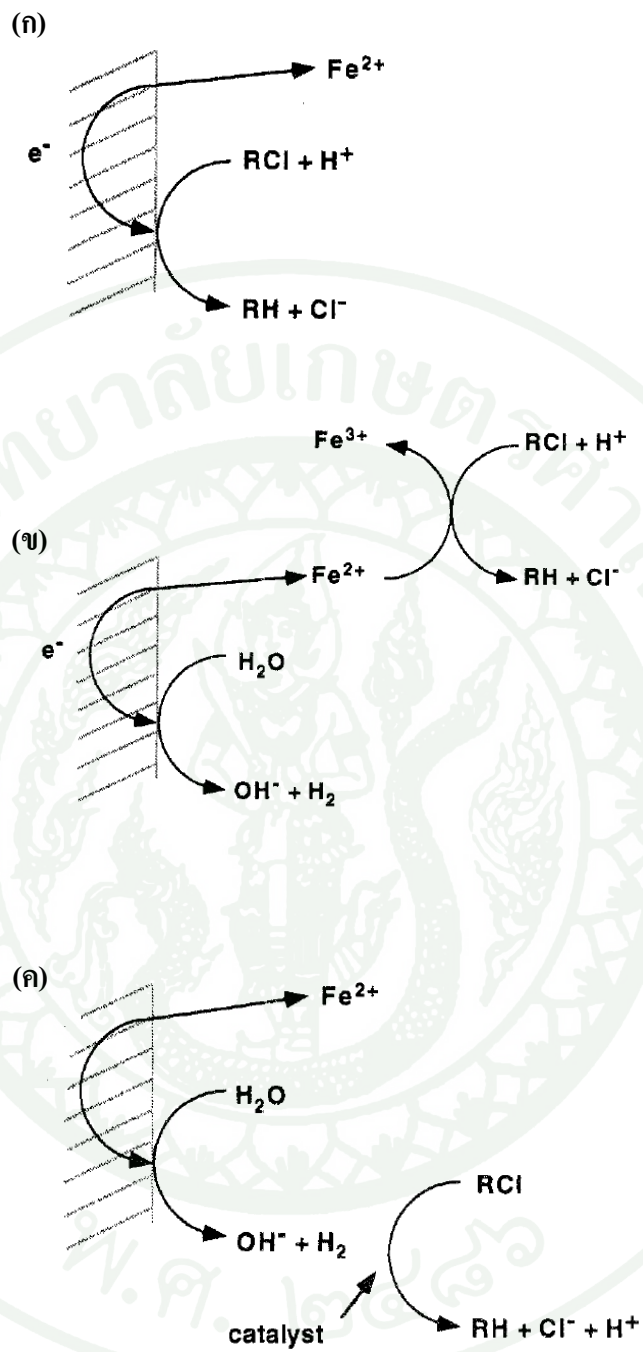
การบำบัดเมโทคลอโรที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 mg/L โดยใช้ NZVI ปริมาณ 0.5% (w/v) 1% (w/v) และ 5% (w/v) ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน พบว่าค่าคงที่จำเพาะการเกิดปฏิกิริยา (specific reaction rate constant, k_{SA}) เป็น 4.46×10^{-5} 5.28×10^{-5} และ 9.19×10^{-5} L/min.m²

ในการบำบัดเมโทคลอร์โดยใช้ NZVI ปริมาณ 0.5% (w/v) 1% (w/v) และ 5% (w/v) ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 22 ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ NZVI เพิ่มมากขึ้น

ในสภาวะไร้ออกซิเจนเมโทคลอร์จะทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอนแทนออกซิเจน และเกิดการ dechlorination ได้เป็นเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) หมู่อัลคิล (R-H) และคลอไรด์ไอออน (Cl^-) โดยการเกิดปฏิกิริยา dechlorination ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนสามารถเกิดปฏิกิริยาโดยตรงกับโลหะเหล็ก ซึ่งเกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนที่ผิวโดยตรง หรือเกิดปฏิกิริยาโดยผ่านตัวกลาง ได้แก่ เฟอร์รัส โดยเฟอร์รัสทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์สามารถทำปฏิกิริยา dehalogenation ซึ่งปฏิกิริยาจะดำเนินไปอย่างช้าๆ หรือเกิดปฏิกิริยากับไฮโดรเจนที่ได้จากการทำปฏิกิริยาของโลหะเหล็กกับน้ำ (Matheson and Trantnyek, 1994) (ภาพที่ 16) ดังนั้นปริมาณออกซิเจนที่ละลายในสารละลายมีผลต่อการเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพของการบำบัดเมโทคลอร์

ตารางที่ 22 ค่าคงที่การบำบัด (destruction rate constant, k_{obs}) และค่าคงที่จำเพาะการเกิดปฏิกิริยา (specific reaction rate constant, k_{SA}) เมโทคลอร์ โดยใช้ NZVI ภายใต้สภาวะ ออกซิเจน (aerobic condition) และสภาวะไร้ออกซิเจน (anaerobic condition)

สภาวะ	ปริมาณ NZVI	ค่าคงที่การบำบัด (destruction rate constant, k_{obs}) ($\times 10^{-2} \text{ min}^{-1}$)	ค่าคงที่จำเพาะการเกิดปฏิกิริยา (specific reaction rate constant, k_{SA}) ($\times 10^{-5} \text{ L.min}^{-1} \text{ m}^{-2}$)
ออกซิเจน	0.5% (w/v)	0.02	0.17
(aerobic	1% (w/v)	2.18	8.72
condition)	5% (w/v)	6.99	5.59
ไร้ออกซิเจน	0.5% (w/v)	0.56	4.46
(anaerobic	1% (w/v)	1.32	5.28
condition)	5% (w/v)	11.49	9.19



ภาพที่ 16 (ก) การเกิดปฏิกิริยา dehalogenation ที่ผิวของเหล็ก

(ข) การเกิดปฏิกิริยา dehalogenation โดยผ่านตัวกลาง

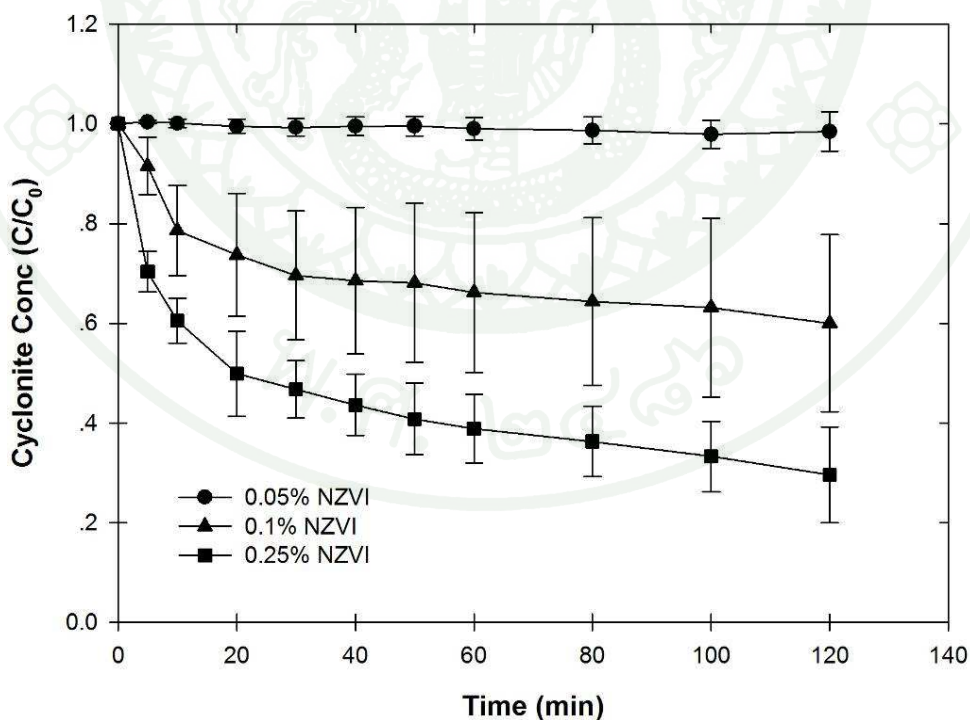
(ค) การเกิดปฏิกิริยา dehalogenation ที่เกี่ยวข้องกับไฮโดรเจน

ที่มา: Matheson and Trantnyek (1994)

