

การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่เหล็กประจุศูนย์/ทองแดงเพื่อนำบำบัด  
น้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนสาร 1,2 ไดคลอโรอีเทน

USING Fe<sup>0</sup>/Cu BIMETALLIC TO TREAT GROUNDWATER  
CONTAMINATED WITH 1,2-DICHLOROETHANE

นายบำรุง สุธเนิน รหัส 52365039  
นางสาวปรียานุช กอสัมพันธ์ รหัส 52365077

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
จัดซื้อ..... 5 ส.ค. 2556
เลขทะเบียน..... 1632 0819
เลขเรียกหนังสือ..... 46
มหาวิทยาลัยนเรศวร ม 311 1

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร  
ปีการศึกษา 2555



ชื่อหัวข้อโครงการ	การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่เหล็กประจุศูนย์/ทองแดงเพื่อนำบำบัดน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนสาร 1,2 ไดคลอโรอีเทน		
ผู้ดำเนินโครงการ	นายบำรุง	สูงเนิน	รหัส 52365039
	นางสาวปรียานุช	กอสัมพันธ์	รหัส 52365077
ที่ปรึกษาโครงการ	อาจารย์อภาภรณ์ จันทร์ปรีกษ์		
ที่ปรึกษาร่วม	ดร. ธนพล เพ็ญรัตน์		
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี		
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ		
ปีการศึกษา	2555		

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคนาโนเหล็กประจุศูนย์ที่ถูกปรับปรุงผิวหน้าด้วยทองแดง สำหรับการกำจัดสารพิษประเภทสารอินทรีย์ระเหยที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบ (Volatile Chlorinated Organics) ในรูปของเหลวที่มีความหนาแน่นสูงกว่าน้ำและไม่สามารถรวมตัวกับน้ำได้ง่าย (Dense Non-Aqueous Phase Liquid; DNAPL) ที่ปนเปื้อนในดินและน้ำใต้ดิน ในการศึกษานี้จะศึกษาเกี่ยวกับผลของอัตราส่วนของปริมาณนาโนเหล็กประจุศูนย์ต่อปริมาณทองแดงในการสลายสาร 1,2-DCA โดยคิดอัตราส่วนโมลอนุภาคนาโนเหล็กประจุศูนย์ต่อปริมาณทองแดง คือ  $n\text{Fe}/m\text{Cu}$  โดยที่  $n$  คือโมลของเหล็กประจุศูนย์และ  $m$  คือโมลของทองแดงซึ่งมีค่าเท่ากับ 1 การทดลองทำใน Batch Reactor ขนาด 20 มิลลิลิตร และประเมินผลโดยการใช้โครมาโตกราฟฟีแบบแก๊ส ผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่มีความสามารถในการสลายสาร 1,2-DCA ได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะเดี่ยว โดยที่แนวโน้มของอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่มีผลต่อการเกิดผลิตภัณฑ์ และที่อัตราส่วน  $5\text{Fe}/\text{Cu}$  แสดงค่าคงที่อัตราที่มากที่สุดซึ่งบ่งชี้ได้ว่ามีความเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้ต่อไป

**Project title** Using Fe<sup>0</sup>/Cu bimetallic to treat groundwater contaminated  
With 1,2-dichloroethane

**Name** Mr. Bamrung Sungeon ID. 52365039  
Miss. Preeyanoot Korsumpun ID. 52365077

**Project advisor** Miss. Arphaphon Chanpirak

**Co advisor** Dr. Tanapon Phenrat

**Major** Chemical Engineering

**Department** Industrial Engineering

**Academic year** 2012

---

### Abstract

1,2-Dichloroethane (1,2-DCA) is a raw material for vinyl chloride monomer (VCM). It has often been detected in the groundwater nearby the VCM chemical plant. Zero valent iron (ZVI) is one of reductant that widely used as electron donor for reductive dechlorination on chlorinated organic compound. Nevertheless the reactivity of ZVI towards 1,2-DCA is very low. In this study, Fe/Cu bimetallic catalysts with different Fe/Cu mole ratio was investigated for reductive dechlorination of 1,2-DCA. Batch experiments were used to test the effectiveness of mono/bimetallic catalysts for 1,2-DCA degradation. The highest activity was obtained over 9Fe/Cu bimetallic catalyst and lowest activity on monometallic catalyst. 5Fe/Cu bimetallic catalyst can be achieved because immobilizing of this catalyst can applied in contaminated groundwater source.

## กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณอันจะกล่าวต่อไปนี้ ที่ให้การสนับสนุนข้อมูลในด้านต่างๆ จนทำให้การศึกษาโครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี อันได้แก่

อาจารย์อภากาศ จันทรปรีกษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการวิจัย อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ให้คำปรึกษา นำวิธีการแก้ไขปัญหาต่างๆ เพื่อสามารถนำไปใช้ดำเนินการในแต่ละขั้นตอนการทำโครงการวิจัยได้ถูกต้อง

ดร.ธนพล เพ็ญรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมโครงการวิจัย อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ให้คำชี้แนะและข้อมูลที่เป็นประโยชน์เกี่ยวกับเทคนิคการสังเคราะห์อนุภาคโพลีเมอร์ที่ถูกปรับปรุงผิวหน้าด้วยทองแดงเพื่อสลายสาร 1,2 ไดคลอโรเอเทน

อาจารย์วรงค์ลักษณ์ ช่อนกลิ่น อาจารย์ผู้ดูแลห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ที่ได้ให้คำแนะนำในการปฏิบัติการในการทดลอง

คุณยุพา เอี่ยมบัวหลวง เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการสิ่งแวดล้อมที่ให้คำแนะนำปรึกษา และให้การช่วยเหลือทางด้านอุปกรณ์เครื่องมือ ตลอดระยะเวลาดำเนินการโครงการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์และท่านอาจารย์ทุกท่านในคณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้แก่คณะผู้ดำเนินโครงการตลอดจนให้คำแนะนำปรึกษาในเรื่องต่างๆ

สุดท้ายนี้ คณะผู้ดำเนินงานหวังว่าโครงการวิศวกรรมเคมีฉบับนี้ จะเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่ศึกษา เรื่องการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่บางส่วน และถ้าเกิดข้อผิดพลาดประการใดจากการดำเนินงานโครงการวิศวกรรมเคมีฉบับนี้ คณะผู้ดำเนินงานต้องกราบขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้ดำเนินโครงการวิศวกรรม

นายบำรุง สูงเนิน

นางสาวปรียานุช กอสัมพันธ์

มีนาคม 2556

# สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
สารบัญสัญลักษณ์และอักษรย่อ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	2
1.3 ขอบเขตการดำเนินโครงการ.....	2
1.4 สถานที่ในการดำเนินโครงการ.....	2
1.5 ระยะเวลาในการดำเนินโครงการ.....	2
1.6 ขั้นตอนการดำเนินโครงการ.....	2
1.7 แผนการดำเนินโครงการ.....	3
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีพื้นฐาน.....	4
2.1 สาร 1,2 ไคคลอโรอีเทน.....	4
2.2 เหล็กและอนุภาคนาโนเหล็กประจุศูนย์.....	4
2.3 อนุภาคทองแดง.....	5
2.4 กระบวนการปลดคลอรีน (Dechlorination).....	5
2.4.1 กลไกกระบวนการ Beta Elimination.....	5
2.4.2 กลไกกระบวนการ Hydrogenolysis.....	5
2.5 อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี.....	6
2.5.1 อัตราการเกิดปฏิกิริยา (Reaction rate).....	6
2.5.2 กฎอัตรา (Rate Law).....	7
2.5.3 อันดับรวมของปฏิกิริยา (Order of Reaction).....	7
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีดำเนินโครงการ.....	10
3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	10
3.1.1 วัสดุและสารเคมี.....	10
3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	10
3.2 วิธีดำเนินการทดลอง.....	11
3.3 วิธีการทดลอง.....	12
3.3.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่/เดี่ยว.....	12
3.3.2 การสลายสาร 1,2-DCA ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่/เดี่ยว.....	13
3.4 การวัดประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการสลายสาร 1,2 ไคคลอโรอีเทน.....	14
3.4.1 วิธีการทดลอง.....	14
3.4.2 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	14
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์.....	15
4.1 การสลายสาร 1, 2 ไคคลอโรอีเทน.....	15
4.2 ผลิตภัณฑ์ที่ได้การสลายสาร 1, 2 ไคคลอโรอีเทน.....	16
4.3 ค่าคงที่อัตราการสลายสาร 1, 2 ไคคลอโรอีเทน.....	18
4.4 การเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	24
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	25
5.1 บทสรุป.....	25
5.1.1 การสลายสาร 1, 2 ไคคลอโรอีเทน.....	25
5.1.2 ผลิตภัณฑ์ที่เกิดในการสลายสาร 1, 2 ไคคลอโรอีเทน.....	25
5.1.3 ค่าคงที่อัตราการสลายสารและการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	25
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	25
เอกสารอ้างอิง.....	26
ภาคผนวก ก .....	28
ภาคผนวก ข .....	39

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.7 แผนการศึกษาโครงการ.....	3
3.1 สารเคมีและเครื่องวัดการทดลอง.....	11
4.1 ค่าคงที่อัตราตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่ที่อัตราส่วน Fe/Cu ต่างกัน.....	22



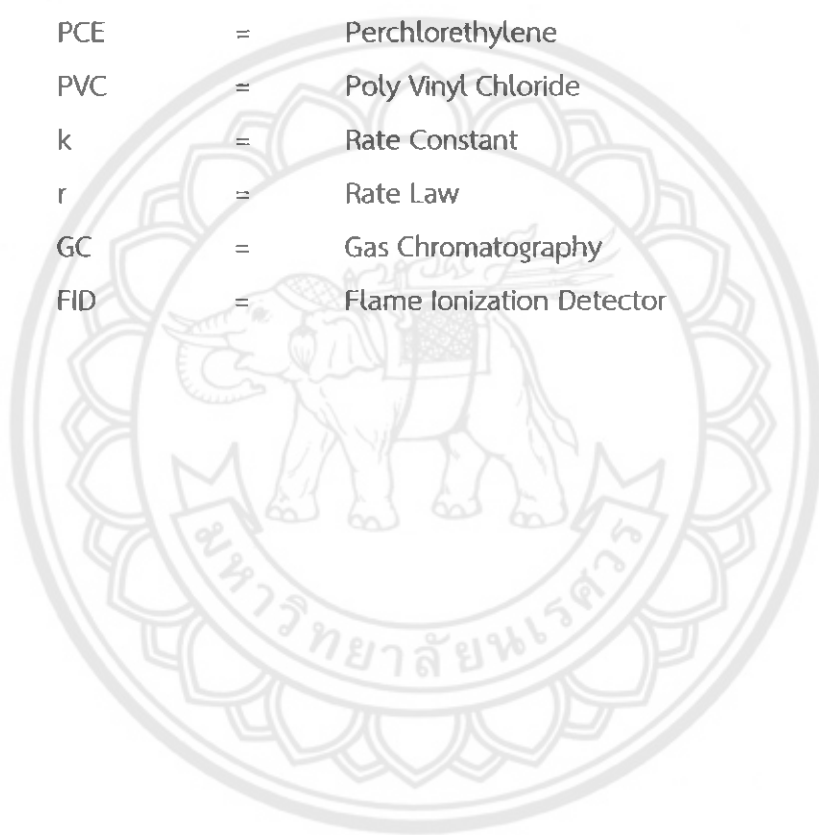


## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 สูตรโครงสร้างของสาร 1,2-DCA.....	4
2.4 เส้นทางการสลายเปอร์คลอโรเอทีลีนโดยใช้เหล็กประจุศูนย์โดยปฏิกิริยารีดักชัน.....	6
3.2 วิธีดำเนินการทดลอง.....	11
3.3 อัตราส่วนโมลลิเก็ดรอนการสังเคราะห์*ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่.....	12
3.4 เครื่องหมุน.....	13
3.5 ลักษณะสีของสารละลายคอปเปอร์ (II) คลอไรด์และตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่.....	13
3.6 เข้มฉืดขนาด 1000 ไมโครลิตร.....	14
4.1 การสลายของสาร 1,2-DCA (8,600 มิลลิกรัม/ลิตรโดยตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่/เดียว) .....	15
4.2 ภาพจำลองการสลายสาร 1,2-DCA.....	16
4.3 แสดงความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่ที่อัตราส่วน Fe/Cu ต่างกัน (a) 3Fe/Cu (b) 5Fe/Cu (c) 7Fe/Cu และ (d) 9Fe/Cu.....	16
4.4 การเปรียบเทียบอัตราส่วนความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่ที่อัตรา ส่วนที่ต่างกัน a) อะเซทิลีน (b) เอทิลีน และ (c) อีเทน.....	17
4.5 แสดงการสลายของ 1,2-DCA (ซ้าย) และกราฟแปรผลเชิงสมการเส้นตรง (ขวา) ของตัวเร่ง ปฏิกิริยาโลหะคู่ที่อัตราส่วน 3Fe/Cu ในระยะเวลา 47.5 ชั่วโมง.....	18
4.6 แสดงการสลายของ 1,2-DCA (ซ้าย) และกราฟแปรผลเชิงสมการเส้นตรง (ขวา) ของตัวเร่ง ปฏิกิริยาโลหะคู่ที่อัตราส่วน 5Fe/Cu ในระยะเวลา 54 ชั่วโมง.....	19
4.7 แสดงการสลายของ 1,2-DCA (ซ้าย) และกราฟแปรผลเชิงสมการเส้นตรง (ขวา) ของตัวเร่ง ปฏิกิริยาโลหะคู่ที่อัตราส่วน 7Fe/Cu ในระยะเวลา 218.5 ชั่วโมง.....	19
4.8 แสดงการสลายของ 1,2-DCA (ซ้าย) และกราฟแปรผลเชิงสมการเส้นตรง (ขวา) ของตัวเร่ง ปฏิกิริยาโลหะคู่ที่อัตราส่วน 7Fe/Cu ในระยะเวลา 169.5 ชั่วโมง.....	20
4.9 แสดงการสลายของ 1,2-DCA (ซ้าย) และกราฟแปรผลเชิงสมการเส้นตรง (ขวา) ของตัวเร่ง ปฏิกิริยาโลหะคู่ที่อัตราส่วน 9Fe/Cu ในระยะเวลา 214.5 ชั่วโมง.....	21
4.10 แสดงการสลายของ 1,2-DCA (ซ้าย) และกราฟแปรผลเชิงสมการเส้นตรง (ขวา) ของตัวเร่ง ปฏิกิริยาโลหะคู่ที่อัตราส่วน 9Fe/Cu ในระยะเวลา 48 ชั่วโมง.....	21
4.11 ค่าคงที่อัตราต่อความเข้มข้นของอนุภาคเหล็กประจุศูนย์.....	23

## สารบัญญัตินิยามและอักษรย่อ

VOCs	=	Volatile Chlorinated Organic Compounds
1,2-DCA	=	1,2-Dichloroethane
VCM	=	Vinyl Chloride Monomer
NZVI	=	Nanoscale Zerovalent Iron
TCE	=	Trichloroethylene
PCE	=	Perchloroethylene
PVC	=	Poly Vinyl Chloride
k	=	Rate Constant
r	=	Rate Law
GC	=	Gas Chromatography
FID	=	Flame Ionization Detector



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

การพัฒนาอย่างต่อเนื่องของระบบเศรษฐกิจที่ขับเคลื่อนโดยภาคอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอุตสาหกรรมเคมีซึ่งมีอัตราการขยายตัวอย่างรวดเร็วเพื่อตอบสนองความต้องการของมนุษย์ โรงงานอุตสาหกรรมผลิตพลาสติกและเม็ดพลาสติกที่มีความสำคัญและขยายกำลังผลิตอย่างรวดเร็ว อุตสาหกรรมประเภทนี้ใช้สารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์สารอินทรีย์ระเหยที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบ (Volatile Chlorinated Organic Compounds) เช่น สาร 1,2 ไดคลอโรอีเทน (1,2-Dichloroethane; 1,2-DCA) และไวนิลคลอไรด์มอนอเมอร์ (Vinyl Chloride Monomer; VCM) ซึ่งสารก่อมะเร็ง หากไม่มีกระบวนการการผลิตและการกำจัดของเสียที่ดีอาจทำให้เกิดการรั่วไหลของสารเคมีดังกล่าวลงสู่ชั้นน้ำใต้ดินซึ่งสารประเภทนี้เป็นสารอินทรีย์ระเหยที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบซึ่งมีความถ่วงเฉพาะสูงกว่าน้ำซึมลงใต้ดิน ซึ่งนำมาสู่การปนเปื้อนของสิ่งแวดล้อมและน้ำใต้ดินระดับตื้นและระดับลึกได้ [1] จำเป็นต้องได้รับการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนดังกล่าวเพื่อปกป้องสุขภาพของประชาชนในบริเวณข้างเคียงและสงวนรักษาทรัพยากรธรรมชาติ

