

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การกำจัดคาร์โบฟูราน ในสารละลาย โดยใช้เศษผงเหล็ก

Removal of Carbofuran from Aqueous Solutions  
using Scrap Iron Powder



RCH

TD

758.5

075

8757

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน..... 67380

วัน,เดือน,ปี..... 259 10 22599

ภาควิชาเคมี

คณะวิทยาศาสตร์

b..... 1166421x
i.....

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ทุนวิจัยคณะวิทยาศาสตร์ ประเภทส่งเสริมนักวิจัย ประจำปี พ.ศ. 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสภาวะที่เหมาะสม ประสิทธิภาพในการกำจัดสารละลายคาร์โบฟูราน และจลนพลศาสตร์เคมี และศึกษาผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการกำจัดสารละลายคาร์โบฟูราน ด้วยเศษผงเหล็กซึ่งเป็นเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ โดยทำการทดลองแบบเบทช์ จากการทดลองพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสารละลายคาร์โบฟูราน คือที่พีเอช 2 ระยะเวลาสัมผัส 24 ชั่วโมง ปริมาณผงเศษเหล็ก 1 กรัม และความเข้มข้นของคาร์โบฟูราน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถกำจัดสารละลายคาร์โบฟูรานได้  $92.67 \pm 0.20$  % จากการศึกษจลนพลศาสตร์เคมี โดยแปรค่าความเข้มข้นของสารละลายคาร์โบฟูรานที่ 5, 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ปฏิกริยาในการกำจัดสารละลายคาร์โบฟูรานเป็นปฏิกริยาอันดับ 2 ค่า k เท่ากับ 23.9270, 8.8614 และ 1.6106 ลิตรต่อโมล-ชั่วโมง ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่าผลิตภัณฑ์หลักที่เกิดจากปฏิกริยาการกำจัดคาร์โบฟูรานด้วยเศษผงเหล็ก ได้แก่ 1,3-diethylbenzene, 1,4-diethylbenzene, 1,2-diethylbenzene และ decahydro-1,6-dimethyl naphthalene

คำสำคัญ : คาร์โบฟูราน, เหล็กวาเลนซ์ศูนย์, เศษผงเหล็ก

## Abstract

This research studied optimum conditions, removal efficiency of carbofuran in aqueous solution, kinetic reaction and products occurring after a removal carbofuran from aqueous solution using scrap iron powder which is zero-valent iron. The experiments were carried out of in batch experiments. The optimum conditions for removal carbofuran in aqueous solution were pH 2, contact time for 24 hours, scrap iron powder 1 gram and concentration of carbofuran 5 mg/L. Under optimum conditions, the removal efficiency was  $92.67 \pm 0.20$  %. A kinetic reaction of carbofuran was second order reaction. It was found that constants of reaction were 23.9270, 8.8614 and 1.6106 L/mol-hr for concentration of 5, 10, 20 mg/L respectively. From the results, 1,3-diethylbenzene, 1,4-dimethylbenzene, 1,2-dimethylbenzene and decahydro-1,6-dimethyl naphthalene were major products after removing carbofuran with scrap iron powder.

Keywords: carbofuran, zero-valent iron, scrap iron powder

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยคณะวิทยาศาสตร์ ประเภทส่งเสริมนักวิจัย ประจำปี พ.ศ. 2548 ในการทำงานวิจัยนี้

สุวรรณี จรรยาพูน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	1
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง</b>	3
2.1 สารกำจัดแมลงศัตรูพืช	3
2.1.1 การจำแนกประเภทของสารกำจัดแมลงศัตรูพืช	4
2.1.1.1 การจำแนกประเภทของสารกำจัดแมลงศัตรูพืชตามองค์ประกอบทางเคมี	4
2.1.1.2 จัดแบ่งสารเคมีตามระดับความเป็นพิษ	5
2.1.2 สารฆ่าแมลงกลุ่มคาร์บาเมท	7
2.1.2.1 สารฆ่าแมลงคาร์โบฟูราน	9
2.1.2.2 การกำจัดคาร์โบฟูราน	11
2.2 เหลือก	11
2.2.1 ประเภทของเหลือก	11
2.2.2 คุณสมบัติทางเคมี	13
2.2.3 ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน	14
2.2.4 เซลล์กร่อนไฟฟ้าเคมี	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3 จลนพลศาสตร์เคมี	16
2.3.1 กฎของอัตราและลำดับของปฏิกิริยา	16
2.3.1.1 ปฏิกิริยาอันดับศูนย์	16
2.3.1.2 ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง	17
2.3.1.3 ปฏิกิริยาอันดับสอง	19
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	22
<b>บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย</b>	<b>23</b>
3.1 อุปกรณ์เครื่องมือและสารเคมี	23
3.1.1 อุปกรณ์	23
3.1.2 สารเคมี	23
3.2 การดำเนินงานวิจัย	24
3.2.1 การเตรียมเศษผงเหล็ก	24
3.2.2 การเตรียมกราฟมาตรฐาน	24
3.2.3 การเตรียมสต็อกสารละลายคาร์โบฟูราน	24
3.2.4 ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการกำจัดคาร์โบฟูราน โดยการทดลองแบบแบทช์	25
3.2.4.1 ศึกษาผลของพีเอช	25
3.2.4.2 ศึกษาผลของระยะเวลาสัมผัส	25
3.2.4.3 ศึกษาผลของปริมาณเศษผงเหล็ก	25
3.2.4.4 ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายคาร์โบฟูราน	26
3.2.5 ศึกษาจลนพลศาสตร์เคมี	26
3.2.6 การศึกษาหาผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาการกำจัดคาร์โบฟูราน	26
<b>บทที่ 4 ผลการทดลอง</b>	<b>28</b>
4.1 การศึกษาเพื่อหาสถานะที่เหมาะสมแบบแบทช์	28
4.1.1 ผลของค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายคาร์โบฟูราน	28
4.1.2 ผลของระยะเวลาในการกำจัดคาร์โบฟูรานของผงเหล็ก	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.3 ผลของปริมาณผงเศษเหล็กในการกำจัดคาร์โบฟูราน	30
4.1.4 ผลของความเข้มข้นสารละลายคาร์โบฟูราน	31
4.2 การศึกษาจลนพลศาสตร์เคมี	31
4.3 หาผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาการกำจัดสารละลายคาร์โบฟูราน	34
<b>บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ</b>	<b>38</b>
5.1 สรุปผลการทดลอง	38
5.2 ข้อเสนอแนะ	38
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	<b>39</b>
<b>ภาคผนวก</b>	
ภาคผนวก ก	41
ภาคผนวก ข	47
ภาคผนวก ค	51



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างทั่วไปของกลุ่มคาร์บาเมท	8
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของคาร์โบฟูราน	9
รูปที่ 2.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง [A] กับ t ของปฏิกิริยาอันดับศูนย์	17
รูปที่ 2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ln [A] กับ t ของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง	19
รูปที่ 2.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง 1/[A] กับ t ของปฏิกิริยาอันดับสอง	21
รูปที่ 4.1 ประสิทธิภาพการบำบัดคาร์โบฟูรานด้วยเศษผงเหล็กที่พีเอชต่าง ๆ	28
รูปที่ 4.2 ประสิทธิภาพในการบำบัดคาร์โบฟูรานด้วยเศษผงเหล็กที่ระยะเวลาในการบำบัดต่าง ๆ	29
รูปที่ 4.3 ประสิทธิภาพในการบำบัดคาร์โบฟูรานที่ปริมาณผงเหล็กต่าง ๆ	30
รูปที่ 4.4 ประสิทธิภาพในการบำบัดคาร์โบฟูรานที่ความเข้มข้นของคาร์โบฟูรานต่าง ๆ	31
รูปที่ 4.5 ปฏิกิริยาอันดับศูนย์ของการกำจัดคาร์โบฟูรานด้วยเศษผงเหล็ก	32
รูปที่ 4.6 ปฏิกิริยาอันดับ 1 ของการกำจัดคาร์โบฟูรานด้วยเศษผงเหล็ก	32
รูปที่ 4.7 ปฏิกิริยาอันดับ 2 ของการกำจัดคาร์โบฟูรานด้วยเศษผงเหล็ก	33
รูปที่ 4.8 โคโรมาโทแกรมของสารมาตรฐานคาร์โบฟูราน	34
รูปที่ 4.9 โคโรมาโทแกรมของชุดควบคุม	34
รูปที่ 4.10 โคโรมาโทแกรมของสารตัวอย่าง	36
รูปที่ ก-1 กราฟมาตรฐานคาร์โบฟูราน	42

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

จากการที่ประชากรของโลกมีอัตราการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วแบบเรขาคณิต แต่อาหารกลับมีอัตราการเพิ่มแบบเลขคณิต ทำให้ปริมาณอาหารไม่เพียงพอแก่ความต้องการของประชากร การใช้สารเคมีในการกำจัดวัชพืชและแมลง รวมทั้งการใช้ปุ๋ยเคมีเพื่อเพิ่มปริมาณและคุณภาพของผลผลิตทางการเกษตร จึงเป็นแนวทางหนึ่งในการแก้ไขปัญหาดังกล่าว อย่างไรก็ตาม การใช้สารเคมีกำจัดวัชพืชและแมลง และปุ๋ยเคมีโดยขาดความรู้และความระมัดระวัง จะก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่น การตกค้างของสารเคมีในผลผลิต การสะสมตัวของสารเคมีในธรรมชาติ ซึ่งก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้บริโภคและสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ

ปัจจุบันประเทศไทยมีการนำเข้าสารเคมีทางการเกษตรจากต่างประเทศเพิ่มขึ้นทุกปี โดยเฉพาะอย่างยิ่ง สารฆ่าแมลง คาร์โบฟูราน รู้จักทางการค้าว่า ฟูราดาน ยิปฟูราน คาซาลิน คาเบนฟูดาน 3 จี เป็นสารฆ่าแมลงชนิดหนึ่งที่มีนิยมนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นสารฆ่าแมลงชนิดเม็ดที่ใช้ได้ง่าย และสามารถกำจัดแมลงได้หลายชนิดเมื่อเทียบกับสารฆ่าแมลงชนิดอื่น องค์การอนามัยโลก (WHO) ได้จัดระดับความเป็นอันตรายของคาร์โบฟูรานอยู่ในกลุ่ม 1b เป็นสารฆ่าแมลงชนิดมีพิษร้ายแรง (Highly toxic) และมีค่า  $LD_{50}$  เพียง 5-13 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Oregon State University, 1996) ส่งผลกระทบต่อระบบประสาทของมนุษย์ และสามารถสะสมในปลาและสัตว์น้ำชนิดอื่นได้ ถ้ามนุษย์ได้รับสารนี้ผ่านทางห่วงโซ่อาหารและสะสมในร่างกายอาจเกิดอันตรายถึงชีวิตได้ ดังนั้น การกำจัดคาร์โบฟูรานก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม จึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง การกำจัดสารฆ่าแมลงสามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่ การดูดซับด้วยแอนทราไซต์ การดูดซับด้วยถ่าน การออกซิไดส์ด้วยโอโซน เป็นต้น อย่างไรก็ตาม วิธีเหล่านี้มีราคาแพง และยุ่งยาก งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาประสิทธิภาพและความเป็นไปได้ในการกำจัดคาร์โบฟูรานด้วยเศษผงเหล็ก ซึ่งเป็นวิธีการบำบัดที่ง่าย ไม่ซับซ้อน และมีค่าใช้จ่ายต่ำ เนื่องจากใช้เศษผงเหล็ก ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ จึงเหมาะสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดสารฆ่าแมลงที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำได้

### 1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสารละลายคาร์โบฟูราน โดยใช้เศษผงเหล็ก
2. ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสารละลายคาร์โบฟูราน โดยใช้เศษผงเหล็ก
3. ศึกษาจลนพลศาสตร์ในการกำจัดสารละลายคาร์โบฟูราน โดยใช้เศษผงเหล็ก
4. ศึกษาผลิตภัณฑ์ที่เกิดปฏิกิริยาการกำจัดสารละลายคาร์โบฟูราน โดยใช้เศษผงเหล็ก

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของพีเอชในการกำจัดสารละลายคาร์โบฟูรานด้วยเศษผงเหล็ก โดยการทดลองแบบเบทซ์ โดยแปรค่าพีเอชที่ 2, 3, 4, 7, 9 ระยะเวลาสัมผัส ที่ 0.5, 1, 3, 5, 12, 24, 48 ชั่วโมง ปริมาณเศษผงเหล็กโดยแปรค่า 1, 5, 10 กรัม และความเข้มข้นของสารละลายคาร์โบฟูราน โดยแปรค่า 5, 10, 20 มิลลิกรัมต่อลิตร
2. ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสารละลายคาร์โบฟูรานด้วยเศษผงเหล็ก โดยการทดลองแบบเบทซ์ โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง
3. ศึกษาจลนพลศาสตร์ในการกำจัดสารละลายคาร์โบฟูรานด้วยเศษผงเหล็ก ที่เวลา 0.5, 1, 3, 5, 12, 24, 48 ชั่วโมง โดยแปรค่าความเข้มข้น 5, 10, 20 มิลลิกรัมต่อลิตร
4. ศึกษาผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาการกำจัดสารละลายคาร์โบฟูรานด้วยเศษผงเหล็ก โดยนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟ-แมสสเปกโตรมิเตอร์ (GC/MS)

### 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสารละลายคาร์โบฟูราน โดยใช้เศษผงเหล็ก
2. ทราบประสิทธิภาพของการกำจัดสารละลายคาร์โบฟูราน โดยใช้เศษผงเหล็ก
3. เป็นการใช้ประโยชน์จากเศษผงเหล็กซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้
4. สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการกำจัดสารฆ่าแมลงที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 สารกำจัดแมลงศัตรูพืช

สารป้องกันและกำจัดศัตรูพืชเป็นสารเคมีที่ใช้เพื่อกำจัด ป้องกัน หรือควบคุมศัตรูพืช เช่น แมลง วัชพืช โรคพืช เป็นต้น โดยไม่ทำลายพืชผลทั้งก่อนและหลังการเก็บเกี่ยว จัดเป็นปัจจัยสำคัญในการเพาะปลูก เพื่อเพิ่มผลผลิตการเกษตร ประเทศไทยอยู่ในเขตร้อนชื้นสามารถปลูกพืชได้ตลอดทั้งปี โดยเฉพาะในแหล่งที่มีชลประทาน อย่างไรก็ตาม สภาพภูมิอากาศดังกล่าว เหมาะกับการเจริญเติบโตของศัตรูพืชเช่นเดียวกัน ดังนั้นจึงนิยมใช้สารเคมีในการป้องกันและกำจัดศัตรูพืช (ศิริพร, 2548) จะเห็นได้จากสถิติการนำเข้าสารเคมีกำจัดศัตรูพืชมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ดังแสดงตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ปริมาณการนำเข้าสารเคมีป้องกันและกำจัดศัตรูพืช ปี 2531-2541

ปี	ปริมาณสารสำคัญ (ตัน)	
	สารฆ่าแมลง	สารกำจัดวัชพืช
2531	7,050	5,596
2532	6,937	6,747
2533	7,176	8,272
2534	5,560	7,071
2535	6,098	8,450
2536	5,305	9,056
2537	5,252	9,554
2538	6,573	11,934
2539	6,608	14,041
2540	6,239	12,946
2541	7,745	8,697

ที่มา: กองควบคุมพืชและวัสดุการเกษตร กรมวิชาการเกษตร, 2541

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.1.1 การจำแนกประเภทของสารกำจัดแมลงศัตรูพืช

### 2.1.1.1 การจำแนกประเภทของสารกำจัดแมลงศัตรูพืชตามองค์ประกอบทางเคมี

สารเคมีที่ใช้กำจัดแมลงศัตรูพืชมีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน การแบ่งชนิดของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชด้วยวิธีนี้ จะครอบคลุมสารกำจัดแมลงได้ค่อนข้างมากและไม่ซ้ำซ้อน ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ ดังนี้ (พรหมพรและยุวดี, 2543)

#### 1) สารฆ่าแมลงประเภทอนินทรีย์สาร (Inorganic insecticides)

เป็นสารกำจัดแมลงศัตรูพืชประเภทที่มีธาตุโลหะเป็นองค์ประกอบ และไม่มีคาร์บอนผสม สารเหล่านี้มีความคงทนมาก ไม่ระเหย และมักละลายน้ำได้ดี บางชนิดมีพิษสะสมต่อสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม เช่น สารประกอบของปรอท สารหนู โซเดียมฟลูออไรด์ ไครโอไลต์ บอแรกซ์ และกำมะถัน เป็นต้น สารฆ่าแมลงประเภทอนินทรีย์สาร เป็นสารประเภทกินแล้วตาย มีอันตรายน้อยต่อแมลง ต้องใช้ปริมาณมากสำหรับการป้องกันและกำจัดแมลงศัตรูพืช อาจทำให้ใบพืชไหม้ (phytotoxic) ได้ สารในกลุ่มนี้ที่โคเคนมีอยู่ 2 ชนิด ได้แก่ สารหนู และฟลูออรีน

#### 2) สารฆ่าแมลงประเภทอินทรีย์สาร (Organic insecticides)

เป็นสารเคมีกำจัดศัตรูพืชกลุ่มใหญ่ สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