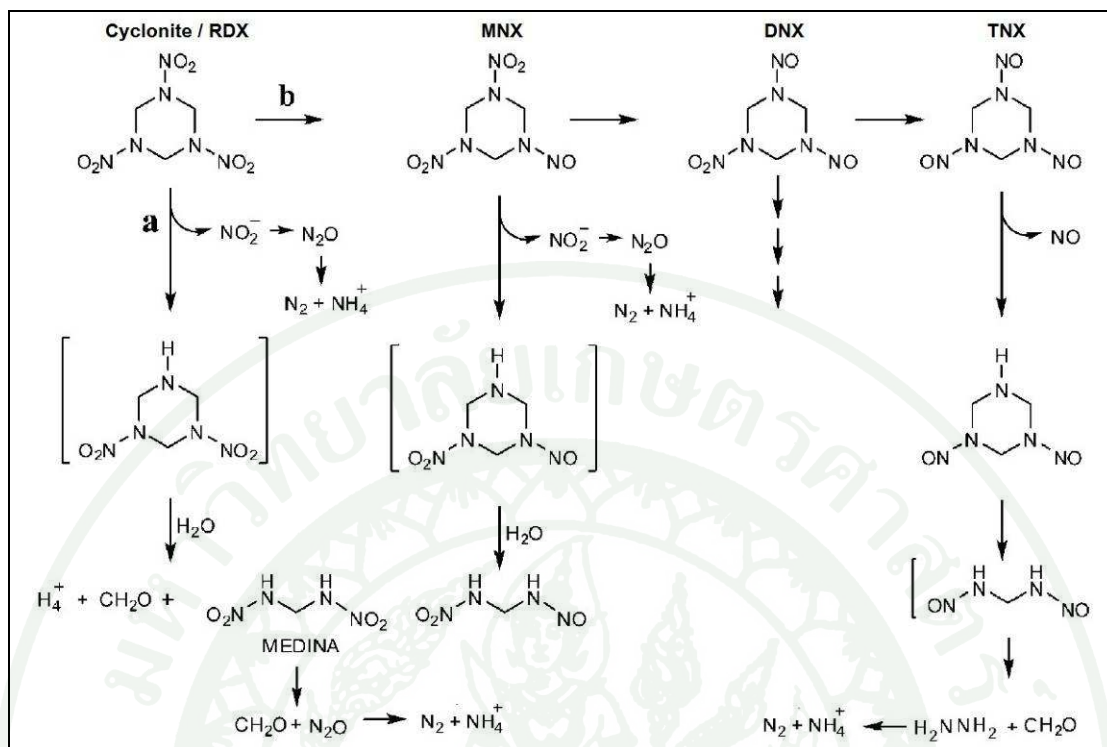
3. การบำบัดไซโครไนท์โดย NZVI

3.1 ผลของปริมาณ NZVI ต่อการบำบัดไซโครไนท์

การบำบัดไซโครไนท์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 mg/L โดยใช้ NZVI ปริมาณ 0.05% (w/v) 0.1% (w/v) และ 0.25% (w/v) พบประสิทธิภาพในการบำบัดเป็น 2 40 และ 76 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อใช้ระยะเวลาสัมผัส 2 ชั่วโมง ดังแสดงในภาพที่ 17 เนื่องจากเมื่อปริมาณของ NZVI เพิ่มขึ้น พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (specific surface area) และพื้นที่ในการทำปฏิกิริยา (reactive site) ระหว่างอนุภาคเหล็กกับสารมลพิษมีมากขึ้น Naja *et al.*, (2008) ได้ศึกษาวิถีทาง (pathway) ของปฏิกิริยาในการบำบัดไซโครไนท์พบว่า ไซโครไนท์เป็นตัวรับอิเล็กตรอนจาก NZVI ส่งผลให้ nitro group เกิดการรีดิวซ์ ได้เป็น methylenedinitramine (MEDINA), formaldehyde (HCHO), nitrite (NO_2^-), ammonium (NH_4^+), hydrazine (NH_2NH_2) และ nitrogen gas (N_2) หรือเกิดเป็น nitroso derivative (MNX, DNX และ TNX) (ภาพที่ 18) โดยไซโครไนท์ 1 โมเลกุลเมื่อถูก reduce ให้อยู่ในรูปของคาร์บอนปริมาณ 95.6 เปอร์เซ็นต์ หรืออยู่ในรูปของไนโตรเจนประมาณ 79 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 17 การบำบัดไซโครไนท์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 mg/L โดยใช้ NZVI ปริมาณ 0.05 % (w/v) 0.1% (w/v) และ 0.25% (w/v)



ภาพที่ 18 วิธีทาง (pathway) ของการบำบัดไซโครไนท์โดย NZVI

ที่มา: ดัดแปลงจาก Naja *et al.* (2008)

จลศาสตร์ของการบำบัดไซโครไนท์สอดคล้องกับสมการ Psuedo-first-order (สมการที่ 34) โดยค่าคงที่ของการบำบัด (destruction rate constant, k_{obs}) เมื่อใช้ NZVI ปริมาณ 0.05 % (w/v) 0.1% (w/v) และ 0.25% (w/v) เป็น 0.18×10^{-3} 3.91×10^{-3} และ $11.04 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ ตามลำดับ เมื่อเพิ่มปริมาณของ NZVI ทำให้ค่าคงที่ของการบำบัดเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Wanaratna *et al.* (2006) ศึกษาการบำบัดไซโครไนท์ที่ความเข้มข้น 10 mg/L โดยใช้เหล็กขนาด ไมโครสเกลวเลนซ์ศูนย์ปริมาณ 0.005 – 0.15% (w/v) พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัด ไซโครไนท์เป็น 100 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที และปฏิกิริยาของการบำบัด สอดคล้องกับสมการ Psuedo-first-order โดยค่าคงที่การบำบัดเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของเหล็กเพิ่มขึ้น ($k_{\text{obs}} = 0.095 - 0.0976 \text{ min}^{-1}$)

$$-\frac{d[\text{Cyclonite}]}{dt} = k_{\text{obs}} [\text{Cyclonite}] \quad (34)$$

สำหรับการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดซึ่งมีปริมาณของ NZVI แตกต่างกัน สามารถทำได้โดยการปรับค่า (normalization) ให้อยู่ในรูปที่เปรียบเทียบกันได้ โดยใช้สมการการหาค่าคงที่จำเพาะของการบำบัด (specific reaction rate, k_{SA}) (สมการที่ 35 และ 36) (Johnson *et al.*, 1996)

$$-\frac{d[\text{Cyclonite}]}{dt} = k_{SA}\rho_a [\text{Cyclonite}] \quad (35)$$

หรือ

$$(k_{SA}) = (k_{obs})/\rho_a \quad (36)$$

โดยที่ k_{SA} คือ ค่าคงที่จำเพาะของการบำบัด (specific reaction rate)
 k_{obs} คือ ค่าคงที่การบำบัด (removal kinetic removal) (min^{-1})
 ρ_a คือ พื้นที่ผิวจำเพาะของ NZVI ในสารละลาย
 หรือ specific surface area ($\text{m}^2 \text{L}^{-1}$)

ตารางที่ 23 ค่าคงที่การบำบัด (destruction rate constant, k_{obs}) และค่าคงที่จำเพาะการเกิดปฏิกิริยา (specific reaction rate constant, k_{SA}) ของไซโครไนท์ โดยใช้ NZVI

ปริมาณ NZVI	ค่าคงที่การบำบัด (destruction rate constant, k_{obs}) ($\times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$)	ค่าคงที่จำเพาะการบำบัด (specific reaction rate constant, k_{SA}) ($\times 10^{-4} \text{ Lmin}^{-1} \text{ m}^{-2}$)
0.05% (w/v)	0.18	0.14
0.1% (w/v)	3.91	1.56
0.25% (w/v)	11.04	1.77

จากตารางที่ 23 พบค่าคงที่จำเพาะการเกิดปฏิกิริยา (specific reaction rate, k_{SA}) ในการบำบัดไซโครไนท์โดย NZVI ปริมาณ 0.05 % (w/v) 0.1% (w/v) และ 0.25% (w/v) เป็น 0.14×10^{-4} 1.56×10^{-4} และ $1.77 \times 10^{-4} \text{ L/min.m}^2$ ตามลำดับ ค่าคงที่จำเพาะการเกิดปฏิกิริยาในการบำบัดไซโครไนท์โดย NZVI ปริมาณ 0.1% (w/v) และ 0.25% (w/v) มีค่าใกล้เคียงกันเมื่อเพิ่มปริมาณ NZVI สอดคล้องกับงานวิจัยของ Huan *et al.* (2006) รายงานว่าการเพิ่มปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ในช่วง 1.5-3.5% (w/v) เป็นการเพิ่มอัตราการบำบัดไนเตรท แต่การเพิ่มปริมาณเหล็กเท่ากับ