อนุภาคนาโนเหล็กประจุศูนย์ (Nanoscale Zerovalent Iron; NZVI) ได้รับความสนใจอย่างมากในฐานะที่เป็นเทคโนโลยีทางเลือกสำหรับการบำบัดการปนเปื้อนด้วยสารอินทรีย์ระเหยที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบ [2] อนุภาคนาโนเหล็กประจุศูนย์เปลี่ยนสารพิษอย่าง ไตรคลอโรเอทิลีน (Trichloroethylene; TCE) ให้เป็นสารไม่มีพิษ อนุภาคนาโนเหล็กประจุศูนย์จะให้ไอเล็กตรอนเพื่อสลายพันธะ C-Cl ซึ่งเป็นการปลดคลอรีนออก (Dechlorination) จากสารอินทรีย์ระเหยที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบและได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่เป็นพิษ เช่น สารอะเซทิลีน (Acetylene) เอทิลีน (Ethylene) และอีเทน (Ethane) อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าอนุภาคนาโนเหล็กประจุศูนย์สลายสาร 1,2-DCA ได้ช้ามากหรือไม่ได้เลย [3] เนื่องจากพันธะเดี่ยวของสาร 1,2-DCA มีความเสถียรมากทำให้มีความสามารถในการทำปฏิกิริยาต่ำ นอกจากนี้ได้มีความพยายามปรับปรุงอนุภาคนาโนเหล็กประจุศูนย์ให้สามารถทำปฏิกิริยาสลายสาร 1,2-DCA ได้ดีขึ้นโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น Pd-Ni, Pt-Sn และ Pt-Cu อย่างไรก็ตาม การปรับปรุงดังกล่าวยังให้ผลการสลายในอัตราที่ช้ามาก จากการศึกษาที่ผ่านมาดังกล่าวแม้จะพบว่าตัวเร่งอนุภาคส่วนใหญ่ไม่สามารถเร่งการสลายสาร 1,2-DCA ได้ คณะวิจัยของ Chang-Chieh Huang และคณะ [3] ได้ประสบความสำเร็จในการสลายสาร 1,2-DCA ด้วยการใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ร่วมกับทองแดงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งพบว่าสามารถสลายสาร 1,2-DCA ได้อัตราถึงร้อยละ 79 อย่างไรก็ตามโซเดียมโบโรไฮไดรด์อยู่ในรูปสารละลายที่เคลื่อนที่ไปกับน้ำใต้ดินได้จึงไม่เหมาะกับการใช้เป็นวัสดุเพื่อการฟื้นฟูน้ำใต้ดิน และดินที่ปนเปื้อนสาร 1,2-DCA วัสดุเพื่อการฟื้นฟูที่ดีควรอยู่ในรูปของอนุภาคที่เกาะอยู่กับดินและน้ำใต้ดินในบริเวณที่ต้องการทำการฟื้นฟู

ด้วยเหตุนี้คณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะปรับปรุงอนุภาคนาโนของเหล็กประจุศูนย์โดยใช้ทองแดงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่ระหว่างเหล็กประจุศูนย์ที่ถูกเคลือบด้วยอนุภาคทองแดงในการสลายสาร 1,2-DCA ที่สภาวะบรรยากาศ (Ambient Condition) เพื่อพัฒนาวัสดุเชิงนวัตกรรมเพื่อการฟื้นฟูการปนเปื้อนดังกล่าว

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1.2.1 เพื่อศึกษากระบวนการการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่เหล็กประจุศูนย์/ทองแดง
- 1.2.2 เพื่อศึกษาอัตราการสลายสาร 1,2-DCA ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่เหล็กประจุศูนย์/ทองแดง โดยการคำนวณหาค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี

## 1.3 ขอบเขตการทำโครงการ

ดำเนินการสังเคราะห์อนุภาคนาโนเหล็กประจุศูนย์ที่ถูกปรับปรุงด้วยทองแดงที่สัดส่วนต่างๆและทดสอบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนของสาร 1,2-DCA กำหนดขอบเขตโครงการวิจัย ดังนี้

### 1.3.1 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่เหล็กประจุศูนย์/ทองแดง

- 1.3.1.1 อัตราส่วนโมล 0:1, 3:1, 5:1, 7:1 และ 9:1

### 1.3.2 การวัดอัตราการสลายสาร 1,2-DCA ด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีแบบแก๊ส

ตัวแปรต้น : สัดส่วนของอนุภาคนาโนเหล็กประจุศูนย์ที่ถูกปรับปรุงด้วยทองแดง

ตัวแปรตาม : ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา

## 1.4 สถานที่ในการดำเนินโครงการ

- 1.4.1 อาคารปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
- 1.4.2 อาคารมหาธรรมราชา มหาวิทยาลัยนเรศวร

## 1.5 ระยะเวลาในการดำเนินโครงการ

ตั้งแต่เดือน 5 มิถุนายน พ.ศ. 2555 ถึง 28 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2556

## 1.6 ขั้นตอนการดำเนินโครงการ

- 1.6.1 วางแผนการดำเนินงาน
- 1.6.2 ศึกษาหลักการและทฤษฎีพื้นฐานของการสังเคราะห์และการบำบัดน้ำใต้ดิน
- 1.6.3 กำหนดขอบเขตระยะการดำเนินโครงการ
- 1.6.4 เตรียมวัสดุอุปกรณ์ในการทำโครงการ
- 1.6.5 ดำเนินการทดลองในห้องปฏิบัติการ
- 1.6.6 รวบรวมผลการทดลอง
- 1.6.7 วิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผลโครงการ
- 1.6.8 จัดทำรายงานและสรุปผล
- 1.6.9 ส่งรายงานฉบับสมบูรณ์

## 1.7 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.7 แผนการดำเนินงาน

ลำดับ	การดำเนินงาน	ระยะเวลาในการดำเนินงาน									
		ม.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	
1.7.1	วางแผนการดำเนินงาน	↔									
1.7.2	รวบรวมข้อมูลพื้นฐานและทฤษฎี	↔	↔								
1.7.3	เตรียมวัสดุอุปกรณ์			↔	↔						
1.7.4	ดำเนินการทดลอง				↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔
1.7.5	วิเคราะห์ผลการทดลอง								↔	↔	↔
1.7.6	สรุปผลการทดลองและทำรายงานวิจัย										↔

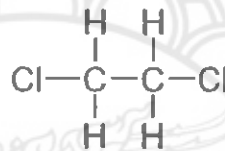
\* ช่องว่าง แสดงระยะเวลาประมาณ 2 สัปดาห์



## บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีพื้นฐาน

### 2.1 สาร 1,2 ไดคลอโรอีเทน

สาร 1,2 ไดคลอโรอีเทน (1,2-Dichloroethane; 1,2-DCA) เป็นหนึ่งในสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบ [4] เป็นของเหลวไม่มีสี ความหนาแน่น (Density) 1.253 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จุดเดือด (Boiling Point) 83.5 องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลว (Melting Point) -35.5 องศาเซลเซียส ละลายกับน้ำได้เล็กน้อย ละลายได้ดีกับเอทานอล (Ethanol) คลอโรฟอร์ม (Chloroform) และไดเอทิลอีเทอร์ (Diethyl Ether) ความดันไอ (Vapor Pressure) 8 กิโลปาสกาลที่ 20 องศาเซลเซียส และจุดวาบไฟ (Flash Point) 18 องศาเซลเซียส โดยมีสูตรโครงสร้างดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงสูตรโครงสร้างของสาร 1,2-DCA

สาร 1,2-DCA ใช้เป็นสารหนึ่งของกระบวนการผลิตไวนิลคลอไรด์มอนอเมอร์ และพอลิไวนิลคลอไรด์ (Poly Vinyl Chloride; PVC) ในอุตสาหกรรมเคมี บ่อยครั้งที่พบการรั่วไหลของสาร 1,2-DCA โดยรอบพื้นที่โรงงานอุตสาหกรรมที่ผลิตไวนิลคลอไรด์มอนอเมอร์และพอลิไวนิลคลอไรด์ ตัวอย่างเช่น การตรวจพบการรั่วไหลของสาร 1,2-DCA ที่โรงงานอุตสาหกรรมปิโตรเคมีแห่งหนึ่งในทางเหนือของประเทศอิตาลี มีพื้นที่การปนเปื้อนประมาณ 7000 ตารางเมตร [5] โรงงานผลิตพอลิไวนิลคลอไรด์ในประเทศได้วันตรวจพบการปนเปื้อนของสาร 1,2-DCA ในน้ำใต้ดินมีความเข้มข้น 15,100 มิลลิกรัมต่อลิตร [3]

### 2.2 เหล็กและอนุภาคนาโนเหล็กประจุศูนย์

เหล็ก คือ ธาตุที่มีเลขอะตอม 26 สัญลักษณ์ คือ Fe เป็นโลหะทรานซิชัน (Transition Metal) มีสีดำ มีความสามารถในการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity) และการนำความร้อน (Thermal Conductivity) ที่ดี มีความหนาแน่น 7.86 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จุดหลอมเหลวที่ 1808.15 เคลวิน โดยทั่วไปมีค่าออกซิเดชันสเตท (Oxidation State) ที่ +2 และ +3

อนุภาคนาโนเหล็กประจุศูนย์ (Zero Valent Iron Nanoparticle; NZVI) คือ เหล็กที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์ให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1-100 นาโนเมตรและผ่านกาให้อิเล็กตรอนจนเลขออกซิเดชันเท่ากับศูนย์ เป็นผงที่มีสีดำ เป็นตัวรีดิวซ์เชิงเอเจนท์ (Reducing Agent) ที่มีประสิทธิภาพในการสลายพันธะคลอรีนในสารอินทรีย์ที่มีคลอรีนระเหยเป็นองค์ประกอบ เช่น TCE โดยเกิดการปลดคลอรีนออก (Dechlorination) [6]

### 2.3 อนุภาคทองแดง (Cu)

ทองแดงเป็นธาตุที่มีเลขอะตอม 29 มีสัญลักษณ์คือ Cu เป็นโลหะทรานซิชัน มีสีแดงส้ม เป็นโลหะที่มีการนำไฟฟ้า และการนำความร้อนที่สูงมาก เบาและดัดง่าย ความหนาแน่น 8.96 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จุดหลอมเหลว 1357.77 เคลวิน จุดเดือด 2835 เคลวิน ทองแดงไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำและถูกออกซิเดชันด้วยอากาศได้ช้า และออกซิเดชันสเตท +1 +2 +3 และ +4 ดังนั้นจึงพบสารประกอบทองแดงในรูปแบบต่างๆ

ทองแดงถูกนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการสลายอินทรีย์ระเหยที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบ เช่น สาร 1,2-DCA การใช้อนุภาคทองแดง เช่น การใช้ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาพลาสมาเดียม/คอปเปอร์ เป็นตัวสนับสนุนและการสลายสาร 1,2-DCA โดยใช้อนุภาคนาโนทองแดงประจุนัยกับโซเดียมโบโรไฮไดรด์ (Sodium Borohydride) [7]

### 2.4 กระบวนการปลดคลอรีน (Reductive Dechlorination) [8]

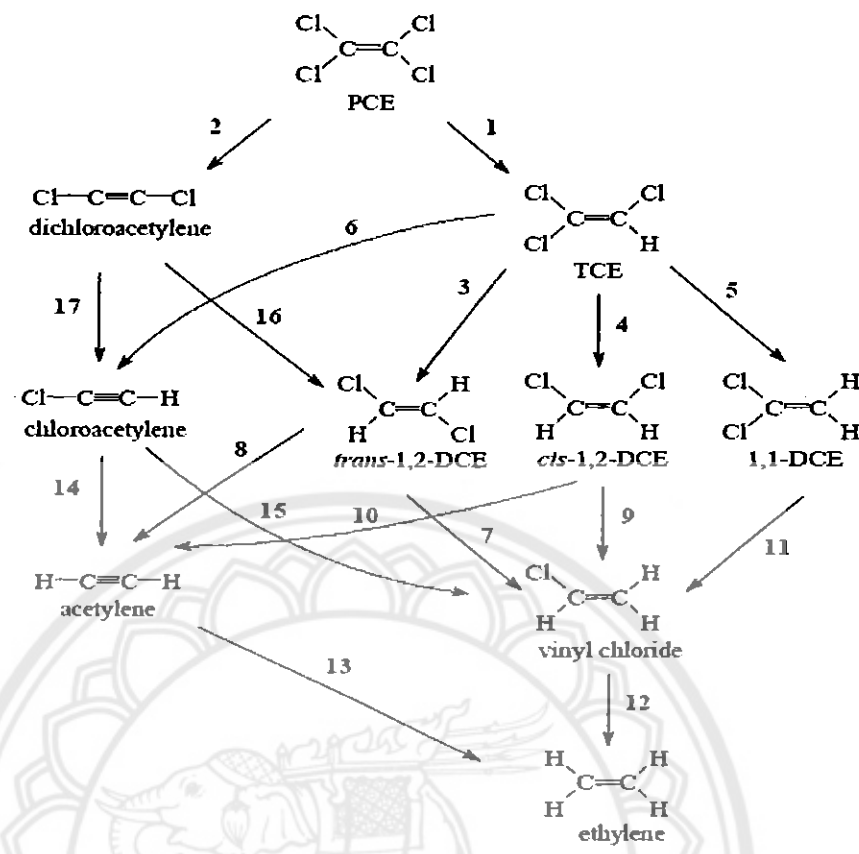
กระบวนการปลดคลอรีน คือ กระบวนการใช้สารที่พร้อมจะให้อิเล็กตรอน (Reductant) แก่สารที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบเพื่อทำการปลดอะตอมคลอรีนออกจากพันธะเคมี ในงานวิจัยนี้อนุภาคนาโนเหล็กประจุนัยถูกใช้เป็นตัวรีดิวเพื่อเปลี่ยนสารอินทรีย์ระเหยที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบให้เป็นสารที่ไม่มีพิษ โดยกลไกของกระบวนการปลดคลอรีนแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่

#### 2.4.1 กลไกกระบวนการ Beta Elimination

คือ สารอินทรีย์ระเหยที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบจะถูกกระตุ้นให้อิเล็กตรอนเพื่อปลดคลอรีนออกพร้อมกันสองอะตอมและเปลี่ยนจากพันธะคู่เป็นพันธะสาม ดังรูปที่ 2.4 สารเปอร์คลอโรเอทิลีน (Perchloroethylene; PCE) มีสูตรโครงสร้าง  $C_2Cl_4$  กระตุ้นให้อิเล็กตรอนเพื่อปลดคลอรีนออกพร้อมกันสองอะตอมและเปลี่ยนจากพันธะคู่เป็นพันธะสามได้สาร Dichloroacetylene มีสูตรโครงสร้าง  $C_2Cl_2$  ซึ่งเป็นสารที่มีพิษน้อยลง

#### 2.4.2 กลไกกระบวนการ Hydrogenolysis

คือ สารอินทรีย์ระเหยที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบจะถูกกระตุ้นให้อิเล็กตรอนเพื่อปลดคลอรีนทีละอะตอม เข้าแทนที่ด้วยไฮโดรเจน ดังรูปที่ 2.4 สาร PCE ถูกกระตุ้นให้อิเล็กตรอนเพื่อปลดคลอรีนทีละอะตอม เข้าแทนที่ด้วยไฮโดรเจน ได้สารที่มีพิษน้อยลง คือ TCE ปลดคลอรีนทีละอะตอมไปเรื่อยๆ ทำยที่สุดได้ผลิตภัณฑ์ คือ อะเซทิลีนและเอทิลีน ซึ่งกลไกกระบวนการ Hydrogenolysis อาจได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความเป็นพิษเพิ่มขึ้น คือ ไวนิลคลอไรด์และผลทางจุลศาสตร์ในการเปลี่ยนไวนิลคลอไรด์เป็นเอทิลีนนั้นยากมากจึงทำให้เส้นทางนี้ไม่เป็นที่นิยมใช้ในการสลายสารอินทรีย์ระเหยที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบ



รูปที่ 2.4 แสดงเส้นทางการสลายเปอร์คลอโรเอทีลีนโดยใช้เหล็กประจุศูนย์โดยปฏิกิริยารีดักชัน  
ที่มา : William Arnold [8]

2.5 อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี

2.5.1 อัตราการเกิดปฏิกิริยา

อัตราการเกิดปฏิกิริยา (Reaction Rate) คือ การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารตั้งต้นหรือสารผลิตภัณฑ์ต่อหนึ่งหน่วยเวลาอัตรามีค่าไม่คงที่แต่จะเปลี่ยนไปเรื่อยๆ เมื่อความเข้มข้นเปลี่ยนแปลง [13] เช่น ปฏิกิริยาการเกิด



$$\text{อัตราการเกิดปฏิกิริยา} = \frac{\text{ความเข้มข้นของ } C \text{ ที่เปลี่ยนไป}}{\text{เวลาที่เปลี่ยนไป}} \tag{2.2}$$

$$\text{อัตราการเกิดปฏิกิริยา} = \frac{\Delta (\text{ความเข้มข้นของ } C)}{\Delta T} \tag{2.3}$$

$$= \frac{\Delta [C]}{\Delta T} \tag{2.4}$$



เนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เวลาต่างๆ ไม่เท่ากันจึงควรเขียนว่า

$$\text{อัตราการเกิดปฏิกิริยา} = \frac{d[C]}{dt} \quad (2.5)$$

หรือถ้าเขียนในรูปของการเปลี่ยนความเข้มข้นของสารตั้งต้น A และ B จะเขียนได้ ดังนี้

$$\text{อัตราการเกิดปฏิกิริยา} = -\frac{d[A]}{dt} = -\frac{d[B]}{dt} \quad (2.6)$$

จากสมการอัตราการลดลงไปของ A เป็นครึ่งหนึ่งของการลดลงไปของ B เพราะฉะนั้นจึงเขียนความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยาในรูปของสารต่างๆ ได้จะต้องคิดต่อ 1 โมลของสารนั้นๆ จึงเขียนได้ ดังนี้

$$\text{อัตราการเกิดปฏิกิริยา} = -\frac{d[A]}{dt} = -\frac{1}{2} \frac{d[B]}{dt} = \frac{d[P]}{dt} \quad (2.7)$$

