

การสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรด้วยสารสกัดใบยูคาลิปตัส
และคลื่นอัลตราโซนิกสำหรับการบำบัดสารไกลโฟเซตในดิน
โดยใช้ปฏิกิริยาเสมือนเฟนตัน



นางสาวอนุสรณ์ แก้วการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมระบบอุตสาหกรรมและสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2562

**SYNTHESIS OF IRON NANO-PARTICLES BY EUCALYPTUS
LEAF EXTRACT AND ULTRASONIC WAVE IRRADIATION
FOR GLYPHOSATE TREATMENT IN SOIL
USING FENTON-LIKE REACTION**



Anusara Kaeokan

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Industrial Systems and Environmental Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2019

การสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรด้วยสารสกัดใบยูคาลิปตัสและคลื่นอัลตราโซนิก
สำหรับการบำบัดสารไกลโฟเซตในดินโดยใช้ปฏิกิริยาเสมือนเฟ้นตัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(อ. ดร. วุฒิ ด้านกิตติกุล)

ประธานกรรมการ



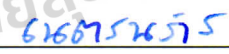
(อ. ดร. อภิชน วัชเรนทร์วงศ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ศ. ดร. พวงรัตน์ ขจิตวิทยานุกุล)

กรรมการ



(รศ. ดร. เนตรนภิส ตันเต็มทรัพย์)

กรรมการ



(รศ. ร.อ. ดร. กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ดร. พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

อนุสรณ์ แก้วการ : การสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรด้วยสารสกัดใบยูคาลิปตัสและคลื่นอัลตราโซนิกสำหรับการบำบัดสารไกลโฟเซตในดินโดยใช้ปฏิกิริยาเสมือนเฟนต์ัน (SYNTHESIS OF IRON NANO-PARTICLES BY EUCALYPTUS LEAF EXTRACT AND ULTRASONIC WAVE IRRADIATION FOR GLYPHOSATE TREATMENT IN SOIL USING FENTON-LIKE REACTION) อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.อภิชน วัชรินทร์วงศ์, 123 หน้า.

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรด้วยสารสกัดใบยูคาลิปตัสและคลื่นอัลตราโซนิกเพื่อนำมาใช้ในการบำบัดสารไกลโฟเซตในดินโดยใช้ปฏิกิริยาเสมือนเฟนต์ัน การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ 1) การศึกษาคุณลักษณะสมบัติของเหล็กขนาดนาโนเมตรที่สังเคราะห์ขึ้น และ 2) การบำบัดสารไกลโฟเซตโดยใช้เหล็กขนาดนาโนเมตรในกระบวนการเสมือนเฟนต์ัน ภายหลังจากการสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรได้ทำการวิเคราะห์คุณลักษณะสมบัติด้วยเทคนิคต่างๆ ได้แก่ XPS BET XAS XRD FTIR FESEM TEM และ pH_{pzc} เหล็กขนาดนาโนเมตรที่สังเคราะห์ด้วยสารสกัดใบยูคาลิปตัสร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิกกำลัง 1000 วัตต์ ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ และใช้ความเข้มข้นของสารเหล็กเฟอร์รัส 0.2 โมลาร์ (Fe-NPs-EL-UL 1000 W) มีปริมาณเหล็กสูงที่สุด 2.61 เปอร์เซ็นต์ โดยเป็นผลจากการพิสูจน์ด้วยเทคนิค XPS ตัวอย่างนี้ถูกเลือกสำหรับใช้ในการบำบัดสารไกลโฟเซต จากการตรวจสอบพื้นที่ผิวจำเพาะมีค่า 26.805 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่าการไม่ใช้คลื่นอัลตราโซนิก เหล็กขนาดนาโนเมตรที่สังเคราะห์ขึ้นมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 60 นาโนเมตร จากการตรวจสอบโดยใช้เทคนิค FESEM และ TEM นอกจากนี้ FTIR บ่งชี้ว่าพบสาร polyphenol ซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์คาร์บอนอยู่บนพื้นผิวของเหล็กขนาดนาโนเมตร และผลจาก XAS ได้แสดงว่าเหล็กมีลักษณะเป็นสารประกอบเชิงซ้อน Fe^{3+} -polyphenol complexes การศึกษาการบำบัดสารไกลโฟเซตได้แบ่งออกเป็น การบำบัดสารไกลโฟเซตในน้ำ และการบำบัดสารไกลโฟเซตในดินในกระบวนการเสมือนเฟนต์ัน ผลการศึกษาพบว่าในการบำบัดสารไกลโฟเซตโดยการใช้เหล็กร่วมกับโซเดียมเปอร์ซัลเฟต (Fe 1 g/L + SPS 5 mM + GLY 20 ppm + pH 7) มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุดภายใน 60 นาที คิดเป็น 82.64 เปอร์เซ็นต์ อนุโมลอิสระเปอร์ซัลเฟตมีบทบาทสำคัญในการกำจัดไกลโฟเซต ส่วนผลของการบำบัดสารไกลโฟเซตในดินอิมิตัวด้วยน้ำ พบว่ามีประสิทธิภาพทั้งหมดในการบำบัด 74.97 เปอร์เซ็นต์

ANUSARA KAEOKAN : SYNTHESIS OF IRON NANO-PARTICLES
BY EUCALYPTUS LEAF EXTRACT AND ULTRASONIC WAVE
IRRADIATION FOR GLYPHOSATE TREATMENT IN SOIL
USING FENTON-LIKE REACTION. THESIS ADVISOR :
APICHON WATCHARENWONG, Ph.D., 123 PP.