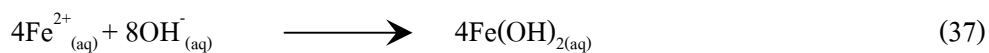
2% (w/v) พบว่าเป็นการลดประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรท และงานวิจัยของ Zhang *et al.* (2010) รายงานว่าเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัด TNT โดย NZVI ปริมาณ 2 3 5 และ 7 g/L การใช้ NZVI ปริมาณ 5 และ 7 ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์เท่ากัน โดยทั้งสองงานวิจัยเกิดจากปริมาณเหล็กที่มากเกินไปทำให้เกิดการเกาะรวมตัวกัน (aggregation) สะสมอยู่บริเวณผิวหน้า บดบังพื้นที่ผิวการทำปฏิกิริยา (reactive site) ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดน้อยลงเช่นกัน

ในงานวิจัยของ Naja *et al.* (2008) ศึกษาการบำบัดไซโครไนท์ที่ความเข้มข้น $82 \mu\text{mol/L}$ โดยใช้ NZVI ปริมาณ 0.3 g/L พบว่าในสภาวะออกซิเจนไซโครไนท์ถูกบำบัดได้ถึง 98.2 เปอร์เซ็นต์ ภายในระยะเวลาสัมผัส 5 นาที เนื่องจาก NZVI มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กประมาณ 32 นาโนเมตร และมีพื้นที่ผิวสัมผัสที่มากถึง $42.6 \text{ m}^2/\text{g}$ จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาที่ค่อนข้างไว นอกจากนี้ Naja *et al.* (2009) ยังได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบผลของ NZVI ที่เคลือบด้วย carboxymethyl cellulose (CMC) และ NZVI เพียงอย่างเดียวในการบำบัดไซโครไนท์ พบว่าการใช้ NZVI ที่เคลือบด้วย CMC ($k_{\text{obs}} 0.816 \text{ min}^{-1}$) ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดที่มากกว่าการใช้ NZVI เพียงอย่างเดียว ($k_{\text{obs}} = 0.019 \text{ min}^{-1}$) เนื่องจาก NZVI มีขนาดเล็ก สามารถเกาะรวมกันเป็นกลุ่มได้ การปรับสภาพ NZVI โดย CMC เป็นการเพิ่มการกระจายตัวของ NZVI ในสารละลายได้อีกด้วย

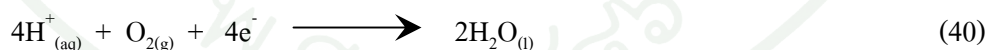
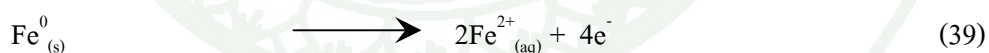
3.2 ผลของค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ต่อการบำบัดไซโครไนท์

การบำบัดไซโครไนท์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 mg/L ที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 4 7 และ 10 โดยใช้ NZVI ปริมาณ 0.25% (w/v) พบว่าค่าคงที่ของการบำบัด (destruction rate constant, k_{obs}) เป็น 2.5×10^{-3} 2.29×10^{-3} และ $4.21 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 19 จลศาสตร์ของการบำบัดไซโครไนท์สอดคล้องกับสมการ pseudo-first-order ประสิทธิภาพของการบำบัดไซโครไนท์ที่ระยะเวลาสัมผัส 120 นาทีเป็น 30 26 และ 48 เปอร์เซ็นต์สำหรับ pH 4 7 10 ตามลำดับ โดยประสิทธิภาพของการบำบัดเพิ่มสูงขึ้นเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้นในสภาวะที่สารละลายมีค่าความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้น จะทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดไซโครไนท์ลดลง เนื่องจากเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเพิ่มสูงขึ้นทำให้ปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ในสารละลายมากขึ้น ไฮดรอกไซด์ไอออนสามารถทำปฏิกิริยากับเฟอร์รัสไอออนได้เหล็กไฮดรอกไซด์ (iron hydroxide) ดังสมการที่ 37 จากนั้นเหล็กไฮดรอกไซด์จึงทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่ละลายในน้ำ เกิดตะกอนของเหล็กออกไซด์ (iron oxide) หรือสนิม (rust) ของเหล็ก ดังสมการที่ 38 (Wang, 1994) ซึ่งจะไป

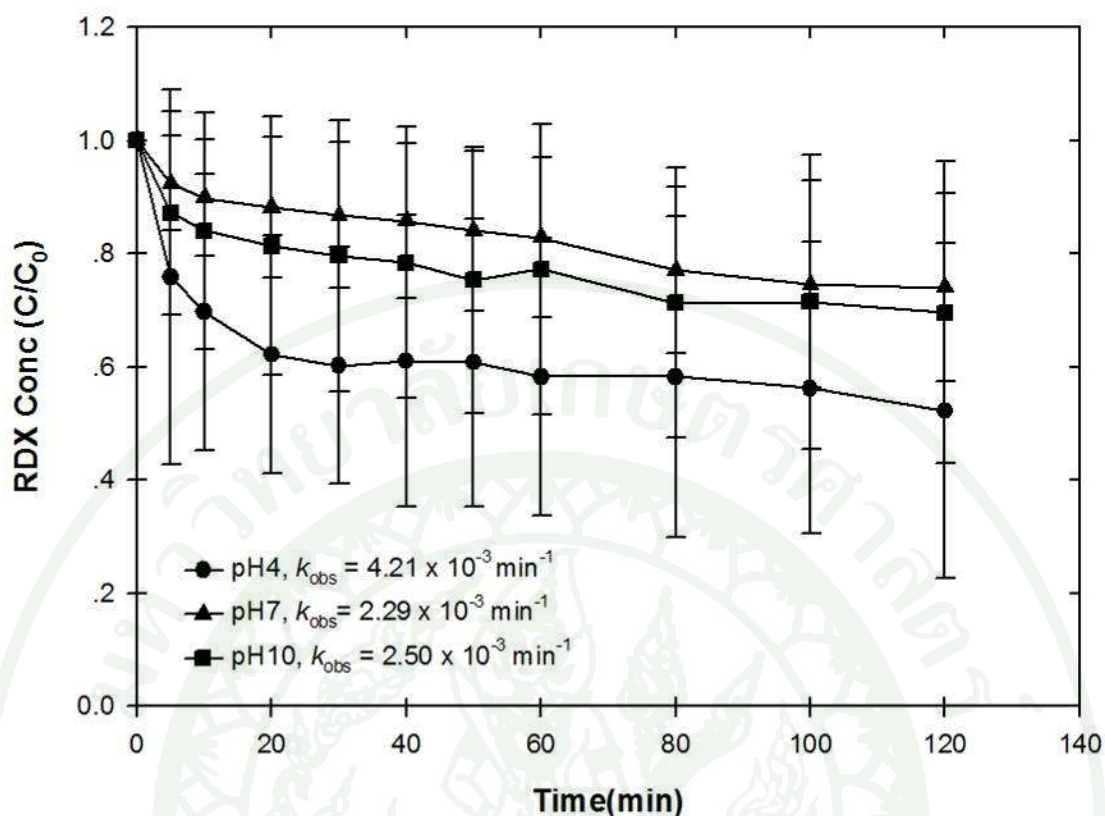
บดบังพื้นที่ผิวการทำปฏิกิริยาระหว่างอนุภาคเหล็กกับไฮโครไนท์ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลง



ขณะที่ค่าความเป็นกรด-ด่างลดลงประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มมากขึ้น เนื่องเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ (Fe^0) เมื่อให้อิเล็กตรอนแก่ไฮโครไนท์จะเปลี่ยนรูปเป็นเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) และละลายอยู่ในสารละลาย (สมการที่ 39) เมื่อลดค่าความเป็นกรด-ด่างจะมีปริมาณโปรตอน (H^+) มากขึ้น ซึ่งโปรตรอนจะทำปฏิกิริยากับอิเล็กตรอนจากเหล็กวาเลนซ์ศูนย์และออกซิเจนที่ละลายน้ำ (dissolve oxygen) อย่างรวดเร็ว (สมการที่ 40) ทำให้เกิดการกร่อน (corrosion) ที่บริเวณผิวหน้าของเหล็ก (Grafen *et al.*, 2008) ดังนั้นการลดค่าความเป็นกรด-ด่าง จึงทำให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กมากขึ้น ส่งผลพื้นที่ในการทำปฏิกิริยาระหว่าง NZVI มีมากขึ้นด้วยเช่นกัน สอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhang *et al.*, 2009 ศึกษาผลของค่าความเป็นกรด-ด่างต่อการบำบัด trinitrotoluene (TNT) พบว่าอัตราการเกิดรีดักชันเพิ่มมากขึ้นเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างลดลง เนื่องจากโปรตอน (H^+) ทำปฏิกิริยากับอนุภาคเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ และโปรตรอนเป็นตัวเร่งการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของ TNT ในทางตรงกันข้ามการเกิดเฟอร์รัสไอออน และเฟอร์ริกไอออนจะทำให้เกิด เหล็กไฮดรอกไซด์ตกตะกอนอยู่ที่ผิวของเหล็ก ทำให้พื้นที่สำหรับทำปฏิกิริยาลดลงด้วยเช่นกัน