##### 2.1) สารอินทรีย์ที่ได้จากพืช

สารเคมีกำจัดแมลงศัตรูพืชกลุ่มนี้มีหลายชนิด ปัจจุบันมีการค้นพบว่าพืชหลายชนิดสามารถใช้ในการฆ่าแมลงได้ แต่มีเพียงจำนวนน้อยที่ให้ผลดี เนื่องจากสารกำจัดแมลงศัตรูพืชที่ได้พืชมีข้อจำกัดหลายประการ เช่น สลายตัวไวหลังจากการสกัด ใช้วิธีการที่ค่อนข้างยุ่งยาก ต้องใช้พืชปริมาณมากทำให้มีราคาแพง พืชบางชนิดมีพิษต่อคนและสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม ดังนั้น ในทางปฏิบัติจึงมีการนำสารฆ่าแมลงจากพืชมาใช้เพียงเล็กน้อย สารฆ่าแมลงที่นิยมนำมาใช้ในการกำจัดแมลงศัตรูพืช ได้แก่ ไพรีทรอยด์ นิโคตินอยด์ โรตินอยด์ และสารสกัดจากสะเดา เป็นต้น

##### 2.2) สารอินทรีย์สังเคราะห์

ก. สารประกอบอินทรีย์ออร์กาโนคลอรีน (Organochlorine compounds) ประกอบด้วยคาร์บอน คลอรีน ไนโตรเจน และบางชนิดจะมีออกซิเจนรวมอยู่ด้วย มักเรียกว่า Chlorinated insecticide สารกลุ่มนี้นำมาใช้ประโยชน์ในทางการเกษตรน้อยลง เนื่องจากสามารถคงทนอยู่ในสภาพแวดล้อมได้นาน สามารถจำแนกตามการเรียงตัวของคาร์บอนในโมเลกุลออกได้เป็น 3 กลุ่มคือ กลุ่มไดฟีนิลอะลิฟาติก (diphenyl aliphatic) กลุ่มเบนซีนเฮกซะคลอไรด์ (benzene hexachloride; BHC) และกลุ่มสารประกอบไซโคลไดอิน (cyclodiene compounds)

ข. สารประกอบอินทรีย์ฟอสฟอรัส (Organophosphorus compounds) สารกลุ่มนี้มีพิษเฉียบพลันกับสัตว์มีกระดูกสันหลัง สามารถยับยั้งโคลีนเอสเตอเรส ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่ทำหน้าที่ในการทำงานของระบบประสาทในคนและสัตว์ สารตกค้างที่เหลืออยู่บนพืชจะมีฤทธิ์อยู่ได้ในระยะเวลาสั้น ซึ่งนับเป็นผลดี และเหมาะที่จะฉีดพ่นในพืชผักที่มีอายุการเก็บเกี่ยวสั้น ข้อเสียคือต้อง

ทำการฉีดพ่นหลายครั้ง สารฟอสเฟตเป็นเอสเทอร์ของกรดฟอสฟอริก สามารถแบ่งออกได้ 3 กลุ่มคือ กลุ่มอะลิฟาติก ออกาโนฟอสเฟต (aliphatic organophosphate) กลุ่มฟีนิลออกาโนฟอสเฟต (phenyl organophosphate) และกลุ่มเฮเทอโรไซคลิกออกาโนฟอสเฟต (heterocyclic organophosphate)

ค. สารกำจัดแมลงออกาโนซัลเฟอร์ (Organosulphur) สารกลุ่มนี้จะมียังค์ประกอบของกำมะถันและวงฟีนิล 2 วง เป็นสารที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดไร แต่มีพิษน้อยต่อแมลง ได้แก่ เตตราไดฟอน (tetradifon)

ง. สารกำจัดแมลงกลุ่มคาร์บาเมท (Carbamates) สารประกอบกลุ่มนี้เป็นสารประกอบเอสเทอร์ของกรดคาร์บาไมค (carbamic acid) มีพิษคล้ายสารในกลุ่มออกาโนฟอสเฟตในด้านการยับยั้งเอนไซม์โคลีนเอสเตอเรส แต่มีฤทธิ์ตกค้างสั้นกว่า ใช้ป้องกันศัตรูพืชได้อย่างกว้างขวาง คือกำจัดได้ทั้ง แมลง ไข่เดือน ไพร และหอยทาก ตัวอย่างสารในกลุ่มนี้ เช่น คาร์บาริล เป็นต้น

จ. สารกลุ่มฟอร์มามิดีน (Formamidines) สารกลุ่มนี้มีประสิทธิภาพในการกำจัดไข่ตัวอ่อนของแมลง นอกจากนี้ ยังสามารถกำจัดไรและหมัดได้เกือบทุกช่วงวงจรชีวิต สามารถใช้แทนกลุ่มออกาโนฟอสเฟต และคาร์บาเมท เมื่อแมลงต้านทานต่อสารสองกลุ่มนี้แล้ว ตัวอย่างสารในกลุ่มนี้ได้แก่ อะมิทราซ (amitraz)

ฉ. สารกลุ่มไพเรทรอยด์ (Pyrethroids) สารกลุ่มนี้สังเคราะห์ขึ้นโดยเลียนแบบสูตรโครงสร้างของไพเรทรินซึ่งสกัดจากดอกไพเรทรัม สารไพเรทรินและไพเรทรอยด์ มีพิษน้อยต่อสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม แต่มีพิษมากต่อผึ้งและปลา และสารพิษที่ตกค้างบนพืชผลทางการเกษตรไม่ก่อให้เกิดปัญหาใด ๆ ตัวอย่างสารกลุ่มนี้คือ เดลต้าเมทริน (deltamethrin)

ช. กลุ่มสารรม (Fumigants) เป็นสารเดี่ยว ๆ หรือสารผสม อยู่ในรูปของเหลว ของแข็งหรือก๊าซ เมื่ออยู่ในบรรยากาศจะระเหยให้ก๊าซหรือควันเพื่อฆ่าแมลง ไข่เดือน หรือสัตว์ฟันแทะ สารที่เป็นก๊าซมักมีโมเลกุลเล็กและมีคลอรีน โบรมีน หรือฟลูออรีน เป็นองค์ประกอบ และมีพิษมากน้อยแตกต่างกันไป ตัวอย่างสารกลุ่มนี้คือ เมทิลโบรไมด์ (methyl bromide)

ซ. สารจำพวกน้ำมัน (Petroleum oil) มักจะใช้กำจัดแมลงและไร โดยไม่เป็นอันตรายต่อพืช

ฌ. สารกลุ่มปฏิชีวนะ (Antibiotics) เป็นสารเคมีที่ผลิตขึ้นโดยจุลินทรีย์ มีฤทธิ์ในการกำจัดแบคทีเรียและรา ตัวอย่างเช่น อะบาเม็กทิน (abamectin)

### 2.1.1.2 จัดแบ่งสารเคมีตามระดับความเป็นพิษ

องค์การอนามัยโลก (WHO) จัดระดับความเป็นอันตราย โดยถือเอาปริมาณสารที่ก่อให้เกิดการบาดเจ็บในสัตว์ทดลองที่เป็นสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมมาเป็นตัวชี้วัด เช่น หนูหรือกระต่าย โดยการได้รับสารพิษนั้น อาจเกิดขึ้นจากการให้สารนั้นโดยการรับประทานทางปาก (oral) โดยการสูดดม (inhalation) โดยการดูดซึมทางผิวหนัง (dermal) และพิษที่มีต่อมนุษย์โดยจัดแบ่งเป็นประเภทตามลำดับความเป็นพิษ ดังแสดงที่ตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แบ่งประเภทตามระดับความเป็นพิษของวัตถุมีพิษที่ใช้ในการเกษตร

*ค่าแอลดี 50 สำหรับหนูทดลอง (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมของน้ำหนักตัว)				
ชนิดของความเป็นพิษ	พิษโดยทางปาก (Oral LD <sub>50</sub> ) (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	พิษโดยการหายใจ 4 ชม. กับหนู (Inhalation 4Hr. LC <sub>50</sub> rat) (ppm)	พิษโดยทาง ผิวหนัง (Dermal LD <sub>50</sub> ) (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	พิษที่มีต่อมนุษย์ (Lethal Dose for Man) (กรัม)
ชนิดมีพิษร้ายแรงยิ่ง (Ia, Extremely toxic)	น้อยกว่า 5	น้อยกว่า 10	น้อยกว่า 5	น้อยกว่า 60 มิลลิกรัม
ชนิดมีพิษร้ายแรง (Ib, Highly toxic)	5-50	10-100	5-50	0.1-5 กรัม
ชนิดมีพิษปานกลาง (II, Moderately toxic)	50-500	100-1,000	50-350	5-50 กรัม
ชนิดมีพิษน้อย (III, Slightly toxic)	500-5,000	1,000-10,000	350-3,000	50-250 กรัม
ชนิดมีพิษน้อยมาก (Practically non toxic)	5,000-15,000	10,000-100,000	3,000-25,000	250-750 กรัม
ชนิดไม่มีพิษ (Harmless)	มากกว่า 15,000	มากกว่า 100,000	มากกว่า 25,000	มากกว่า 750

ที่มา: [http://www.suanlukchan.com/discussion\\_taisuan.php?suan\\_chanruean\\_id=56](http://www.suanlukchan.com/discussion_taisuan.php?suan_chanruean_id=56)

หมายเหตุ \*แอลดี 50 (LD<sub>50</sub>— median lethal dose) หมายถึง ปริมาณหรือความเข้มข้นต่ำสุดของวัตถุมีพิษที่ทำให้ประชากรของสัตว์ทดลองตายร้อยละ 50 ภายในระยะเวลาไม่เกิน 7 วัน เป็นดัชนีชี้อันตรายของวัตถุมีพิษนิยมใช้อย่างกว้างในปัจจุบันยิ่งค่า LD<sub>50</sub> สูงยิ่งมีความปลอดภัยต่อมนุษย์หรือยังมีค่าต่ำก็ยังมีอันตรายร้ายแรงมาก แต่อย่างไรก็ดี สารเคมีแทบทุกชนิดอาจเป็นพิษได้หากบริโภคในปริมาณที่มาก แม้ว่าจะมีค่าแอลดี 50 สูง เช่น เกลือแกง (NaCl) มีค่า แอลดี 50 เท่ากับ 4,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม แต่หากรับประทานเกินครึ่งละ 24 กรัม สำหรับคนที่มีน้ำหนัก 60 กิโลกรัมก็ทำให้ตายได้ (เครือข่ายเกษตรทางเลือก, 2548)

หากจัดแบ่งสารกำจัดศัตรูพืชที่มีการนำเข้าไปใน ปี พ.ศ. 2543 ตามการจัดระดับความเป็นอันตราย โดยองค์การอนามัยโลก (WHO) พบว่าสารกำจัดศัตรูพืชเหล่านั้นสามารถจัดแบ่งตามความเป็นพิษดังแสดงตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ปริมาณการนำเข้าสารกำจัดศัตรูพืชโดยแบ่งตามระดับความเป็นพิษ

ชั้น	ปริมาณสารสำคัญที่นำเข้า (ตัน)	มูลค่า (ล้านบาท)	ตัวอย่าง
1 เอ พิษร้ายแรงสูงมาก (Ia, extremely hazardous)	393	73.1	parathion methyl, EPN, flocoumafen
1 บี พิษร้ายแรงสูง (Ib, highly hazardous)	3,529	682.23	methomyl, methamidophos, carbofuran
พิษปานกลาง (II, moderately hazardous)	7,006	2,195.62	endosulfan, paraquat, 2,4-D
พิษน้อย (III, slightly hazardous)	3,149	809.97	alachlor, butachlor, propagite
Unlikely to acute hazard in normal use	14,758	2,878.59	mancozeb, carbendazim, azadirachtin
กลุ่มผสม*	703	250.58	metalaxyl + mancozeb, butachlor + propanil

หมายเหตุ \* กลุ่มผสม หมายถึง สารกำจัดศัตรูพืชที่เป็นสารผสมระหว่าง สารที่มีพิษในระดับต่างกันเช่น สารผสมระหว่าง metalaxyl ซึ่งมีพิษจัดอยู่ในกลุ่ม II และ mancozeb ซึ่งมีพิษจัดอยู่ในกลุ่ม II ตามการจัดลำดับความเป็นพิษโดยองค์การอนามัยโลก (เครือข่ายเกษตรทางเลือก, 2548)

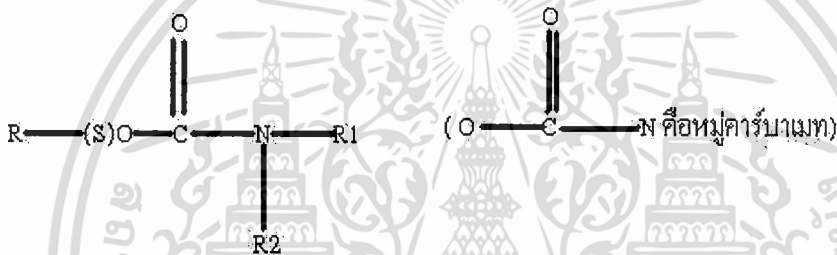
### 2.1.2 สารฆ่าแมลงกลุ่มคาร์บาเมต (Carbamates)

สารกลุ่มนี้เป็นสารอินทรีย์สังเคราะห์กลุ่มใหญ่กลุ่มหนึ่ง และนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย สามารถเป็นทั้งสารฆ่าหญ้า สารฆ่าแมลง และเชื้อราได้ สูตรเคมีโดยทั่วไป ดังรูปที่ 2.1 ในกรณีที่ เป็นสารฆ่าแมลง จะไม่มีอะตอมของกำมะถัน และหมู่ R จะมีขนาดใหญ่กว่าหมู่ R1 และ R2 ในกรณีที่ เป็นยาฆ่าหญ้าและเชื้อรา กำมะถันจะไปแทนที่ออกซิเจน และหมู่ R1 และ R2 จะมีขนาดใหญ่ใกล้เคียงหรือใหญ่กว่าหมู่ R จึงมีฤทธิ์ตรงกันข้าม

สารฆ่าแมลงกลุ่มนี้เป็นสารสังเคราะห์ที่ค่อนข้างใหม่ มีฤทธิ์ในการกำจัด และสามารถกำจัดแมลงได้กว้างขวาง เนื่องจากมีพิษต่อคนและสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมน้อยกว่าสารฆ่าแมลงชนิดอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพราะว่ามันสลายตัวได้รวดเร็ว จึงทำให้มีพิษตกค้างในธรรมชาติน้อย สารฆ่าแมลงในกลุ่มคาร์บาเมทที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ได้แก่ เซวิน (Sevin) หรือ คาร์บาริล (Carbaryl) ไบกอล (Baygon) ฟูราดาน (Furadan) และแลนเนท (Lannate) สารกลุ่มนี้ทุกชนิดจะมีหมู่คาร์บาเมทอยู่ด้วยเสมอ และหมู่ R มักจะเป็นอนุพันธ์ของเบนซีน แพพทาลิน หรือสารอะโรมาติกอื่น ๆ สารคาร์บาเมทแต่ละชนิดมีความเป็นพิษแตกต่างกันขึ้นอยู่กับหมู่ R ความเป็นพิษขึ้นอยู่กับสถานะของสาร การละลาย การดูดซึมเข้าไปสู่ร่างกาย สารที่ระเหยได้ง่ายจะมีพิษรุนแรงกว่า นอกจากนี้ ยังขึ้นอยู่กับกลไกการกำจัดพิษของร่างกายอีกด้วย สำหรับผู้ป่วยที่ได้รับสารพิษนี้จะมีอาการกระตุกและหดตัวของกล้ามเนื้ออย่างมากจนเป็นตะคริว อาการอื่น ๆ ได้แก่ ปวดศีรษะ คลื่นไส้ อาเจียน สายตาพร่า ม่านตาหด เล็กลง เหงื่อออกมาก เจ็บหน้าอกและท้อง มีอาการเกร็ง น้ำลายฟูมปาก ถ้าหากได้รับในปริมาณมาก ๆ ก็อาจทำให้คนและสัตว์เสียชีวิตได้ (พรหมพร และยวดี, 2543)



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทั่วไปของกลุ่มคาร์บาเมท

ความเป็นพิษของสารฆ่าแมลงกลุ่มคาร์บาเมทนั้น จะเหมือนกับกลุ่มออกาโนฟอสเฟต คือจะยับยั้งการทำงานของเอนไซม์โคลีนเอสเตอเรส (Cholinesterase; ChE) ตรงบริเวณ Esteratic site ของโมเลกุลเอนไซม์ ทำให้มีการสะสมของอะเซทิลโคลีนที่รอยต่อประสานระหว่างเซลล์ประสาท กระบวนการดังกล่าว เรียกว่า Carbarylation และปฏิกิริยาจะแตกต่างไปจากคุณสมบัติของสารออร์กาโนฟอสเฟต ดังนี้