### 2.5.2 กฎอัตรา

กฎอัตรา (Rate Law) คือ สมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยากับค่าคงที่อัตราและความเข้มข้นของสารตั้งต้นค่าคงที่อัตรา (k) เปลี่ยนแปลงได้ตามอุณหภูมิเมื่อสมการแสดงปฏิกิริยาเป็น ดังนี้



$$\text{จะได้ว่า} \quad r = k[A]^n[B]^m \quad (2.9)$$

เมื่อ k คือ ค่าคงที่เฉพาะของอัตราการเกิดปฏิกิริยา (Rate Constant) ขึ้นกับอุณหภูมิและธรรมชาติของปฏิกิริยา

n, m คือ เลขยกกำลังความเข้มข้นอาจเป็นจำนวนเต็มบวกหรือลบ หรือเศษส่วนก็ได้ จะมีค่าเท่ากับตัวเลขข้างหน้าของสารตั้งต้นในสมการเคมี

### 2.5.3 อันดับรวมของปฏิกิริยา

อันดับรวมของปฏิกิริยา (Order Of Reaction) คือ ผลรวมของเลขชี้กำลังของความเข้มข้นของสารตั้งต้นในกฎอัตราทั้งกฎอัตราและอันดับของปฏิกิริยาจะหาได้จากการทดลองเท่านั้น [14] ผลรวมของค่า n และ m เช่น

ถ้า n = 0 และ m = 0 เรียกว่า ปฏิกิริยาอันดับศูนย์ หมายความว่า การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารตั้งต้น ไม่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา เขียนกฎอัตราได้เป็น

$$r = k[A]^0[B]^0 \text{ หรือ } r = k \quad (2.10)$$

ถ้า  $n = 0$  และ  $m = 1$  ผลบวกเป็น 1 เรียกว่า ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (First Order Of Reaction) เขียนกฎอัตราได้เป็น

$$r = k[A]^0[B]^1 \text{ หรือ } r = k[B]^1 \quad (2.11)$$

ถ้า  $n = 1$  และ  $m = 1$  ผลบวกเป็น 2 เรียกว่า ปฏิกิริยาอันดับสอง (Second Order Of Reaction) เขียนกฎอัตราได้เป็น

$$r = k[A]^1[B]^1 \quad (2.12)$$

ถ้า  $n = 2$  และ  $m = 1$  ผลบวกเป็น 3 เรียกว่า ปฏิกิริยาอันดับสาม (Third Order Of Reaction) เขียนกฎอัตราได้เป็น

$$r = k[A]^2[B]^1 \quad (2.12)$$

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการบำบัดน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนสารอันตรายประเภทสารอินทรีย์ระเหยที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบโดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่เหล็กประจุศูนย์/ทองแดงสามารถทำได้ ดังนี้

Chang-Chieh Huang และคณะ [3] ได้ศึกษาการสลายสาร 1,2-DCA โดยใช้ทองแดงประจุศูนย์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้สภาวะรีดักชันของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ ( $\text{NaBH}_4$ ) ซึ่งโซเดียมโบโรไฮไดรด์เป็นตัวให้อิเล็กตรอนแก่ สาร 1,2-DCA ผลของการทดลองที่ได้ คือ ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีอัตรา 79 อัตราการสลายสาร 1,2-DCA ภายใต้สภาวะนี้แปรผันตรงกับความเข้มข้นของสารตั้งต้น ในขณะที่การเพิ่มจำนวนของทองแดงไม่มีผลต่ออัตราการสลายสาร 1,2-DCA และการที่ทองแดงไม่เคลื่อนที่ทำให้สามารถประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากสามารถเติมโซเดียมโบโรไฮไดรด์ เพื่อให้อิเล็กตรอนต่อได้อย่างต่อเนื่อง

Anna Srebowata และคณะ [7] ได้ศึกษาการใช้พลาสมาเดียว/ทองแดง เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาบนถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ถูกสนับสนุนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาพลาสมาเดียว/คอปเปอร์ ได้ออกฤทธิ์ที่ดีและมีเสถียรภาพ ในการทำ hydrodechlorination ของสาร 1,2-DCA ที่อุณหภูมิสูง (210–230 องศาเซลเซียส) ผลิตภัณฑ์เลือกเกิดไปทางเอทิลีน (Selectivity To Ethene) อย่างเดียว ซึ่งต่างจากการใช้พลาสมาเดียวเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยจะเกิดเป็นอีเทนและ คลอโรอีเทน (Chloroethane)

Stephen J. Bransfield และคณะ [9] ทำการทดลองศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่เหล็ก/ทองแดง ในการสลายสาร 1,1,1-Trichloroethane โดยสารที่ใช้เตรียมอนุภาค คือ เหล็กประจุศูนย์กับคอปเปอร์ (II) คลอไรด์ ( $\text{CuCl}_2$ ) ร้อยละ 93.9 ซึ่งคอปเปอร์ (II) คลอไรด์ไดไฮโดร (  $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ) เตรียมที่สภาวะไร้ออกซิเจน (Anaerobic Chamber) โดยเตรียมเป็นสัดส่วน ดังนี้ ที่ 6 ไมโครโมล และ 125 ไมโครโมลของทองแดงต่อหนึ่งกรัมเหล็ก แล้วนำไปสลายสาร 1,1,1- Trichloroethane ผลที่ได้เป็น ดังนี้ ที่ 6 ไมโครโมลของทองแดงต่อหนึ่งกรัมเหล็กสลายสาร

1,1,1-Trichloroethane ถูกเปลี่ยนเป็นอีเทนและเอทิลีนร้อยละ 25 ส่วน 125 ไมโครโมล ของทองแดงต่อหนึ่งกรัมเหล็ก สลายสาร 1,1,1-Trichloroethane ถูกเปลี่ยนเป็นอีเทนและเอทิลีนร้อยละ 50

Wei-xian Zhang และคณะ [10] ได้ศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่ขนาดนาโน 4 ชนิด คือ พาลาเดียม/เหล็ก พาลาเดียม/สังกะสี แพททินัม/เหล็ก นิกเกิล/เหล็ก (Pd/Fe, Pd/Zn, Pt/Fe, Ni/Fe) เพื่อสลายสารอินทรีย์ระเหยที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบที่เป็นมลพิษ ผลการทดลองที่ได้ คือ เหล็กประจุศูนย์และพาลาเดียม/เหล็ก สามารถที่จะสลายสาร PCE TCE DCEs และ VC ได้ไวและสมบูรณ์ โดยก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอนได้หลากหลาย โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาของทั้งเหล็กประจุศูนย์และพาลาเดียม/เหล็กมีแนวโน้มตามนี้  $PCE > TCE > cis-DCE > VC$  โดยที่ PCE มีค่า Redox ที่สูงที่สุด และ VC ต่ำที่สุด 2) อนุภาคพาลาเดียม/เหล็กขนาดนาโนสามารถสลายคลอรีนในวงเบนซีนที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบได้อย่างสมบูรณ์

Hsing-Lung Lien และ Wei-xian Zhang [11] ได้ศึกษาการใช้อนุภาคโลหะคู่พาลาเดียม/เหล็กขนาดนาโน ในการสลายสารที่มีจำนวนคาร์บอนสองตัวและมีคลอรีนเป็นองค์ประกอบ คือ Hexachloroethane (HCA;  $C_2Cl_6$ ) Pentachloroethane (PCA;  $C_2HCl_5$ ) 1,1,2,2-Tetrachloroethane (1,1,2,2-TeCA;  $C_2H_2Cl_4$ ) 1,1,1,2-Tetrachloroethane (1,1,1,2-TeCA;  $C_2H_2Cl_4$ ) 1,1,1-Trichloroethane (1,1,1-TCA;  $C_2H_3Cl_3$ ) ผลที่สังเกตได้ภายใน 24 ชั่วโมง คือ การใช้อนุภาคโลหะคู่พาลาเดียม/เหล็กขนาดนาโนมีอัตราการสลายสารเหล่านี้สูงกว่าการใช้เหล็กประจุศูนย์โดยตรงจึงทำให้การใช้อนุภาคโลหะคู่พาลาเดียม/เหล็กขนาดนาโน เป็นอีกทางเลือกในการบำบัดพื้นที่ปนเปื้อนของสารที่มีจำนวนคาร์บอนสองตัวและมีคลอรีนเป็นองค์ประกอบ

Hocheol Song and Elizabeth R. Carraway [12] ได้ศึกษาผลของเหล็กประจุศูนย์ขนาดนาโนในการสลายสารที่มีจำนวนคาร์บอนสองตัวและมีคลอรีนเป็นองค์ประกอบจำนวน 8 ชนิด คือ Hexachloroethane (HCA) Pentachloroethane (PCA) 1,1,2,2-Tetrachloroethane (1,1,2,2-TeCA) 1,1,1,2-Tetrachloroethane (1,1,1,2-TeCA) 1,1,2-Trichloroethane (1,1,2-TCA) 1,1,1-Trichloroethane (1,1,1-TCA) 1,2-Dichloroethane (1,2-DCA) และ 1,1-Dichloroethane (1,1-DCA) ในขวดปฏิกรณ์เคมีแบบกะ (Batch Reactor) ผลที่ได้ คือ 1,2-DCA ที่ pH ในช่วงการทำปฏิกิริยา 7.2-8.6 มีค่าคงที่อัตราเทียมปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (Pseudo First Order Rate Constant) น้อยกว่า  $5.6 \times 10^{-5} h^{-1}$  ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้เหล็กประจุศูนย์เพียงอย่างเดียวทำให้อัตราการสลายสาร 1,2-DCA ที่ต่ำมาก

จากหลักการ ทฤษฎีพื้นฐานและผลงานวิจัยที่ผ่านมาคณะผู้วิจัยได้สังเกตเห็นถึงศักยภาพและความเป็นไปได้ของการพัฒนาสมบัติของอนุภาคนาโนเหล็กประจุศูนย์ที่ถูกปรับปรุงด้วยทองแดงที่สัดส่วนต่างๆ เพื่อการบำบัดน้ำใต้ดินที่มีการปนเปื้อนของสาร 1,2-DCA อย่างมีประสิทธิภาพ

### บทที่ 3 วิธีการดำเนินโครงการ

การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่เหล็กประจุศูนย์/ทองแดงเพื่อบำบัดน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนสารอันตรายประเภทสารอินทรีย์ระเหยที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบโดยดำเนินการสังเคราะห์หาอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่ที่เหมาะสมและการทดสอบความสามารถของอนุภาคนาโนโลหะคู่ในการสลายสาร 1,2-DCA โดยมีวิธีในการดำเนินโครงการ ดังนี้

#### 3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ

การศึกษากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่เหล็กประจุศูนย์/ทองแดงเพื่อบำบัดน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนสารอันตรายประเภทสารอินทรีย์ระเหยที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบซึ่งดำเนินการศึกษาในห้องปฏิบัติการภาควิศวกรรมโยธาและอาคารมหาธรรมราชา โดยมีวัสดุอุปกรณ์ ดังนี้

##### 3.1.1 วัสดุและสารเคมี

- 3.1.1.1 อนุภาคนาโนเหล็กประจุศูนย์ ( $Fe^0$  Nano-particles) ขนาด 40 นาโนเมตร
- 3.1.1.2 คอปเปอร์ (II) คลอไรด์ ( $CuCl_2$ )
- 3.1.1.3 น้ำที่ปราศจากประจุหรือน้ำกลั่น (Deionized Water)

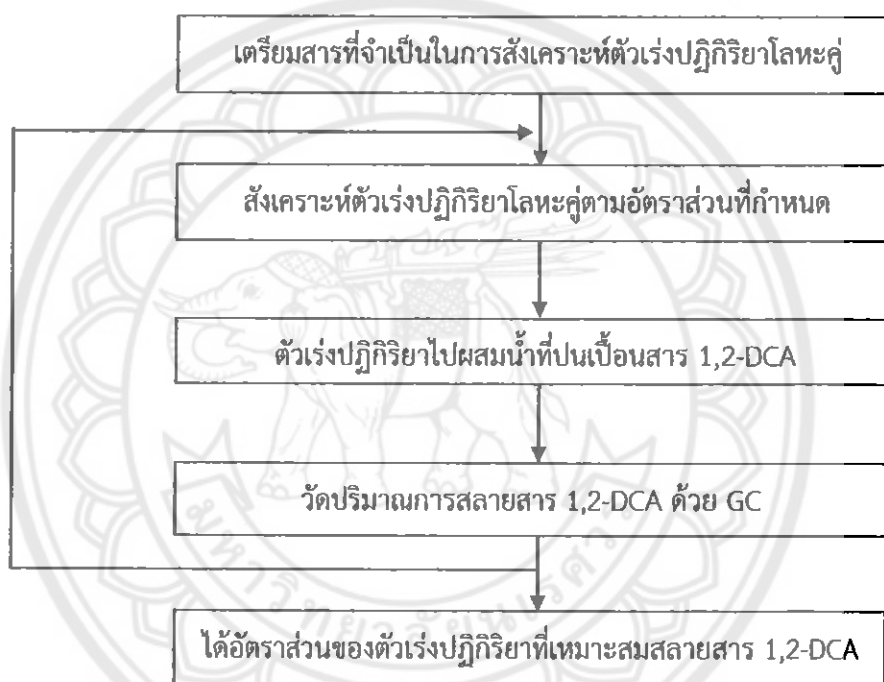
##### 3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

- 3.1.2.1 ถังมือ
- 3.1.2.2 เครื่องแก้ว
- 3.1.2.3 ซ้อนดักสาร
- 3.1.2.4 เครื่องชั่งตวงวัด 4 ตำแหน่ง
- 3.1.2.5 ไมโครปิเปต
- 3.1.2.6 Batch Reactor ขนาดเล็ก
- 3.1.2.7 แม่เหล็ก
- 3.1.2.8 นาฬิกาจับเวลา
- 3.1.2.9 ชุดเครื่องมือโครมาโทกราฟีแบบแก๊ส
- 3.1.2.10 เข็มฉีดยาขนาด 1000 ไมโครลิตร
- 3.1.2.11 Column GS-CARBONPLOT
- 3.1.2.12 Detector Flame Ionization Detector (FID)

ตารางที่ 3.1 สารเคมีและเครื่องวัดการทดลอง

สารเคมี / อุปกรณ์	บริษัทผู้ผลิต / ความบริสุทธิ์	ใช้สำหรับ
$\text{CuCl}_2$	Sigma - Aldrich	ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่
$\text{Fe}^0$	Nanofer 25	ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่
เครื่องชั่ง (SI-234)	DENVER INSTRUMENT	ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่
1,2-DCA	CHEM SERVICE 99.5%	ศึกษาการสลายสาร 1,2-DCA
เข็มฉีด (SGE)	Analytical Science	วัดปริมาณการสลายสาร 1,2-DCA

## 3.2 วิธีดำเนินการทดลอง



รูปที่ 3.2 วิธีดำเนินการทดลอง

### 3.3 วิธีการทดลอง

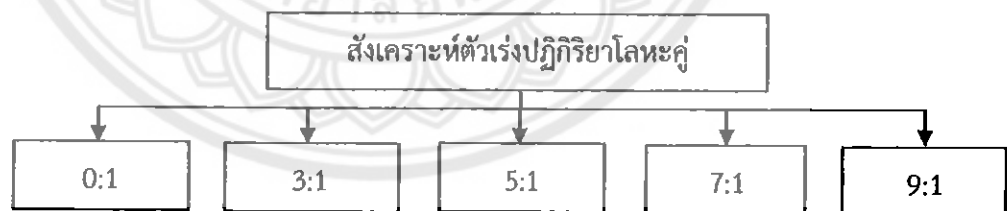
#### 3.3.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่/เดี่ยว

สำหรับปฏิกิริยาที่ใช้สังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่เหล็กประจุศูนย์ทองแดงถูกแสดงด้านล่าง [15]

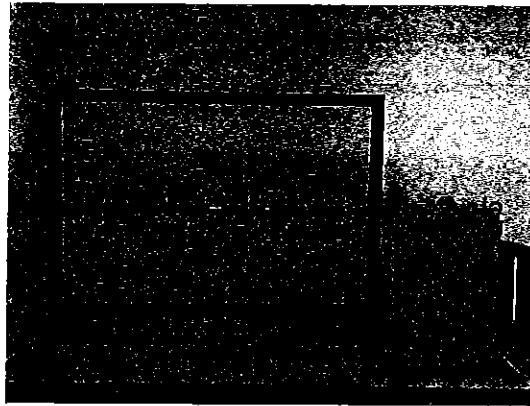


เป็นการบ่งชี้ให้เห็นว่าการใช้เหล็กประจุศูนย์ 1 โมล จะทำให้ทองแดง 1 โมล เปลี่ยนเลขออกซิเดชันจาก +2 เป็น 0 และดูดซับลงบนผิวของอนุภาคนาโนเหล็กประจุศูนย์ ดังนั้นในทางทฤษฎี การสังเคราะห์อนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่เหล็กประจุศูนย์/ทองแดงต้องใช้อัตราส่วนอย่างต่ำที่ 1:1 จึงทำให้ได้ทองแดงเกาะลงบนผิวของเหล็กทั้งหมด แต่อย่างไรก็ตามสำหรับกระบวนการปลดคลอรีนมีความจำเป็นต้องมีจำนวนอิเล็กตรอนที่ใช้ในปฏิกิริยาซึ่งสัดส่วน 1:1 เองนั้นไม่เหมาะสมเนื่องจากไม่มีอิเล็กตรอนในระบบสำหรับการเกิดปฏิกิริยาละลายสารอินทรีย์ระเหยที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบ ดังนั้นทางผู้วิจัยเลยคิดสัดส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่เหล็กประจุศูนย์/ทองแดงเป็น 0:1, 3:1, 5:1, 7:1 และ 9:1 ตามลำดับ โดยมีวิธีการเตรียม ดังนี้