GLYPHOSATE/ EUCALYPTUS LEAF EXTRACT/ ULTRASONIC WAVE/ IRON
NANO-PARTICLES

This research was to study the synthesis of iron nanoparticles by eucalyptus leaf extract and ultrasonic wave radiation for glyphosate treatment in soil using a Fenton-like reaction. The experiment was divided into two parts as 1) the characterization study of the synthesized iron nanoparticles (Fe-NPs) and 2) the treatment of glyphosate using iron nanoparticle in the Fenton-like process. After the synthesis, the characteristic of iron nanoparticles was investigated using XPS, BET, XAS XRD, FTIR, FESEM, TEM, and pH_{pzc} . Iron nanoparticles synthesized using eucalyptus leaf extract with ultrasonic waves 1000 W 20 kHz and using a 0.2 molar of ferrous iron (Fe-NPs-EL-UL 1000 W) had the highest iron content up to 2.61%, as proved by XPS. This sample was selected for the treatment of glyphosate. The specific surface area was 26.805 square meters per gram, which is higher than without using ultrasonic waves radiation. The synthesized iron nanoparticle had an average diameter of approximately 60 nm, as proved by FESEM and TEM. Besides, FTIR indicated the polyphenol, which is an organic carbon compound on the surface of the iron nanoparticles. XAS showed that iron was Fe^{3+} -polyphenol complexes. The study of glyphosate treatment was divided into aqueous glyphosate treatment and soil glyphosate treatment in the Fenton-like process. The results found that

the combination of iron nanoparticles and SPS for the treatment of glyphosate (Fe 1 g / L + SPS 5 mM + GLY 20 ppm + pH 7) had the highest glyphosate removal efficiency within 60 minutes, accounting for 82.64%. The persulfate free radical plays a crucial role in glyphosate removal. The treatment of glyphosate in saturated soil showed a total efficiency of 74.97%.



School of Environmental Engineering

Academic Year 2019

Student's Signature อนงค์ แก้วมณี

Advisor's Signature อ. 965

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่างๆ ได้แก่

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.อภิชน วัชรินทร์วงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาดูแลเอาใจใส่ และให้ความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำ ตลอดจนแนวทางการแก้ไขปัญหาอันเป็นประโยชน์ ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.วุฒิ ด้านกิตติคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.เนตรนภิส ดันเต็มทรัพย์ และศาสตราจารย์ ดร.พวงรัตน์ จิตวิษยานุกูล ที่สละเวลามาเป็นกรรมการสอบโครงร่างวิทยานิพนธ์ และสอบป้องกันวิทยานิพนธ์ ให้ความกรุณาแนะนำในการแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและบุคลากรทุกท่าน ที่คอยให้คำแนะนำปรึกษา ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ มาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณทุนกิตติบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่อนุเคราะห์ทุนสนับสนุนการศึกษาทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และเจ้าหน้าที่ส่วนอาคารสถานที่ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และเจ้าหน้าที่สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือด้านการดำเนินการวิจัยเป็นอย่างดี และขอขอบคุณพี่น้องบัณฑิตทุกท่านที่คอยให้คำปรึกษาด้านวิชาการ ให้กำลังใจและความช่วยเหลือด้านต่างๆ ในการทำวิจัยมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่อบรมเลี้ยงดู และส่งเสริมการศึกษามาโดยตลอด และขอบคุณทุกๆ คนในครอบครัวที่คอยห่วงใย ดูแล และให้กำลังใจเสมอมา จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา

อนุสรณ์ แก้วการ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	๓
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	4
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	4
1.4 สมมติฐานงานวิจัย.....	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
2 ปรัชญาวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 สารก้ำจัดค้ตฐพีช.....	6
2.2 ไกลโฟเซต.....	11
2.2.1 คุณสมบัติทางเคมี.....	11
2.2.2 การนำไปใช้ในทางการเกษตร.....	12
2.2.3 กลไกการกำจัดวัชพีชของสารไกลโฟเซต.....	12
2.2.4 ความเป็นพิษสารไกลโฟเซต.....	13
2.2.5 ค้ามาตรฐานการปนเปื้อนของสารไกลโฟเซต ในสิ่งแวดล้อม.....	13