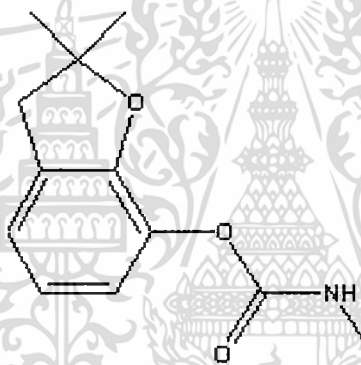
- สลายตัวได้ง่าย (low stability)
- ไม่ทำให้เอนไซม์โคลีนเอสเตอเรสเสื่อมสภาพ ฤทธิ์ในการยับยั้งเอนไซม์จึงเป็นแบบย้อนกลับได้ (reversible effect) และอาการทางคลินิกที่ปรากฏจะไม่ค่อยรุนแรงนัก
- ถูกดูดซึมเข้าสู่ระบบประสาทส่วนกลางได้น้อย ทำให้อาการทางสมองที่พบไม่บ่อยรุนแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ปริมาณของสารคาร์บาเมทที่เป็นอันตรายต่อร่างกายมีพิษกว้างมาก ดังนั้น โอกาสของการเกิดอาการรุนแรงนั้น จึงมีน้อย
- การตรวจวัดระดับเอนไซม์โคลีนเอสเตอเรสทำได้ยากมาก ขึ้นอยู่กับชนิดและเวลาที่ใช้สารคาร์บาเมท เนื่องจากเอนไซม์จะกลับคืนสู่ภาวะปกติได้เร็วมาก
- การรักษา การแก้พิษเบื้องต้นของสารฆ่าแมลงชนิดคาร์บาเมทนั้น จะใช้หลักการเดียวกันกับสารฆ่าแมลงชนิดออร์กาโนฟอสเฟต คือ การทำให้เอนไซม์โคลีนเอสเตอเรสมีฤทธิ์กลับคืนอย่างเดิมอีก โดยใช้สารเคมีที่มีคุณสมบัติเข้าไปแย่งสารฆ่าแมลงดังกล่าว สารเคมีจะไปจับกับเอนไซม์ชั่วคราว และนำมาใช้เป็นการรักษาพิษได้ดี ยาแก้พิษที่ใช้กันมากที่สุดได้แก่ 2-pyridine aldoxime (PAM)

### 2.1.2.1 คาร์โบฟูราน (Carbofuran) (Oregon State University, 1996 และ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2537)

จัดเป็นสารฆ่าแมลงในกลุ่มคาร์บาริเมต มีสูตรโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของคาร์โบฟูราน

ชื่อทางเคมี	2,3-dihydro-2,2-dimethylbenzofuran-7-yl-methylcarbamate (IUPAC)
	2,3-dihydro-2,2-dimethyl-7-benzofuranyl methylcarbamate
	(CA;1563-66-2)
ชื่อสามัญ	carbofuran (BSI,ISO,ANSI,ESA)
สูตรเอมไพริกัล	$C_{12}H_{15}NO_3$
น้ำหนักโมเลกุล	221.25 กรัม
ชื่อทางการค้า	Buraon (Sree Ramcide Chemical Pvt. Ltd.)
	Carbochem (Agrochemical Industries Co;Ltd.)
	Damira (Ladda Co;Ltd)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	Diafuran (Calliope S.A.)
	Dhaal (Searle India Ltd.)
	Furacarb (Aimco Pesticide)
	Furadan (Rallis India Ltd.)
	Vitafuran (Asiantic Agricultural Industries Pte; Ltd.)
	Yaltox (Bayer)
<b>คุณสมบัติทางกายภาพ</b>	ผลึกแข็งสีขาว (White crystalline solid) ไม่มีกลิ่น
<b>จุดหลอมเหลว</b>	153-154 องศาเซลเซียส
<b>การละลาย</b>	ที่ 25 องศาเซลเซียส ละลายในน้ำ 0.7 กรัมต่อกิโลกรัม, ใน Acetone 150 กรัมต่อกิโลกรัม, Acetonitrile 140 กรัมต่อกิโลกรัม, Cyclohexanone 90 กรัมต่อกิโลกรัม, Dimethylformamide 270 กรัมต่อกิโลกรัม, Dimethylsulfoxide 250 กรัมต่อกิโลกรัม, Benzene 40 กรัมต่อกิโลกรัม
<b>การคงสภาพ ครึ่งชีวิต</b>	ในสารละลายที่เป็นกรดหรือกลาง แต่ไม่คงสภาพ ในสารละลายที่เป็นเบส ในช่วง 30-120 วัน สภาวะเบส sandy soil (30 days), intermediate half-life in loam (40 days) และ long half-life in mud (80day) และ 690 สัปดาห์ สภาวะกรด
<b>ชนิดของผลิตภัณฑ์</b>	ชนิดเม็ด ชนิดผง และชนิดแขวนลอย
<b>การออกฤทธิ์</b>	เป็นสารกำจัดแมลงและไส้เดือนฝอย คาร์บาเมทชนิดดูดซึม ออกฤทธิ์ในทางสัมผัสและกินเป็นพิษต่อ Cholinesterase inhibitor
<b>ความเป็นพิษ</b>	มีพิษเฉียบพลัน โดยมีค่า LD <sub>50</sub> ต่อนู ทางปาก เท่ากับ 3.5 - 8 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมและ ทางผิวหนัง เท่ากับ 3000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
<b>แมลงที่กำจัดได้</b>	เพลี้ยจักจั่น เพลี้ยกระโดดสีน้ำตาล เพลี้ยกระโดดหลังขาว เพลี้ยอ่อน เพลี้ยไฟ หนอนม้วนใบข้าว หนอนกระทู้ควายพระอินทร์ ตัวงัด หนอนกอลาย หนอนเจาะสมอ ตัวงัด และไส้เดือนฝอย
<b>พืชที่ใช้</b>	ข้าว ฝ้าย ยาสูบ ถั่ว มันฝรั่ง ข้าวโพด ข้าวฟ่าง อ้อย ส้ม กาแฟ พริกทอง แตง และผักต่างๆ
<b>วิธีการใช้</b>	โดยการหว่านหรือโรยในร่องปลูก
<b>คำเตือน</b>	การโบพฟูรานเป็นวัตถุที่มีพิษอันตรายมาก ต้องใช้ด้วยความระมัดระวัง เพื่อป้องกันมิให้เป็นพิษต่อผู้ใช้และสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ ผู้ใช้ต้องปฏิบัติดังนี้ <ul style="list-style-type: none"> <li>- ขณะโรยหรือหว่านวัตถุที่มีพิษต้องอยู่เหนือลมเสมอ</li> </ul>

- อย่าให้ละอองวัดภูมิพิศเข้าปาก ตา จมูก หรือถูกผิวหนังและต้องสวมถุงมือทุกครั้งและหน้ากากขณะใช้วัดภูมิพิศ
- ต้องล้างมือและหน้าให้สะอาดด้วยน้ำและสบู่ก่อนกินอาหาร
- ต้องอาบน้ำ สระผม เปลี่ยนเสื้อผ้าใหม่ทุกครั้งหลังเสร็จจากสัมผัสวัดภูมิพิศ
- ภาชนะบรรจุเมื่อใช้หมดแล้วต้องทำลายแล้วฝังดิน ห้ามเผาไฟ
- ระวังอย่าให้วัดภูมิพิศนี้ปลิวลงในแม่น้ำ ลำธาร หนอง บึง หรือบ่อน้ำ เพราะเป็นพิษต่อปลาและสัตว์น้ำอื่น ๆ มาก

#### อาการเกิดพิษ

วิงเวียนศีรษะ อ่อนเพลีย น้ำลายไหล เหงื่อออกมาก ปวดท้อง อาเจียน

#### การแก้พิษ

- ถ้าเกิดพิษที่ผิวหนังให้ล้างด้วยน้ำสบู่หลายๆ
- ถ้าเข้าตาให้ล้างด้วยน้ำสะอาด
- ถ้ากลืนกินเข้าไปต้องทำให้อาเจียนโดยเร็ว ด้วยการล้วงคอ หรือดื่มน้ำเกลือมากๆ
- กินยาอะโทรปีนซัลเฟต ขนาด 1 ต่อ 1000 เกรน 2 เม็ด แล้วส่งแพทย์ โดยเร็วที่สุด

#### หมายเหตุ

สำหรับยาสูบ ถั่วเหลือง มะเขือเทศ แดงโม ให้ใช้คาร์โบฟูรานเพียงครั้งเดียวเมื่อปลูกพืช

#### 2.1.2.2 การกำจัดคาร์โบฟูราน

สามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่ การดูดซับคาร์โบฟูรานด้วยตัวดูดซับชนิดต่างๆ ได้แก่ ทราบ ขี้เถ้า แกลบ แอนทราไซด์ และถ่าน (จิราพรและถาวร, 2538) การออกซิไดส์ด้วยโอโซน (พรหมพร และยวดี, 2543) อย่างไรก็ตาม วิธีนี้ค่อนข้างยุ่งยาก และมีข้อจำกัดมาก เช่น โอโซนนั้นไม่เสถียร สามารถสลายตัวได้ง่าย ทำให้ไม่สามารถผลิตไว้ใช้ได้ ต้องทำการผลิตใหม่ ๆ อยู่เสมอ

### 2.2 เหล็ก

#### 2.2.1 ประเภทของเหล็ก

เหล็กมีหลายชนิดด้วยกัน ซึ่งสามารถแบ่งเป็นชนิดได้ดังนี้

##### 1) เหล็กดิบ

เหล็กดิบ (pig iron) หมายถึง เหล็กที่ถูกขุดขึ้นมาจากการทำเหมืองแร่โดยตรงโดยที่ยังไม่มีกรรมวิธีแปรรูปใดๆ มีลักษณะเป็นเหล็กที่ไม่บริสุทธิ์ จึงไม่อาจนำมาใช้งานได้ทันที เนื่องจากมีสิ่งเจือปนอยู่

โดยเฉพาะออกซิเจน ซึ่งมีปริมาณมากในสินแร่เหล็ก ออกซิเจนเหล่านี้จะอยู่ในรูปของเหล็กออกไซด์ ดังนั้น ต้องขจัดออกซิเจนออกจากสินแร่เหล็กก่อนที่จะนำสินแร่เหล็กไปใช้ประโยชน์ โดยถลุงเหล็กภายในเตาที่มีอุณหภูมิสูง การถลุงแร่เหล็กเป็นขั้นตอนแรกของกระบวนการผลิตเหล็ก เหล็กที่ได้จากเตาสูงเรียกว่าเหล็กดิบ ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่นำไปใช้ในการผลิตเหล็กหล่อ และเหล็กกล้าในขั้นตอนต่อไป (นิรนาม, 2547)

## 2) เหล็กอ่อน (Wrought Iron)

หมายถึง เหล็กที่ได้จากเตาพุดเดิล (Puddle furnace) ซึ่งเป็นกรรมวิธีที่ผลิตเหล็กที่เก่าแก่มาก เป็นเหล็กที่นิยมของช่างตีเหล็ก โดยเฉพาะเหล็กชนิดนี้เป็นเหล็กที่มีความบริสุทธิ์มาก คือ เป็นเนื้อเหล็กถึงร้อยละ 99.99 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเผาให้ร้อนเหล็กอ่อนจะไม่ละลาย แต่จะตีขึ้นรูปได้ง่ายมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ ยังสามารถตีให้เหล็กประสานกันได้อีกด้วย (ณัฐสม, 2532)

## 3) เหล็กกล้า (Steel)

เหล็กกล้า หมายถึง เหล็กที่มีธาตุคาร์บอนเป็นส่วนผสม โดยจะถือหลักที่ว่าในเหล็กมีคาร์บอนผสมอยู่ต่ำกว่า 1.7 หรือ 2 เปอร์เซ็นต์ จะเรียกว่าเหล็กกล้า (ถ้ามีคาร์บอนผสมอยู่มากกว่า 1.7 หรือ 2 เปอร์เซ็นต์จะจัดเป็นเหล็กหล่อ) นอกจากธาตุคาร์บอนแล้วยังมีธาตุอื่น ๆ ผสมอยู่ด้วย แต่จะอยู่ในลักษณะเป็นธาตุเจือปน (impurities) เช่น ซิลิกอน แมงกานีส กำมะถัน และฟอสฟอรัส

พื้นผิวของเหล็กกล้าแบ่งได้เป็น 2 ส่วน (Burriss *et al.*, 1995 และ Mantha *et al.*, 2001) คือ

ก. ส่วนที่เป็น Reactive sites สามารถใช้ในการกำจัดโดยปฏิกิริยา Redox โดยจะเกิดการทำลายพันธะคู่ของโมเลกุลอื่น

ข. ส่วนที่เป็น Nonreactive sites ใช้ทำการกำจัดสารด้วยการดูดซับ โดยโมเลกุลของสารจะถูกดูดซับบนพื้นผิวของเหล็ก

เหล็กกล้าแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ

### 3.1) เหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon steel)

ซึ่งเป็นเหล็กที่มีคาร์บอนเป็นส่วนผสมหลัก ส่วนธาตุอื่น ๆ มีอยู่น้อยไม่ได้ทำการผสมลงไป แต่อาจจะติดมาจากกรรมวิธีถลุง หรือกรรมวิธีการไล่แก๊ส

### 3.2) เหล็กกล้าผสม (Alloy steel)

คือเหล็กกล้าคาร์บอนที่มีธาตุอื่น ๆ ผสมอยู่ เช่น โครเมียม นิกเกิล โมลิบดีนัม วานาเดียม และโคบอลต์ สำหรับแมงกานีส และซิลิกอน ถ้ามีปริมาณสูงกว่าในเหล็กกล้าคาร์บอน จะจัดเป็นธาตุผสมเช่นเดียวกัน เช่น ผสมแมงกานีสหรือซิลิกอนเกินกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ การผสมธาตุต่าง ๆ ลงไปในเหล็กกล้าคาร์บอนส่วนใหญ่มีจุดประสงค์ที่จะปรับปรุงคุณสมบัติและความสามารถในการชุบแข็ง (hardenability) คุณสมบัติด้านทานการกัดกร่อนทั้งที่อุณหภูมิปกติและอุณหภูมิสูง และในบางกรณีเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติตัวนำไฟฟ้าและคุณสมบัติเกี่ยวกับแม่เหล็ก

#### 4) เหล็กหล่อ

เหล็กหล่อ (Cast iron) หมายถึง เหล็กที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป และมีส่วนน้อยที่คาร์บอนมากกว่า 4.5 เปอร์เซ็นต์ การหลอมละลายเหล็กหล่อตามปกติจะทำในเตาควิปอลาหรือเตาไฟฟ้าโดยการผสมเหล็กคิบ เศษเหล็กกล้า ถ่านโค้ก และสารเจือเหล็ก (ferro-alloy) เข้าไป ในการเย็นตัวเร็ว เหล็กหล่อจะแข็งตัวเป็นเหล็ก-คาร์บอนที่ไม่เสถียร (metastable Fe-C system) นั่นคือ คาร์บอนจะอยู่ในรูปคาร์ไบด์ (โครงสร้างจะเรียกว่าซีเมนไต์) รอยแตกหักในเนื้อเหล็กเป็นรอยเหมือนเปราะรมีสีสว่างขาวเมื่อดึงแยก แข็งเปราะ เจริญวัยผิวได้อย่างเดียว เหล็กนี้เรียกว่า "เหล็กหล่อขาว"

เหล็กหล่อ เป็นเหล็กที่เหมาะสมกับการขึ้นรูปโลหะวิธีการหนึ่ง คือ การหล่อโดยการให้ความร้อนแก่เหล็กจนถึงจุดหลอมเหลวเป็นน้ำเหล็ก แล้วนำไปเทลงในโพรงแบบหล่อที่ทำด้วยทรายละเอียด เรียกว่า ทรายหล่อ เตรียมไว้เป็นรูปทรงของเครื่องใช้ต่าง ๆ แล้ว ทิ้งไว้ให้เย็น จึงค่อยแกะแบบทรายออก จะได้เหล็กที่แข็งตัวไปตกแต่งและใช้งานได้ วัสดุช่างประเภทเหล็กหล่อในปัจจุบันได้มีการค้นคิด ปรับปรุงและพัฒนาให้มีคุณสมบัติดีขึ้น พร้อมกับการแก้ไขจุดด้อยต่าง ๆ ให้ลดน้อยลง ทำให้มีวัสดุเหล็กหล่อที่สามารถตอบสนองการใช้งานได้อย่างกว้างขวาง (นิรนาม, 2547) เหล็กหล่อที่พบเห็นโดยทั่วไปสามารถจำแนกตามลักษณะโครงสร้างพื้นฐานได้ 4 กลุ่ม คือ (กนกวรรณ, 2547)

##### 4.1) เหล็กหล่อเทา

เมื่อตีหักจะเห็นเนื้อเป็นสีเทา สมบัติการหล่อดี ความทนแรงดึงสูง ราคาถูก พบในชิ้นส่วนรถยนต์ เสื้อสูบ ฝาสูบ ปลอกเสื้อสูบ จานถ่วง กังหันน้ำ เฟือง ข้อต่อส่งกำลัง ลูกกรอก

##### 4.2) เหล็กหล่อเหนียว

ใช้ทำชิ้นส่วนเครื่องกลที่ทนแรงกระแทกสูงกว่าเหล็กหล่อเทา เช่น ลูกกรอก เพลาช้อเหวี่ยง ลูกกลิ้งรีดเหล็ก

##### 4.3) เหล็กหล่อขาว

เมื่อตีหักจะเห็นเนื้อเป็นสีขาวเหมือนเหล็กทั่วไป พบในชิ้นส่วนอุปกรณ์ที่ต้องการความคงทนต่อการเสียดสี เช่น ส่วนประกอบใบพัดของเครื่องยิงทราย จานเจริญวัยเพชรพลอย

##### 4.4) เหล็กหล่อผสม

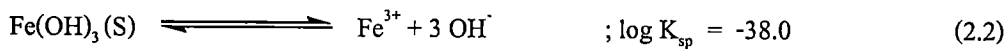
ใช้ผลิตชิ้นส่วนของปั๊ม และข้อต่อต่าง ๆ

#### 2.2.2 คุณสมบัติทางเคมี (Chemical Properties) (วรรณิกา, 2542)

เหล็กโดยทั่วไปมีสถานะออกซิเดชัน 0, +2 และ +3 มีเพียงเหล็กสถานะออกซิเดชันศูนย์ (Zero Valence Iron ; Fe<sup>0</sup>) เท่านั้น ที่ปรากฏในรูปธาตุเหล็กบริสุทธิ์ เหล็กที่ใช้ประโยชน์ส่วนใหญ่ นั้นมีไขเหล็กบริสุทธิ์แต่จะผสมธาตุอื่นลงไป เพื่อให้มีคุณสมบัติดีขึ้น หรือที่เรียกว่า เหล็กกล้า