- ก. ชั่งคอปเปอร์ (II) คลอไรด์โดยมีความเข้มข้นเทียบเท่าทองแดง 5 กรัม/ลิตร ตามอัตราส่วนโมลอิเล็กตรอนของอนุภาคเหล็กประจุศูนย์/อนุภาคทองแดง คือ 0:1, 3:1, 5:1, 7:1 และ 9:1 ใส่ Batch Reactor โดยแต่ละตัวอย่างเตรียมสองขวด (Duplicated Reactor)
- ข. ใช้ไมโครปิเปตดูดอนุภาคนาโนเหล็กประจุศูนย์ใส่ Batch Reactor ตามอัตราส่วนโมลอิเล็กตรอนของอนุภาคเหล็กประจุศูนย์/อนุภาคทองแดง 0:1, 3:1, 5:1, 7:1 และ 9:1 ตามลำดับ
- ค. นำไปหมุนในเครื่องหมุนประมาณ 15-20 นาที
- ง. ล้างอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่ด้วยน้ำกลั่น 3 ครั้ง



รูปที่ 3.3 อัตราส่วนโมลอิเล็กตรอนการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่

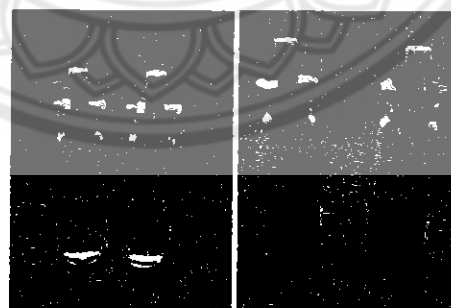


รูปที่ 3.4 เครื่องหมวน

### 3.3.2 การสลายสาร 1,2-DCA ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่/เดี่ยว

- ก. นำตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่/เดี่ยวเติมลงไป Batch Reactor
- ข. ใส่สาร 1,2-DCA ตามลงไป Batch Reactor ขนาด 5 มิลลิลิตร
- ค. ทิ้งระยะเวลาสำหรับการสลายสาร 1,2-DCA
- ง. ทำการวัดการเกิดผลิตภัณฑ์ คือ อะซิทีลีน เอทิลีน และอีเทน โดยใช้โครมาโทกราฟีแบบแก๊สชนิด FID

โดยสังเคราะห์ในสภาวะที่มีออกซิเจนน้อยที่สุดเพื่อให้เหล็กประจุศูนย์เกิดการออกซิเดชันกับออกาศน้อยที่สุด ซึ่งทำได้โดยเตรียมในขวดปริมาตรที่มีพื้นที่หน้าตัดต่ำและมีความเข้มข้นของอนุภาคเหล็กประจุศูนย์ที่สูงเพื่อให้สูญเสียอนุภาคเหล็กประจุศูนย์ไปกับออกาศน้อย จากรูปที่ 3.5 (ก) สารละลายคอปเปอร์ (II) คลอไรด์ และรูปที่ 3.5 (ข) ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่เป็นสีดำ เมื่อผสมอัตราส่วนโมลอิเล็กตรอนของอนุภาคเหล็กประจุศูนย์ที่สามารถถ่ายโอนให้แก่อนุภาคทองแดงที่ได้จะมีลักษณะเป็นตะกอนขนาดเล็กสีน้ำตาลเข้ม



(ก)

(ข)

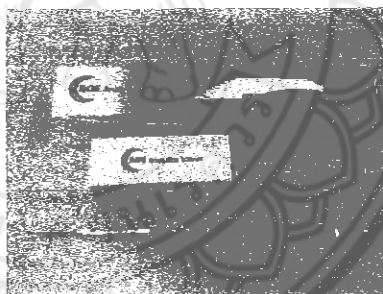
รูปที่ 3.5 (ก) ลักษณะสีของสารละลายคอปเปอร์ (II) คลอไรด์ (ข) ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่

### 3.4 การวัดประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการสลายสาร 1,2-DCA

จุดประสงค์ของขั้นตอนนี้ คือ การคำนวณหาค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo First Order Rate Constant) ของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคูปอนาคานาโนเหล็กประจุศูนย์/ทองแดงในการสลายสาร 1,2-DCA โดยการวัดปริมาณผลิตภัณฑ์ที่คาดว่าจะได้รับ อะเซทิลีน เอทิลีน และอีเทน ผ่านทางชุดเครื่องมือวัดโครมาโทกราฟีแบบแก๊ส (Gas Chromatography, GC) เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ถึงสัดส่วนที่ดีที่สุดของตัวเร่งปฏิกิริยาอนุภาคคานาโนเหล็กประจุศูนย์/ทองแดงในการสลายสาร 1,2-DCA

#### 3.4.1 วิธีการทดลอง

- ก. เปิดแก๊ส (Air Zero, Nitrogen Gas, Helium Gas, Hydrogen Gas)
- ข. เปิดเครื่องมือวัดโครมาโทกราฟีแบบแก๊สและคอมพิวเตอร์
- ค. เลือกใช้ Column GS-CARBONPLOT และ Detector FID
- ง. ใช้เข็มดูดแก๊สภายใน Batch Reactor ปริมาตร 100 ไมโครลิตร ตามอัตราส่วนโมล อิเล็กตรอน 0:1, 3:1, 5:1, 7:1 และ 9:1 ตามลำดับ เพื่อวัดปริมาณผลิตภัณฑ์ผ่านทางชุดเครื่องมือวัดโครมาโทกราฟีแบบแก๊ส
- จ. บันทึกผลการทดลอง
- ฉ. ทำการทดลองซ้ำเป็นเวลา 50 ชั่วโมง



รูปที่ 3.6 เข็มฉีดขนาด 1000 ไมโครลิตร

#### 3.4.2 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

ระบุถึงสัดส่วนที่ดีที่สุดของตัวเร่งปฏิกิริยาอนุภาคคานาโนเหล็กประจุศูนย์/ทองแดงในการสลายสาร 1,2-DCA

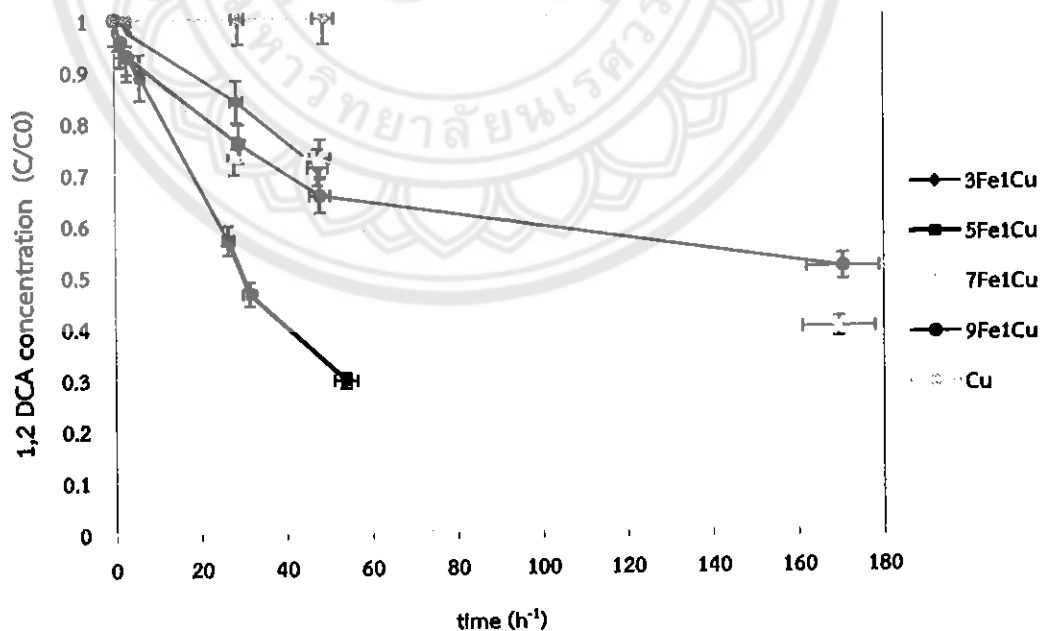


## บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์

โครงการการศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่เหล็กประจุศูนย์/ทองแดงเพื่อบำบัดน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนสารอันตรายประเภทสารอินทรีย์ระเหยที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบ มีผลการทดลองและวิเคราะห์การวัดประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการสลายสาร 1,2 ไดคลอโรอีเทน ดังนี้

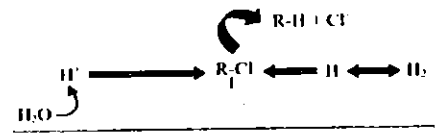
### 4.1 การสลายสาร 1,2 ไดคลอโรอีเทน

จากผลการทดลองรูปที่ 4.1 แสดงการสลายสาร 1,2-DCA ของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่/เดี่ยว พบว่าผลของอัตราส่วนเหล็กประจุศูนย์/ทองแดงต่อการสลายของสาร 1,2-DCA ที่มีช่วงความเข้มข้นสาร 8,600 มิลลิกรัม/ลิตร การใช้ทองแดงเพียงอย่างเดียวนั้นไม่สามารถสลายสาร 1,2-DCA ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chang-Chieh Huang และคณะ [3] จะเห็นจากรูปที่ 4.1 ว่าแม้ผ่านไปถึง 50 ชั่วโมง อุณหภูมิของทองแดงก็ไม่สามารถสลายสาร 1,2-DCA ได้ อันเนื่องจากสภาวะการสลายสารอินทรีย์ระเหยที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบด้วยวิธีดังกล่าวจำเป็นต้องมีสารที่ทำหน้าที่ให้อิเล็กตรอนแก่ระบบอย่างใดที่รูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าสาร 1,2-DCA สามารถถูกสลายได้โดยใช้อุณหภูมิตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่เหล็กประจุศูนย์/ทองแดง และสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นของเหล็กประจุศูนย์ไม่แสดงความสัมพันธ์โดยตรงต่ออัตราการสลายตัวของสาร 1,2-DCA และค่าคอนเวอร์ชัน คือ 0.29 ที่เวลา 47.5 นาที, 0.71 ที่เวลา 54 ชั่วโมง, 0.27 ที่เวลา 48 ชั่วโมง และ 0.35 ที่เวลา 48 ชั่วโมง ที่ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่ 3Fe/Cu 5Fe/Cu 7Fe/Cu และ 9Fe/Cu ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 แสดงการสลายของสาร 1,2-DCA (8,600 มิลลิกรัม/ลิตร) โดยตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่/เดี่ยว

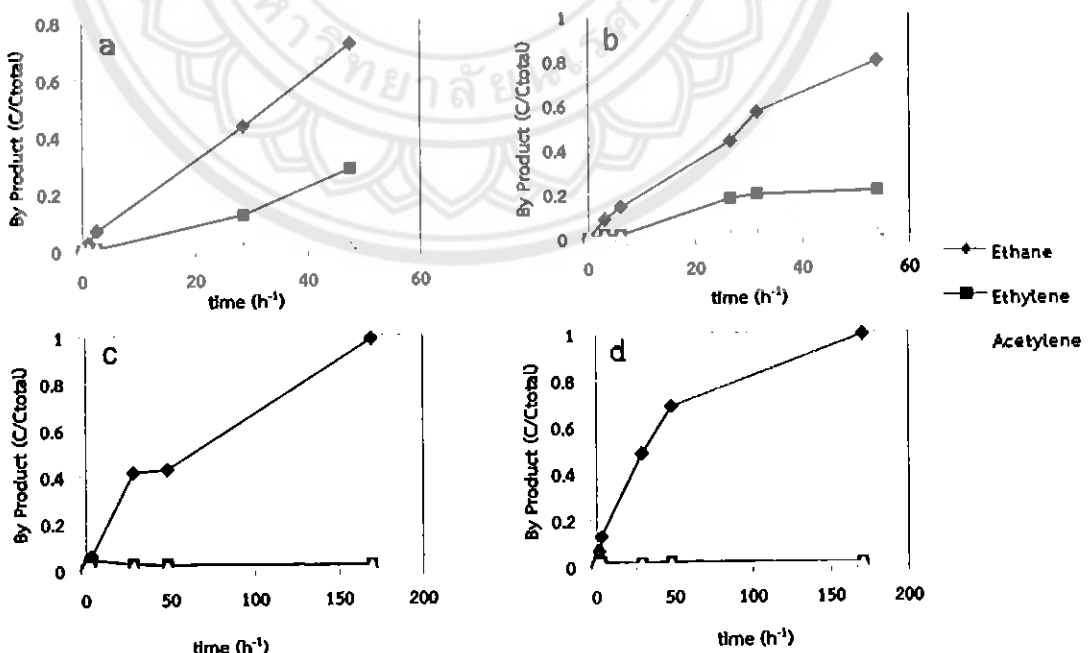
สำหรับกระบวนการสลาย 1,2-DCA ในตอนแรกสารอินทรีย์ระเหยถูกดูดซับบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาทองแดง (สีเหลือง) หลังจากนั้น อิเล็กตรอนจะถูกถ่ายโอนจากเหล็กประจุศูนย์ (สีเทา) ผ่านทองแดงและไฮโดรเจนที่ได้จากเหล็กประจุศูนย์รีดิวซ์น้ำและสมดุลไฮโดรเจนในระบบ หลังจากนั้นคลอรีนถูกปลดออกและอะตอมไฮโดรเจนเข้ามาแทนที่ซึ่งก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอนหลังจากเสร็จสิ้นปฏิกิริยา โดยแสดงดังรูปที่ 4.2 [17]



รูปที่ 4.2 แสดงภาพจำลองการสลายสาร 1,2-DCA

4.2 ผลิตภัณฑ์ที่ได้รับการสลายสาร 1,2 ไดคลอโรอีเทน

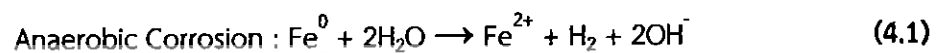
การสลายตัวของสาร 1,2-DCA แสดงให้เห็นจากรูปที่ 4.3 ผลิตภัณฑ์ที่ได้มี 3 ตัว คือ อีเทน เอทิลีนและอะเซทิลีนในการทดลองแต่ละอัตราส่วนของ Fe/Cu สามารถเห็นได้ว่าอีเทนนั้น คือผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมากที่สุด รองลงมา คือ เอทิลีนและอะเซทิลีนตามลำดับโดยอะเซทิลีนเกิดเฉพาะที่ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่ที่อัตราส่วน 5Fe/Cu ซึ่งอาจจะทำให้คาดได้ว่าอีเทน คือ ผลิตภัณฑ์หลักซึ่งสอดคล้องตามสมมติฐานเส้นทางการสลายสารอินทรีย์ระเหยของอนุภาคเหล็กประจุศูนย์แบบ Beta Elimination และอาจจะเกิดปฏิกิริยา Hydrogenolysis ร่วมด้วย (รูปที่ 2.4) แสดงถึงการเกิดอะเซทิลีนและเอทิลีนตามลำดับ บ่งชี้ว่าอะเซทิลีนและเอทิลีนนั้นเป็นตัวกลาง (Intermediate) ก่อนที่จะเกิดเป็นอีเทน



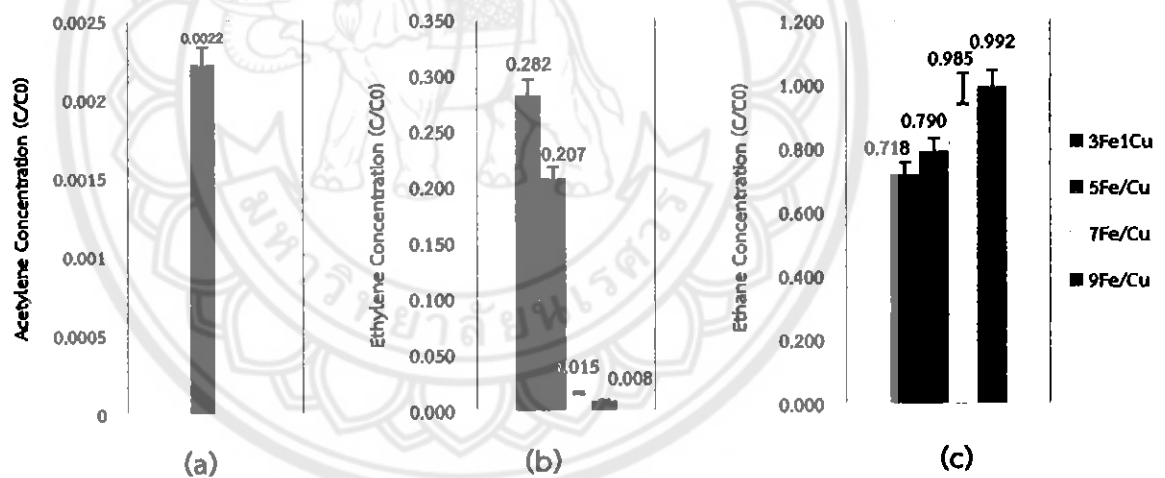
รูปที่ 4.3 แสดงความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่ที่อัตราส่วน Fe/Cu ต่างกัน (a) 3Fe/Cu (b) 5Fe/Cu (c) 7Fe/Cu และ (d) 9Fe/Cu

การเปรียบเทียบระหว่างการเกิดผลิตภัณฑ์ทั้ง 3 ชนิดแสดงจากรูปที่ 4.4 (a) แสดงให้เห็นว่ามีเพียงตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่อัตราส่วน 5Fe/Cu เกิดผลิตภัณฑ์เป็นอะเซทิลีน จากรูปที่ 4.3 (b) บ่งชี้ว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนระหว่าง Fe/Cu มีผลทำให้อัตราการเกิดเอทิลีนต่ำลง รูปที่ 4.4 (c) แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนระหว่าง Fe/Cu ส่งผลให้การเกิดอีเทนเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญซึ่งอาจจะกล่าวได้ว่าอีเทนเป็นผลิตภัณฑ์หลักกระบวนการ Reductive Dechlorination โดยตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่ 7Fe/Cu และ 9Fe/Cu มีการให้อีเทนมากและใกล้เคียงกัน