ดังนั้นการปรับค่าความเป็นกรด-ด่างให้เพิ่มขึ้นหรือลดลงของไฮโครไนท์ทำให้ประสิทธิภาพของการบำบัดลดลงเมื่อเทียบกับการบำบัดโดยไม่ทำการปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (ค่าความเป็นกรด-ด่างของไฮโครไนท์ = 6.65) ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดเป็น 76 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นการปรับค่าความเป็นกรด-ด่างจึงมีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดไฮโครไนท์ที่ลดลง

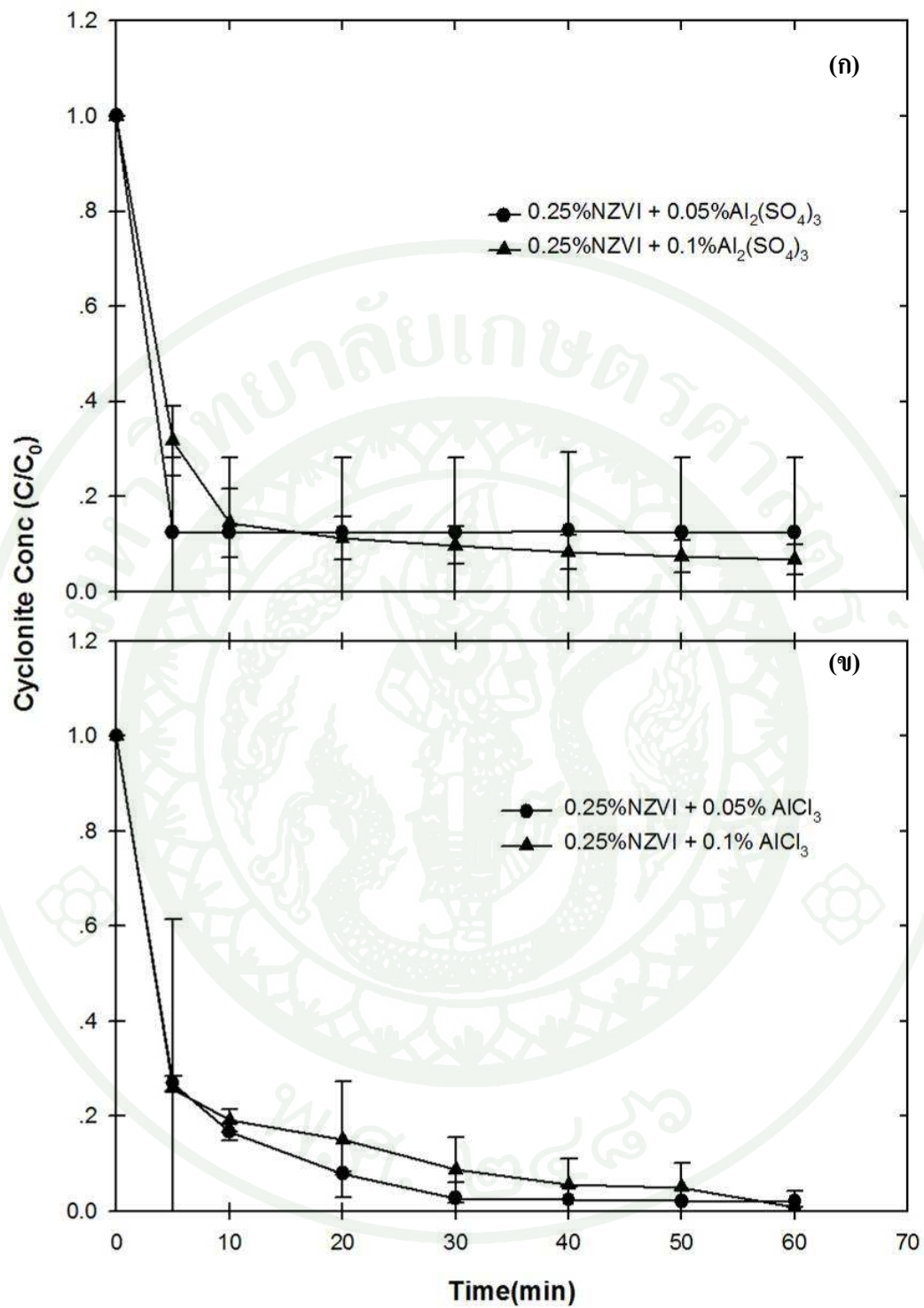


ภาพที่ 19 การบำบัดไซโครไนท์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 mg/L ที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 4 7 และ 10 โดยใช้ NZVI ปริมาณ 0.25% (w/v)

3.3 ผลของเกลืออะลูมิเนียม (Al-Salt) ต่อการบำบัดไซโครไนท์

การบำบัดไซโครไนท์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 mg/L โดยใช้ NZVI ปริมาณ 0.25% (w/v) อะลูมิเนียมซัลเฟต ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) และอะลูมิเนียมคลอไรด์ (AlCl_3) ปริมาณ 0.05% (w/v) และ 0.1% (w/v) พบว่าภายในระยะเวลา 10 นาที ประสิทธิภาพในการบำบัดไซโครไนท์เป็น 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งใช้เวลาน้อยกว่าการใช้ NZVI เพียงอย่างเดียว ดังแสดงในภาพที่ 20 เมื่อเปรียบเทียบผลของอะลูมิเนียมซัลเฟต และอะลูมิเนียมคลอไรด์ พบว่ามีแนวโน้มในทางเดียวกัน โดยค่าคงที่ของการบำบัด (destruction rate constant, k_{obs}) เป็น 0.36 และ 0.21 min^{-1} เมื่อใช้อะลูมิเนียมซัลเฟต 0.05%(w/v) และ 0.1%(w/v) ตามลำดับ และค่าคงที่ของการบำบัดเป็น 0.22 และ 0.29 min^{-1} เมื่อใช้อะลูมิเนียมคลอไรด์ 0.05% (w/v) และ 0.1% (w/v) ตามลำดับ (ตารางที่ 24)