(Steel) เหล็กสถานะออกซิเดชันศูนย์ เป็นตัวรีดิวซ์ที่ดี สามารถเกิดปฏิกิริยากับกรดเจือจางเมื่อไม่มีอากาศได้ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยา คือ เฟอร์รัสไอออน ( $\text{Fe}^{2+}$ ) และเฟอร์ริกไอออน ( $\text{Fe}^{3+}$ )

เฟอร์รัสไอออน ( $\text{Fe}^{2+}$ ) และเฟอร์ริกไอออน ( $\text{Fe}^{3+}$ ) เมื่อทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออน ( $\text{OH}^-$ ) จะได้เฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ ( $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ) และเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ) ตามลำดับ ซึ่งมีค่าคงที่ในการละลาย (solubility constant) ดังปฏิกิริยา 2.1 และ 2.2



เฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นละลายน้ำได้น้อย จึงตกผลึกเป็นของแข็งสีขาวได้อย่างรวดเร็ว และเคลือบอยู่บนผิวโลหะ อย่างไรก็ตาม เฟอร์รัสไฮดรอกไซด์มีความคงตัวต่ำ จึงทำปฏิกิริยากับออกซิเจนถูกเปลี่ยนเป็นเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์อย่างรวดเร็วดังปฏิกิริยา 2.3



เฟอร์ริกไฮดรอกไซด์สามารถเปลี่ยนเป็นเฟอร์ริกออกไซด์ได้โดยการดึงน้ำออก ดังปฏิกิริยา 2.4 และ 2.5

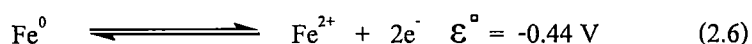


สนิมเหล็กโดยทั่วไปคือ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  จากการวิจัยพบว่าเมื่อสนิมเหล็กเกาะจับอยู่บนขั้วบวก (anodic region) ไอออนอื่น ๆ ก็จะตกผลึกรวมอยู่ด้วย ดังนั้นเมื่อเกาะเอาสนิมเหล็กมาวิเคราะห์ดูมักปรากฏว่ามีสารประกอบประเภทความกระด้าง เศษดินทรายต่าง ๆ ปะปนอยู่ด้วยเสมอ (มันสิน และไพพรรณ, 2527)

### 2.2.3 ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน

ปฏิกิริยาจำนวนมากมีการเปลี่ยนแปลงเลขออกซิเดชัน ปฏิกิริยาประเภทนี้เรียกว่าออกซิเดชัน-รีดักชัน หรือ ปฏิกิริยารีดอกซ์ เมื่อใดมีการเพิ่มเลขออกซิเดชันเรียกว่าเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และเมื่อใดมีการลดเลขออกซิเดชันเรียกว่าเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ปฏิกิริยาออกซิเดชันและปฏิกิริยารีดักชันเกิดขึ้นควบคู่พร้อมกันไปเสมอ เพื่อที่จะทำให้เลขออกซิเดชันที่เพิ่มขึ้นเท่ากันพอดีกับเลขออกซิเดชันที่ลดลง

1) ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) หมายถึง ปฏิกิริยาที่มีการให้อิเล็กตรอน ตัวอย่างดังปฏิกิริยา 2.6 (อินทิตรา, 2536)



ตัวออกซิไดซ์ (Oxidizing agent) หมายถึง สารที่สามารถรับอิเล็กตรอนได้จากปฏิกิริยา 2.6 ตัวออกซิไดซ์ คือ  $\text{Fe}^{2+}$

2) ปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) หมายถึง ปฏิกิริยาที่มีการรับอิเล็กตรอน ตัวอย่างดังปฏิกิริยา 2.7

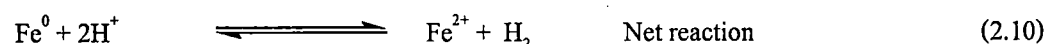
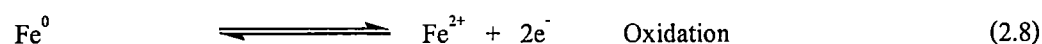


ตัวรีดิวซ์ (Reducing agent) หมายถึง สารที่สามารถให้อิเล็กตรอนได้จากปฏิกิริยา 2.7 ตัวรีดิวซ์ คือ  $\text{Fe}^0$  (กฤษณา, 2531)

## 2.2.4 เซลล์กัดกร่อนไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Corrosion) (Powell และ คณะ, 1995)

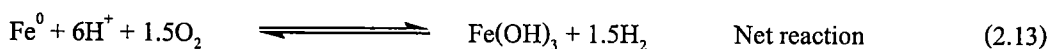
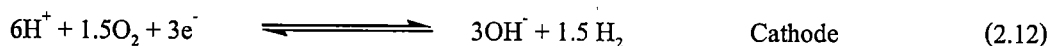
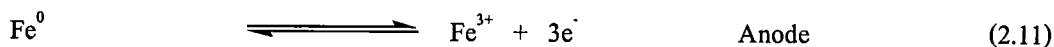
โลหะสถานะออกซิเดชัน มีแนวโน้มที่จะกลับไปสู่สถานะทางอุณหพลศาสตร์ที่เสถียร (Thermodynamically Stable Form) เช่น เหล็กสถานะออกซิเดชันศูนย์ ( $\text{Fe}^0$ ) จะถูกออกซิไดซ์เป็นเหล็กออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ในบรรยากาศของโลก ที่มีออกซิเจนเมื่อโลหะจุ่มอยู่ในสารละลายที่เป็นน้ำเกลือกลไกการกัดกร่อนไฟฟ้าเคมีสามารถเกิดขึ้นได้ อิเล็กตรอน ( $e^-$ ) ถูกปลดปล่อยออกมาจากขั้วบวก (anodic region) ได้ไอออนบวกของโลหะ (metal cation) และ อิเล็กตรอน ( $e^-$ ) จะถูกรับไปโดยตัวออกซิไดซ์ ที่อีกบริเวณหนึ่งของผิวโลหะ คือบริเวณขั้วลบ (cathodic region) ปรากฏการณ์เช่นนี้ถือเป็นการหลีกเลี่ยงการสะสมของประจุไฟฟ้า

เซลล์กัดกร่อนไฟฟ้าเคมีประกอบด้วย 2 ส่วน คือ วงจรภายในคือสารละลายอิเล็กโตรไลต์และวงจรภายนอก คือ โลหะที่เป็นขั้วบวกและโลหะที่เป็นขั้วลบ วงจรภายนอกจะถ่ายเทอิเล็กตรอนจากขั้วบวกไปยังขั้วลบ และทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจน ( $\text{H}^+$ ) ได้ก๊าซไฮโดรเจน ( $\text{H}_2$ ) หรือเมื่อมีออกซิเจนและไฮโดรเจนไอออนจะเกิดปฏิกิริยาได้ไฮดรอกไซด์ไอออน ( $\text{OH}^-$ ) ตัวอย่างของเซลล์กัดกร่อนไฟฟ้าเคมีเมื่อใช้เหล็กเป็นขั้วบวกดังปฏิกิริยา 2.8 – 2.13



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเมื่อมีออกซิเจน



## 2.3 จลนพลศาสตร์เคมี

### 2.3.1 กฎของอัตราและลำดับของปฏิกิริยา

กฎอัตรา (rate law) คือ สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราของปฏิกิริยากับความเข้มข้นของสารตั้งต้นหรือสารที่เข้าทำปฏิกิริยา

ลำดับของปฏิกิริยา (order of reaction) คือ ผลรวมของกำลังหรือเอ็กซ์โปเนนเชียลของสารที่ปรากฏในกฎของอัตรา

กฎอัตราทั่วไปอาจเขียนได้ดังสมการ 2.14

$$\text{อัตรา} = k [\text{A}]^n [\text{B}]^m \quad (2.14)$$

ซึ่ง [A] และ [B] เป็นความเข้มข้น (โมลต่อลิตร) ของสารที่เข้าทำปฏิกิริยา

n และ m เป็นเลขยกกำลังตามที่สารเข้าทำปฏิกิริยาซึ่งมีค่า = 0, 1/2, 1, 2, 3, ...

เมื่อ  $n + m = 1$  เรียกว่าปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

$n + m = 2$  เรียกว่าปฏิกิริยาอันดับสอง

k ในกฎอัตรา คือค่าคงที่เฉพาะของอัตราที่อุณหภูมิที่กำหนดให้ ค่า k จะเปลี่ยนแปลงเมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิ

#### 2.3.1.1 ปฏิกิริยาอันดับศูนย์

อัตราของปฏิกิริยาจะคงที่เสมอ ไม่ว่าความเข้มข้นของสารตั้งต้นมีค่ามากน้อยเพียงใด ปฏิกิริยาประเภทนี้เรียกว่า ปฏิกิริยาอันดับศูนย์ และกฎอัตราแสดงดังสมการ 2.15-2.17

$$\text{อัตรา} = \frac{d[\text{A}]}{dt} = -k \quad (2.15)$$

อินทิเกรตสมการ (Integrate) 2.15 จะได้สมการ 2.16

$$[\text{A}]_0 - [\text{A}] = kt \quad (2.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \text{ถ้า } [A] &= [A]_0/2 \\ t_{1/2} &= ([A]_0 / 2)/k \end{aligned} \quad (2.17)$$

อัตราของปฏิกิริยาอันดับศูนย์โดยปกติขึ้นกับปัจจัยอื่นๆ เช่น ในปฏิกิริยาประเภทโฟโตเคมีคัล (photochemical reaction) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่มีแสงเป็นตัวเร่ง อัตราจะขึ้นกับปริมาณหรือความเข้มของแสง หรือในปฏิกิริยาที่มีเอนไซม์ (enzyme) เป็นตัวเร่ง อัตราขึ้นกับปริมาณของเอนไซม์ที่ใช้ เป็นต้น

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารตั้งต้น ( $[A]$ ) กับเวลา ( $t$ ) แสดงดังรูปที่

2.3



รูปที่ 2.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $[A]$  กับ  $t$  ของปฏิกิริยาอันดับศูนย์

### 2.3.1.2 ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

ปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (first order reaction) เมื่อผลบวกของ  $n$  และ  $m$  ในกฎอัตราเท่ากับหนึ่ง ซึ่งในกรณีทั่วไป  $n = 1, m = 0$  หรือ  $n = 0, m = 1$  อาจเขียนกฎอัตราทั่วไปสำหรับปฏิกิริยาอันดับหนึ่งดังสมการ 2.18

$$\text{อัตรา} = -k [A] \quad (2.18)$$

ซึ่ง  $[A]$  = ความเข้มข้นของสารตั้งต้น

ลำดับของปฏิกิริยาสามารถหาได้โดยทำการทดลองหลายๆ การทดลอง แต่ละการทดลองให้ความเข้มข้นของสารตั้งต้นหรือสารที่เข้าทำปฏิกิริยาแตกต่างกันออกไป แล้วทำการวัดอัตรา ทำให้ทราบว่าปฏิกิริยานั้นมีลำดับเท่าใดตามสารตั้งต้นนั้น ลำดับของปฏิกิริยาอาจหาได้โดยใช้ความเข้มข้นของสารตั้งต้นเพียงหนึ่งค่าแล้วติดตามการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นนี้กับเวลา ข้อมูลที่

บันทึกไว้สามารถนำไปหาลำดับของปฏิกิริยาโดยวิธีการเขียนกราฟ แต่ต้องดัดแปลงสมการของกฎอัตราให้เป็นสมการที่สะดวกต่อการเขียนกราฟดังนี้

อัตราของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเขียนในรูปของการลดสารตั้งต้นกับเวลา ดังสมการ 2.19

$$\text{อัตรา} = \frac{\Delta[A]}{\Delta t} = -k[A] \quad (2.19)$$

หรือเขียนในรูปของสมการดิฟเฟอเรนเชียล (differential equation) ดังสมการ 2.20 หรือ 2.21

$$\frac{d[A]}{dt} = -k[A] \quad (2.20)$$

หรือ

$$\frac{d[A]}{[A]} = -kdt \quad (2.21)$$

อินทิเกรต (Integrate) สมการ 2.21 จะได้สมการ 2.22 หรือ 2.23

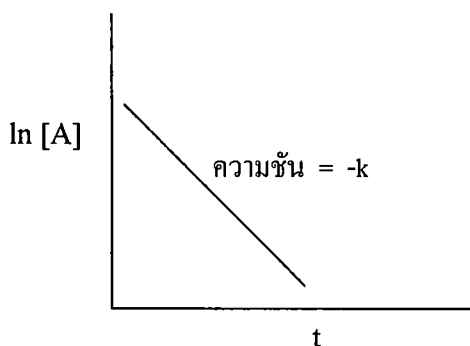
$$\ln [A] - \ln [A]_0 = -kt \quad (2.22)$$

$[A]_0$  = ความเข้มข้นของ A เมื่อ  $t = 0$

หรือ

$$2.303 \log \frac{[A]}{[A]_0} = -kt \quad (2.23)$$

ถ้าเขียนกราฟของ  $\ln [A]$  หรือ  $\log [A]$  กับเวลาจะได้เส้นตรงที่มีความชัน = -k ค่า  $\ln [A]$  ลดลง เมื่อเวลา  $t$  ผ่านไป และเมื่อปริมาณ  $[A]$  หดไปครึ่งหนึ่ง เวลา  $t$  เรียกว่าครึ่งชีวิต ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln [A]$  กับ  $t$  ของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

ครึ่งชีวิต (half life) หรือครึ่งเวลา (half time) คือ เวลาที่ต้องใช้เพื่อให้ความเข้มข้นหรือปริมาณของสารเหลือครึ่งหนึ่งของปริมาณสารเดิม ดังสมการ 2.24

$$[A] = \frac{[A]_0}{2} \quad (2.24)$$

แทนค่า  $[A]$  จากสมการ 2.24 ในสมการ 2.23 จะได้สมการ 2.25 - 2.26

$$2.303 \log 2 = kt_{1/2} \quad (2.25)$$

$$t_{1/2} = \frac{2.303 \log 2}{k} = \frac{0.693}{k} \quad (2.26)$$

จากสมการ 2.26 จะเห็นได้ว่า  $t_{1/2}$  เป็นอิสระต่อความเข้มข้นของสารตั้งต้น ซึ่งหมายความว่าความเข้มข้นของสารตั้งต้นจะลดลงครึ่งหนึ่งในช่วงเวลาครึ่งชีวิต ไม่ว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตั้งต้นจะเป็นเท่าใดก็ตาม เมื่อเวลาผ่านไปอีก  $t_{1/2}$  ความเข้มข้นก็จะลดลงอีก  $\frac{1}{2}$  เป็นเช่นนี้เรื่อย ๆ อาจกล่าวได้ว่า ครึ่งชีวิตของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นหรือปริมาณของสารตั้งต้น

### 2.3.1.3 ปฏิกิริยาอันดับสอง

ปฏิกิริยาอันดับสอง (second order reaction) คือ ปฏิกิริยาที่ผลบวกของ  $m$  และ  $n$  ในกฎอัตราเท่ากับสอง ซึ่งอาจเป็นกรณีที่  $n = 1, m = 1$  หรือ  $n = 2, m = 0$  หรือ  $n = 0, m = 2$  ดังสมการ 2.27 หรือ 2.28

$$\text{อัตรา} = k [A][B] \quad (2.27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{หรือ} \quad \text{อัตรา} = k[A]^2 \quad (2.28)$$

ซึ่ง  $[A]$  และ  $[B]$  เป็นความเข้มข้น (โมลต่อลิตร) ของสารที่เข้าทำปฏิกิริยา  
 $k$  เป็นค่าคงที่เฉพาะของอัตราของปฏิกิริยาอันดับสอง

จากสมการ 2.27 และ 2.28 จะเห็นว่าถ้าเพิ่มความเข้มข้นของ A และ B สมการ 2.27 หรือความเข้มข้นของ A สมการ 2.28 เป็น 2 เท่า อัตราของปฏิกิริยาจะเพิ่มเป็น 4 เท่า ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะตัวของปฏิกิริยาอันดับสอง ดังนั้นสมมติสารที่เข้าทำปฏิกิริยามีเพียงสารเดียวคือ สาร A หรือถ้ามีสองสารคือ A หรือ B แต่มี  $[A] = [B]$  วัดอัตราการเปลี่ยนแปลงของสาร A สมการ 2.27 หรือ 2.28 อาจเขียนในรูปของสมการดิฟเฟอเรนเชียล (differential equation) ดังสมการ 2.29

$$-\frac{d[A]}{dt} = k[A]^2 \quad (2.29)$$

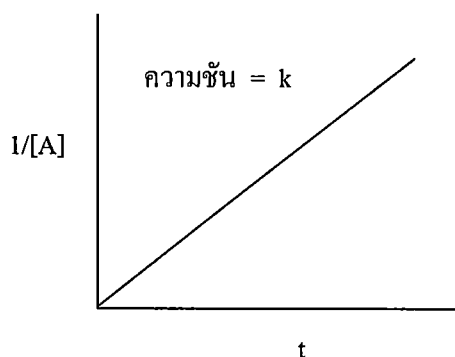
ย้ายข้าง  $[A]$  ในสมการ 2.29 จะได้สมการ 2.30

$$\frac{d[A]}{[A]^2} = -kdt \quad (2.30)$$

อินทิเกรต (Integrate) สมการ 2.30 จะได้สมการ 2.31

$$\frac{1}{[A]} - \frac{1}{[A]_0} = -kt \quad (2.31)$$

ถ้าเราเขียนกราฟของ  $\frac{1}{[A]}$  กับเวลา  $t$  จะได้เส้นตรงที่มีความชัน  $k$  (รูปที่ 2.5)