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3 การเคลื่อนย้ายสารไกลโฟเซตปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม.....	13
2.3.1 ความสัมพันธ์ของสารกำจัดวัชพืชในดินและกลไกการดูดซับ.....	17
2.3.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับสารกำจัดวัชพืชในดิน.....	17
2.3.3 ผลกระทบจากการใช้สารไกลโฟเซตจากการทำการเกษตร.....	19
2.3.3.1 ผลกระทบของสารไกลโฟเซตต่อพืช.....	19
2.3.3.2 ผลกระทบของสารไกลโฟเซตต่อสิ่งแวดล้อม.....	20
2.3.3.3 ผลกระทบของสารไกลโฟเซตต่อสิ่งมีชีวิต.....	21
2.4 การฟื้นฟูดินทางเคมีโดยใช้วิธีการออกซิเดชันทางเคมี.....	22
2.4.1 ปฏิกิริยาเฟนตัน (Fenton).....	23
2.4.2 ปฏิกิริยาเสมือนเฟนตัน (Fenton-Like).....	24
2.4.3 กลไกการย่อยสลายของไกลโฟเซตด้วยอนุมูลอิสระ.....	27
2.5 การสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตร.....	29
2.5.1 การสังเคราะห์เคมีสีเขียว.....	29
2.5.2 ยูคาลิปตัส.....	30
2.5.3 การสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรด้วยใบยูคาลิปตัส.....	31
2.5.4 คลื่นอัลตราโซนิก.....	32
2.5.4.1 หลักการของคลื่นอัลตราโซนิก.....	33
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	36
2.6.1 การสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตร.....	36
2.6.2 การบำบัดสารกำจัดศัตรูพืชด้วยอนุมูลอิสระ.....	40
3 การศึกษาดำเนินงาน.....	43
3.1 สารเคมี เครื่องมือ และอุปกรณ์.....	45
3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....	45
3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	45

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 การสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตร (Fe-NPs).....	45
3.2.1 การสังเคราะห์สารสกัดจากใบยูคาลิปตัส.....	46
3.2.2 การสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรจากสารสกัด จากใบยูคาลิปตัส.....	47
3.2.3 การสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรจากสารสกัด ใบยูคาลิปตัสร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิก.....	48
3.2.4 การวิเคราะห์คุณลักษณะสมบัติของเหล็กขนาดนาโนเมตร.....	49
3.3 การบำบัดสารไกลโฟเซต.....	49
3.3.1 การเตรียมสารละลายไกลโฟเซต.....	49
3.3.2 การศึกษาปัจจัยในการบำบัดสารไกลโฟเซต.....	50
3.3.2.1 การศึกษาปัจจัยในการบำบัดสารไกลโฟเซตในน้ำ.....	50
3.3.2.2 การบำบัดสารไกลโฟเซตในดินชุ่มน้ำ.....	58
3.4 การวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของสารไกลโฟเซต.....	59
4 ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	61
4.1 ผลการศึกษาลักษณะสมบัติของเหล็กขนาดนาโนเมตร (Fe-NPs).....	61
4.1.1 เทคนิค X-Ray Photoemission spectroscopy (XPS).....	61
4.1.2 เทคนิค Brunauer-Emmet-Teller (BET).....	65
4.1.3 เทคนิค Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM).....	67
4.1.4 เทคนิค Transmission electron microscope (TEM).....	69
4.1.5 เทคนิค X-Ray Diffractometer (XRD).....	70
4.1.6 เทคนิค X-ray absorption spectroscopy (XAS).....	71
4.1.7 เทคนิค Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR).....	73
4.1.8 Point zero charge ด้วยเทคนิค salt addition.....	75

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 ผลการศึกษาการบำบัดสารไกลโฟเซต.....	77
4.2.1 ผลการศึกษาปัจจัยในการบำบัดสารไกลโฟเซตในน้ำ ด้วยปฏิกิริยาเสมือนเฟนตัน.....	78
4.2.1.1 ผลของการใช้เหล็ก สาร โซเดียมเปอร์ซัลเฟต และเหล็กร่วมกับสาร โซเดียมเปอร์ซัลเฟตต่อ การบำบัดสารไกลโฟเซต.....	78
4.2.1.2 ผลของความเข้มข้นสาร โซเดียมเปอร์ซัลเฟต ต่อการบำบัดสารไกลโฟเซตด้วยปฏิกิริยา เสมือนเฟนตัน.....	81
4.2.1.3 ผลของความเข้มข้นเหล็กต่อการบำบัดสาร ไกลโฟเซตด้วยปฏิกิริยาเสมือนเฟนตัน.....	83
4.2.1.4 ผลของความเข้มข้นสารไกลโฟเซตต่อการบำบัด สารไกลโฟเซตด้วยปฏิกิริยาเสมือนเฟนตัน.....	85
4.2.1.5 ผลของสภาวะความเป็นกรดต่อการบำบัด สารไกลโฟเซตด้วยปฏิกิริยาเสมือนเฟนตัน.....	86
4.2.1.6 ผลของอนุมูลอิสระต่อการบำบัดสารไกลโฟเซต ด้วยปฏิกิริยา.....	88
4.2.2 ผลของการบำบัดสารไกลโฟเซตในดิน.....	89
4.2.2.1 คุณลักษณะของดิน.....	89
4.2.2.2 ผลการบำบัดสารไกลโฟเซตในดินชุ่มน้ำ.....	90
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	96
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	96
5.1.1 สรุปการศึกษาลักษณะสมบัติของเหล็กอนุภาคนาโนเมตร.....	96
5.1.2 สรุปการศึกษาการบำบัดสารไกลโฟเซต.....	97