พฤติกรรมของการเกิดอีเทนจากรูปที่ 4.4 (c) และการเกิดเอทิลีนจากรูปที่ 4.4 (b) อาจจะเกิดจากการเกิดไฮโดรเจนในระบบโดยเหล็กประจุศูนย์ทำปฏิกิริยาในน้ำโดยแสดงดังสมการ [16]



จากปฏิกิริยาข้างต้นแสดงให้เห็นได้ว่าที่อัตราส่วน 9Fe/Cu สามารถก่อให้เกิดไฮโดรเจนและจำนวนอิเล็กตรอนได้มากกว่าที่อัตราส่วน 7Fe/Cu 5Fe/Cu และ 3Fe/Cu ฉะนั้นจึงทำให้มีจำนวนอะตอมของไฮโดรเจนและอิเล็กตรอนมากในระบบมากพอสำหรับที่จะต่อพันธะกับอะตอมของคาร์บอนในระบบเช่นเดียวกัน ในทางกลับกันที่สัดส่วนเหล็กประจุศูนย์ต่ำๆ จะส่งผลให้อะตอมไฮโดรเจนในระบบน้อยลงจึงส่งผลให้ผลิตภัณฑ์จากการสลายเลือกที่จะเกิดเป็นเอทิลีนมากกว่าอีเทน



รูปที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบอัตราส่วนความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่ที่อัตราส่วนที่ต่างกัน (a) อะเซทิลีน (b) เอทิลีน และ (c) อีเทน

### 4.3 ค่าคงที่อัตราการสลายสาร 1,2 ไดคลอโรอีเทน

ในงานวิจัยเกี่ยวกับแบบจำลองทางจลศาสตร์ที่ถูกใช้ในการคำนวณสารอินทรีย์ระเหยที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบนั้น คือ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo First Order Kinetics Model) ตามสมการ [12]

$$\frac{dC}{dt} = -k_{\text{obs}} C \quad (4.2)$$

เมื่อ  $C$  คือ ความเข้มข้นของสาร 1,2-DCA มีหน่วยเป็น  $\text{mol/L}$

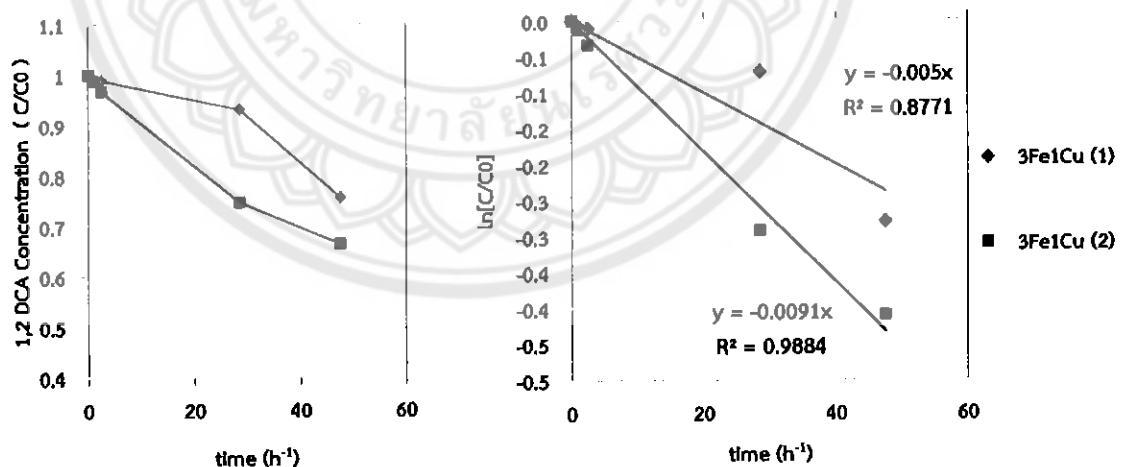
-  $k_{\text{obs}}$  คือ ค่าคงที่อัตราที่สังเกต (Observed Rate Constant) มีหน่วยเป็น  $\text{h}^{-1}$

$t$  คือ เวลา มีหน่วยเป็น  $\text{h}^{-1}$

สำหรับการทดลองนี้มีการเก็บค่าจากขดทดลองสัดส่วนละ 2 ขดและทำการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของค่าคงที่อัตรา สามารถดูได้ ดังนี้

#### 4.3.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่เหล็กประจุนย์/ทองแดงที่อัตราส่วน 3Fe/Cu

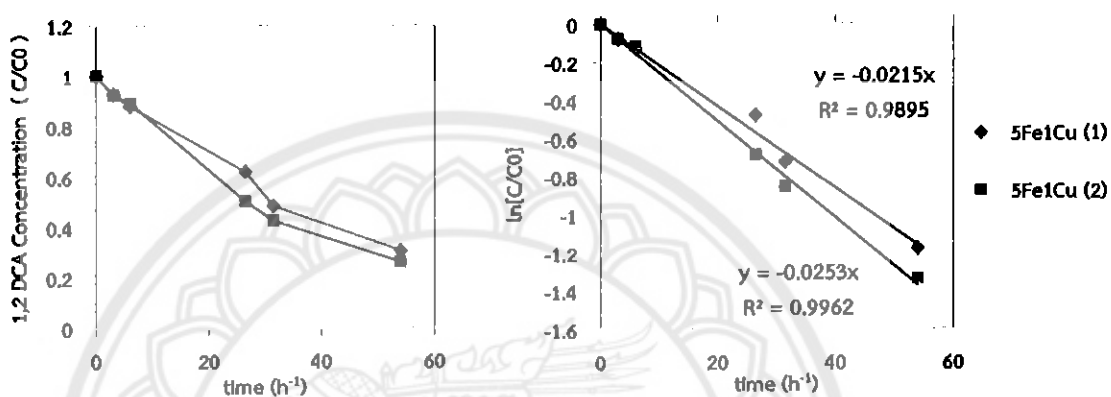
จากรูปที่ 4.5 แสดงผลการทดลองและการคำนวณค่าคงที่อัตราการสลายสาร 1,2-DCA ในการแปรผลในเชิงสมการเส้นตรงของขดทั้งสองโดยขดที่ 1 (3Fe1Cu (1)) แสดงค่าคงที่อัตราที่มีค่าเท่ากับ  $0.005 \text{ h}^{-1}$   $R^2 = 0.877$  และขดที่ 2 (3Fe1Cu (2)) แสดงค่าคงที่อัตราที่มีค่าเท่ากับ  $0.009 \text{ h}^{-1}$   $R^2 = 0.9884$  ซึ่งการบันทึกผลการทดลองผ่านไป 47.5 ชั่วโมง จะเห็นได้ว่าจุดข้อมูลการทดลองที่ได้มีพฤติกรรมค่อนข้างในเชิงเส้นตรง โดยค่าคงที่อัตราการสลายเฉลี่ยของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่ที่อัตราส่วน 3Fe/Cu คือ  $0.00705 \pm 0.00205 \text{ h}^{-1}$



รูปที่ 4.5 แสดงการสลายของ 1,2-DCA (ซ้าย) และกราฟแปรผลเชิงสมการเส้นตรง (ขวา) ของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่ที่อัตราส่วน 3Fe/Cu ในระยะเวลา 47.5 ชั่วโมง

#### 4.3.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่เหล็กประจุศูนย์/ทองแดงที่อัตราส่วน 5Fe/Cu

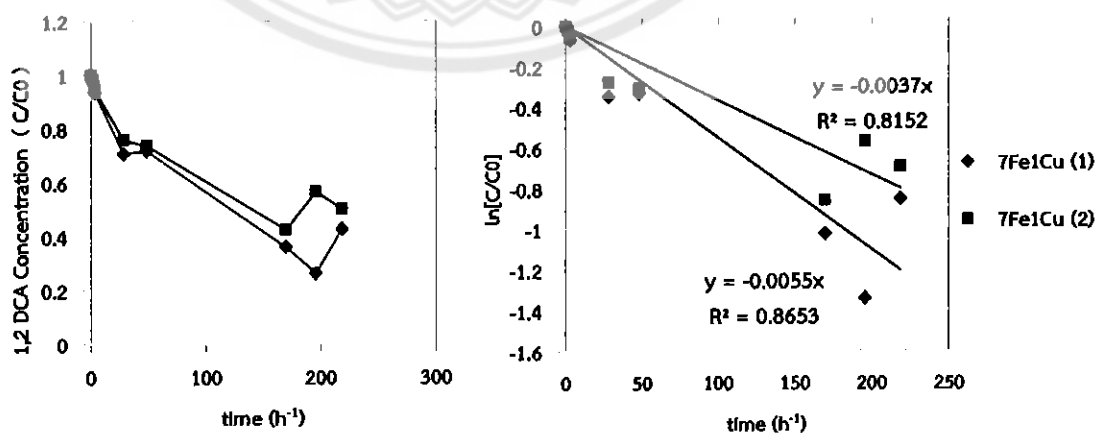
จากรูปที่ 4.6 แสดงผลการลดลงและการคำนวณค่าคงที่อัตราการสลายสาร 1,2-DCA ในการแปรผลในเชิงสมการเส้นตรงของขดทั้งสองโดยขดที่ 1 (5Fe1Cu (1)) แสดงค่าคงที่อัตราที่มีค่าเท่ากับ  $0.0215 \text{ h}^{-1}$   $R^2 = 0.9895$  และขดที่ 2 (5Fe1Cu (2)) แสดงค่าคงที่อัตราที่มีค่า  $0.0253 \text{ h}^{-1}$   $R^2 = 0.9962$  ซึ่งการบันทึกผลการทดลองผ่านไป 54 ชั่วโมง จะเห็นได้ว่าจุดข้อมูลการทดลองที่ได้มีพฤติกรรมค่อนข้างในเชิงเส้นตรง โดยค่าคงที่อัตราการสลายเฉลี่ยของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่ที่อัตราส่วน 5Fe/Cu คือ  $0.0234 \pm 0.0019 \text{ h}^{-1}$



รูปที่ 4.6 แสดงการสลายของ 1,2-DCA (ซ้าย) และกราฟแปรผลเชิงสมการเส้นตรง (ขวา) ของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่ที่อัตราส่วน 5Fe/Cu ในระยะเวลา 54 ชั่วโมง

#### 4.3.3 ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่เหล็กประจุศูนย์/ทองแดงที่อัตราส่วน 7Fe/Cu

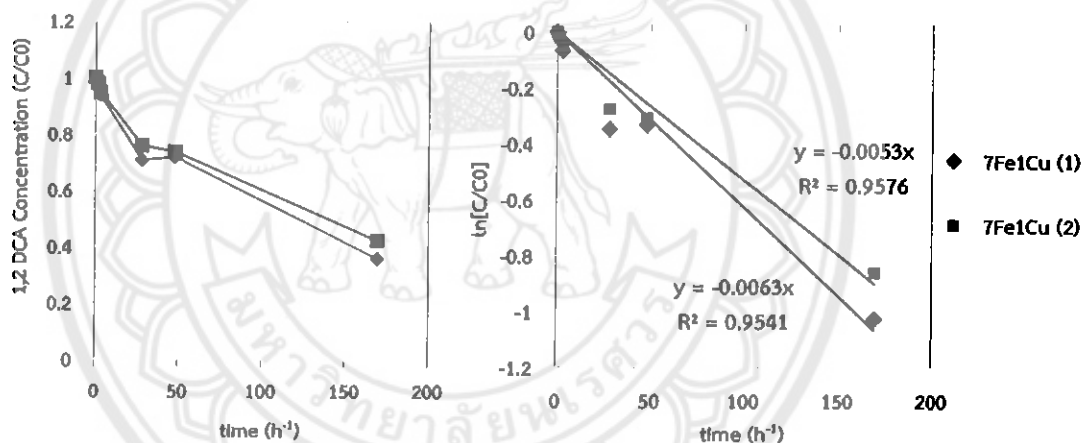
จากรูปที่ 4.7 แสดงผลการลดลงและการคำนวณค่าคงที่อัตราการสลายสาร 1,2-DCA ในการแปรผลในเชิงสมการเส้นตรงของขดทั้งสองโดยขดที่ 1 (7Fe1Cu (1)) แสดงค่าคงที่อัตราที่มีค่าเท่ากับ  $0.0055 \text{ h}^{-1}$   $R^2 = 0.8152$  และขดที่ 2 (7Fe1Cu (2)) แสดงค่าคงที่อัตราที่มีค่าเท่ากับ  $0.0037 \text{ h}^{-1}$   $R^2 = 0.8653$  ซึ่งการบันทึกผลการทดลองผ่านไป 218.5 ชั่วโมง



รูปที่ 4.7 แสดงการสลายของ 1,2-DCA (ซ้าย) และกราฟแปรผลเชิงสมการเส้นตรง (ขวา) ของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่ที่อัตราส่วน 7Fe/Cu ในระยะเวลา 218.5 ชั่วโมง

จากข้อมูลการทดลองในช่วงเริ่มต้นจนถึงที่เวลา 169.5 ชั่วโมง สามารถสังเกตเห็นการสลายตัวของ 1,2-DCA อย่างรวดเร็วและหลังจากเวลา 169.5 ชั่วโมง จนถึงเวลา 218.5 ชั่วโมง มีการลดลงของอัตราการสลาย 1,2-DCA ซึ่งพฤติกรรมไม่เป็นไปตามแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ดังนั้นจึงมีการคำนวณหาค่าคงที่อัตราโดยการแบ่งช่วงที่เวลา 169.5 ชั่วโมง ดังรูปที่ 4.8 แสดงค่าคงที่อัตราที่ ขวดที่ 1 (7Fe1Cu (1)) แสดงค่าคงที่อัตราที่มีค่าเท่ากับ  $0.0063 \text{ h}^{-1}$   $R^2 = 0.9541$  และขวดที่ 2 (7Fe1Cu (2)) แสดงค่าคงที่อัตราที่มีค่าเท่ากับ  $0.0053 \text{ h}^{-1}$   $R^2 = 0.9576$  ซึ่งสอดคล้องตามแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งโดยค่าคงที่อัตราการสลายเฉลี่ยของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคูปินช่วงนี้ คือ  $0.0058 \pm 0.0005 \text{ h}^{-1}$

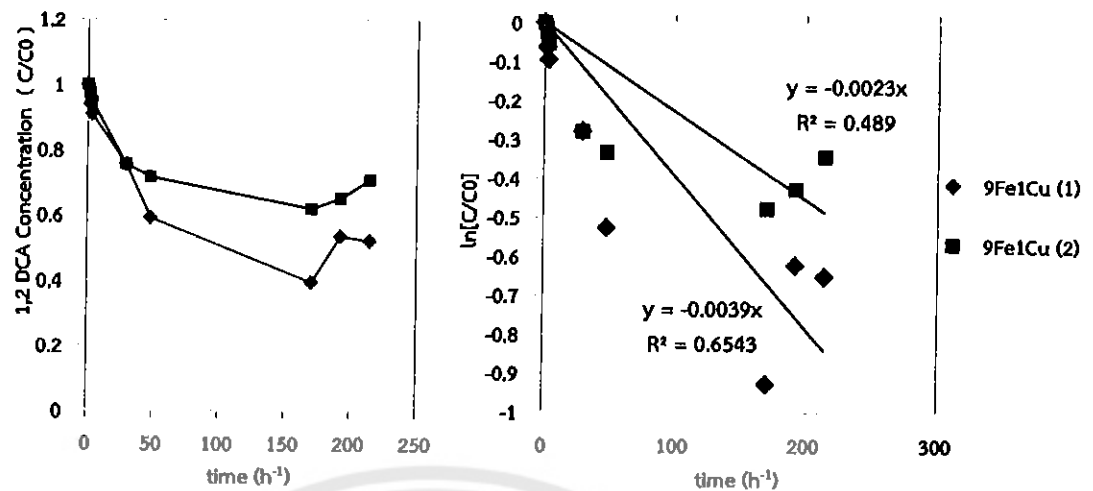
พฤติกรรมในช่วงเวลาหลังจาก 169.5 จนถึง 218.5 ชั่วโมง สันนิษฐานว่าอาจจะเกิดจากความ เป็นพิษของตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst Poisoning) คือ ทำให้ความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการสลายสารลดน้อยลงอาจจะเป็นเพราะเกิดการบดบังพื้นผิวทำปฏิกิริยา ซึ่งเหตุผลนี้ส่งผลให้เมื่อมีการตั้ง สารตัวอย่างนำไปวิเคราะห์จึงทำให้มวลในระบบหายไปซึ่งส่งผลโดยตรงกับความเข้มข้นที่วัดได้ในภายหลัง



รูปที่ 4.8 แสดงการการสลายของ 1,2-DCA (ซ้าย) และกราฟแปรผลเชิงสมการเส้นตรง (ขวา) ของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคูปินที่อัตราส่วน 7Fe/Cu ในระยะเวลา 169.5 ชั่วโมง