รูปที่ 2.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $1/[A]$  กับ  $t$  ของปฏิกิริยาอันดับสอง

ครึ่งชีวิตของปฏิกิริยาอันดับสอง สามารถหาได้ทำนองเดียวกับกรณีของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ดังสมการ 2.32

$$\text{ที่ } t_{1/2}, \quad [A] = \frac{[A]_0}{2} \quad (2.32)$$

แทนค่าในสมการ 2.32 จะได้สมการ 2.33

$$\frac{1}{\frac{1}{2}[A]_0} - \frac{1}{[A]_0} = kt_{1/2} \quad (2.33)$$

$$t_{1/2} = \frac{1}{k[A]_0} \quad (2.34)$$

จากสมการ 2.34 จะเห็นได้ว่า ครึ่งชีวิตของปฏิกิริยาอันดับสอง แปรอย่างผกผันกับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตั้งต้น ( $[A]_0$ ) ซึ่งแตกต่างกับครึ่งชีวิตของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งซึ่งเป็นอิสระต่อความเข้มข้นของสารตั้งต้น และค่าคงที่เฉพาะของอัตรา ( $k$ ) ปฏิกิริยาอันดับสองมีหน่วยเป็น ลิตร โมล<sup>-1</sup> เวลา<sup>-1</sup> (ชัยวัฒน์, 2530)

## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จิราพร (2538) ศึกษาการลดปริมาณคาร์โบฟูรานในน้ำด้วยวิธีการดูดซับ โดยบรรจุตัวดูดซับ คือ ทราช ขี้เถ้าแกลบ แอนทราไซต์ และถ่านลงในคอลัมน์ แล้วผ่านสารละลายคาร์โบฟูรานลงไปที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ ผลการทดลองสรุปได้ว่าขี้เถ้าแกลบจะสามารถลดปริมาณคาร์โบฟูรานได้มากที่สุด แอนทราไซต์จะลดปริมาณคาร์โบฟูรานได้น้อยที่สุด ส่วนทราชและถ่านจะลดได้พอ ๆ กัน ในส่วนของความสูงของคอลัมน์ คอลัมน์ที่สูงกว่าจะมีความสามารถในการดูดซับสูงกว่าคอลัมน์เตี้ย และพบว่าความเข้มข้นของคาร์โบฟูรานที่ต่ำ ๆ จะมีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงกว่า

พรหมพร และยุวดี (2543) ได้ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์โบฟูรานในถั่วฝักยาว โดยใช้วิธีออกซิไดส์ด้วยโอโซน และโอโซนร่วมกับรังสียูวี ที่สภาวะเดียวกัน โดยฉีดพ่นคาร์โบฟูรานลงในถั่วฝักยาว แล้วปล่อยให้แห้งเป็นเวลา 5 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปแช่น้ำปราศจากไอออน พันด้วยโอโซนและโอโซนกับรังสียูวีลงไป เป็นเวลา 1 และ 10 นาที จากนั้นนำมาสกัดด้วยอะซิโตน นำสารที่สกัดได้มาทำการวัดปริมาณคาร์โบฟูรานที่เหลืออยู่โดยใช้เทคนิค HPLC แล้วหาเปอร์เซ็นต์การบำบัด พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดโดยใช้โอโซนใช้ร่วมกับยูวีมีประสิทธิภาพสูงกว่า คือที่ 1 และ 10 นาที จะมีประสิทธิภาพในการบำบัด 87.07 และ 83.89 % ตามลำดับ

Hideyuki และคณะ (2005) ศึกษาการย่อยสลายคาร์โบฟูรานด้วยแสง ในสารละลาย Fe(III) พบว่า ค่าพีเอชและความเข้มข้นของ Fe(III) มีผลต่อประสิทธิภาพในการย่อยสลาย โดยคาร์โบฟูราน ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร จะย่อยสลายได้สูงสุดที่พีเอช 2.3 ความเข้มข้นของสารละลายเหล็ก 0.0008 โมลต่อลิตร ระยะเวลาสัมผัส 50 นาที และศึกษาจลนพลศาสตร์พบว่าปฏิกิริยาอันดับ 2 สารละลายเหล็กจะทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้นให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล ซึ่งมีความสามารถออกซิไดส์สารอินทรีย์ได้ดีและได้ผลิตภัณฑ์เป็น 2,2-dimethyl-2,3-dihydro-benzofuran-7-ol (C<sub>10</sub>H<sub>12</sub>O<sub>2</sub>) และแอมโมเนีย (NH<sub>3</sub>)

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 อุปกรณ์เครื่องมือและสารเคมี

##### 3.1.1 อุปกรณ์

1. เครื่อง ก๊าซโครมาโทกราฟี (GC) ยี่ห้อ Agilent รุ่น 6890N (Network GC System) และเครื่องแมสสเปกโตรมิเตอร์ (MS) รุ่น 5973 Network บริษัท Agilent Technologies (Thailand) Ltd. ประเทศ สหรัฐอเมริกา
2. เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ Thermo electron corporation รุ่น Hexios Q ประเทศ สหราชอาณาจักร
3. เครื่องพีเอชมิเตอร์ (pH meter) Denver instrument Co., Ltd รุ่น Model 215
4. เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง (Single pan balance) Denver Instrument Company รุ่น TC-254
5. เครื่องเขย่า (Shaker) Gallenkamp Orbital Shaker ประเทศ สหราชอาณาจักร
6. กระจกทรง ขนาด 0.45 ไมครอน National Scientific Company
7. Bond Elut C18 Thai Unique Company ยี่ห้อ Varian
8. เครื่องแก้วต่าง ๆ

##### 3.1.2 สารเคมี

1. เศษผงเหล็กจากบริษัทผลิตภัณฑ์วิเศษไทย จำกัด จังหวัด ปทุมธานี
2. สารมาตรฐานคาร์โบฟูราน แบบผง เกรดวิเคราะห์ หจก. เอ ซี เอส ซีนอน
3. คาร์โบฟูราน ชนิดเม็ด (carbofuran) ยี่ห้อ ฟูราดาน 3% จี เกรด การค้า บริษัท บี เอ เอสเอฟ (ประเทศไทย) จำกัด
4. สารละลายกรดไฮโดรคลอริก เกรดวิเคราะห์ Carlo Erba Co., Ltd.
5. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เกรดวิเคราะห์ Lab Scan Co., Ltd.
6. สารละลายเมทานอล เกรดวิเคราะห์ Merck Co., Ltd.
7. สารละลายอะซิโตน เกรดวิเคราะห์ Lab Scan Co., Ltd.
8. สารละลายเอทิลอะซิเตต เกรดวิเคราะห์ Merck Co., Ltd.
9. สารละลายไดคลอโรมีเทน เกรดวิเคราะห์ Merck Co., Ltd.
10. น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)
11. แก๊สไนโตรเจน บริสุทธิ์ 99.99 เปอร์เซ็นต์ บริษัท ไทยอินดัสเตรียลแก๊ส จำกัด (มหาชน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.2 การดำเนินงานวิจัย

### 3.2.1 การเตรียมเศษผงเหล็ก

1. ชั่งเศษผงเหล็กที่ไม่คัดขนาด ที่นำมาจากโรงกลึง มา 100 กรัม
2. นำไปแช่ใน 3% HCl ปริมาตร 200 มิลลิลิตร
3. แช่เป็นเวลา 30 นาที ที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที
4. ล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนที่กำจัดแก๊สออกซิเจนออก โดยการฟุ้งด้วยแก๊สไนโตรเจน จำนวน 3 ครั้ง
5. ล้างด้วยอะซิโตน 1 ครั้ง เพื่อกำจัดน้ำ
6. ทำให้แห้งโดยการฟุ้งด้วยแก๊สไนโตรเจน
7. เก็บเศษผงเหล็กที่ผ่านการล้างและทำให้แห้งแล้วใส่ขวดสีชาเพื่อใช้ในการทดลอง โดยต้องปิดให้มิดชิด เพื่อไม่ให้อากาศและไอน้ำสัมผัสกับเหล็ก

### 3.2.2 การเตรียมกราฟมาตรฐาน (calibration curve method)

1. เตรียมสารละลายมาตรฐานคาร์โบฟูราน ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยการชั่งสารมาตรฐานคาร์โบฟูรานมา 30 มิลลิกรัม ละลายในน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตรจนละลายหมด ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 1,000 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดวัดปริมาตร เก็บใส่ขวดสีชา
2. ปิเปตสารละลายมาตรฐานคาร์โบฟูรานจากข้อ 1 มา 8.33, 16.66, 25.00, 33.33, 41.66, 50.00 มิลลิลิตร ตามลำดับ โดยใช้ไมโครปิเปตใส่ขวดวัดปริมาตร ขนาด 50 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดวัดปริมาตร จะได้สารละลายเข้มข้น 0, 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ
3. นำไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 279 นาโนเมตร ซึ่งได้จากการสแกนหาความยาวคลื่นสูงสุด ( $\lambda_{max}$ )

### 3.2.3 การเตรียมสต็อกสารละลายคาร์โบฟูราน ความเข้มข้น 5, 10, 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

1. ชั่งคาร์โบฟูรานชนิดผงจำนวน 5, 10, 20 มิลลิกรัม ตามลำดับ ละลายในน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร จนละลายหมด ใส่ขวดวัดปริมาตร ขนาด 1,000 มิลลิลิตร
2. นำสารละลายที่ได้มาปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น แล้วเก็บในขวดสีชา
3. นำสารละลายคาร์โบฟูรานที่เตรียมจากข้อ 1 ไปทำการทดลองในข้อ 3.2.4, 3.2.5 และ 3.2.6 (เนื่องจากสารละลายคาร์โบฟูรานไม่เสถียร จึงต้องทำการเตรียมสารละลายคาร์โบฟูรานใหม่ทุกครั้งก่อนการทดลอง และวัดความเข้มข้นเริ่มต้นทุกครั้งที่มีการเตรียมสารละลาย)

### 3.2.4 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดคาร์โบฟูราน โดยการทดลองแบบแบทช์

#### 3.2.4.1 ศึกษาผลของพีเอช

1. ชั่งเศษผงเหล็กที่ทำกรเตรียมจากข้อ 3.2.1 มา 5 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร
2. เติมน้ำละลายมาตรฐานคาร์โบฟูรานความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร จำนวน 50 มิลลิลิตร ที่ปรับพีเอช เป็น 2, 3, 4, 7 และ 9 ด้วย 1M HCl หรือ 1M NaOH
3. เขย่าที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
4. กรองสารละลายผ่านกระดาษกรอง ขนาด 0.45 ไมครอน
5. นำสารละลายจากข้อ 4 มาวิเคราะห์ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 279 นาโนเมตร ซึ่งได้จากการสแกนหาความยาวคลื่นสูงสุด ( $\lambda_{max}$ )
6. ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง
7. ทำรีเอเจนต์แบลนด์ โดยทำการทดลองเช่นเดียวกับ ข้อ 1-6 แต่ใช้น้ำกลั่นแทน สารละลายคาร์โบฟูราน
8. ทำชุดควบคุม โดยทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-6 แต่ไม่ใส่เศษผงเหล็ก
9. คำนวณหาประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายคาร์โบฟูราน

#### 3.2.4.2 ศึกษาผลของระยะเวลาสัมผัส

1. ชั่งเศษผงเหล็กที่ทำกรเตรียมจากข้อ 3.2.1 มา 5 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร
2. เติมน้ำละลายคาร์โบฟูรานความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร จำนวน 50 มิลลิลิตร ที่พีเอชที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 3.2.4.1
3. เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 0.5, 1, 3, 5, 12, 24 และ 48 ชั่วโมง
4. ทำการทดลองเช่นเดียวกับ 3.2.4.1 ข้อ 4-9

#### 3.2.4.3 ศึกษาผลของปริมาณเศษผงเหล็ก

1. ชั่งเศษผงเหล็กที่ทำกรเตรียมจากข้อ 3.2.1 มา 1, 5, 10 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร
2. เติมน้ำละลายคาร์โบฟูรานความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร จำนวน 50 มิลลิลิตร โดยปรับพีเอชที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 3.2.4.1
3. เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที ระยะเวลาที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 3.2.4.2
4. ทำการทดลองเช่นเดียวกับ 3.2.4.1 ข้อ 4-9

#### 3.2.4.4 ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายคาร์โบฟูราน (Carbofuran)

1. ชั่งเศษผงเหล็กปริมาณที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 3.2.4.3 ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร
2. เติมสารละลายคาร์โบฟูรานความเข้มข้น 5, 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร จำนวน 50 มิลลิลิตร โดยปรับพีเอชที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 3.2.4.1
3. เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลาที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 3.2.4.2
4. ทำการทดลองเช่นเดียวกับ 3.2.4.1 ข้อ 4-9

#### 3.2.5 ศึกษาจลนพลศาสตร์เคมี

ศึกษาจลนพลศาสตร์เคมีในการกำจัดสารละลายคาร์โบฟูรานของเศษผงเหล็ก ที่ความเข้มข้นของคาร์โบฟูรานและเวลาต่าง ๆ ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองแบบเบบท์

1. ชั่งเศษผงเหล็กปริมาณที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 3.2.4.3 ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร
2. เติมสารละลายคาร์โบฟูรานที่ความเข้มข้น 5, 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร จำนวน 50 มิลลิลิตร โดยปรับพีเอชที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 3.2.4.1
3. เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที และระยะเวลาสัมผัสที่ 1, 3, 5, 12, 24 และ 48 ชั่วโมง
4. ทำการทดลองเช่นเดียวกับ 3.2.4.1 ข้อ 4-9

#### 3.2.6 การศึกษาผลผลิตภัณฑ์ที่เกิดหลังจากปฏิบัติการกำจัดคาร์โบฟูราน

ศึกษาหาผลิตภัณฑ์จากการออกซิไดส์คาร์โบฟูรานด้วยเศษผงเหล็ก

1. ชั่งเศษผงเหล็กปริมาณที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 3.2.4.3 ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร
2. เติมสารละลายคาร์โบฟูรานที่ความเข้มข้นที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 3.2.4.4 จำนวน 50 มิลลิลิตร โดยปรับพีเอชที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 3.2.4.1
3. เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที ระยะเวลาที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 3.2.4.2
4. นำมากรองแบบลดความดัน จากนั้นกรองซ้ำด้วยกระดาษกรองขนาด 0.45 ไมครอน
5. ผ่านสารละลายที่ได้จากข้อ 4 ลงใน Bond Elut C18 ที่ผ่านการ activate ด้วย methanol
6. ทำการชะสารที่ถูกดูดซับใน Bond Elut C18 ด้วย สารละลายเอทิลอะซิเตต ผสมกับ ไดคลอโรมีเทน ในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 จำนวน 10 มิลลิลิตร
7. พ่นสารละลายที่ชะออกมาจากข้อ 6 ด้วยแก๊สไนโตรเจน จนปริมาตรลดลงเหลือ 2 มิลลิลิตร
8. นำสารละลายที่ได้ไปวัดด้วยเครื่อง GC/MS ที่สภาวะดังตารางที่ 3.1
9. ทำชุดควบคุม โดยทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 2-8 แต่ไม่ใส่เศษผงเหล็ก
10. การทำแบลงค์ โดยทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 5-8

ตารางที่ 3.1 สภาวะของ GC/MS ที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นหลังจากการออกซิไดซ์ สารละลายคาร์โบฟูราน ด้วยเศษผงเหล็ก

GC Information :	
Capillary Column	HP-5 (0.25 mm × 30 m × 0.25 μm)
Injection mode	split
Injection volume	10 μL
Split ratio	10:1
GC temperature program	80 °C คงที่ 5 min เพิ่ม 10 °C min <sup>-1</sup> จนถึง 210 °C เพิ่ม 30 °C min <sup>-1</sup> จนถึง 310 °C คงที่ 5 min
Pressure	6.69 psi
MS Information :	EI Mode
Acquisition Mode	Scan
Thermal Aux : 2	MSD Transfer Line Heater
Solvent Delay	3 min
Resulting EM Voltage	1,600
Scan Parameters:	
Low Mass (aum)	50
High Mass (aum)	500
Threshold	150
MS Zone:	
MS Quad	150 °C Maximum 200 °C
MS Source	230 °C Maximum 250 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