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.1.2.1	97
5.1.2.2	99
5.2	100
เอกสารอ้างอิง	101
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก	108
ภาคผนวก ข	113
ภาคผนวก ค	115
ภาคผนวก ง	117
ภาคผนวก จ	120
ประวัติผู้เขียน	123

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ปริมาณการนำเข้าวัตถุอันตรายทางการเกษตรของประเทศไทย พ.ศ. 2555-2560	8
2.2 ปริมาณการนำเข้าสารกำจัดศัตรูพืชที่มีการนำเข้าสูงสุด ในปี พ.ศ. 2550-2560	32
2.3 ผลของความถี่ต่างๆ ของคลื่นเสียงอัลตราโซนิก	30
2.4 การสังเคราะห์เหล็กประจุศูนย์ที่ได้จากพืชชนิดต่างๆ	38
2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการสังเคราะห์เหล็กประจุศูนย์ขนาดนาโนเมตรจาก ไบยูกาลิปตัส	39
2.6 การบำบัดสารไกลโฟเซตด้วยอนุภาคลิธระ	42
3.1 การวิเคราะห์สารไกลโฟเซตโดยเทคนิค Liquid Chromatograph-Mass Spectrometer	60
4.1 ค่า Atomic Concentration ของเหล็กอนุภาคนาโนเมตร (Fe-NPs)	62
4.2 สรุปลักษณะสมบัติทางเคมีและกายภาพของเหล็กขนาดนาโนเมตร	76
4.3 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของดิน	89
4.4 สรุปลผลการบำบัดสารไกลโฟเซต	94
ก.1 ผลของการใช้เหล็ก SPS และเหล็กร่วมกับ SPS ในการบำบัดสารไกลโฟเซต	109
ก.2 ผลของความเข้มข้นของสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟต ในการบำบัดสารไกลโฟเซต	109
ก.3 ผลของปริมาณเหล็กในการบำบัดสารไกลโฟเซต	110
ก.4 ผลของความเข้มข้นไกลโฟเซต (GLY) ในการบำบัดสารไกลโฟเซต	110
ก.5 ผลของสภาวะ pH ในการบำบัดสารไกลโฟเซต	111
ก.6 ผลของอนุภาคลิธระในการบำบัดสารไกลโฟเซต	111
ก.7 ผลของการบำบัดสารไกลโฟเซตในดิน	112
ข.1 ผลของสภาวะความเป็นกรดค้างหลังการเติม โซเดียมเปอร์ซัลเฟต	114

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	การเกิดความคงตัวของสารกำจัดวัชพืชในดิน.....	15
2.2	รูปแบบของสารไกลโฟเซตเมื่อสภาวะความเป็นกรดต่างแตกต่างกัน.....	16
2.3	กระบวนการการสลายตัวในสิ่งแวดล้อมของสารกำจัดวัชพืช.....	16
2.4	กลไกการย่อยสลายสารไกลโฟเซต.....	28
2.5	เส้นทางการย่อยสลายของไกลโฟเซตโดยการออกซิไดซ์ของอนุมูลอิสระ.....	28
2.6	ไบยูคาลิปตัส.....	29
2.7	การเกิด Iron polyphenol complexes.....	31
2.8	การเกิดฟองอากาศในตัวกลางเนื่องจากคลื่นอัลตราโซนิก.....	34
2.9	การเกิดแรงดันของของเหลวเนื่องจากการแตกของฟองอากาศขนาดเล็ก.....	35
3.1	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	44
3.2	วิธีการสังเคราะห์สารสกัดจากไบยูคาลิปตัส.....	46
3.3	วิธีการสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรจากสารสกัดจากไบยูคาลิปตัส.....	47
3.4	วิธีการสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรจากสารสกัดไบยูคาลิปตัสร่วมกับ คลื่นอัลตราโซนิก.....	48
3.5	วิธีเตรียมสารละลายไกลโฟเซต.....	49
3.6	วิธีการบำบัดสารไกลโฟเซตด้วยเหล็กขนาดนาโนเมตร.....	51
3.7	วิธีการบำบัดสารไกลโฟเซตด้วยสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟต.....	52
3.8	วิธีการศึกษาความเข้มข้นของสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟตที่มีผลต่อการบำบัด สารไกลโฟเซตด้วยปฏิกิริยาเสมือนเฟนต์ัน.....	53
3.9	วิธีการศึกษาความเข้มข้นของเหล็กที่มีผลต่อการบำบัดสารไกลโฟเซต ด้วยปฏิกิริยาเสมือนเฟนต์ัน.....	54
3.10	วิธีการศึกษาความเข้มข้นของสารไกลโฟเซตเริ่มต้นที่มีผลต่อการบำบัด สารไกลโฟเซตด้วยปฏิกิริยาเสมือนเฟนต์ัน.....	55