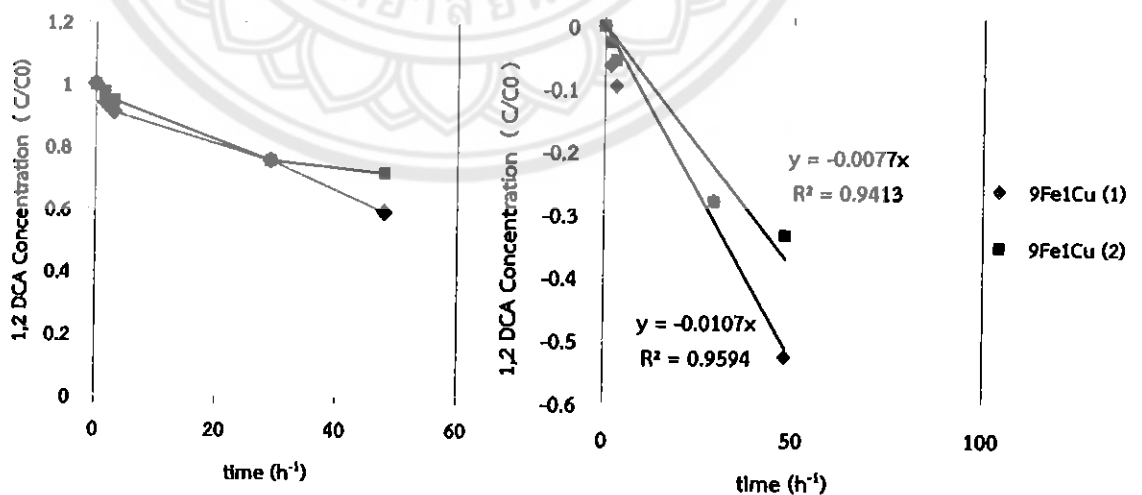
#### 4.3.4 ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคูปินเหล็กประจุศูนย์/ทองแดงที่อัตราส่วน 9Fe/Cu

จากรูปที่ 4.9 แสดงผลการลดลงและการคำนวณค่าคงที่อัตราการสลายสาร 1,2-DCA ในการแปรผลในเชิงสมการเส้นตรงของขวดทั้งสองโดยขวดที่ 1 (9Fe1Cu (1)) แสดงค่าคงที่อัตราที่มีค่าเท่ากับ  $0.0039 \text{ h}^{-1}$   $R^2 = 0.6543$  และขวดที่ 2 (9Fe1Cu (2)) แสดงค่าคงที่อัตราที่มีค่า  $0.0023 \text{ h}^{-1}$   $R^2 = 0.4890$  ซึ่งการบันทึกผลการทดลองผ่านไป 214.5 ชั่วโมง



รูปที่ 4.9 แสดงการการสลายของ 1,2-DCA (ซ้าย) และกราฟแปรผลเชิงสมการเส้นตรง (ขวา) ของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่ที่อัตราส่วน 9Fe/Cu ในระยะเวลา 214.5 ชั่วโมง

จากข้อมูลการทดลองในช่วงเริ่มต้นจนถึงที่เวลา 48 ชั่วโมง สามารถสังเกตเห็นการสลายตัวของสาร 1,2-DCA อย่างรวดเร็วและหลังจากเวลา 48 ชั่วโมง จนถึงเวลา 214.5 ชั่วโมง มีการลดลงของอัตราการสลาย 1,2-DCA ซึ่งพฤติกรรมไม่เป็นไปตามแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ดังนั้นจึงมีการคำนวณหาค่าคงที่อัตราโดยการแบ่งช่วงที่เวลา 48 ชั่วโมง ดังรูปที่ 4.10 แสดงค่าคงที่อัตราที่ ขวดที่ 1 (9Fe1Cu (1)) แสดงค่าคงที่อัตราที่มีค่าเท่ากับ  $0.0077\text{h}^{-1}$   $R^2 = 0.9413$  และขวดที่ 2 (9Fe1Cu (2)) แสดงค่าคงที่อัตราที่มีค่าเท่ากับ  $0.0107\text{h}^{-1}$   $R^2 = 0.9594$  ซึ่งสอดคล้องตามแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งโดยค่าคงที่อัตราการสลายเฉลี่ยของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่ในช่วงนี้ คือ  $0.0092 \pm 0.0015\text{h}^{-1}$  พฤติกรรมในช่วงเวลาหลังจาก 48 จนถึง 214.5 ชั่วโมง สันนิษฐานเดียวกันกับตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่ที่อัตราส่วน 7Fe/Cu



รูปที่ 4.10 แสดงการการสลายของ 1,2-DCA (ซ้าย) และกราฟแปรผลเชิงสมการเส้นตรง (ขวา) ของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่ที่อัตราส่วน 9Fe/Cu ในระยะเวลา 48 ชั่วโมง

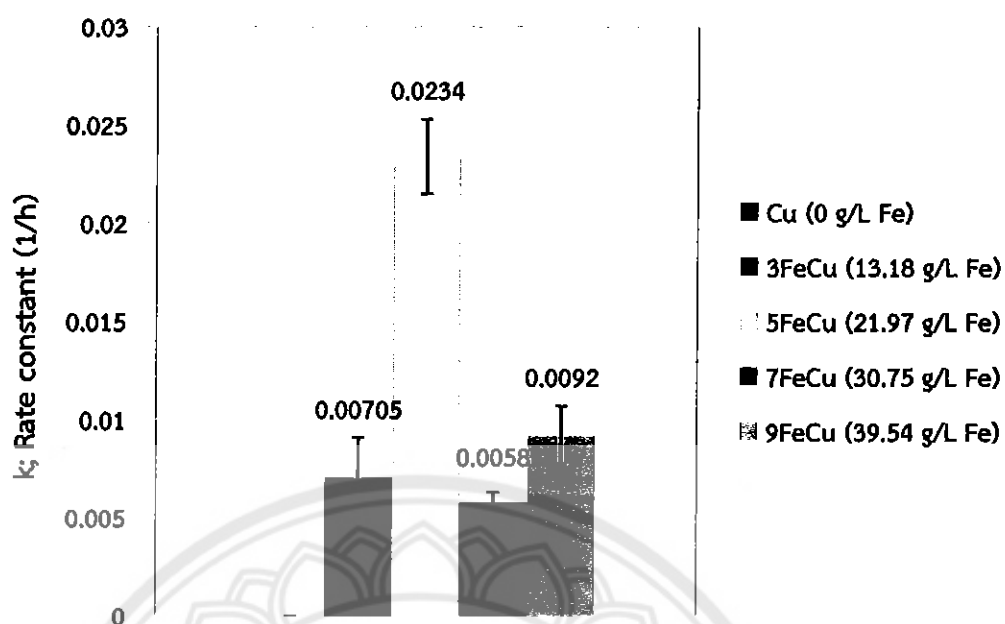
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าคงที่อัตราตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่ที่อัตราส่วน Fe/Cu ต่างกัน

Catalyst	k; Rate constant (h <sup>-1</sup> )			
	1	2	Average	SD
Cu monometallic	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3Fe1Cu Bimetallic	0.0050	0.0091	0.0071	0.0021
5Fe1Cu Bimetallic	0.0215	0.0253	0.0234	0.0019
7Fe1Cu Bimetallic	0.0063	0.0053	0.0058	0.0005
9Fe1Cu Bimetallic	0.0107	0.0077	0.0092	0.0015

จากตารางที่ 4.1 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่ Fe/Cu มีความสามารถในการสลายสาร 1,2-DCA ได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะเดี่ยวทั้งทองแดงและเหล็ก ( $k < 0.00005\text{h}^{-1}$ ) [12] และยังแสดงให้เห็นอีกว่าสัดส่วนที่ดีที่สุดสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่ คือ ที่อัตราส่วน 5Fe/Cu ซึ่งสามารถดูได้จากค่าคงที่อัตราที่มีค่าเท่ากับ  $0.0234 \pm 0.0019 \text{ h}^{-1}$

ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่เหล็กประจุศูนย์/ทองแดงที่อัตราส่วน 5Fe/Cu แสดงถึงความสามารถในการเป็นตัวเร่งที่ดีที่สุด จากรูปที่ 4.11 ในช่วงอัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่ที่ 0Fe/Cu (0 กรัม/ลิตร Fe) ถึง 5Fe/Cu (21.97 กรัม/ลิตร Fe) แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่าคงที่อัตราการสลาย 1,2-DCA อาจจะสันนิษฐานได้ว่าการกระจายตัวของทองแดงบนผิวหน้าของเหล็กประจุศูนย์ได้อย่างเหมาะสมเพิ่มขึ้นจนถึงที่อัตราส่วน 5Fe/Cu ซึ่งสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่ที่อัตราส่วน 3Fe/Cu อาจจะคาดเดาได้ว่ามีปริมาณการกระจายตัวของทองแดงบนผิวของเหล็กประจุศูนย์ที่สูงกว่าที่อัตราส่วน 5Fe/Cu ส่งผลให้ผิวเหล็กประจุศูนย์สัมผัสโดยตรงกับน้ำได้น้อยทำให้การเกิดของไฮโดรเจนต่ำซึ่งส่งผลโดยตรงกับการสลาย 1,2-DCA และสำหรับค่าคงที่อัตราตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่ลดลง โดยที่อัตราส่วน 7Fe/Cu และ 9Fe/Cu มีค่าคงที่อัตราน้อยกว่าที่อัตราส่วน 5Fe/Cu อาจจะ เป็นเพราะว่าปริมาณของทองแดงที่ปรับปรุงบนผิวของเหล็กมีปริมาณที่ต่ำส่งผลให้พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลงและส่งผลโดยตรงกับการสลายของ 1,2-DCA





รูปที่ 4.11 แสดงค่าคงที่อัตราต่อความเข้มข้นของอนุภาคเหล็กประจุศูนย์

สำหรับงานวิจัยนี้ปัจจัยที่ไม่ได้ศึกษาและคาดว่าส่งผลต่อปฏิกิริยาปลดคลอรีน คือ

1. ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา
2. ตัวรีดิวซิงเอเจนต์
3. สภาวะการทดลอง เช่น อุณหภูมิ เป็นต้น

#### 4.4 การเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

จากข้อสันนิษฐานเกี่ยวกับความเป็นพิษของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยจากผลการทดลองมีการคาดว่าเริ่มมีความเป็นพิษที่ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่ที่อัตราส่วน 7:1 หลังจากเวลาผ่านไป 169.5 ชั่วโมง และตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่ที่อัตราส่วน 9:1 ที่เวลา 48 ชั่วโมง ข้อมูลเหล่านี้อาจบ่งบอกได้ว่าเมื่ออัตราส่วนของอนุภาคเหล็กประจุศูนย์เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้มีการเกิดผลของความเป็นพิษของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน เหตุผลนี้สามารถอธิบายโดยอ้างถึงคุณสมบัติของเหล็กประจุศูนย์ได้ คือ เหล็กประจุศูนย์มีหน้าที่เป็นตัวรีดิวซึ่งเอเจนท์ในการทดลองนี้ซึ่งไม่เพียงจะเป็นตัวรีดิวสารอินทรีย์ระเหยที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบแต่ยังมีความสามารถในการรีดิวน้ำในระบบ (ใช้เป็นตัวทำลายในการทดลอง) ซึ่งในการทดลองของงานวิจัยนี้สนับสนุนเหตุผลดังกล่าว คือ เมื่ออัตราส่วนของเหล็กประจุศูนย์เพิ่มขึ้นเราสามารถสังเกตเห็นการเกิดจำนวนฟองแก๊สเพิ่มขึ้นซึ่งพบได้อย่างทั่วไปในแต่ละขบวนการทดลอง ซึ่งแก๊สที่เกิดเหล่านี้ คือ แก๊สไฮโดรเจนและมีออกซิเจนเจือปนอยู่ในสารละลายเช่นเดียวกันเมื่อแก๊สไฮโดรเจนเกิดพันธะแก่สารอินทรีย์ระเหยที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบโดยกระบวนการปลดคลอรีน เหล็กประจุศูนย์ที่เสียอิเล็กตรอนจะเกิดสารประกอบเหล็กออกไซด์ ไฮดรอกไซด์ (Fe Oxide Hydroxide) ดังสมการ [16]

ตะกอนเฟอร์ริกออกไซด์ระหว่าง pH 2 ถึง 4



ตะกอนเฟอร์รัสออกไซด์ระหว่าง pH 7 ถึง 9



ตะกอนเหล่านี้จะทับถมบนชั้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่ซึ่งส่งผลทำให้พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาลดน้อยลงและเกิดปรากฏการณ์ความเป็นพิษของตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าว

## บทที่ 5

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปโครงการ

##### 5.1.1 การสลายสาร 1,2 ไคคลอโรอีเทน

ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคูปี้มีความสามารถในการสลายสาร 1,2-DCA ที่ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะเดี่ยวซึ่งทองแดงเพียงอย่างเดียวไม่สามารถสลายสาร 1,2-DCA

##### 5.1.2 ผลึกที่เกิดขึ้นในการสลายสาร 1,2 ไคคลอโรอีเทน

ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคูปี้และเดี่ยวบางสัดส่วนมีการเกิดอะเซทิลีนโดยผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ที่ได้ คือ เอทิลีนและอีเทนโดยสัดส่วนการเกิดอีเทนเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราส่วนของเหล็กประจุศูนย์ในตัวเร่งปฏิกิริยาและอัตราการเกิดเอทิลีนนั้นเป็นอัตราส่วนผกผันโดยตรงกับอัตราส่วนของเหล็กประจุศูนย์ในตัวเร่งปฏิกิริยา

##### 5.1.3 ค่าคงที่อัตราการสลายสารและการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคูปี้เหล็ก/ทองแดงมีความสามารถในการสลายสาร 1,2-DCA ได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะเดี่ยวและสัดส่วนที่ดีที่สุดสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคูปี้ คือ ที่อัตราส่วน 5Fe/Cu โดยค่าคงที่อัตราที่มีค่าเท่ากับ  $0.0234 \pm 0.0019 \text{ h}^{-1}$  มีการสันนิษฐานจากการทดลองว่ามีการเกิดความเป็นพิษของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคูปี้ในสัดส่วน 7Fe/Cu และ 9Fe/Cu มีแนวโน้มจะเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนโมลของเหล็กประจุศูนย์

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาและทำการทดลองการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคูปี้เหล็กประจุศูนย์/ทองแดงเพื่อบำบัดน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนสาร 1,2-DCA คณะผู้ดำเนินการศึกษาได้พบข้อควรปรับปรุงและข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการทดลอง ดังนี้

5.2.1 การใช้เครื่องมือวัดผลทางจลนศาสตร์มีเวลาใช้อย่างจำกัดทำให้ผลของเวลานั้นอาจจะไม่เท่ากัน

5.2.2 ความเข้มข้นของสาร 1,2-DCA นั้นเตรียมได้ยากเนื่องจากการละลายที่ไม่ทั่วถึงทำให้กำหนดไม่ได้แน่นอน

5.2.3 สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยายังจำเป็นต้องใช้เครื่องมือวัดอื่นๆ ช่วยเพื่อยืนยันการมีอยู่และความถูกต้องของสมมติฐาน

5.2.4 การวัดพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยานั้นจำเป็นซึ่งเครื่องมือที่มีนั้นไม่เพียงพอ

อย่างไรก็ตามโครงการการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคูปี้เหล็กประจุศูนย์/ทองแดงเพื่อบำบัดน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนสาร 1,2-DCA นี้เป็นการศึกษาเพียงประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการสลายสาร 1,2-DCA ผ่านทางชุดเครื่องมือวัดโครมาโทกราฟีแบบแก๊ส ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสลายสาร 1,2-DCA คือ อีเทนและเอทิลีน

## เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมควบคุมมลพิษ. (2553). รายงานสถานการณ์ด้านมลพิษทางน้ำ เขตควบคุมมลพิษจังหวัดระยอง ประจำปี2552. สำนักจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ.
- [2] Phenrat, T., Saleh, N., Sirk, K., Tilton, R., D., and Lowry, G., V. (2007). Aggregation and sedimentation of aqueous nanoscale zerovalent iron dispersions. *Environ. Sci. Technol.*, 41(1), 284-290.
- [3] Huang, C. C., Lo, S. L., Tsai, S. M., Lien H. L. (2011). Catalytic hydrodechlorination of 1,2-dichloroethane using copper nanoparticles under reduction conditions of sodium borohydride. Cite this: *J. Environ. Monit.*, 13, 2406.
- [4] สำนักจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ. (2552). เบื้องต้นเกี่ยวกับสารอินทรีย์ระเหยง่าย. สืบค้นเมื่อ 14 ตุลาคม 2555, จาก <http://monitor.onep.go.th/document/voc.html>.
- [5] Ing. Claudio Sandrone, Ing. Paola Gorla, Ing. (2009). Carboni, M., Micheletti, D. L. Remediation of 1,2-dichloroethane (1,2-DCA) and vinyl chloride (VC) contaminated groundwater lab and field pilot test, *Proceedings of The International Conference BOSICON – Rome, May 13-15, 2009*.
- [6] ดร. วิษณุ แทนบุญช่วย. (2555). อนุภาคนาโนเหล็กประจุศูนย์ (Zero Valent iron Nanoparticle). อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร.
- [7] Srebowata, A., Lisowski, W., Sobczak, J. W., Karpinski, Z. (2011). Hydrogen-assisted dechlorination of 1,2-dichloroethane on active carbon supported palladium-copper catalysts. *Catalysis Today*, 175, 576– 584.
- [8] ดร. ธนพล เพ็ญรัตน์. (2555). เส้นทางการสลายเปอร์คลอโรเอทีลีนโดยใช้เหล็กประจุศูนย์โดยปฏิกิริยารีดักชัน. อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยนเรศวร
- [9] Stephen J. Bransfield และคณะ. (2010). The Influence of Copper Loading and Surface Coverage on the Reactivity of Granular Iron Toward 1,1,1-Trichloroethane. Supporting Information 8 Pages 2 Figures.
- [10] Zhang, W. X., Wang, C. B., Lien, H. L. **Treatment of chlorinated organic contaminants**
- [11] Lien, H. L., Zhang, W. X. (2005). Hydrodechlorination of Chlorinated Ethanes by Nanoscale Pd/Fe Bimetallic Particles. DOI: 10.1061 / (ASCE) 0733-9372, 131 : 1 (4).
- [12] Song, H., Carraway, E. R. (2005). Reduction of Chlorinated Ethanes by Nanosized Zero-Valent Iron. Kinetics, Pathways, and Effects of Reaction Conditions, *Environ. Sci. Technol.*, 39, 6237-6245.
- [13] โรงเรียนมหิตลวิทยานุสรณ์ (องค์การมหาชน) โรงเรียนวิทยาศาสตร์ของรัฐ. (2549). เอกสารประกอบการเรียน. วิชาเคมี 3 (ว40123) ภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2549.