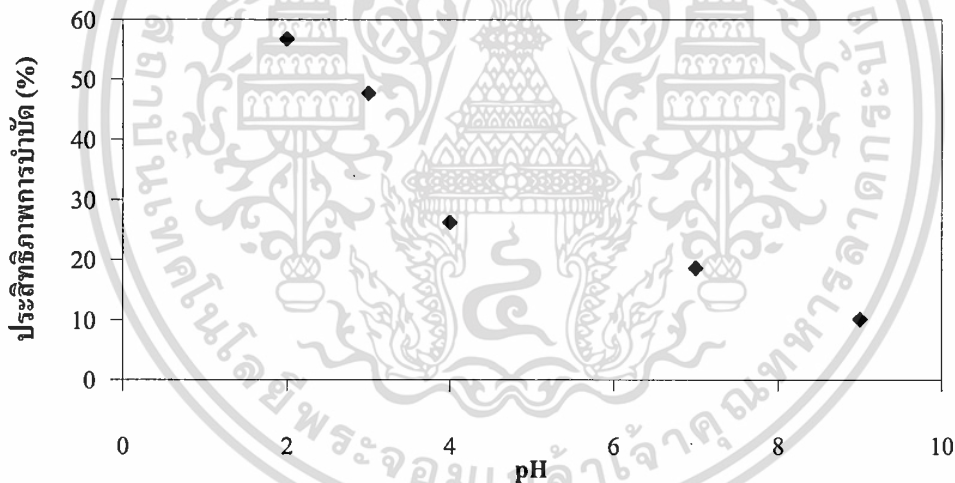
### ผลการทดลอง

ผลการศึกษาการกำจัดคาร์โบฟูรานโดยใช้เศษผงเหล็กโดยแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนหลัก ๆ คือ ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดคาร์โบฟูรานในน้ำโดยวิธีการออกซิไดส์ด้วยเศษผงเหล็กโดยการทดลองแบบแบตช์ การศึกษาจลนพลศาสตร์เคมี (kinetics) และการหาผลิตภัณฑ์ (products) ที่เกิดจากปฏิกิริยาการกำจัดคาร์โบฟูรานด้วยเศษผงเหล็ก

#### 4.1 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดคาร์โบฟูราน

##### 4.1.1 ผลของค่าพีเอชของสารละลายคาร์โบฟูราน

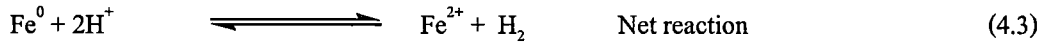
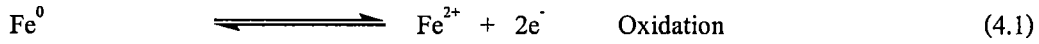
การศึกษาผลของค่าพีเอชของสารละลายคาร์โบฟูราน โดยใช้ปริมาณความเข้มข้นของคาร์โบฟูราน 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร เขย่ากับเศษผงเหล็ก 5 กรัมที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.1 (ดูรายละเอียดในตาราง ก-2 ภาคผนวก ก)



รูปที่ 4.1 ประสิทธิภาพการกำจัดคาร์โบฟูรานด้วยเศษผงเหล็กที่พีเอชต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.1 พบว่าเมื่อค่าพีเอชของสารละลายคาร์โบฟูรานเพิ่มขึ้น จะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์โบฟูรานลดลง ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 2 ประสิทธิภาพของการกำจัดเท่ากับ  $56.27 \pm 0.035$  % ในขณะที่หากเพิ่มพีเอชเป็น 9 ประสิทธิภาพในการกำจัดลดลงเป็น  $9.11 \pm 0.023$  %

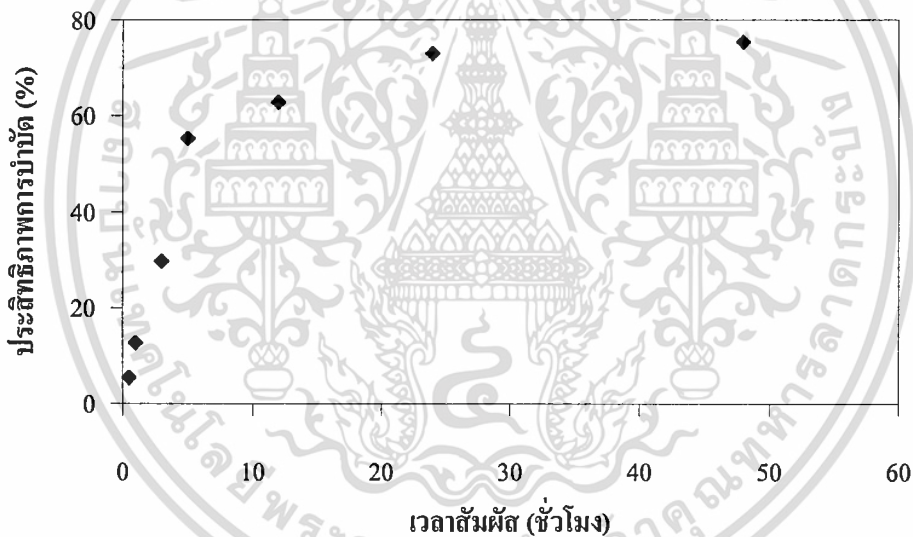
ทั้งนี้เนื่องจากการกำจัดใช้กลไกการออกซิไดส์ และที่สภาวะความเป็นกรดเพิ่มมากขึ้น จะทำให้  $Fe^0$  อยู่ในสภาวะที่ให้อิเลคตรอน ดังสมการ 4.1-4.3 (Powell และคณะ, 1995)



จากผลการทดลองพบว่าค่าพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดคือ พีเอชเท่ากับ 2

#### 4.1.2 ผลของระยะเวลาสัมผัส

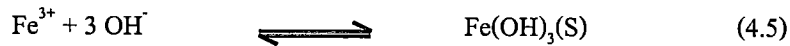
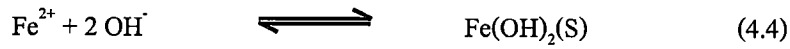
นำสารละลายคาร์โบฟูรานความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตรปริมาตร 50 มิลลิลิตร มาปรับพีเอชเป็นพีเอชที่เหมาะสมคือพีเอช 2 แล้วนำไปปั่นกวนที่ 150 รอบต่อนาทีเป็นเวลาต่าง ๆ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.2 (รายละเอียดแสดงดังตาราง ก-3 ภาคผนวก ก)



รูปที่ 4.2 ประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์โบฟูรานด้วยเศษผงเหล็กที่ระยะเวลาในการบำบัดต่าง ๆ

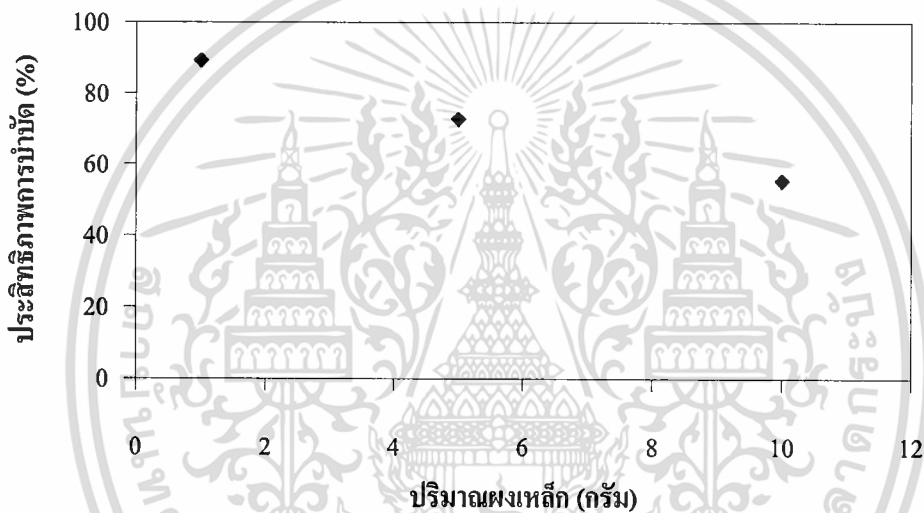
จากรูปที่ 4.2 พบว่าเมื่อเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการกำจัดคาร์โบฟูราน จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและจะคงที่ที่เวลาตั้งแต่ 24 ชั่วโมงขึ้นไป โดยที่เวลา 24 ชั่วโมง ประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ  $72.66 \pm 0.042\%$  สาเหตุที่ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์โบฟูราน

มีแนวโน้มคงที่ เนื่องจากที่เวลาเพิ่มมากขึ้น พื้นที่ผิวของเหล็กในการเกิดออกซิไดส์ลดลง เนื่องจากมีออกไซด์เคลือบอยู่บนผิวเหล็ก ดังสมการ 4.4- 4.5 (มันสิน และไพพรรณ, 2527)



#### 4.1.3 ผลของปริมาณผงเหล็กในการกำจัดคาร์โบฟูราน

นำสารละลายคาร์โบฟูรานความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตรปริมาตร 50 มิลลิลิตร มาปรับพีเอชเป็น 2 นำไปเขย่ากับผงเหล็กปริมาณต่าง ๆ ที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.3 (รายละเอียดดังตาราง ก-4 ภาคผนวก ก)



รูปที่ 4.3 ประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์โบฟูรานที่ปริมาณผงเหล็กต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.3 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเศษผงเหล็ก จะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารละลายคาร์โบฟูรานลดลง โดยเมื่อใช้เศษผงเหล็ก 1 กรัม ประสิทธิภาพในการกำจัดอยู่ที่  $89.06 \pm 0.034$  % และถ้าเพิ่มปริมาณเศษผงเหล็กเป็น 10 กรัม ประสิทธิภาพในการกำจัดลดลงเป็น  $54.72 \pm 0.017$  % ดังนั้น ปริมาณเศษผงเหล็กที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองคือ 1 กรัมต่อสารละลายคาร์โบฟูราน 50 มิลลิลิตร จากการที่เศษผงเหล็กมีปริมาณเพิ่มขึ้น แต่ประสิทธิภาพในการกำจัดสารละลายคาร์โบฟูรานลดลง ทั้งนี้อาจมีสาเหตุเนื่องจากเหล็กจะถูกออกซิไดส์เป็น  $\text{Fe}^{2+}$  และ  $\text{Fe}^{3+}$  ได้ง่าย เมื่อปริมาณเศษผงเหล็กเพิ่มมากขึ้น จะทำให้มีปริมาณ  $\text{Fe}^{2+}$  และ  $\text{Fe}^{3+}$  มากไปด้วย ซึ่ง  $\text{Fe}^{2+}$  และ  $\text{Fe}^{3+}$

มีช่วงการดูดกลืนแสงที่ 225 นาโนเมตร ซึ่งใกล้เคียงกับการดูดกลืนแสงของคาร์โบฟูราน ทำให้ค่าการดูดกลืนแสงหลังการบำบัดยังคงสูงขึ้น

#### 4.1.4 ผลของความเข้มข้นสารละลายคาร์โบฟูราน

นำสารละลายคาร์โบฟูรานความเข้มข้นต่าง ๆ จำนวน 50 มิลลิลิตร มาเขย่ากับเศษผงเหล็ก 1 กรัม ที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.4 (รายละเอียดดังตารางที่ ก-5 ภาคผนวก ก)

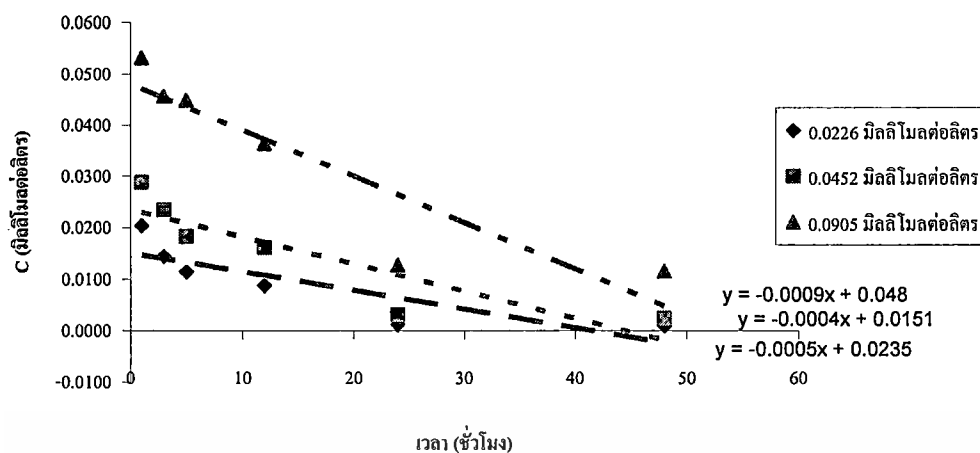


รูปที่ 4.4 ประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์โบฟูรานที่ความเข้มข้นของคาร์โบฟูรานต่าง ๆ

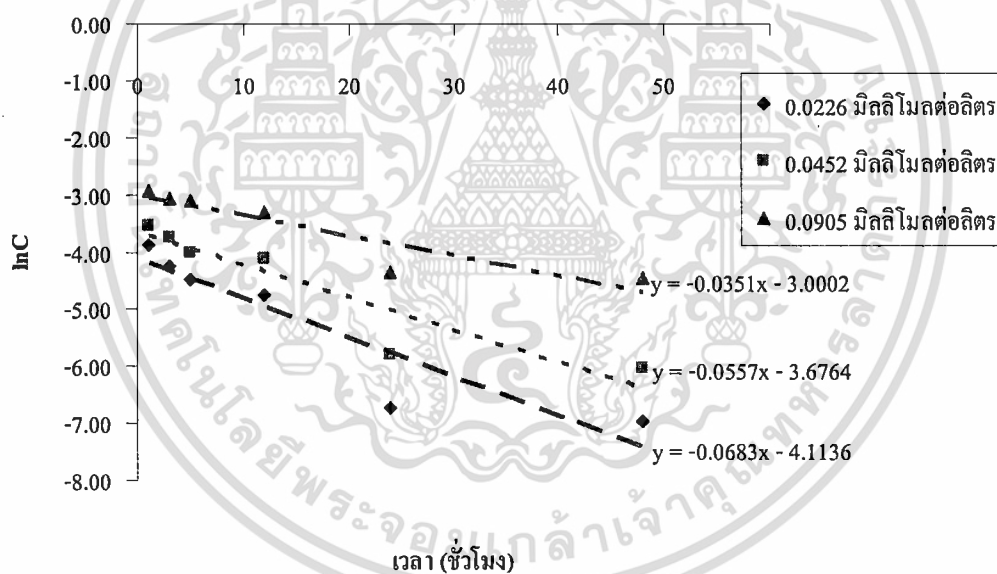
จากรูปที่ 4.4 เมื่อความเข้มข้นของคาร์โบฟูรานเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลง เนื่องจากผงเหล็กมีปริมาณคงที่ ในขณะที่คาร์โบฟูรานมีปริมาณเพิ่มขึ้น ทำให้สัดส่วนของสารที่กำจัดได้ลดลง เมื่อเทียบกับสารที่เหลืออยู่ ความเข้มข้นที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองคือ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพในการบำบัด  $92.67 \pm 0.201$  %

#### 4.2 การศึกษาจลนพลศาสตร์เคมี (Kinetics)

การศึกษาจลนพลศาสตร์เคมีของปฏิกิริยาการกำจัดคาร์โบฟูราน โดยทำการศึกษาความเข้มข้นของคาร์โบฟูรานที่ 5, 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยทำการควบคุมปริมาณเศษผงเหล็กและค่าพีเอชให้คงที่ จะได้กราฟความเข้มข้นเทียบกับเวลาของปฏิกิริยาอันดับ 0, 1 และ 2 ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.5-4.7

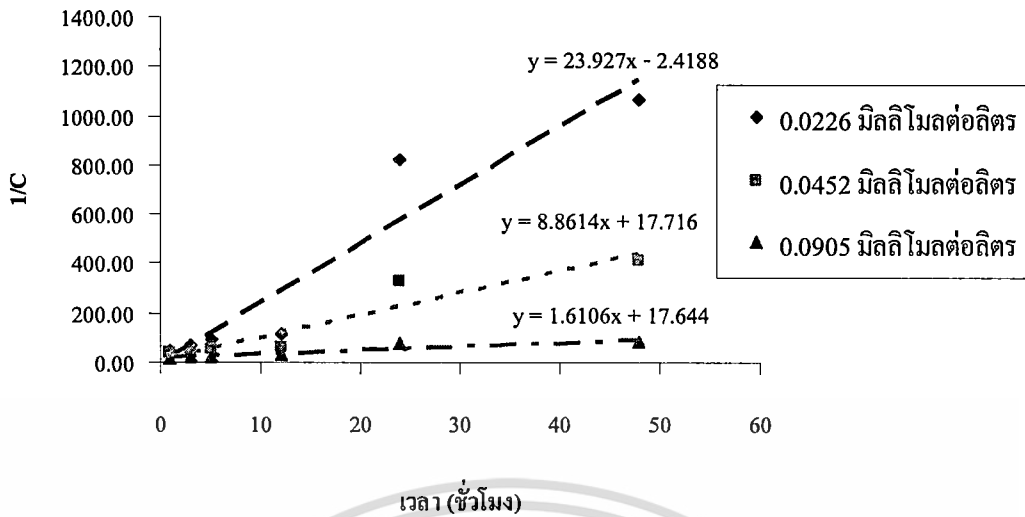


รูปที่ 4.5 ปฏิกริยาอันดับศูนย์ของการกำจัดสารละลายคาร์โบพรานด้วยเศษผงเหล็ก



รูปที่ 4.6 ปฏิกริยาอันดับ 1 ของการกำจัดสารละลายคาร์โบพรานด้วยเศษผงเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ปฏิกริยาอันดับ 2 ของการกำจัดสารละลายคาร์โบฟูรานด้วยเศษผงเหล็ก

จากสมการปฏิกริยาอันดับ 0, 1 และ 2 สามารถหาค่าคงที่ต่างๆ แสดงได้ดังตารางที่ 4.1 (รายละเอียดแสดงดังตาราง ข-1 ถึง ข-3 ในภาคผนวก ข)