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.11	วิธีการศึกษาสภาวะความเป็นกรดต่างเริ่มต้นที่มีผลต่อการบำบัด สารไกลโฟเซตด้วยปฏิกิริยาเสมือนเฟนตัน 56
3.12	วิธีการศึกษาผลของอนุมูลอิสระต่อการบำบัดสารไกลโฟเซตด้วยปฏิกิริยา เสมือนเฟนตัน 57
3.13	แบบจำลองการบำบัดสารไกลโฟเซตในรูปแบบดินชุ่มน้ำ 58
3.14	วิธีการบำบัดสารไกลโฟเซตในดินชุ่มน้ำ 59
4.1	รูปแบบ XPS spectrum ของ Fe-NPs-EL และ Fe-NPs-EL-UL 1000 64
4.2	ภาพถ่าย FESEM ของ Fe-NPs-EL และ Fe-NPs-EL-UL 1000 W 67
4.3	ภาพถ่าย Transmission electron microscope (TEM) ของ Fe-NPs-EL-UL 1000W 69
4.4	รูปแบบ XRD patterns ของ Fe-NPs-EL และ Fe-NPs-EL-UL 1000 W 70
4.5	รูปแบบ XANES Spectra ของเหล็กขนาดนาโนเมตรเทียบกับเหล็กมาตรฐาน 72
4.6	FTIR bands ของสารสกัดไบโอบิวคาลิปต์ส Fe-NPs-EL และ Fe-NPs-EL-UL 1000 W 74
4.7	ผลของค่าความเป็นกรดต่างที่พื้นผิวประจุเป็นศูนย์ ของ Fe-NPs-EL-UL 1000 W 75
4.8	ผลของการใช้เหล็ก สารโซเดียมเปอร์ซัลเฟตและเหล็กร่วมกับสาร โซเดียม เปอร์ซัลเฟตต่อการบำบัดสาร ไกลโฟเซต 78
4.9	ผลของความเข้มข้นสาร โซเดียมเปอร์ซัลเฟตต่อการบำบัดสาร ไกล โฟเซต ด้วยปฏิกิริยาเสมือนเฟนตัน 81
4.10	ผลของความเข้มข้นของเหล็กต่อการบำบัดสาร ไกล โฟเซต ด้วยปฏิกิริยาเสมือนเฟนตัน 83
4.11	ผลของความเข้มข้นสาร ไกล โฟเซตต่อการบำบัดสาร ไกล โฟเซต ด้วยปฏิกิริยาเสมือนเฟนตัน 85
4.12	ผลของสภาวะความเป็นกรดต่างต่อการบำบัดสาร ไกล โฟเซต ด้วยปฏิกิริยาเสมือนเฟนตัน 86

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13	ผลของอนุมูลอิสระต่อการบำบัดสารไกลโฟเซตด้วยปฏิกิริยาเสมือนเฟนตัน..... 88
4.14	ผลความเข้มข้นของสารไกลโฟเซตในดินเทียบกับเวลา..... 91
4.15	ผลความเข้มข้นของสารไกลโฟเซตในน้ำเหนือผิวดินเทียบกับเวลา..... 91
4.16	มวลของสารไกลโฟเซตในระบบดินชุ่มน้ำ..... 92
ค.1	การสังเคราะห์สารสกัดจากใบยูคาลิปตัส..... 116
ง.1	การสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรจากสารสกัดจากใบยูคาลิปตัส..... 118
ง.2	การสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรจากสารสกัดจากใบยูคาลิปตัส ร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิก..... 119
จ.1	การจำลองการบำบัดสารไกลโฟเซตในน้ำ..... 121
จ.2	การจำลองการบำบัดสารไกลโฟเซตในดินชุ่มน้ำและลักษณะการเก็บตัวอย่าง..... 121
จ.3	การสกัดสารไกลโฟเซตออกจากดิน..... 122
จ.4	การเตรียมดินโดยนำไปอบแห้งและคัคขนาด..... 122

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

GLY	=	สารไกลโฟเซต
SPS	=	สารโซเดียมเปอร์ซัลเฟต
XPS	=	X-Ray Photoemission spectroscopy
XAS	=	X-ray absorption spectroscopy
XRD	=	X-Ray Diffractometer
FTIR	=	Fourier-transform infrared spectroscopy
FESEM	=	Field Emission Scanning Electron Microscope
TEM	=	Transmission electron microscope
BET	=	Brunauer-Emmet-Teller
LC-MS	=	Liquid Chromatograph-Mass Spectrometer
DI	=	Demineral Water
Fe-NPs	=	เหล็กอนุภาคนาโนเมตร
Fe	=	เหล็กอนุภาคนาโนเมตร
TBA	=	Tert-Butyl alcohol
Fe-NPs-EL	=	เหล็กอนุภาคนาโนเมตรที่สังเคราะห์ด้วยสารสกัดใบยูคาลิปตัส
Fe-NPs-EL-UL 1000 W	=	เหล็กอนุภาคนาโนเมตรที่สังเคราะห์ด้วยสารสกัดใบยูคาลิปตัส ร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิกกำลัง 1000 วัตต์
M	=	โมลาร์
nm	=	นาโนเมตร
m ² /g	=	ตารางเมตรต่อกรัม
cmol(+)/kg	=	เซนติโมลของประจุ (+) ต่อกิโลกรัม
CEC	=	ค่าความจุการแลกเปลี่ยนไอออนบวก
OM	=	องค์ประกอบอินทรีย์