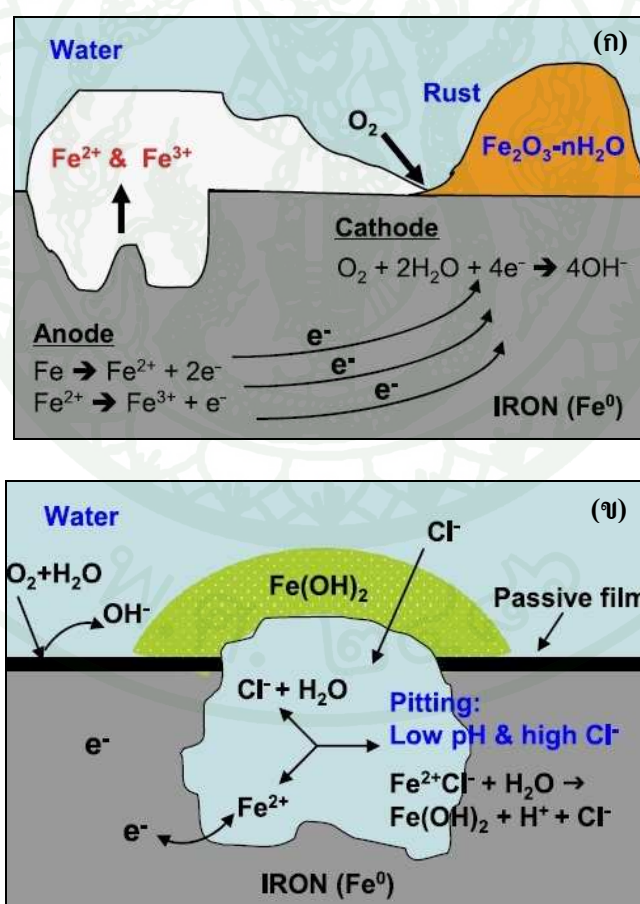
เมื่อเปรียบเทียบอัตราการเกิดปฏิกิริยาในช่วงแรกระหว่างเหล็กกับ nitroaromatic group หรือ nitramine group เกิดเร็วกว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเหล็กกับ chlorinated solvent หรือ pesticide แต่เนื่องจากผลิตภัณฑ์ (by product) ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาของ nitroaromatic group หรือ nitramine group สามารถดูดซับที่ผิวของโลหะได้เป็นอย่างดี จึงไปยับยั้งการผุกร่อน ทำให้เกิดฟิล์มที่ผิวของโลหะ (passivation) ส่งผลให้การทำปฏิกิริยาระหว่างเหล็กกับสารมลพิษ ลดน้อยลง (deactivation) (Scherer *et al.*, 2001) การเติมเกลือของอะลูมิเนียมลงไปจึงช่วยเพิ่ม การผุกร่อน (corrosion) ของเหล็ก และลดการเกิดฟิล์มออกไซด์ที่เกาะอยู่ที่ผิวของโลหะ ซึ่งการผุกร่อนโดยปกติเป็นกระบวนการเกิด electrochemical เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทอิเล็กตรอน ระหว่างผิวโลหะกับสารละลาย electrolyte โดยเหล็กจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (ให้อิเล็กตรอน หรือขั้วแคโทด) ส่วนออกซิเจนที่ละลายน้ำจะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (รับอิเล็กตรอนหรือขั้วแอโนด) อิเล็กตรอนจะเคลื่อนไปทางขั้วแอโนดส่งผลให้ด้านขั้วแคโทดหรือด้านเหล็กเกิดการผุกร่อน และด้านแอโนดเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่ละลายน้ำหรือสนิมเหล็ก (rust) (Kim *et al.*, 2007) ดังแสดงในภาพที่ 21 เมื่อในสารละลายมีอะลูมิเนียมคลอไรด์จะทำให้เกิดการผุกร่อนแบบรูลึก (pitting) คลอไรด์ไอออน (Cl⁻) จะถูกดูดซับบริเวณออกไซด์ฟิล์มที่เคลือบเหล็ก (passive film) และทำปฏิกิริยากับเฟอร์รัสไอออน และน้ำ ได้เป็นเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ (Fe(OH)₂) และโปรตรอน (H⁺) (Kim *et al.*, 2007)



ภาพที่ 20 การบำบัดไซโครไนที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 mg/L โดยใช้ NZVI ปริมาณ 0.25% (w/v)
 (ก) อะลูมิเนียมซัลเฟต ($Al_2(SO_4)_3$) และ (ข) อะลูมิเนียมคลอไรด์ ($AlCl_3$) ปริมาณ 0.05%
 (w/v) และ 0.1% (w/v)

ตารางที่ 24 ค่าคงที่การบำบัด (destruction rate constant, k_{obs}) ของการบำบัดไซโครไนท์ โดยใช้ NZVI ปริมาณ 0.25 % (w/v) อะลูมิเนียมซัลเฟต ($Al_2(SO_4)_3$) และอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($AlCl_3$) ปริมาณ 0.05 % (w/v) และ 0.1% (w/v)

ปริมาณเกลืออะลูมิเนียม		ค่าคงที่การบำบัด (destruction rate constant, k_{obs}) (min^{-1})
อะลูมิเนียมซัลเฟต ($Al_2(SO_4)_3$)	0.05% (w/v)	0.36
	0.1% (w/v)	0.21
อะลูมิเนียมคลอไรด์ ($AlCl_3$)	0.05% (w/v)	0.22
	0.1% (w/v)	0.29



ภาพที่ 21 (ก) การเกิดสนิมเหล็ก และ(ข) การกัดกร่อนของเหล็ก

ที่มา: Kim *et al.* (2007)

3.4 ผลของสภาวะออกซิเจน (aerobic condition) และสภาวะไร้ออกซิเจน (anaerobic condition) ต่อการบำบัดไซโครไนท์

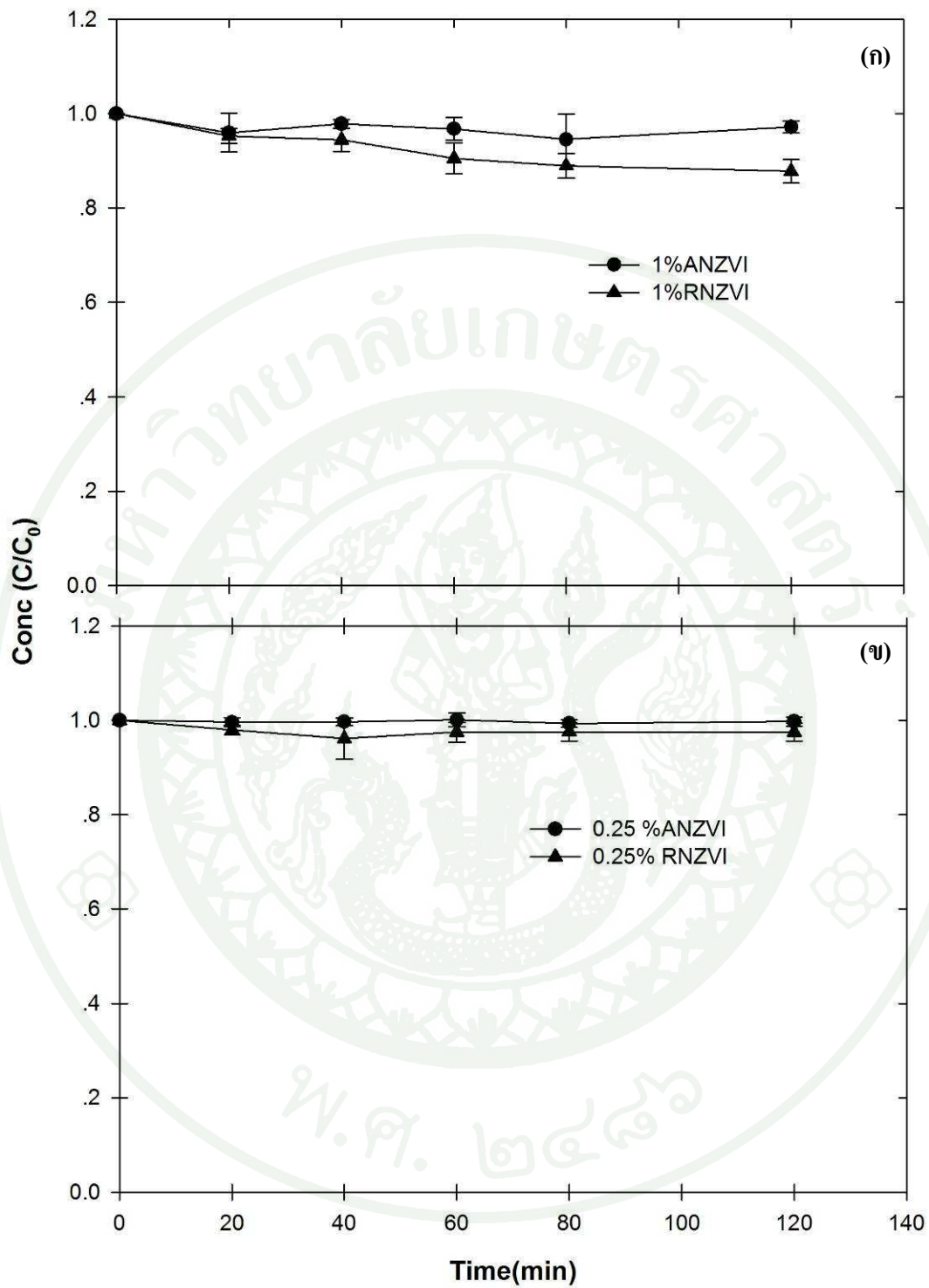
การบำบัดไซโครไนท์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 mg/L โดยใช้ NZVI ปริมาณ 0.05% (w/v) 0.1% (w/v) และ 0.25% (w/v) ภายใต้สภาวะออกซิเจน และสภาวะไร้ออกซิเจน พบว่าค่าคงที่จำเพาะการเกิดปฏิกิริยา (specific reaction rate constant, k_{SA}) ในสภาวะออกซิเจนเป็น 0.14×10^{-4} 1.56×10^{-4} และ 1.77×10^{-4} $L \cdot min^{-1} \cdot m^{-2}$ ตามลำดับ ในสภาวะไร้ออกซิเจนเป็น 0.75×10^{-4} 3.27×10^{-4} และ 6.00×10^{-5} $L \cdot min^{-1} \cdot m^{-2}$ ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 25 ประสิทธิภาพของการบำบัดไซโครไนท์ในสภาวะไร้ออกซิเจนมีมากกว่าในสภาวะออกซิเจน เนื่องจากในสภาวะไร้ออกซิเจนไซโครไนท์จะเป็นตัวรับอิเล็กตรอน (electron acceptor) จาก NZVI เกิดการ denitration บริเวณ $N-NO_2$ ได้เป็น nitrite (NO_2^-) จากนั้น nitrite เกิดการรีดิวซ์ได้เป็น ammonium (NH_4^+) หรือ nitrogen gas (N_2) ขณะที่สภาวะออกซิเจนจะมีออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนร่วมด้วย ทำให้เกิดการกัดกร่อนของ NZVI ที่ไวขึ้น นอกจากนี้ในสภาวะออกซิเจนยังทำปฏิกิริยากับเฟอร์รัส (Fe^{2+}) เกิดเป็นเหล็กออกไซด์ หรือสนิมเหล็กบริเวณผิวของเหล็ก สอดคล้องกับงานวิจัยของ Naja *et al.*, 2008 ศึกษาเปรียบเทียบสภาวะออกซิเจน และสภาวะไร้ออกซิเจนในการบำบัดไซโครไนท์โดย NZVI พบว่าที่สภาวะออกซิเจนให้ประสิทธิภาพในการบำบัดน้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ในสภาวะไร้ออกซิเจนประสิทธิภาพในการบำบัดมีการถึง 75 เปอร์เซ็นต์ในระยะเวลาบำบัด 1 ชั่วโมง