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการศึกษาจลนพลศาสตร์เคมี

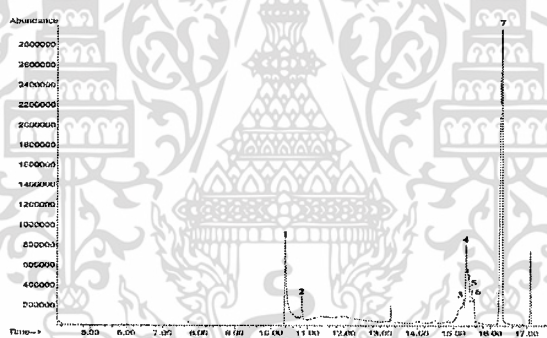
ความเข้มข้น (มิลลิโกลต่อลิตร)	ปฏิกริยาอันดับ 0		ปฏิกริยาอันดับ 1		ปฏิกริยาอันดับ 2	
	k	R <sup>2</sup>	k	R <sup>2</sup>	k	R <sup>2</sup>
0.0226	-0.0004	0.7332	-0.0683	0.8598	23.927	0.9012
0.0452	-0.0005	0.7875	-0.0557	0.8645	8.8614	0.9035
0.0905	-0.0009	0.8282	-0.0351	0.8511	1.6106	0.8631

จากตารางที่ 4.1 เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ (R<sup>2</sup>) ของปฏิกริยาอันดับศูนย์ หนึ่งและสอง พบว่าการกำจัดคาร์โบฟูรานด้วยเศษผงเหล็กที่ความเข้มข้นต่างๆ เป็นปฏิกริยาอันดับที่สอง เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ (R<sup>2</sup>) เข้าใกล้ 1 มากกว่าปฏิกริยาอันดับหนึ่ง และศูนย์ นอกจากนี้ เมื่อนำค่าคงที่ของปฏิกริยาไปคำนวณหาครึ่งชีวิตของปฏิกริยาพบว่า ครึ่งชีวิตของปฏิกริยาจะแปรผกผันตรงกับความเข้มข้นของคาร์โบฟูรานซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะของปฏิกริยาอันดับ 2

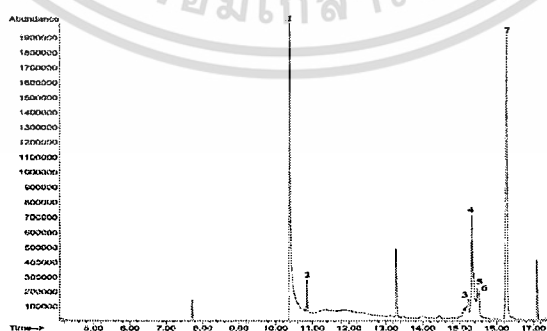
เมื่อพิจารณาค่าคงที่เฉพาะของปฏิกิริยา (k) เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจาก 0.0226, 0.0542 และ 0.0905 มิลลิโมลต่อลิตร พบว่าค่าคงที่เฉพาะของปฏิกิริยา (k) ลดลงเรื่อย ๆ คือจาก 23.927, 8.8614 และ 1.6106 ตามลำดับ แสดงว่าเมื่อความเข้มข้นของคาร์โบฟูรานเพิ่มขึ้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะลดลง เนื่องจากปริมาณของผงเหล็กคองที่ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของคาร์โบฟูรานมากขึ้น จึงทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์โบฟูรานลดลง

#### 4.3 ผลิตภัณฑ์ (products) ที่เกิดจากปฏิกิริยาการกำจัดสารละลายคาร์โบฟูราน

สามารถหาผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการกำจัดคาร์โบฟูราน ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมทรี (GC/MS) โดยนำสภาวะที่เหมาะสมจากข้อ 4.1 มาใช้ในการกำจัดสารละลายคาร์โบฟูราน แล้วนำสารละลายที่กำจัดได้มาทำการสกัดด้วยเทคนิค Solid phase extraction ด้วยตัวทำละลาย Dichloromethane ผสมกับ Ethylacetate ในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 โครมาโทแกรมของสารละลายมาตรฐานคาร์โบฟูราน หูดควมคุมและสารละลายคาร์โบฟูราน หลังจากทำการกำจัดด้วยผงเหล็กแสดงดังรูป 4.8-4.10 ตามลำดับ รายละเอียดของโครมาโทแกรมแสดงดังตารางที่ 4.2-4.3 ตามลำดับ



รูปที่ 4.8 โครมาโทแกรมของสารมาตรฐานคาร์โบฟูราน



รูปที่ 4.9 โครมาโทแกรมของหูดควมคุม

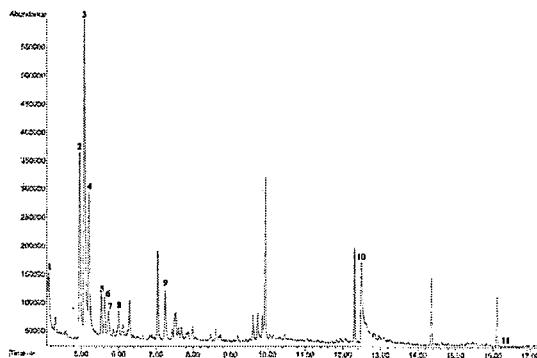
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากโครมาโทแกรมของสารละลายมาตรฐานคาร์โบฟูราน (รูปที่ 4.8) และโครมาโทแกรมของชุดควบคุม (รูปที่ 4.9) ซึ่งเป็นสารละลายมาตรฐานที่ไม่ได้ผ่านการบำบัดด้วยผงเหล็ก โดยนำสถานะที่เหมาะสมในการบำบัดมาทำการทดลองคือ ปรับพีเอชเป็น 2 แล้วนำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 24 ชั่วโมงเช่นเดียวกับสารตัวอย่างพบว่ามีสารผลิตภัณฑ์ที่ได้คล้ายกัน แต่มีพื้นที่ใต้กราฟไม่เท่ากัน ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลิตภัณฑ์จากชุดควบคุมที่รายงานโดยเครื่อง GC/MS

ลำดับที่	Retention Time (นาที)	ชื่อสาร	พื้นที่ใต้กราฟของสารมาตรฐาน	พื้นที่ใต้กราฟของชุดควบคุม	%ความเหมือน
1	10.40	2,3-dihydro-2,2-dimethyl-7-benzofuranol	30,367,423	67,121,083	98.00
2	10.86	benzyloxyamine-N,N-ditms	3,742,803	3,457,884	38.00
3	15.12	อนุพันธ์ carbofuran	1,017,521	3,477,769	91.00
4	15.35	อนุพันธ์ 2,3-dihydro-2,2-dimethyl-7-benzofuranol	14,169,073	18,299,699	95.00
5	15.39	อนุพันธ์ carbofuran	8,111,053	5,478,351	91.00
6	15.48	อนุพันธ์ carbofuran	5,178,260	5,971,283	91.00
7	16.30	carbofuran	117,862,133	57,223,396	97.00

จากผลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบพื้นที่ใต้กราฟของทั้ง 2 ชุด พบว่าในชุดควบคุมจะมีปริมาณคาร์โบฟูรานลดลงจากสารมาตรฐาน และจะมีปริมาณของ 2,3-dihydro-2,2-dimethyl-7-benzofuranol หรือ Carbofuran phenol เพิ่มขึ้น เนื่องจากคาร์โบฟูรานเป็นยาฆ่าแมลงที่สลายตัวได้ง่าย ดังนั้น เมื่อนำสารมาตรฐานไปทดลองในสถานะเดียวกับสารตัวอย่าง จึงเกิดการสลายตัวไปบางส่วน ดังนั้น ในการทดลองวัดประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์โบฟูราน จะนำค่าที่ได้จากชุดควบคุมไปหักลบ เพื่อลดข้อผิดพลาดที่เกิดจากการสลายตัวของคาร์โบฟูราน หลังจากกำจัดคาร์โบฟูรานโดยใช้เศษผงเหล็กที่สถานะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง จะได้ผลิตภัณฑ์ดังแสดงในรูปที่ 4.10 และตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.10 โครมาโทแกรมของสารตัวอย่าง

ตารางที่ 4.3 ผลผลิตของปฏิกิริยากำจัดคาร์โบฟูรานด้วยผงเหล็ก

ลำดับที่	Retention Time (นาที)	ชื่อสาร	พื้นที่ใต้กราฟ	%ความเหมือน
1	4.120	hexadecane	1,398,202	72.00
2	4.950	1,3-diethylbenzene	8,741,354	97.00
3	5.096	1,4-diethylbenzene	16,785,156	97.00
4	5.210	1,2-diethylbenzene	6,672,234	90.00
5	5.609	1-octanol	1,609,226	64.00
6	5.624	stearyl alcohol	1,409,299	53.00
7	5.723	2,3-dihydro-1-methyl indan	1,234,869	87.00
8	5.997	dodecane	1,203,930	83.00
9	7.252	decahydro-1,6-dimethyl naphthalene	2,386,256	90.00
10	12.501	2,4-bis(1,1-dimethylethyl phenol)	5,153,787	94.00
11	16.300	carbofuran	-	-

จากตารางที่ 4.3 ผลผลิตที่เกิดขึ้นจากการกำจัดคาร์โบฟูรานด้วยเศษผงเหล็กจะได้สารประเภท Alkane, Alcohol, Phenol, Ethylbenzene, Indan และ Naphthalene ทั้งนี้อาจเป็นเพราะ  $Fe^0$  เป็นตัวรีดิวซ์ที่แรงจึงสลายพันธะของคาร์โบฟูรานได้ Alkane, Alcohol, Phenol, Ethylbenzene, Indan นอกจาก  $Fe^0$  จะมีคุณสมบัติเป็นตัวรีดิวซ์แล้ว ยังมีคุณสมบัติเป็นตัวคะตะลิสต์ จึงอาจทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงเบนซีน (Benzene rings) ของคาร์โบฟูรานที่แตกตัวออก เกิดการเชื่อมพันธะกลายเป็น Naphthalene ได้ ดังนั้น ปฏิกิริยาการกำจัดคาร์โบฟูรานด้วยเศษผงเหล็กจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีแนวโน้มความเป็นพิษน้อยลง (ดังแสดงในภาคผนวก ค) ถึงแม้ว่าคาร์โบฟูรานจะสลายตัวได้ง่ายในสิ่งแวดล้อม แต่จะสลายตัวเป็น 2,2-dimethyl-2,3-dihydro-benzofuran-3,7-diol, 7-hydroxy-2,2-demethyl-benzofuran-3-one, 2,2-dimethyl-2,3-dihydro-benzofuran-7-ol และ 3-hydroxy-2-methoxy-benzaldehyde (Hideyuki และคณะ, 2004) ซึ่งยังคงเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ และยังคงมีค่าความเป็นพิษสูง แต่การกำจัดสารละลายคาร์โบฟูรานด้วยเศษผงเหล็กจะได้สารผลิตภัณฑ์ที่มีความเป็นพิษลดลง ในระยะเวลาอันรวดเร็ว และเป็นวิธีที่เสียค่าใช้จ่ายต่ำ จึงเป็นวิธีการกำจัดสารละลายคาร์โบฟูรานที่น่าจะได้รับความสนใจในอนาคต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

การกำจัดคาร์บอนฟูรานด้วยเศษผงเหล็กสามารถสรุปได้ดังนี้

- สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดคาร์บอนฟูราน ได้แก่ ค่าพีเอช 2 เวลาสัมผัสของเหล็ก 24 ชั่วโมง ปริมาณผงเหล็ก 20 กรัมต่อคาร์บอนฟูราน 10 มิลลิกรัม ความเข้มข้นของคาร์บอนฟูราน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนฟูรานได้  $92.67 \pm 0.20$  เปอร์เซ็นต์
- จากการศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการทดลอง เป็นปฏิกิริยาอันดับสองโดยได้ค่า  $k$  เท่ากับ 23.927, 8.8614 และ 1.6106 ลิตรต่อมิลลิโมล-ชั่วโมง เมื่อเปลี่ยนความเข้มข้นของคาร์บอนฟูรานเป็น 5, 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ
- จากการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ (products) ที่เกิดจากปฏิกิริยาการกำจัดคาร์บอนฟูรานด้วย GC/MS พบว่าผลิตภัณฑ์หลักที่เกิดขึ้นได้แก่ 1,3-diethylbenzene, 1,4-dimethylbenzene, 1,2-dimethylbenzene และ decahydro-1,6-dimethyl naphthalene

ดังนั้น การกำจัดคาร์บอนฟูรานโดยการออกซิไดส์ด้วยเศษผงเหล็ก เป็นวิธีกำจัดคาร์บอนฟูรานที่มีประสิทธิภาพสูงและเสียค่าใช้จ่ายต่ำ เนื่องจากเศษผงเหล็กเป็นวัสดุเหลือใช้และมีราคาถูก

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรศึกษาการกำจัดคาร์บอนฟูรานที่ปนเปื้อนในน้ำเสียจากการเกษตร เพื่อศึกษาปัจจัยรบกวนอื่น ๆ ซึ่งอาจมีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนฟูรานด้วยเศษผงเหล็ก

5.2.2 ควรศึกษาถึงแนวทางในการกำจัดไอออนเหล็ก และตะกอนเหล็กที่เป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยา เพื่อไม่ให้เหล็กแพร่ออกสู่สิ่งแวดล้อม

5.2.3 ควรนำผลการทดลองที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการกำจัดคาร์บอนฟูรานที่ปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน หรือ แหล่งน้ำธรรมชาติต่าง ๆ

5.2.4 ควรทำการยืนยันผลของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกำจัดสารละลายคาร์บอนฟูราน โดยการเทียบ retention time ของผลิตภัณฑ์ที่ได้กับ retention time ของสารมาตรฐานชนิดนั้น ๆ โดยวิเคราะห์ที่สภาวะเดียวกันของเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

5.2.5 ควรทดสอบหาค่าความเป็นพิษของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกำจัดคาร์บอนฟูรานด้วยเศษผงเหล็ก

## เอกสารอ้างอิง

กองควบคุมพืชและวัสดุการเกษตร. 2541. ข้อมูลการนำเข้าวัตถุดิบพืช. กรมวิชาการเกษตร. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

กนกวรรณ แสงเกียรติยศ. 2547. เหล็กหล่อ. [Online].

Available : <http://www.material.chula.ac.th/RADIO44/june/radio6-1.htm>

กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2537. การขึ้นทะเบียนวัตถุอันตรายทางการเกษตรในประเทศไทย.

กรุงเทพฯ: บาลีธุรกิจและโฆษณา

กฤษณา ชูติมา. 2531. หลักเคมีทั่วไป เล่ม 1. พิมพ์ครั้งที่ 10. กรุงเทพฯ:ภาควิชาเคมี. คณะ

วิทยาศาสตร์. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

เครือข่ายเกษตรกรรมทางเลือก. 2548. ภาพรวมสถานการณ์สารเคมีกำจัดศัตรูพืชในประเทศไทย.

[Online] Available : [http://www.consumerthai.org/data/chemicals/chemicals\\_01](http://www.consumerthai.org/data/chemicals/chemicals_01)

จิราพร ศรีพลากิจ และถาวร ท่วมเจริญ. 2538. “การวิเคราะห์คาร์โบฟูรานด้วยเอชพีแอลซี”. ข่าวสาร

วัตถุดิบพืช. 22(2): เมษายน-มิถุนายน

ชัยวัฒน์ เจนวานิชย์. 2530. หลักเคมี 2. ภาควิชาเคมี. คณะวิทยาศาสตร์.

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์.

ณัฐสม สงวนวงศ์. 2532. การศึกษาหาคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของโลหะเหลือทิ้ง

จากโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในเชิงวิศวกรรมกรรมทาง. กองวิเคราะห์และ

วิจัย. กรมทางหลวง.

นรินาม. 2547. แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 3. [Online].

Available : <http://www.library.rink.ac.th/WEB%20MATERIAL/noname6.htm>

พรหมพร สกุลธนะ และชวดี วงศ์เบ็ญสัจจ์. 2543. การลดปริมาณคาร์โบฟูรานในถั่วฝักยาวด้วย

O<sub>3</sub>/UV. ภาควิชาเคมี. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

มันสิน ตันจุลเวศม์ และ ไพพรรณ พรประภา. 2527. การปรุงแต่งคุณภาพน้ำสำหรับระบบหม้อน้ำ

ระบบหล่อเย็น ระบบประปาในอาคาร. กรุงเทพฯ : ภาควิชาวิศวกรรมสุขาภิบาล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วรรณวิภา ผลาหาญ. 2547. การกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมโดยใช้เศษผงเหล็ก.

บัณฑิตวิทยาลัย. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ศิริพร วันฝัน. เกษตรกรรมปลอดพิษ ชีวิตปลอดภัย. [Online]

Available : [http://www.tei.or.th/PliBai/th\\_plibai59\\_sarakadi.html](http://www.tei.or.th/PliBai/th_plibai59_sarakadi.html)

อินทรา หาญพงษ์พันธ์. 2536. เคมีทั่วไป. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

Burris, D.R., Campbell, T.J., and Manoranjan, V.S., 1995. "Sorption of Trichloroethylene and Tetrachloroethylene in a Batch Reactive Metallic Iron Water System. **Environmental Science and Technology**. 29(11), 2580-2855.

[http://newsearch.chemexper.com/cheminfo/servlet/org.dbcreator.MainServlet?action=PowerSearch&query=msds.\\_msdsID%3D14404&sort=&target=msds&from=0&realQuery=rn.value%3D%3D%22496-11-7%22&searchTemplate=rn.value%3D%3D%3F&searchValue=496-11-7&history=off&options=brandqtyoffer&format=ccd](http://newsearch.chemexper.com/cheminfo/servlet/org.dbcreator.MainServlet?action=PowerSearch&query=msds._msdsID%3D14404&sort=&target=msds&from=0&realQuery=rn.value%3D%3D%22496-11-7%22&searchTemplate=rn.value%3D%3D%3F&searchValue=496-11-7&history=off&options=brandqtyoffer&format=ccd)

[http://www.suanlukchan.com/discussion\\_taisuan.php?suan\\_chanruean\\_id=56](http://www.suanlukchan.com/discussion_taisuan.php?suan_chanruean_id=56).