- [14] อรอุมา บวรศักดิ์. (2548). กฎอัครา. อาจารย์คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม.
- [15] Hosseini, S. M., Ashtiani, B. A., Kholghi, M. (2011). Nitrate reduction by nano-Fe/Cu particles in packed column. *Desalination*, 276, 214–221.
- [16] Luyken, H. (2012). เหล็ก (III) ออกไซด์ไฮดรอกไซด์. สืบค้นเมื่อ 9 มีนาคม 2556, จาก [http://en.wikipedia.org/wiki/Iron\(III\)\\_oxide-hydroxide](http://en.wikipedia.org/wiki/Iron(III)_oxide-hydroxide)
- [17] Reardon, E. R., Randal, F., John, L. V., Przepiora, A. Anaerobic Corrosion Reaction Kinetics of Nanosized Iron. *Environ. Sci. Technol.* 2008, 42 (7), pp 2420-2425





ภาคผนวก ก

ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การวัดประสิทธิภาพ  
ของตัวเร่งปฏิกิริยาในการสลายสาร 1,2-DCA

ตารางที่ ก.1 ผลการทดลองการวัดประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการสลายสาร 1,2-DCA ด้วย GC ที่อัตราส่วนโมลลิเก็ดรอนของอนุภาคเหล็กประจุศูนย์/อนุภาคทองแดงที่ 0:1 ตัวอย่างที่ 1

Cu Bimetallic Catalyst_8600 mg/L (1)					
1,2-Dichloroethane (Peak area)			Moles		
Acetylene	Ethylene	Ethane	Acetylene	Ethylene	Ethane
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0

ตารางที่ ก.2 ผลการทดลองการวัดประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการสลายสาร 1,2-DCA ด้วย GC ที่อัตราส่วนโมลลิเก็ดรอนของอนุภาคเหล็กประจุศูนย์/อนุภาคทองแดงที่ 0:1 ตัวอย่างที่ 2

Cu Bimetallic Catalyst_8600 mg/L (2)					
1,2-Dichloroethane (Peak area)			Moles		
Acetylene	Ethylene	Ethane	Acetylene	Ethylene	Ethane
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0

ตารางที่ ก.3 การวิเคราะห์ผลการทดลองการวัดประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการสลายสาร 1,2-DCA ด้วย GC ที่อัตราส่วนโมลลิเก็ดรอนของอนุภาคเหล็กประจุศูนย์/อนุภาคทองแดงที่ 0:1 ตัวอย่างที่ 1

Cu Bimetallic Catalyst_8600 mg/L (1)									
Concentration			Total		Remaining 1,2-Dichloroethane				
Acetylene	Ethylene	Ethane	moles	mole/L	moles	moles/L	Ct/C0	t	ln(Ct/C0)
0	0	0	0	0	0.0004	0.0869	1	0.0	0
0	0	0	0	0	0.0004	0.0869	1	1.5	0
0	0	0	0	0	0.0004	0.0869	1	3.0	0
0	0	0	0	0	0.0004	0.0869	1	29.0	0
0	0	0	0	0	0.0004	0.0869	1	49.0	0

ตารางที่ ก.4 การวิเคราะห์ผลการทดลองการวัดประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการสลายสาร 1,2-DCA ด้วย GC ที่อัตราส่วนโมลเล็กน้อยของอนุภาคเหล็กประจุศูนย์/อนุภาคทองแดงที่ 0:1 ตัวอย่างที่ 2

Cu Bimetallic Catalyst_8600 mg/L (2)									
Concentration			Total		Remaining 1,2-Dichloroethane				
Acetylene	Ethylene	Ethane	moles	mole/L	moles	moles/L	Ct/C0	t	ln(Ct/C0)
0	0	0	0	0	0.0004	0.0869	1	0.0	0
0	0	0	0	0	0.0004	0.0869	1	1.5	0
0	0	0	0	0	0.0004	0.0869	1	3.0	0
0	0	0	0	0	0.0004	0.0869	1	29.0	0
0	0	0	0	0	0.0004	0.0869	1	49.0	0

ตารางที่ ก.5 การวิเคราะห์ผลการทดลองค่าเฉลี่ยที่อัตราส่วนโมลเล็กน้อยของอนุภาคเหล็กประจุศูนย์/อนุภาคทองแดงที่ 0:1 ตัวอย่างที่ 1 และ 2

Average Data										
Moles			Concentration (mg/L)			Total		Remaining 1,2-Dichloroethane		
Acetylene	Ethylene	Ethane	Acetylene	Ethylene	Ethane	Moies	Conc	Ct/C0	t	ln(Ct/C0)
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0.0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	1	1.5	0
0	0	0	0	0	0	0	0	1	3.0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	1	29.0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	1	49.0	0

ตารางที่ ก.6 ผลการทดลองการวัดประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการสลายสาร 1,2-DCA ด้วย GC ที่อัตราส่วนโมลเล็กน้อยของอนุภาคเหล็กประจุศูนย์/อนุภาคทองแดงที่ 3:1 ตัวอย่างที่ 1

3Fe1Cu Bimetallic Catalyst_8600 mg/L (1)					
1,2-Dichloroethane (Peak area)			Moles		
Acetylene	Ethylene	Ethane	Acetylene	Ethylene	Ethane
0	0.0	0.0	0	0.00	0.00
0	1558.2	8294.4	0	4.86E-07	2.53E-06
0	1355.2	13694.4	0	4.23E-07	4.18E-06
0	46227.1	50443.4	0	1.44E-05	1.54E-05
0	194385.6	149619.3	0	6.07E-05	4.56E-05



ตารางที่ ก.7 ผลการทดลองการวัดประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการสลายสาร 1,2-DCA ด้วย GC ที่อัตราส่วนโมลอิเล็กตรอนของอนุภาคเหล็กประจุศูนย์/อนุภาคทองแดงที่ 3:1 ตัวอย่างที่ 2

3Fe1Cu Bimetallic Catalyst_8600 mg/L (2)					
1,2-Dichloroethane (Peak area)			Moles		
Acetylene	Ethylene	Ethane	Acetylene	Ethylene	Ethane
0	0.0	0.0	0	0.00	0.00
0	3503.1	13671.5	0	1.09E-06	4.17E-06
0	3843.5	43141.7	0	1.20E-06	1.32E-05
0	52554.3	307637.6	0	1.64E-05	9.38E-05
0	33927.8	445715.0	0	1.06E-05	1.06E-05

ตารางที่ ก.8 การวิเคราะห์ผลการทดลองการวัดประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการสลายสาร 1,2-DCA ด้วย GC ที่อัตราส่วนโมลอิเล็กตรอนของอนุภาคเหล็กประจุศูนย์/อนุภาคทองแดงที่ 3:1 ตัวอย่างที่ 1

3Fe1Cu Bimetallic Catalyst_8600 mg/L (1)									
Concentration			Total		Remaining 1,2-Dichloroethane				
Acetylene	Ethylene	Ethane	moles	mole/L	moles	moles/L	Ct/C0	t	ln(Ct/C0)
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0004	0.0869	1.0000	0.0	0.0000
0	9.72E-05	5.06E-4	3.02E-6	6.03E-4	0.0004	0.0863	0.9931	1.0	-0.0070
0	8.46E-05	8.35E-4	4.60E-6	9.20E-4	0.0004	0.0860	0.9894	2.5	-0.0106
0	2.89E-03	3.08E-3	2.98E-5	5.96E-3	0.0004	0.0809	0.9314	28.5	-0.0711
0	1.21E-02	9.13E-3	1.06E-4	2.13E-2	0.0003	0.0656	0.7554	47.5	-0.2805

ตารางที่ ก.9 การวิเคราะห์ผลการทดลองการวัดประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการสลายสาร 1,2-DCA ด้วย GC ที่อัตราส่วนโมลอิเล็กตรอนของอนุภาคเหล็กประจุศูนย์/อนุภาคทองแดงที่ 3:1 ตัวอย่างที่ 2

3Fe1Cu Bimetallic Catalyst_8600 mg/L (2)									
Concentration			Total		Remaining 1,2-Dichloroethane				
Acetylene	Ethylene	Ethane	moles	mole/L	moles	moles/L	Ct/C0	t	ln(Ct/C0)
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0004	0.08690	1.0000	0.0	0.0000
0	2.19E-4	8.34E-4	5.26E-6	1.05E-3	0.0004	0.08585	0.9879	1.0	-0.0122
0	2.40E-4	2.63E-3	1.44E-5	2.88E-3	0.0004	0.08403	0.9670	2.5	-0.0336
0	3.28E-03	1.88E-2	1.10E-4	2.20E-2	0.0003	0.06486	0.7463	28.5	-0.2926
0	2.12E-03	2.72E-2	1.47E-4	2.93E-2	0.0003	0.05760	0.6628	47.5	-0.4113

ตารางที่ ก.10 การวิเคราะห์ผลการทดลองค่าเฉลี่ยที่อัตราส่วนโมลอิเล็กตรอนของอนุภาคเหล็ก  
ประจุศูนย์/อนุภาคทองแดงที่ 3:1 ตัวอย่างที่ 1 และ 2

Average Data (1), (2)										
Moles			Concentration (mg/L)			Total		Remaining 1,2-Dichloroethane		
Acetylene	Ethylene	Ethane	Acetylene	Ethylene	Ethane	Moles	Conc	Ct/C0	t	ln(Ct/C0)
0	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.0000	1.0000	0.0	0.0000
0	7.90E-7	3.35E-6	0	1.58E-04	6.70E-4	4.14E-6	0.0008	0.9905	1.0	-0.0096
0	8.11E-7	8.67E-6	0	1.62E-04	1.73E-3	9.48E-6	0.0019	0.9782	2.5	-0.0221
0	1.54E-5	5.46E-5	0	3.08E-03	1.09E-2	7.00E-5	0.0400	0.8389	28.5	-0.1757
0	3.56E-5	9.08E-5	0	7.12E-03	1.82E-2	1.26E-4	0.0253	0.7091	47.5	-0.3438

ตารางที่ ก.11 ผลการทดลองการวัดประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการสลายสาร 1,2-DCA ด้วย  
GC ที่อัตราส่วนโมลอิเล็กตรอนของอนุภาคเหล็กประจุศูนย์/อนุภาคทองแดงที่ 5:1 ตัวอย่างที่ 1

5Fe1Cu Bimetallic Catalyst_ 8600 mg/L (1)					
1,2-Dichloroethane (Peak area)			Moles		
Acetylene	Ethylene	Ethane	Acetylene	Ethylene	Ethane
0	0.0	0.0	0	0.0	0.0
0	0.0	16002.2	0	0.0	4.88E-06
0	0.0	18902.6	0	0.0	5.77E-06
0	40759.4	42306.6	0	1.27E-05	1.29E-05
0	43115.4	42578.9	0	1.35E-05	1.30E-05
0	63662.1	62052.7	0	1.99E-05	1.89E-05

ตารางที่ ก.12 ผลการทดลองการวัดประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการสลายสาร 1,2-DCA ด้วย  
GC ที่อัตราส่วนโมลอิเล็กตรอนของอนุภาคเหล็กประจุศูนย์/อนุภาคทองแดงที่ 5:1 ตัวอย่างที่ 2

5Fe1Cu Bimetallic Catalyst_ 8600 mg/L (2)					
1,2-Dichloroethane (Peak area)			Moles		
Acetylene	Ethylene	Ethane	Acetylene	Ethylene	Ethane
0	0.0	0.0	0	0.0	0.0
0.0	0.0	16846.7	0	0.0	5.14E-06
0.0	0.0	19925.1	0	0.0	6.08E-06
0.0	35228.3	37385.3	0	1.10E-05	1.14E-05
0.0	52851.0	49362.0	0	1.65E-05	1.51E-05
0.0	4864.4	45332.7	0	1.52E-06	1.38E-05

ตารางที่ ก.13 การวิเคราะห์ผลการทดลองการวัดประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการสลายสาร 1,2-DCA ด้วย GC ที่อัตราส่วนโมลของอนุภาคเหล็กประจุศูนย์/อนุภาคทองแดงที่ 5:1 ตัวอย่างที่ 1

5Fe1Cu Bimetallic Catalyst_8600 mg/L (1)									
Concentration			Total		Remaining 1,2-Dichloroethane				
Acetylene	Ethylene	Ethane	moles	mole/L	moles	moles/L	Ct/C0	t	ln(Ct/C0)
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0004	0.0869	1.0000	0.0	0.0000
0	0.00	9.76E-4	4.88E-6	9.76E-4	0.0004	0.0859	0.9888	3.5	-0.0113
0	0.00	1.15E-3	5.77E-6	1.15E-3	0.0004	0.0858	0.9867	6.5	-0.0134
0	2.54E-03	2.58E-3	2.56E-5	5.12E-3	0.0004	0.0818	0.9410	23.5	-0.0608
0	2.69E-03	2.60E-3	2.64E-5	5.29E-3	0.0004	0.0816	0.9391	27.5	-0.0628
0	3.97E-03	3.79E-3	3.88E-5	7.76E-3	0.0004	0.0791	0.9107	51.0	-0.0935

ตารางที่ ก.14 การวิเคราะห์ผลการทดลองการวัดประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการสลายสาร 1,2-DCA ด้วย GC ที่อัตราส่วนโมลของอนุภาคเหล็กประจุศูนย์/อนุภาคทองแดงที่ 5:1 ตัวอย่างที่ 2

5Fe1Cu Bimetallic Catalyst_8600 mg/L (2)									
Concentration			Total		Remaining 1,2-Dichloroethane				
Acetylene	Ethylene	Ethane	moles	mole/L	moles	moles/L	Ct/C0	t	ln(Ct/C0)
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0004	0.0869	1.0	0.0	0.0000
0	0.00	1.03E-3	5.14E-6	1.03E-3	0.0004	0.0859	0.9882	3.5	-0.0119
0	0.00	1.22E-3	6.08E-6	1.22E-3	0.0004	0.0857	0.9860	6.5	-0.0141
0	2.20E-03	2.28E-3	2.24E-5	4.48E-3	0.0004	0.0824	0.9485	24.0	-0.0529
0	3.30E-03	3.01E-3	3.15E-5	6.31E-3	0.0004	0.0806	0.9274	28.0	-0.0754
0	3.04E-04	2.77E-3	1.53E-5	3.07E-3	0.0004	0.0838	0.9647	51.0	-0.0360

ตารางที่ ก.15 การวิเคราะห์ผลการทดลองค่าเฉลี่ยที่อัตราส่วนโมลของอนุภาคเหล็กประจุศูนย์/อนุภาคทองแดงที่ 5:1 ตัวอย่างที่ 1 และ 2

Average Data (1), (2)										
Moles			Concentration (mg/L)			Total		Remaining 1,2-Dichloroethane		
Acetylene	Ethylene	Ethane	Acetylene	Ethylene	Ethane	Moles	Mole/L	Ct/C0	t	ln(Ct/C0)
0	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.0000	1.0000	0.0	0.0000
0	0.00	5.01E-6	0	0.00	1.00E-3	5.01E-6	0.0010	0.9885	3.5	-0.0116
0	0.00	5.92E-6	0	0.00	1.18E-3	5.92E-6	0.0012	0.9864	6.5	-0.0137
0	1.19E-05	1.20E-5	0	2.4E-3	2.43E-3	2.40E-5	0.0048	0.9447	23.5	-0.0568
0	1.50E-05	1.40E-5	0	3.0E-3	2.80E-3	2.90E-5	0.0058	0.9333	27.5	-0.0691

ตารางที่ ก.16 ผลการทดลองการวัดประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการสลายสาร 1,2-DCA ด้วย GC ที่อัตราส่วนโมลอิเล็กตรอนของอนุภาคเหล็กประจุศูนย์/อนุภาคทองแดงที่ 7:1 ตัวอย่างที่ 1

7Fe1Cu Bimetallic Catalyst_8600 mg/L (1)					
1,2-Dichloroethane (Peak area)			Moles		
Acetylene	Ethylene	Ethane	Acetylene	Ethylene	Ethane
0	0.0	0.0	0	0.00	0.00
0	17189.8	18235.7	0	5.36E-06	5.56E-06
0	38531.8	52419.2	0	1.20E-05	1.60E-05
0	20995.2	396181.5	0	6.55E-06	1.21E-04
0	18650.9	382879.0	0	5.82E-06	1.17E-04

ตารางที่ ก.17 ผลการทดลองการวัดประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการสลายสาร 1,2-DCA ด้วย GC ที่อัตราส่วนโมลอิเล็กตรอนของอนุภาคเหล็กประจุศูนย์/อนุภาคทองแดงที่ 7:1 ตัวอย่างที่ 2

7Fe1Cu Bimetallic Catalyst_8600 mg/L (2)					
1,2-Dichloroethane (Peak area)			Moles		
Acetylene	Ethylene	Ethane	Acetylene	Ethylene	Ethane
0	0.0	0.0	0	0.00	0.00
0	16073.2	12847.0	0	5.00E-06	3.92E-06
0	31944.0	44426.9	0	1.00E-05	1.36E-05
0	18453.8	325600.4	0	5.76E-06	9.93E-05
0	15614.6	359585.1	0	4.87E-06	1.10E-04