ตารางที่ 25 ค่าคงที่การบำบัด (destruction rate constant, k_{obs}) และค่าคงที่จำเพาะการเกิดปฏิกิริยา (specific reaction rate constant, k_{SA}) ของไซโครไนท์ โดยใช้ NZVI ภายใต้สภาวะ ออกซิเจน (aerobic condition) และสภาวะไร้ออกซิเจน (anaerobic condition)

สภาวะ	ปริมาณ NZVI	ค่าคงที่การบำบัด (destruction rate constant, k_{obs}) ($\times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$)	ค่าคงที่จำเพาะการบำบัด (specific reaction rate constant, k_{SA}) ($\times 10^{-4} \text{ L/min.m}^2$)
ออกซิเจน	0.05% (w/v)	0.18	0.14
(aerobic	0.1% (w/v)	3.91	1.56
condition)	0.25% (w/v)	11.04	1.77
ไร้ออกซิเจน	0.05% (w/v)	0.94	0.75
(anaerobic	0.1% (w/v)	8.19	3.27
condition)	0.25% (w/v)	37.43	6.00

4. การบำบัดเมโทคลออร์และไซโครไนท์โดย NZVI ที่นำกลับมาใช้ใหม่

NZVI ที่ผ่านการบำบัดเมโทคลออร์และไซโครไนท์ถูกนำมาเติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกแล้วล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน (recovery nano zero valent iron, RNZVI) (Zhu *et al.*, 2007) พบว่า NZVI หลังการบำบัดมีลักษณะเป็นสีน้ำตาล เมื่อผ่านการล้างด้วยกรดแล้วจะมีสีดำ สอดคล้องกับงานวิจัยของชีวันนท์, 2552 ศึกษาการนำ NZVI กลับมาใช้ใหม่ พบว่า NZVI หลังการบำบัดมีสีน้ำตาลเนื่องจากมีองค์ประกอบของเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) ซึ่งมีโครงสร้างผลึกเหมือนกับสารประกอบเหล็กออกไซด์ (iron oxide) แต่อนุภาคที่ผ่านการฟื้นฟูด้วย NaBH_4 มีองค์ประกอบของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ (Fe^0) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) แต่มี intensity ครึ่งหนึ่งของเหล็กก่อนใช้งาน ส่วนอนุภาคเหล็กขนาดนาโนเมตรที่ไม่ผ่านล้างด้วยกรด (aged nano zero valent iron, ANZVI) ยังคงมีสีน้ำตาล และเมื่อนำมาศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดเมโทคลออร์และไซโครไนท์โดยใช้ RNZVI และ ANZVI ปริมาณ 1% (w/v) สำหรับเมโทคลออร์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และใช้ RNZVI และ ANZVI ปริมาณ 0.25% (w/v) สำหรับไซโครไนท์ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าประสิทธิภาพของการบำบัดเมโทคลออร์และไซโครไนท์โดย RNZVI และ ANZVI ต่ำกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเวลาสัมผัส 120 นาที ดังแสดงในภาพที่ 22 เนื่องจาก NZVI ที่ผ่านการบำบัดมีองค์ประกอบของออกไซด์ การล้างด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเป็นเพียงการกำจัดออกไซด์ที่เคลือบอยู่ที่ผิวอนุภาคเหล็กขนาดไมโครเมตร (Zhu *et al.*, 2007) และการนำ NZVI ที่ไม่ผ่านการล้างหรือการกำจัดออกไซด์ที่เคลือบอยู่ที่ผิวมาบำบัดเมโทคลออร์และไซโครไนท์ส่งผลให้ประสิทธิภาพเป็นเช่นเดียวกับการบำบัดโดย RNZVI ซึ่งการฟื้นฟูอนุภาคเหล็กขนาดนาโนเมตรที่ผ่านการบำบัด (regenerated) โดยการนำ NZVI มาล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน แล้วเติมโซเดียมโบโรไฮไดรด์ (NaBH_4) (Liou *et al.*, 2005) สามารถนำ NZVI ที่ผ่านการฟื้นฟูมาบำบัดสารมลพิษได้แต่ประสิทธิภาพของการบำบัดที่ได้จะลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของชีวันนท์ (2551) ศึกษาการนำ NZVI ที่ผ่านการฟื้นฟูมาบำบัด RB5 และ RR198 พบประสิทธิภาพการบำบัดเป็น 67 และ 62 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งประสิทธิภาพที่ได้มีค่าต่ำกว่าการใช้ NZVI ที่ทำการสังเคราะห์ใหม่ (ประสิทธิภาพการบำบัดเป็น 86 และ 88 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ)



ภาพที่ 22 การบำบัด (ก) เมโทคลออร์ที่ความเข้มข้น 100 mg/L โดย RNZVI และ ANZVI ปริมาณ 1% (w/v) และ (ข) ไซโครไนท์ที่ความเข้มข้น 20 mg/L โดย RNZVI และ ANZVI ปริมาณ 0.25% (w/v)

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. อนุภาคเหล็กขนาดนาโนเมตร (Nanofer 25s) ที่ได้จากบริษัท Nanoiron, S.R.O. (Czech Republic) มีลักษณะเป็นก้อนกลมจับตัวกันเป็นกลุ่ม มีองค์ประกอบของเหล็กประมาณ 76.63% (w/v) อนุภาคเหล็กประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ของอนุภาคเหล็กทั้งหมดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 50 นาโนเมตร และมีพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) ประมาณ $25 \text{ m}^2/\text{g}$

2. การบำบัดเมโทลาคลอร์และไซโครไนท์โดย NZVI ให้ประสิทธิภาพสูง และใช้ระยะเวลาในการบำบัดน้อย เนื่องจาก NZVI มีขนาดเล็ก พื้นที่ผิว (surface area) และพื้นที่ปฏิกิริยา (surface reactivity) สูง โดยประสิทธิภาพในการบำบัดขึ้นอยู่กับปริมาณ NZVI ประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณ NZVI และการปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง การเพิ่มปริมาณเกลือของอะลูมิเนียมช่วยให้เกิดการกัดกร่อนที่ผิวของ NZVI (corrosion) ซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยา นอกจากนี้ออกซิเจนที่ละลายน้ำยังมีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด เมโทลาคลอร์และไซโครไนท์ด้วยเช่นกัน

3. การนำอนุภาคเหล็กที่ผ่านการใช้งานกลับมาใช้ใหม่โดยการล้างด้วยสารละลายกรด ไฮโดรคลอริก (HCl) และไม่ผ่านการล้างด้วยกรด พบว่าให้ประสิทธิภาพในการบำบัดเมโทลาคลอร์และไซโครไนท์ที่ต่ำกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้การฟื้นฟูอนุภาคเหล็กขนาดนาโนเมตรที่ผ่านการบำบัด (regenerated) โดยโซเดียมโบโรไฮไดรด์ (NaBH_4) สามารถนำอนุภาคเหล็กขนาดนาโนเมตรที่ผ่านการฟื้นฟูมาบำบัดสารมลพิษได้แต่ประสิทธิภาพของการบำบัดที่ได้จะลดลงกว่าการใช้อนุภาคเหล็กที่ยังไม่ผ่านการบำบัด

ข้อเสนอแนะ

การนำ NZVI ไปใช้ฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนจริงจำเป็นต้องศึกษาความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตของ NZVI และของเสียอันตรายหลังการบำบัด โดยอาจเพิ่มขั้นตอนในการกักเก็บ NZVI และของเสียอันตรายหลังการบำบัด เพื่อให้ไอออนของโลหะและผลิตภัณฑ์อยู่ในรูปที่ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในสิ่งแวดล้อม

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

เกรียงศักดิ์ อุคมสินโรจน์. 2546. **ของเสียอันตราย**. มหาวิทยาลัยรังสิต, ปทุมธานี.