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันสารเคมีกำจัดศัตรูพืชทั้งยาฆ่าหญ้าและยาฆ่าแมลงได้เข้ามาเป็นส่วนสำคัญของการทำเกษตรกรรมส่วนใหญ่ โดยเฉพาะยาฆ่าหญ้า เช่น ไกลโฟเซต ซึ่งมีการใช้อย่างแพร่หลายเป็นอันดับ 1 ของประเทศไทย สารไกลโฟเซต หรือที่เรารู้จักกันในชื่อทางการค้าว่า “Roundup” ซึ่งผู้ผลิตรายใหญ่ก็คือบริษัทมอนซานโต โดยสารไกลโฟเซต อยู่ในหมวดของ “ยาฆ่าหญ้า” โดยมีฤทธิ์ดูดซึมและเข้าไปทำลายบริเวณรากของศัตรูพืช เกษตรกรจะใช้สารนี้ฉีดพ่นฆ่าหญ้าในไร่ก่อนที่จะลงมือปลูกผัก พืชทางการเกษตร เช่น กะเพรา โหระพา ถั่วเหลือง หรือมันสำปะหลัง เป็นต้น เนื่องจากไกลโฟเซตมีฤทธิ์ฆ่าหญ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพและรวดเร็วจึงทำให้เป็นที่นิยมในหมู่เกษตรกร สารชนิดนี้สามารถปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม หมายความว่าไม่ใช่เพียงเกษตรกรเท่านั้นที่เสี่ยงต่อการรับสารพิษชนิดนี้ คนทั่วไปตกอยู่ในความเสี่ยงเช่นกัน ซึ่งล่าสุดองค์การสหประชาชาติได้ระบุว่าไกลโฟเซตอาจก่อให้เกิดมะเร็งได้และสามารถผ่านจากมารดาไปสู่ตัวอ่อนในครรภ์ได้ โดยไกลโฟเซตสามารถปนเปื้อนลงสู่ ดิน น้ำ และแหล่งน้ำใต้ดิน โดยเฉพาะดิน ที่สารเคมีชนิดนี้สามารถเข้าจับได้แน่นกับอนุภาคดิน เนื่องจากไกลโฟเซตมีหมู่ฟังก์ชันแบบมีขั้ว 3 หมู่ ซึ่งจะจับกันได้ดีกับดิน ไกลโฟเซตที่อยู่ในดินส่วนใหญ่ (ดินที่ pH 4-8) จะอยู่ในรูป monovalent และ divalent anions ซึ่งจะจับกันได้ดีกับ Al^{3+} และ Fe^{3+} บนผิวของอนุภาคดิน (Borggaard and Gimsing, 2008) ผลคือไกลโฟเซตอยู่ในดินได้นานกว่า 170 วันหรือเป็นเวลากว่า 5 เดือน และมีโอกาสปนเปื้อนออกสู่สิ่งแวดล้อมสูง เนื่องจากไกลโฟเซตเมื่อพ่นลงดินแล้วไม่ได้เสื่อมฤทธิ์ในทันที แม้ว่าสารไกลโฟเซตมีการดูดซับได้ดีในดิน แต่เมื่อมีการใช้สารเคมีต่อเนื่องซ้ำๆ หลายปี หรือมีการใช้ในปริมาณมาก จะทำให้สารเคมีสะสมจนเกินสภาวะอิ่มตัวที่สารอินทรีย์ในดินจะดูดซับได้ จะเกิดการคายซับเกิดขึ้น ทำให้สารเคมีถูกชะล้างออกจากดิน ไปสู่น้ำใต้ดินและแหล่งน้ำ ส่งผลให้พืชดูดซับสารเคมีเหล่านี้ไปสะสมในลำต้นได้ และเกิดการสะสมของสารเคมีเหล่านี้ในสิ่งมีชีวิตในระบบนิเวศวิทยา โดยสารไกลโฟเซตเข้าสู่รากพืชด้วยการแพร่ (passive diffusion) ตามกลไก carrier-mediated system เป็นการดูดซึมสารเคมีเข้าสู่พืชในรูปแบบของ active absorption ผ่านเยื่อเมมเบรน โดยมีโปรตีน กรดอะมิโนเป็นสารนำพาทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายไกลโฟเซตจากรากไปเซลล์ต่างๆ ของพืช (Danezis et al., 2016) ทั้งนี้ การใช้ไกลโฟเซตกลับมาไปสู่ปัญหาใหม่ในการกำจัดวัชพืช