2548. ความรู้เกี่ยวกับสารฆ่าแมลง.

<http://www.physchem.ox.ac.uk/MSDS/PH/phenol.html>

<http://physchem.ox.ac.uk/MSDS/ET/ethylbenzene.html>

<http://physchem.ox.ac.uk/MSDS/DE/decane.html>

<http://wvlc.uwaterloo.ca/biology447/Assignments/Assignment1Submissions/On-Campus/carbofuran/Carbofuran.html>

Hideyuki, K., Keisuke, M., Satoshi, K., Tohru, S., Kiyohisa, O., and Yoshihiro Y., 2004. Degradation of carbofuran in aqueous solution by Fe(III) aquacomplexes as effective photocatalysts. **Journal of Photochemistry and Photobiology**. 170(3), 239-245

Mantha, R., Taylor, K.E., Nihar, E.B. and Bewtra J.K. 2001. "A Continuous System for Fe<sup>0</sup> Reduction of Nitrobenzene in Synthetic Wastewater". **Environmental Science and Technology**. 35(15), 3231-3236.

Oregon State University. 1996. **Pesticide Information Profiles**. [Online]

Available : <http://extoxnet.orst.edu/pips/carbofuran.htm>

Powell, R.M., Puls, R.W., Hightower, S.K. and Sabatini, D.A. 1995. "Couple Iron Corrosion and Chromate Reduction: Mechanism for Subsurface Remediation." **Environmental Science and Technology**. 29(8), 1931-1922

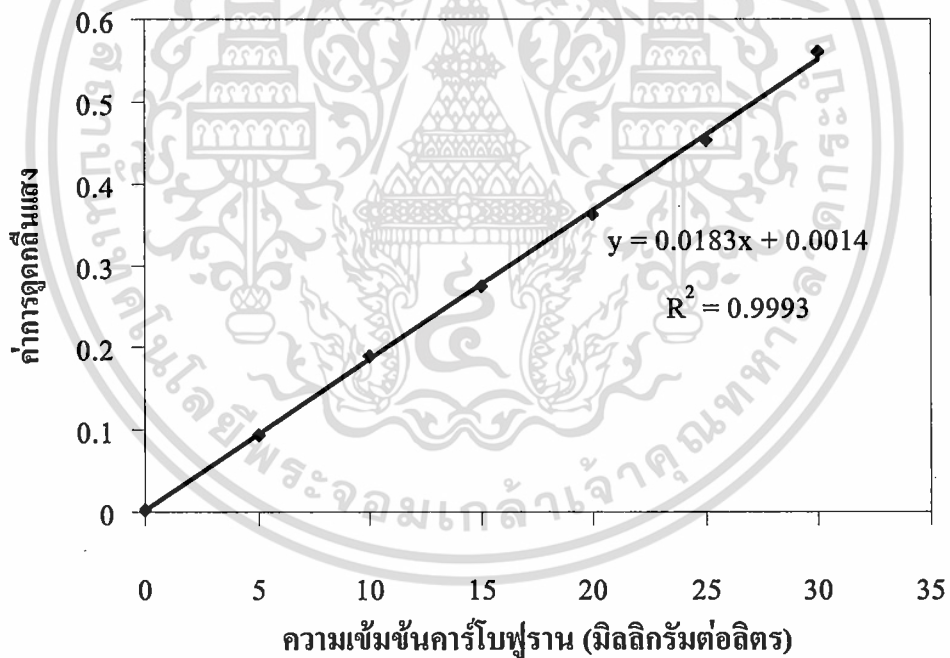


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก-1 กราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นคาร์โบฟูรานกับค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 279 นาโนเมตร แสดงดังตารางที่ ก-1 และรูป ก-1

ตาราง ก-1 ข้อมูลกราฟมาตรฐานของคาร์โบฟูราน

ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง (279nm)
0	0.0026
5	0.0929
10	0.1889
15	0.2751
20	0.3625
25	0.4538
30	0.5602



รูปที่ ก-1 กราฟมาตรฐานคาร์โบฟูราน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก-2 การศึกษาผลของค่าพีเอชของสารละลายคาร์โบฟูราน โดยใช้สารละลายคาร์โบฟูรานความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เขย่ากับเหล็ก 5 กรัมต่อ 50 มิลลิตรของสารละลายคาร์โบฟูราน ที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นกรองผ่านตัวกรองขนาด 0.45 ไมครอน นำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 279 นาโนเมตร ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ ก-2

ตารางที่ ก-2 ประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายคาร์โบฟูรานที่พีเอชต่างๆ

pH	ความเข้มข้นของชุดควบคุม (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ความเข้มข้นของสารตัวอย่าง (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ความเข้มข้นของรีเอเจนต์แบบสด (มิลลิกรัมต่อลิตร)					ประสิทธิภาพการกำจัด (%)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD
2	7.011	7.071	7.049	7.044	0.030	4.672	4.618	4.607	4.632	0.035	1.639	1.481	1.536	1.552	0.080	56.27±0.035
3	7.104	7.169	7.153	7.142	0.034	5.115	5.119	5.158	5.131	0.024	1.246	1.421	1.328	1.332	0.087	46.80±0.024
4	7.077	6.956	6.984	7.005	0.063	6.617	6.509	6.590	6.572	0.057	1.426	1.257	1.361	1.348	0.085	25.43±0.057
7	7.235	7.219	7.186	7.213	0.025	7.404	7.437	7.448	7.430	0.023	1.503	1.481	*	1.492	0.015	17.68±0.023
9	7.022	7.093	7.082	7.066	0.038	7.836	7.802	7.792	7.810	0.023	1.262	1.486	1.415	1.388	0.114	9.11±0.023

หมายเหตุ \* เป็นค่าที่ถูกตัดทิ้งจากการคำนวณ Q-test

ก-3 การศึกษาผลของระยะเวลาสัมผัส โดยใช้สารละลายคาร์โบฟูรานความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชของสารละลายให้เป็น 2 เขย่ากับเหล็ก 5 กรัม 50 มิลลิิตรของสารละลายคาร์โบฟูราน ที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลาต่าง ๆ จากนั้นกรองผ่านตัวกรองขนาด 0.45 ไมครอน นำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 279 นาโนเมตร ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ ก-3

ตารางที่ ก-3 ประสิทธิภาพในการกำจัดสารละลายคาร์โบฟูรานที่ระยะเวลาในการบำบัดต่าง ๆ

เวลาสัมผัส (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นของชุดควบคุม (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ความเข้มข้นของสารตัวอย่าง (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ความเข้มข้นของรีเอเจนต์แบบลงค์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)					ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD						
0.5	7.251	7.279	7.339	7.290	0.045	8.317	8.315	8.383	8.338	0.038	1.339	1.388	1.372	1.366	0.025	4.36±0.038
1	7.257	7.383	7.328	7.322	0.063	7.918	7.863	7.907	7.896	0.029	1.404	1.437	1.454	1.432	0.025	11.72±0.029
3	7.306	7.224	7.257	7.262	0.041	6.956	7.019	6.913	6.962	0.053	1.825	1.798	1.787	1.803	0.020	28.96±0.053
5	7.240	7.268	7.311	7.273	0.036	6.738	6.783	6.803	6.775	0.034	3.530	3.459	3.470	3.486	0.038	54.79±0.034
12	7.060	7.066	7.137	7.087	0.043	7.279	7.464	7.421	7.388	0.097	4.738	4.721	4.705	4.721	0.016	62.38±0.097
24	7.361	7.306	7.317	7.328	0.029	6.694	6.639	6.612	6.648	0.042	4.612	4.639	4.683	4.645	0.036	72.66±0.042
48	7.148	6.956	6.995	7.033	0.101	6.508	6.457	6.421	6.462	0.044	4.699	4.678	4.754	4.710	0.039	75.09±0.044

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก-4 การศึกษาผลของปริมาณผงเหล็ก โดยใช้สารละลายคาร์โบฟูรานความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชของสารละลายให้เป็น 2 เขย่ากับเหล็กปริมาณต่าง ๆ กัน ที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นกรองผ่านตัวกรองขนาด 0.45 ไมครอน นำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 279 นาโนเมตร ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ ก-4

ตารางที่ ก-4 ประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์โบฟูรานที่ปริมาณผงเหล็กต่างๆ

ผงเหล็ก (กรัม)	ความเข้มข้นของชุดควบคุม (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ความเข้มข้นของสารตัวอย่าง (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ความเข้มข้นของรีเอเจนต์เบดจ์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)					ประสิทธิภาพการกำจัด (%)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD
1	7.093	7.049	7.005	7.049	0.044	3.180	3.198	3.246	3.208	0.034	2.410	2.525	2.377	2.437	0.077	89.06±0.034
5	6.989	6.929	6.852	6.923	0.068	6.393	6.436	6.459	6.430	0.033	4.546	4.525	4.470	4.514	0.039	72.33±0.033
10	6.945	6.880	6.896	6.907	0.034	8.585	8.565	8.552	8.567	0.017	5.448	5.432	*	5.440	0.012	54.72±0.017

หมายเหตุ \* เป็นค่าที่ถูกตัดทิ้งจากการคำนวณ Q-test

- ก-5 การศึกษาผลของความเข้มข้นคาร์โบฟูรานโดยใช้สารละลายคาร์โบฟูรานความเข้มข้นต่างๆ ปรับพีเอชของสารละลายให้เป็น 2 เปรียบเทียบเทดิก 1 กริมต่อ 50 มิลลิตรของสารละลายคาร์โบฟูราน ที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อวินาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นกรองผ่านตัวกรองขนาด 0.45 ไมครอน นำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 279 นาโนเมตร ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ ก-5

ตารางที่ ก-5 ประสิทธิภาพในการกำจัดสารละลายคาร์โบฟูรานที่ความเข้มข้นของคาร์โบฟูรานต่างๆ

ความเข้มข้นคาร์โบฟูราน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นของชุดควบคุม (มิลลิกรัมต่อลิตร)				ความเข้มข้นของสารตัวอย่าง (มิลลิกรัมต่อลิตร)				ความเข้มข้นของรีเอเจนต์เบดจ์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)				ประสิทธิภาพการกำจัด (%)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD
5	4.634	4.705	4.743	4.694	0.055	2.710	3.098	2.995	2.934	0.201	2.448	2.716	2.607	2.590	0.135	92.67±0.201
10	6.869	6.978	6.940	6.929	0.055	3.301	3.388	3.361	3.350	0.045	2.448	2.716	2.607	2.590	0.135	89.04±0.045
20	12.617	12.672	12.69	12.661	0.039	5.503	5.464	5.475	5.481	0.020	2.448	2.716	2.607	2.590	0.135	77.17±0.020



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาจนพบผลศาสตร์เคมี โดยใช้สารละลายคาร์โบฟูรานความเข้มข้น 5, 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิตร ปรับพีเอชของสารละลายให้เป็น 2 เขย่ากับเหล็ก 1 กรัม ที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็น 24 ชั่วโมง จากนั้นกรองผ่านตัวกรองขนาด 0.45 ไมครอน นำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 279 นาโนเมตร ได้ผลดังตารางที่ ข-1 ถึง ข-3

ตารางที่ ข-1 ผลการศึกษาจนพบผลศาสตร์เคมีของคาร์โบฟูรานความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นของชุดควบคุม (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ความเข้มข้นของสารตัวอย่าง (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ความเข้มข้นของรีเอเจนต์เบคคก์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)				ประสิทธิภาพการกำจัด (%)					
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD						
1	4.689	4.617	4.760	4.689	0.071	5.295	4.962	5.087	5.115	0.168	0.514	0.519	0.590	0.541	0.043	2.45±0.168
3	4.568	4.350	4.787	4.568	0.219	4.055	4.475	4.322	4.284	0.213	1.005	0.929	1.131	1.022	0.102	28.59±0.213
5	4.579	4.399	4.727	4.568	0.164	3.831	4.503	4.208	4.180	0.337	1.678	1.525	1.568	1.590	0.079	43.30±0.337
12	4.656	4.781	4.694	4.710	0.064	4.087	4.137	4.022	4.082	0.058	2.098	2.044	2.087	2.077	0.029	57.42±0.058
24	4.634	4.705	4.743	4.694	0.055	2.710	3.098	2.995	2.934	0.201	2.448	2.716	2.607	2.590	0.135	92.67±0.201
48	4.541	3.940	4.519	4.333	0.341	4.033	3.645	3.716	3.798	0.207	3.557	3.514	3.470	3.514	0.044	93.44±0.207

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-2 ผลการศึกษางานทดลองสถิติของคาร์โบฟูรานความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นของชุดควบคุม (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ความเข้มข้นของสารตัวอย่าง (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ความเข้มข้นของรีเอเจนต์เบรคค์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)						
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย		SD					
1	6.803	6.896	6.940	6.880	0.070	6.984	6.989	6.929	6.967	0.033	0.514	0.519	0.590	0.541	0.043	6.59±0.033
3	6.678	6.530	6.596	6.601	0.074	6.273	6.240	6.339	6.284	0.050	1.005	0.929	1.131	1.022	0.102	20.28±0.050
5	6.503	6.486	6.585	6.525	0.053	5.623	5.765	5.727	5.705	0.074	1.678	1.525	1.568	1.590	0.079	36.93±0.074
12	6.809	6.710	6.760	6.760	0.049	5.721	5.639	5.787	5.716	0.074	2.098	2.044	2.087	2.077	0.029	46.16±0.074
24	6.869	6.978	6.940	6.929	0.055	3.301	3.388	3.361	3.350	0.045	2.448	2.716	2.607	2.590	0.135	89.04±0.045
48	6.634	6.869	6.678	6.727	0.125	4.208	4.093	4.077	4.126	0.071	3.557	3.514	3.470	3.514	0.044	90.90±0.071

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-3 ผลการศึกษาจากผลศาสตร์เดิมของการโอบุราณความเพิ่มขึ้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นของชุดควบคุม (มิลลิกรัมต่อลิตร)				ความเข้มข้นของสารตัวอย่าง (มิลลิกรัมต่อลิตร)				ความเข้มข้นของรีเอเจนต์เบเลนซ์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)				ประสิทธิภาพการกำจัด (%)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย		SD		
1	12.470	12.443	12.317	12.410	0.082	12.432	12.366	12.317	12.372	0.058	0.514	0.519	0.590	0.541	0.043	4.67±0.058
3	12.372	12.443	12.432	12.415	0.038	11.169	11.213	11.175	11.186	0.024	1.005	0.929	1.131	1.022	0.102	18.13±0.024
5	12.459	12.623	12.525	12.536	0.083	11.508	11.645	11.585	11.579	0.068	1.678	1.525	1.568	1.590	0.079	20.31±0.068
12	12.333	12.295	12.421	12.350	0.064	10.109	10.273	10.175	10.186	0.083	2.098	2.044	2.087	2.077	0.029	34.34±0.083
24	12.617	12.672	12.694	12.661	0.039	5.503	5.464	5.475	5.481	0.020	2.448	2.716	2.607	2.590	0.135	77.17±0.020
48	12.514	12.448	12.432	12.464	0.043	6.169	6.098	6.158	6.142	0.038	3.557	3.514	3.470	3.514	0.044	78.91±0.038

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-1 ความเป็นพิษของผลิตภัณฑ์หลังจากการกำจัดคาร์โบฟูราน

ผลิตภัณฑ์	ความเป็นพิษ
Phenol	มีระดับความเป็นพิษปานกลาง คือมีค่า LD <sub>50</sub> ทางปากที่ 317 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมของน้ำหนักตัวหนูทางปาก ถึงแม้ว่า Phenol จะมีความเป็นพิษปานกลาง แต่ยังมีค่า LD <sub>50</sub> น้อยกว่า Carbofuran ซึ่งมีค่า LD <sub>50</sub> เท่ากับ 8 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)
Ethylbenzene	ถึงแม้ว่า Benzene จะมีความเป็นพิษสูง แต่เมื่อมีหมู่ Ethyl มาเกาะ ทำให้ระดับความเป็นพิษของ Benzene ลดน้อยลง โดยมีค่า LD <sub>50</sub> เท่ากับ 3,500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมทางปาก ซึ่งถือว่าเป็นสารที่มีระดับความเป็นพิษน้อย (ดังแสดงในตาราง 2.2)
Decane	มีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตน้อย เนื่องจากมีค่า LD <sub>50</sub> เท่ากับ 5,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งถือได้ว่ามีความเป็นพิษน้อย
Naphthalene	มีระดับความเป็นพิษสูง แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้ เป็น Naphthalene ที่ถูกไฮโดรเจนเข้าไปแทนที่ในพันธะคู่ทั้งหมดจึงทำให้สารตัวนี้แสดงความเป็น Naphthalene ได้น้อยลง และยังมีหมู่ Methyl มาเกาะอีกด้วย ระดับความเป็นพิษจึงลดลง
Indan	มีระดับความเป็นพิษน้อยกว่า Carbofuran เนื่องจาก Indan มีค่า LD <sub>50</sub> 2,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งถือว่ามีความเป็นพิษน้อย
Alcohol	แอลกอฮอล์ ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม

ที่มา : <http://newsearch.chemexper.com> ; <http://www.physchem.ox.ac.uk>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้