กรมควบคุมมลพิษ. 2535. **พระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ**.

แหล่งที่มา: <http://www.pcd.go.th/Download/regulation.cfm?task=s1>, 10 เมษายน 2553.

ฉัตรเพชร ขศพล. 2553. **จลพลศาสตร์ของปฏิกิริยา**. แหล่งที่มา:

http://eng.sut.ac.th/envi/modules/menu/files_menu/128589950712857416601009-Class%20Note%20432-426-Ch2.pdf, 21 กุมภาพันธ์ 2554.

จิวันนท์ ชมพูนันท์. 2551 **การพัฒนาตัวกรองหลักขนาดนาโนเมตรที่ยึดติดกับซิลิกาออกไซด์เพื่อการบำบัดสี**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ. 2547. **ความหมายของนาโนเทคโนโลยี**. แหล่งที่มา:

<http://www.nanotec.or.th/nanotec/index.php?leftmenu=nanotechnology&index=nanotechnology>, 1 มกราคม 2554

ศุภมาส พนิชศักดิ์พัฒนา. 2545. **ภาวะมลพิษของดินจากการใช้สารเคมี**. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ศุภกร ภูเกิด, อุคม ทิพราร และ ทิพวรรณ สายพิน. 2549. **วัสดุนาโน**. วารสารวิชาการ ม.อบ. 8(1): 27-40.

ศศิธร แทนทอง. 2545. **การหาสารเคมีในสิ่งแวดล้อมจังหวัดเพชรบูรณ์**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันราชภัฏเพชรบูรณ์.

สำนักควบคุมพืชและวัสดุการเกษตร. 2553. **รายงานการนำเข้าวัตถุอันตราย**. แหล่งที่มา:

<http://as.doa.go.th/ard/stat2.php?cat=2>, 10 เมษายน 2553.

หวน พันธุ์พันธ์. 2549. นาโนเทคโนโลยี. แหล่งที่มา: <http://facstaff.swu.ac.th/huan/นาโนเทคโนโลยี.doc>, 1 มกราคม 2554

อลิสา วังไ. 2553. การบำบัดสารมลพิษชีวภาพ. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

Alan Wood. 2010. Classified of herbicide. **Compendium of Pesticide Common Names**.

Available source: <http://www.alanwood.net/pesticides/index.html>, December 16, 2010.

Amonette, J.E., D.J. Workman, D.W. Kennedy, J.S. Fruchter and Y.A. Gorby. 2000.

Dechlorination of Carbon Tetrachloride by Fe(II) Associated with Goethite.

Environmetal Science and Technology 34: 4606–4613.

Bai, X., Z.F. Ye, Y.Z. Qu, Y.F. Li and Z.Y. Wang. 2009. Immobilization of nanoscale Fe⁰ in and on PVA microspheres for nitrobenzene reduction. **Hazardous Materials** 172: 1357-1364.

Cheng, R., J.L. Wang and W.X Zhang. 2006. Comparison of reductive dechlorination of p-chlorophenol using Fe⁰ and nanosized Fe⁰. **Hazardous Materials** 144: 334-339.

Chesters, G, G.V. Simsiman, J. Levy, B.J. Alhajjar, R.N. Fathulla and J.M. Harkin. 1989.

Environmental fate of alachlor and metolachlor. **Environmental Contamination and Toxicology** 110:1-74.

Deng, N., F. Luo, F. Wu, M. Xiao, and X. Wu. 2000. Discoloration of aqueous reactive dye solutions in the UV/ Fe⁰ system. **Water Research** 34 (8): 2,408-2,411.

Dombek, T., E. Dolan, J. Schultz and D. Klarup. 1999. Rapid reductive dechlorination of atrazine by zero-valent iron under acidic conditions. **Environmental Pollution** 111: 21-27.

- Farrell, J.M. Kason, N. Melitas, and T. Li. 1999. Investigation of the Long-Term Performance of Zero-Valent Iron for Reductive Dechlorination of Trichloroethylene. **Environmetal Science and Technology** 34: 514–521.
- Georgios, B., K. Kostas and P. Ioannis. 2006. Laboratory evaluation of Fe^0 barriers to treat acidic leachates. **Minerals Engineering** 19: 505-514.
- Gillham, R.W. and S.F. O'Hannesin. 1994. Enhance degradation of halogenated aliphatics by zero-valent iron. **Ground Water** 32: 958-967.
- Globalsecurity. 2010. Military. **Explosive**. Available source: <http://www.globalsecurity.org/military/systems/munitions/explosives.htm>, December 16, 2010.
- Grafen, H., E.M. Horn., H. Schelecker, and H. Schindler. 2002. **Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry**. Wiley-VCH, Weinheim.
- Haderlein, S.B., K.W. Weissmahr and R.P. Schwarzenbach. 1996. Specific adsorption of nitroaromatic explosives and pesticides to clay minerals. **Environmental Science and Technology** 30: 612-622.
- Huan, Z, J. Zhao-hui, H. Lu.,and Q. Cheng-hu. 2006. Synthesis of nanoscale zerovalent iron supported on expoliated graphite of removal of nitrate. **The Transactions of Nonferrous Metals Society of China** 16: s345-349.
- Hundal, L.S., P.J. Shea, S.D. Comfort, W.L. Powers and J. Singh. 1997. Long-term TNT sorption and bound residue formation in soil. **Environmental Quality** 26: 896-904.
- Johnson, T., M .M . Scherer and P. Trantnyek. 1996. Kinetics of halogenated Organic Compound Degradation by Iron Metal. **Environmental Science and Technology** 30: 2634-2640.

- Jong, S.K., P.J. Shea, E.Y. Jae and K. Jang-Eok. 2007. Halide salts accelerate degradation of high explosive by zerovalent iron. **Environmental Pollution** 147: 634–641.
- Kim, J.S., P.J. Shea, J.E. Yang and J.E. Kim. 2007. Halide salts accelerate degradation of high explosives by zerovalent iron. **Environmental Pollution** 147: 634-641.
- Lee, T. and H.B. Craig. 2004. Sorption and Degradation of Alachlor and Metolachlor in Ground Water Using Green Sands. **Environmental Quality** 33: 1682-1693.
- Li, X.Q., D. W. Elliott and W.X. Zhang. 2006. Zero-Valent Iron Nanoparticles for Abatement of Environmental Pollutants: Materials and Engineering Aspects. **Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences** 31: 111–122.
- Lien, H.L. and W., Zhang. 2001. Nanoscale iron particles for complete reduction of chlorinated ethenes. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects** 191: 97-105.
- Liou, Y.H., S.L. Loa, C.J. Lin, W.H. Kuan, and S.C. Weng. 2005. Chemical reduction of an unbuffered nitrate solution using catalyzed and uncatalyzed nanoscale iron particles. **Hazardous Materials** 127: 102–110.
- Liu, Y., S.A. Majetich, R.D. Tilton, D.S. Sholl and G.V. Lowry. 2005. TCE dechlorination rates, pathways, and efficiency of nanoscale iron particles with different properties. **Environmental Science and Technology** 39: 1338-1345.
- Matheson, L.J. and P. G. Tratnyek. 1994. Reductive Dehalogenation of Chlorinated Methanes by Iron Metal. **Environmental Science and Technology** 28: 2045-2053.
- McLellan, W. L., Hartley, W. R., and Brower, M. E. 1988. **Health advisory for hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine (RDX)**. PB90-273533, US Army Medical Research and Development Command, Fort Detrick, MD.

Muller, M.C. and N. Bernd. 2010. **Observatory NANO focus report 2010.**

Naja, G., A. Halasz, S. Thiboutot, G. Ampleman and J. Hawari. 2008. Degradation of Hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine (RDX) Using zerovalent Iron Nanoparticles. **Environmetal Science and Technology** 42: 4364-4370.