ในประเทศสหรัฐอเมริกาได้เกิดปัญหา “Super Weed” หรือซูเปอร์วัชพืช เกิดขึ้นจากการใช้ยาฆ่าหญ่อย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน เนื่องจากวัชพืชนั้นสามารถปรับตัวให้ต้านทานต่อไกลโฟเซตได้ การกำจัดวัชพืชจึงกลายเป็นเรื่องยาก เกษตรกรจึงต้องกำจัดด้วยการพลิกหน้าดินซึ่งจะส่งผลเสียต่อคุณภาพดินในระยะยาวทำให้ปริมาณผลผลิตลดลงเรื่อยๆ สำหรับในประเทศไทยปัญหาดินเสื่อมสภาพนั้นเชื่อมโยงกับการย้ายที่ทำการเกษตรอาจส่งผลต่อการบุกรุกป่าเพื่อทำไร่เลื่อนลอย ถึงแม้จะมีการหมุนเวียนการใช้สารไกลโฟเซต แต่สารไกลโฟเซตถูกใช้เป็นเวลานานหลายสิบปีจึงส่งผลต่อการตกค้างในสิ่งแวดล้อม ในฐานะวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมจึงมุ่งเน้นการฟื้นฟูแหล่งปนเปื้อนสารไกลโฟเซต โดยเฉพาะการปนเปื้อนในดินเพราะสารไกลโฟเซตมีการดูดซับได้ดีในดิน

กระบวนการฟื้นฟูดินที่มีการปนเปื้อนสารไกลโฟเซตที่ผ่านมาได้มีการนำจุลินทรีย์มาใช้บำบัด เนื่องจากสารไกลโฟเซตสามารถย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ อย่างไรก็ตามการบำบัดโดยจุลินทรีย์เป็นไปได้ช้า เพราะต้องความเหมาะสมให้เหมาะสมกับจุลินทรีย์ เช่น ออกซิเจนในดิน แหล่งคาร์บอน และค่า pH ในช่วงที่แคบ ประกอบกับการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์มีกลไกคือ กระบวนการหนึ่งจะสร้าง sarcosine และ glycine เป็นสารอนุพันธ์ในการทำลายพันธะ C-P และอีกกระบวนการหนึ่งจะใช้เอนไซม์ glyphosate oxidoreductase ทำลายพันธะ C-N ทำให้สารไกลโฟเซตเปลี่ยนไปเป็น aminomethylphosphonic acid (AMPA) ซึ่งมีความเป็นพิษและถูกย่อยสลายต่อโดยจุลินทรีย์ให้กลายเป็น CO₂ และน้ำได้ช้าทำให้เสี่ยงต่อการเกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมในระยะยาว ในอีกด้านการใช้เทคโนโลยีออกซิเดชันขั้นสูง (Advance oxidation technologies, AOPs) เป็นวิธีการที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยใช้อนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (OH[•]) หรืออนุมูลอิสระซัลเฟต (SO₄^{•-}) ในการบำบัดมลพิษอินทรีย์ที่บำบัดยากและเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่เป็นอันตราย เช่น H₂O และ CO₂ โดยกระบวนการบำบัดเป็นไปได้อย่างรวดเร็ว (Farzadkia และคณะ, 2014) สำหรับหลักการในการบำบัดอาศัยอนุมูลอิสระทำลายพันธะ C-P ของสารไกลโฟเซต ซึ่งได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็น PO₄³⁻ NH₄⁺ NO₂⁻ NO₃⁻ CO₂ และ H₂O โดยผลิตภัณฑ์เหล่านี้เป็นแร่ธาตุที่พบได้ในธรรมชาติ (YingYang และคณะ, 2018) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำการผลิตอนุมูลอิสระด้วยปฏิกิริยาเสมือนเฟนตันโดยใช้โซเดียมเปอร์ซัลเฟตร่วมกับเหล็กอนุภาคขนาดนาโนเมตร (SPS/Fe³⁺) ซึ่งจะได้อนุมูลอิสระซัลเฟต (SO₄^{•-}) และอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (OH[•]) แต่อนุมูลอิสระส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปอนุมูลอิสระซัลเฟต (SO₄^{•-}) เนื่องจากอนุมูลอิสระซัลเฟต มีเสถียรภาพนาน (t_{1/2} = 30–40 μs) และมีค่าศักย์รีดักชันมาตรฐานที่สูง (E = 2.5–3.1 V) ในขณะที่อนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (OH[•]) (t_{1/2} = 1 μs, E = 1.8–2.7 V) มีเสถียรภาพไม่นานพอเกิดการแตกตัวและย่อยสลายไปเองอย่างรวดเร็ว (Forouzesh et al., 2019) ซึ่งเหล็กอนุภาคขนาดนาโนเมตรได้จากการสังเคราะห์ด้วยสารสกัดไบยูกาลิปตัสร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิกเป็นการสังเคราะห์ทางเคมีสีเขียว