ตารางที่ ก.18 การวิเคราะห์ผลการทดลองการวัดประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการสลายสาร 1,2-DCA ด้วย GC ที่อัตราส่วนโมลอิเล็กตรอนของอนุภาคเหล็กประจุศูนย์/อนุภาคทองแดงที่ 7:1 ตัวอย่างที่ 1

7Fe1Cu Bimetallic Catalyst_8600 mg/L (1)									
Concentration			Total		Remaining 1,2-Dichloroethane				
Acetylene	Ethylene	Ethane	moles	mole/L	moles	moles/L	Ct/C0	t	ln(Ct/C0)
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0004	0.0869	1.0000	0.0	0.0000
0	1.07E-3	1.11E-3	1.09E-5	2.19E-3	0.0004	0.0847	0.9749	1.5	-0.0255
0	2.40E-3	3.20E-3	2.80E-5	5.60E-3	0.0004	0.0813	0.9355	3.0	-0.0666
0	1.31E-3	2.42E-2	1.27E-4	2.55E-2	0.0003	0.0614	0.7068	28.0	-0.3470
0	1.16E-3	2.34E-2	1.23E-4	2.45E-2	0.0003	0.0624	0.7179	48.0	-0.3315

ตารางที่ ก.19 การวิเคราะห์ผลการทดลองการวัดประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการสลายสาร 1,2-DCA ด้วย GC ที่อัตราส่วนโมลอิเล็กตรอนของอนุภาคเหล็กประจุศูนย์/อนุภาคทองแดงที่ 7:1 ตัวอย่างที่ 2

7Fe1Cu Bimetallic Catalyst_8600 mg/L (2)									
Concentration			Total		Remaining 1,2-Dichloroethane				
Acetylene	Ethylene	Ethane	moles	mole/L	moles	moles/L	Ct/CO	t	ln(Ct/CO)
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0004	0.0869	1	0.0	0.0000
0	1.00E-3	7.84E-4	8.93E-6	1.79E-3	0.0004	0.0851	0.9794	1.5	-0.0208
0	1.99E-3	2.71E-3	2.35E-5	4.70E-3	0.0004	0.0822	0.9459	3.0	-0.0556
0	1.15E-3	1.99E-2	1.05E-4	2.10E-2	0.0003	0.0659	0.7582	28.0	-0.2768
0	9.75E-4	2.19E-2	1.15E-4	2.29E-2	0.0003	0.0640	0.7364	48.0	-0.3060

ตารางที่ ก.20 การวิเคราะห์ผลการทดลองค่าเฉลี่ยที่อัตราส่วนโมลอิเล็กตรอนของอนุภาคเหล็กประจุศูนย์/อนุภาคทองแดงที่ 7:1 ตัวอย่างที่ 1 และ 2

Average Data (1), (2)										
Moles			Concentration (mg/L)			Total		Remaining 1,2-Dichloroethane		
Acetylene	Ethylene	Ethane	Acetylene	Ethylene	Ethane	Moies	Mole/L	Ct/CO	t	ln(Ct/CO)
0	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.000	1.0000	0.0	0.0000
0	5.19E-6	4.74E-6	0	1.04E-3	9.48E-4	9.93E-6	0.0020	0.9771	1.5	-0.0231
0	1.10E-5	1.48E-5	0	2.20E-3	2.95E-3	2.58E-5	0.0052	0.9407	3.0	-0.0611
0	6.15E-6	1.10E-4	0	1.23E-3	2.20E-2	1.16E-4	0.0232	0.7325	28.0	-0.3113
0	5.35E-6	1.13E-4	0	1.07E-3	2.26E-2	1.19E-4	0.0237	0.7271	48.0	-0.3187

ตารางที่ ก.21 ผลการทดลองการวัดประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการสลายสาร 1,2-DCA ด้วย GC ที่อัตราส่วนโมลอิเล็กตรอนของอนุภาคเหล็กประจุศูนย์/อนุภาคทองแดงที่ 9:1 ตัวอย่างที่ 1

9Fe1Cu Bimetallic Catalyst_8600 mg/L (1)					
1,2-Dichloroethane (Peak area)			Moles		
Acetylene	Ethylene	Ethane	Acetylene	Ethylene	Ethane
0	0.0	0.0	0	0.00	0.00
0	17934.9	68396.7	0	5.60E-06	2.09E-05
0	14718.9	114633.3	0	4.59E-06	3.50E-05
0	3579.6	342397.2	0	1.12E-06	1.04E-04
0	7105.0	574667.3	0	2.22E-06	1.75E-04

ตารางที่ ก.22 ผลการทดลองการวัดประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการสลายสาร 1,2-DCA ด้วย GC ที่อัตราส่วนโมลอิเล็กตรอนของอนุภาคเหล็กประจุศูนย์/อนุภาคทองแดงที่ 9:1 ตัวอย่างที่ 2

9Fe1Cu Bimetallic Catalyst_8600 mg/L (2)					
1,2-Dichloroethane (Peak area)			Moles		
Acetylene	Ethylene	Ethane	Acetylene	Ethylene	Ethane
0	0.0	0.0	0	0.00	0.00
0	10871.7	25732.7	0	3.39E-06	7.85E-06
0	9845.8	65157.0	0	3.07E-06	2.00E-05
0	9592.5	337385.1	0	3.00E-06	1.03E-04
0	15024.0	388047.1	0	4.69E-06	1.18E-04

ตารางที่ ก.23 การวิเคราะห์ผลการทดลองการวัดประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการสลายสาร 1,2-DCA ด้วย GC ที่อัตราส่วนโมลอิเล็กตรอนของอนุภาคเหล็กประจุศูนย์/อนุภาคทองแดงที่ 9:1 ตัวอย่างที่ 1

9Fe1Cu Bimetallic Catalyst_8600 mg/L (1)									
Concentration			Total		Remaining 1,2-Dichloroethane				
Acetylene	Ethylene	Ethane	moles	mole/L	moles	moles/L	Ct/C0	t	ln(Ct/C0)
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0004	0.0869	1.0000	0.0	0.0000
0	1.12E-03	4.17E-3	2.65E-5	5.29E-3	0.0004	0.0816	0.9391	1.5	-0.0628
0	9.19E-04	6.99E-3	3.96E-5	7.91E-3	0.0004	0.0790	0.9090	3.0	-0.0955
0	2.23E-04	2.09E-2	1.06E-4	2.11E-2	0.0003	0.0658	0.7571	29.0	-0.2783
0	4.43E-04	3.51E-2	1.77E-4	3.55E-2	0.0003	0.0514	0.5915	49.0	-0.5251

ตารางที่ ก.24 การวิเคราะห์ผลการทดลองการวัดประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการสลายสาร 1,2-DCA ด้วย GC ที่อัตราส่วนโมลอิเล็กตรอนของอนุภาคเหล็กประจุศูนย์/อนุภาคทองแดงที่ 9:1 ตัวอย่างที่ 2

9Fe1Cu Bimetallic Catalyst_8600 mg/L (2)					9Fe1Cu Bimetallic Catalyst_8600 mg/L (2)				
Concentration (mg/L)			Total		Remaining 1,2-Dichloroethane				
Acetylene	Ethylene	Ethane	moles	mole/L	moles	moles/L	Ct/C0	t	ln(Ct/C0)
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0004	0.0869	1.0000	0.0	0.0000
0	6.78E-04	1.57E-3	1.12E-5	2.25E-3	0.0004	0.0847	0.9741	1.5	-0.0262
0	6.14E-04	3.97E-3	2.29E-5	4.59E-3	0.0004	0.0823	0.9472	3.0	-0.0543
0	5.99E-04	2.06E-2	1.06E-4	2.12E-2	0.0003	0.0657	0.7563	29.0	-0.2793
0	9.38E-04	2.37E-2	1.23E-4	2.46E-2	0.0003	0.0623	0.7168	49.0	-0.3329

ตารางที่ ก.25 การวิเคราะห์ผลการทดลองค่าเฉลี่ยที่อัตราส่วนโมลเอทิลีนเล็กน้อยของอนุภาคเหล็ก  
ประจุศูนย์/อนุภาคทองแดงที่ 9:1 ตัวอย่างที่ 1 และ 2

Average Data (1), (2)										
Moles			Concentration (mg/L)			Total		Remaining 1,2-Dichloroethane		
Acetylene	Ethylene	Ethane	Acetylene	Ethylene	Ethane	Moles	Conc	Ct/C0	t	ln(Ct/C0)
0	0.00	0.00	0	0.00	0.000	0.00	0.0000	1.0000	0.0	0.0000
0	4.49E-6	1.4E-5	0	8.99E-4	2.87E-3	1.88E-5	0.0038	0.9566	1.5	-0.0443
0	3.83E-6	2.7E-5	0	7.67E-4	5.48E-3	3.13E-5	0.0063	0.9281	3.0	-0.0746
0	2.06E-6	1.0E-4	0	4.11E-4	2.07E-2	1.06E-4	0.0211	0.7567	29.0	-0.2788

ตารางที่ ก.26 จำนวนการคำนวณที่อัตราปฏิกิริยาอันดับศูนย์ ที่อัตราส่วน 3Fe1Cu

zero order			
C	C <sub>0</sub>	C <sub>0</sub> -C	t
0.087	0.087	0.000	0.000
0.086	0.087	0.001	1.000
0.086	0.087	0.001	2.500
0.081	0.087	0.006	28.500
0.066	0.087	0.021	47.500

ตารางที่ ก.26 จำนวนการคำนวณที่อัตราปฏิกิริยาอันดับสอง ที่อัตราส่วน 3Fe1Cu

2nd order			
1/C	1/C <sub>0</sub>	1/C - 1/C <sub>0</sub>	t
11.507	11.507	0.000	0.000
11.587	11.507	0.080	1.000
11.630	11.507	0.123	2.500
12.355	11.507	0.848	28.500
15.233	11.507	3.726	47.500

ตารางที่ ก.26 คำนวณการค่าคงที่อัตราปฏิกิริยาอันดับสาม ที่อัตราส่วน 3Fe1Cu

3rd order			
$1/C^2$	$1/C_0^2$	$(1/2)(1/C^2 - 1/C_0^2)$	t
132.411	132.411	0.000	0.000
134.268	132.411	0.929	1.000
135.259	132.411	1.424	2.500
152.635	132.411	10.112	28.500
232.055	132.411	49.822	47.500







ภาคผนวก ข  
การคำนวณ

มหาวิทยาลัยพระนคร

### การคำนวณ ข.1 คำนวณการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่

คอปเปอร์ (II) คลอไรด์ที่ต้องใช้กำหนดทองแดง 5 กรัม/ลิตร

จากปริมาตรรวม 5 มิลลิตร

$$g_{CuCl_2} = g_{Cu} \frac{Mw_{CuCl_2}}{Mw_{Cu}}$$

$$g_{CuCl_2} = \left( 5g/l \cdot \frac{l}{5 \times 10^{-3}l} \right) \frac{134.45}{63.55}$$

$$g_{CuCl_2} = 0.053g/5ml$$

ความเข้มข้นของอนุภาคเหล็กประจุศูนย์ที่ต้องใช้ที่อัตราส่วน 3:1

$$\frac{n_{NZVI}}{3} = \frac{n_{CuCl_2}}{1}$$

$$\frac{1}{3} \left( \frac{g_{NZVI}}{Mw_{NZVI}} \right) = \left( \frac{g_{CuCl_2}}{Mw_{CuCl_2}} \right)$$

$$g_{NZVI} = 3 \left( \frac{g_{CuCl_2} \cdot Mw_{NZVI}}{Mw_{CuCl_2}} \right)$$

$$g_{NZVI} = 3 \left( \frac{0.053g/5ml \cdot 55.845g/mol}{134.45g/mol} \right)$$

$$g_{NZVI} = 0.066g/5ml = 13.18g/l$$

ความเข้มข้นของอนุภาคเหล็กประจุศูนย์ที่ต้องใช้ที่อัตราส่วน 3:1

$$V_{NZVI_{required}} = \frac{g_{NZVI}}{g_{NZVI_{stock}}} \cdot (5ml)$$

$$V_{NZVI_{required}} = \frac{13.18g/l}{246.2g/l} \cdot (5ml)$$

$$V_{NZVI_{required}} = 0.268ml$$

## การคำนวณ ข.2 คำนวณการหาความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์รวมที่เกิดในการทดลอง

การคำนวณเปลี่ยนค่า Peak Area เป็นความเข้มข้นในแก๊ส

การเปลี่ยนค่า Peak Area เป็นความเข้มข้นในแก๊ส โดย calibration factor =  $2 \times 10^{-12}$  mol/Peak area ทั้งอะซิทีลีน เอทิลีนและอีเทน แล้วดึงตัวอย่างมา 0.0001 ลิตร จาก 0.015 ลิตร จากตัวอย่างตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคู่ 3Fe/Cu ตัวอย่างที่ 1

- สำหรับอะซิทีลีน

$$\text{mol}_{\text{Acetylene, air}} = \text{Calibration Factor} \cdot \text{Peak Area} \cdot \left( \frac{V_{\text{gas space}}}{V_{\text{gas sampling}}} \right)$$

$$\text{mol}_{\text{Acetylene, air}} = 2 \times 10^{-12} \text{ mol / peak area} \cdot 0 \text{ peak area} \cdot \left( \frac{0.015 \text{ l}}{0.0001 \text{ l}} \right)$$

$$\text{mol}_{\text{Acetylene, air}} = 0 \text{ mol}$$

- สำหรับเอทิลีน

$$\text{mol}_{\text{Acetylene, air}} = \text{Calibration Factor} \cdot \text{Peak Area} \cdot \left( \frac{V_{\text{gas space}}}{V_{\text{gas sampling}}} \right)$$

$$\text{mol}_{\text{Acetylene, air}} = 2 \times 10^{-12} \text{ mol / peak area} \cdot 194385.6 \text{ peak area} \cdot \left( \frac{0.015 \text{ l}}{0.0001 \text{ l}} \right)$$

$$\text{mol}_{\text{Acetylene, air}} = 5.83 \times 10^{-5} \text{ mol}$$

- สำหรับอีเทน

$$\text{mol}_{\text{Acetylene, air}} = \text{Calibration Factor} \cdot \text{Peak Area} \cdot \left( \frac{V_{\text{gas space}}}{V_{\text{gas sampling}}} \right)$$

$$\text{mol}_{\text{Acetylene, air}} = 2 \times 10^{-12} \text{ mol / peak area} \cdot 149619.3 \text{ peak area} \cdot \left( \frac{0.015 \text{ l}}{0.0001 \text{ l}} \right)$$

$$\text{mol}_{\text{Acetylene, air}} = 4.49 \times 10^{-5} \text{ mol}$$

การคำนวณหาโมลในสารละลายโดยใช้กฎของเฮนรี

$$\text{(Henry's Law)} \quad H = \frac{C_{air}}{C_{solution}}$$

โดย  $C_{air}$  คือ ความเข้มข้นของสารในแก๊สและ  $C_{solution}$  คือ ความเข้มข้นของสารในของเหลว

- สำหรับอะซิทีลีน

$$\begin{aligned} mol_{Acetylene, solution} &= \frac{C_{Acetylene, air} \cdot V_{solution}}{H_{Acetylene}} \\ mol_{Acetylene, solution} &= \left( \frac{0 \text{ mol}}{0.015 \text{ l}} \right) \left( \frac{0.005 \text{ l}}{1} \right) \\ mol_{Acetylene, solution} &= 0 \text{ mol} \end{aligned}$$

- สำหรับเอทิลีน

$$\begin{aligned} mol_{Ethylene, solution} &= \frac{C_{Ethylene, air} \cdot V_{solution}}{H_{Ethylene}} \\ mol_{Ethylene, solution} &= \left( \frac{5.83 \times 10^{-5} \text{ mol}}{0.015 \text{ l}} \right) \left( \frac{0.005 \text{ l}}{8.3} \right) \\ mol_{Ethylene, solution} &= 2.34 \times 10^{-6} \text{ mol} \end{aligned}$$

- สำหรับอีเทน

$$\begin{aligned} mol_{Ethane, solution} &= \frac{C_{Ethane, air} \cdot V_{solution}}{H_{Ethane}} \\ mol_{Ethane, solution} &= \left( \frac{4.49 \times 10^{-5} \text{ mol}}{0.015 \text{ l}} \right) \left( \frac{0.005 \text{ l}}{20} \right) \\ mol_{Ethane, solution} &= 7.48 \times 10^{-7} \text{ mol} \end{aligned}$$

การคำนวณหาจำนวนความเข้มข้นรวมจากโมลรวมในระบบได้จากโมลในอากาศ+โมลในสารละลาย

$$\begin{aligned} mol_{Total} &= mol_{Total, air} + mol_{Total, solution} \\ mol_{Total} &= (0 + 5.83 \times 10^{-5} + 4.49 \times 10^{-5} \text{ mol}) + (0 + 2.34 \times 10^{-6} + 7.48 \times 10^{-7} \text{ mol}) \\ mol_{Total} &= 0.000106 \text{ mol} \\ C_{Total} &= \frac{0.000106 \text{ mol}}{0.005 \text{ l}} = 0.0212 \text{ mol / l} \end{aligned}$$

การคำนวณ ข.3 คำนวณการค่าคงที่อัตราปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

$$-\frac{d[C_{1,2DCA}]}{dt} = k[C_{1,2DCA}]$$

$$\ln \frac{[C_{1,2DCA,t(hr)}]}{[C_{1,2DCA,0(hr)}]} = -kt$$

โดยที่  $t = 0$ ;  $[C_{1,2DCA,t(hr)}] = [C_{1,2DCA,0(hr)}]$

และสร้างกราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงโดยแกน x คือ เวลา (hr) และ แกน y

คือ  $\ln \frac{[C_{1,2DCA,t(hr)}]}{[C_{1,2DCA,0(hr)}]}$  ความชันที่ได้ คือ ค่าคงที่อัตรา