Naja, G., R. Apiratikul, P. Pavasant, B. Volesky and J. Hawari. 2009. Dynamic and equilibrium studies of the RDX removal from soil using CMC-coated zerovalent iron nanoparticles. **Environmental Pollution** 157: 2405–2412

Pischa, W., Christodoulatos C. and Sidhoumv M. 2006. Kinetics of RDX degradation by zero-valent iron (ZVI). **Hazardous Materials** 136: 68–74.

Ponder, S.M., J.G. Darab and T.E. Mallouk. 2000. Remediation of Cr(VI) anf Pb(II) aqueous solutions using supported, nanoscale zero-valent iron. **Environmental Science and Technology** 34: 2564-2569.

Reardon, EricJ. 1995. Anaerobic Corrosion of Granular Iron: Measurement and Interpretation of Hydrogen Evolution Rates. **Environmental Science and Technology** 29: 2936-2945.

Rosenblatt, D.H., E.P. Burrows, W.R. Mitchell and D.L. Parmer. 1991. Organic explosives and related compounds, pp. 195-232. *In* O. Hutzinger Jr., eds. **The Handbook of Environmental Chemistry**. Springer-Verlag, Berlin.

Satapanajaru, T. 2002. **Remediation Chloroacetanilide-contaminated Water Using Zero valent Iron**. Ph.D. Dissertation. University of Nebraska. Lincoln. USA.

_____, P. Anurakpongsatorn, P. Pengthamkeerati and H. Boparai. 2008. Remediation of Atrazine-contaminated Soil and Water by Nano Zerovalent Iron. **Water Air Soil Pollution** 192: 349–359.

- Satapanajaru, T, P.S. Shea and S.D. Comfort. 2003a. Green Rust and Iron Oxide Formation Influences Metolachlor Dechlorination during Zerovalent Iron Treatment. **Environmetal Science and Technology** 37: 5219-5227.
- _____, S.D. Comfort and P.S. Shea. 2003b. Enhancing metolachlor destruction rates with aluminum and iron salts during zerovalent iron treatment. **Environmental Quality** 32: 1726-1734.
- Sayles, G.D., G. You, M. Wang and M.J. Kupferic. 1997. DDT, DDD and DDE Dechlorination by Zero-Valent Iron. **Environmental Science and Technology** 31: 3448-3454.
- Scherer, M., K.M. Johnson, J.S. Westall and P.G. Tratnyek. 2001. Mass transport effects on the kinetics of nitrobenzene reduction by iron metal. **Environmetal Science and Technology** 35: 2804-2811.
- Shea, P.J., T.A. Machacek and S.D. Comfort. 2004. Accelerated remediation of pesticide-contaminated soil with zerovalent iron. **Environmental Pollution** 132: 183–188.
- Singh, B.K. and A. Walker. 2006. Microbial degradation of organophosphorus compounds. **FEMS Microbial** 30: 428–471.
- Spanggord, R.J., T. Mill, T.W. Chou, W.R. Mabey, J.H. Smith and S. Lee. 1980. **Final report : Environmental fate studies on certain munition wastewater constituents.**
- Sun, Y.P., X. Li, J. Cao, W. Zhang, and H.P. Wang. 2006. Characterization of zero-valent iron nanoparticles. **Advances in Colloid and Interface Science** 120: 47-56.
- Tratnyek, P.G. and R.L. Johnson. 2006. Nano technologies for environmental cleanup. **Nanotoday** 1: 44-48.

United States Environmental Protection Agency. 2004. **Type of Hazardous Waste**..

Hazardous Waste. Available Source:

<http://www.epa.gov/osw/hazard/wastetypes/index.htm>, Jan 15, 2010.

_____. 2005. **In Situ Treatments Using Nano-Scale Zero Valent Iron (nZVI) Implemented in North America and Europe**. pp. 17-18. *In* Workshop on Nanotechnology for Site Remediation. U.S. Department of Commerce Washington, DC

Varanasi, P., A. Fullana and S. Sidhu. 2007. Remediation of PCB contaminated soils using iron nano-particles. **Chemosphere** 66: 1031-1038.

Wang, J. 1994. **Analytical Electrichemistry**. VCH, New York.

Wang, C.B. and W.X. Zhang. 1997. Synthesizing Nanoscale Iron Particles for Rapid and Complete Dechlorination of TCE and PCBs. **Environmental Science and Technology** 31: 2154-2156.

Wanaratna, P., C. Christodoulatos and M. Sidhoum. Kinetics of RDX degradation by zero-valent iron (ZVI). **Hazardous Materials** 136: 68-74.

Weast, R.C. 1978. **Handbook of chemistry and physics**. 58th ed. CRC Press, Inc. West Palm Beach, FL.

Westernoff, P. and J. Jame. 2003. Nitrate removal in zero-valent iron packed columns. **Water Research** 37: 1,818-1,830.

William H.A. 1994. **Herbicide handbook**. 7th ed. Weed Science Society of America, Illinois, USA.

Xin, Z., L. Yu-man, S. Xaio-quan and C. Zu-liang. 2010. Accelerated remediation of pesticide-contaminated soil with zerovalent iron. **Chemical Engineering** 158: 566-570.

Yang, G.C.C. and H.L. Lee. 2005. Chemical reduction of nitrate by nanosized iron: kinetics and pathways. **Water Research** 39: 884-894.

Yinon, J. 1990. **Toxicity and metabolism of explosives**. CRC Press, Ann Arbor, MI.

Zhang, X., Y.M. Lina, X.Q. Shanb and Z.L. Chena. 2010. Degradation of 2,4,6-trinitrotoluene (TNT) from explosive wastewater using nanoscale zero-valent iron. **Chemical Engineering** 158: 566-570.

Zhang, X., Y.M. Lina and Z.L. Chen. 2009. 2,4,6-Trinitrotoluene reduction kinetics in aqueous solution using nanoscale zero-valent iron. **Hazardous Materials** 165: 923-927.

Zhu, B.W. and T.T. Lim. 2007. Catalytic Reduction of Chlorobenzene with Pd/Fe Nanoparticles: Reactive Sites, Catalyst Stability, Particle Aging, and Regeneration. **Environmental Science and Technology** 41: 7523-7529.

Zhu, B.W., T.T. Lim and J. Feng. 2008. Influences of Amphiphiles on Dechlorination of a Trichlorobenzene by Nanoscale Pd/Fe: Adsorption, Reaction Kinetics, and Interfacial Interactions. **Environmental Science and Technology** 42: 4513-4519.



TECHNICAL DATA SHEET

NANOFER 25S

Dispersion of zero valent iron nanoparticles

Product specification Chemical

Parameter	Description
Chemical composition of Fe(0)	Fe(core) FeO(shell)
Content of solid phase in dispersion by weight	20% $\approx 85\%$
Content Fe(0) in solid phase	Fe ₃ O ₄ , FeO, C
Other ingredients in solid phase	organic stabilisator
Other ingredients in liquid phase	17%
Content of Fe(0) in dispersion by weight	
Other ingredients	alpha Fe
Particles morphology	spherical
Average particle size	d ₅₀ < 50nm
Particles specific surface area	>25m ² /g
Dispersion colour	black
Dispersion density	1210 kg/m ³
Fe(0) particles density	7870 kg/m ³
Fe ₃ O ₄ density	5700 kg/m ³

Product application

- Decontamination of groundwater, soil
- Decontamination of surface water
- Technological water purification
- Decontamination of technological waste water

Product package and delivery

- NANOFER 25S is packed in steel barrels, with tight PE bag inside, 25 and 50kg
- Small package up to 1kg is delivered in plastic doses

Transport and storage

- No special requirements for transport
- Fe(0) is very reactive, subsequently oxidize to Fe₃O₄, then content of Fe(0) decrease in time.
- Is necessary to reduce the disperse exposition to air, and dispose the disperse as soon as possible.
- No storage for a long time.

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวประภัสสร สุนทรโชติ
วัน เดือน ปี ที่เกิด	26 มีนาคม พ.ศ. 2528
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2547 จบการศึกษา วท.บ. (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม) ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	1. ทุนอุดหนุนการค้นคว้า และวิจัยประเภทวิทยานิพนธ์ ระดับบัณฑิตศึกษา ประจำปีงบประมาณ 2553 2. ทุนสนับสนุนการเสนอผลงานวิจัยแบบปากเปล่าใน การประชุมวิชาการระดับนานาชาติ ปี 2553 3. ทุนผู้ช่วยวิจัยของศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์