กระบวนการเคมีสีเขียวเป็นศาสตร์แขนงหนึ่งที่ยึดหลักปรัชญาในกระบวนการออกแบบ และสังเคราะห์วัสดุหรือสารเคมี โดยการลด ละ หลีกเลี่ยงการใช้หรือสังเคราะห์สารที่ก่อให้เกิดอันตรายและเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม (Saif และคณะ, 2016) ซึ่งในประเทศไทยมีการใช้ประโยชน์ ส่วนของลำต้นยูคาลิปตัสในการทำกระดาษมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนการใช้ประโยชน์ของ ใบยูคาลิปตัสเป็นการนำใบมาสกัดเป็นน้ำมัน น้ำยาหอมระเหย ไอระเหยแก้หวัด แต่ถือเป็นสัดส่วน น้อยสำหรับการนำใบยูคาลิปตัสไปใช้ประโยชน์ ทำให้ใบของยูคาลิปตัสจะถูกทิ้งเป็นปริมาณมาก มี งานวิจัยพบว่าสาร polyphenols เป็นสารสกัดจากการต้มใบยูคาลิปตัส ซึ่งเป็นสารในกลุ่ม สารประกอบฟีนอลิก (Phenolic Compound) มีโครงสร้างทางเคมีเป็นวงแหวนอะโรมาติก (Aromatic Ring) ที่มีจำนวนหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl Group) รวมอยู่ในโมเลกุล ตั้งแต่ 2 วงขึ้นไป ซึ่ง polyphenols มีคุณสมบัติเป็น Capping agent ของกระบวนการการสังเคราะห์เหล็กขนาด นาโนเมตร ซึ่งจะช่วยลดการเกาะกลุ่มรวมตัวของเหล็กขนาดนาโนเมตร อย่างไรก็ตามเหล็กที่ สังเคราะห์ด้วยสารสกัดจากพืชโดยส่วนใหญ่จะมีขนาดประมาณ 80 nm เนื่องจากมีสาร ออร์แกนิกคาร์บอนของ polyphenols ปกคลุมบริเวณโดยรอบอนุภาคเหล็ก ทำให้เหล็กที่สังเคราะห์ ด้วยสารสกัดจากพืชมีขนาดใหญ่ (Santos และคณะ, 2012) ที่ผ่านมาความสนใจทางด้านนาโน เทคโนโลยีเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงทำให้สามารถเข้ามามีบทบาทในการเพิ่ม ประสิทธิภาพการบำบัดโดยจะทำให้โอกาสในการสัมผัสกันระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาและมลสาร สูงขึ้น ได้มีการประยุกต์ใช้คลื่นอัลตราโซนิกในการลดขนาดอนุภาคของวัสดุให้มีขนาดนาโนเมตร มี งานวิจัยใช้คลื่นอัลตราโซนิกเพื่อช่วยในการลดขนาดของเหล็กขนาดนาโนเมตรพบว่า สามารถทำ ให้ขนาดอนุภาคลดลงจาก 90.3 นาโนเมตร เป็น 29.9 นาโนเมตร และมีพื้นที่ผิวของอนุภาคนาโน เพิ่มขึ้นจาก 10 ตารางเมตรต่อกรัม เป็น 42 ตารางเมตรต่อกรัม (Jamei และคณะ, 2014) โดยใช้ คลื่นอัลตราโซนิกช่วงความถี่ 20-30 กิโลเฮิร์ตซ์ เป็นการใช้คลื่นอัลตราโซนิกที่มีความถี่ต่ำและ ความเข้มพลังงานที่สูง โดยคลื่นเสียง อัลตราโซนิกจะทำให้เกิดและสลายฟองอากาศขนาดเล็ก จำนวนมากอย่างรวดเร็ว เรียกว่า cavitation ฟองอากาศที่เกิดขึ้นจะเกิดการแตกตัว ส่งผลให้มีแรงดันต่อผิวอนุภาคหรือวัตถุที่สัมผัสทำให้อนุภาคแตกออกจากกัน

ดังนั้นการวิจัยครั้งนี้จึงสนใจการสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรจากสารสกัด ใบยูคาลิปตัสร่วมกับการใช้คลื่นอัลตราโซนิกในการลดขนาดอนุภาคเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะทำให้ โอกาสในการสัมผัสกันระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาและมลสารสูงขึ้น เป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับการ สังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรเพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการบำบัดสารไกลโฟเซตในดิน โดย จะทำการศึกษาลักษณะพื้นฐานเหล็กขนาดนาโนเมตรและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเหล็ก ขนาดนาโนเมตรเมื่อใช้ร่วมกับสาร โซเดียมเปอร์ซัลเฟตในปฏิกิริยาเสมือนเฟนตัน ที่สภาวะปัจจัย

ต่างๆ ได้แก่ ความเข้มข้นของสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟต ปริมาณเหล็กขนาดนาโนเมตร และค่าความเป็นกรดต่อการบำบัดสารไกลโฟเซตในดิน

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรด้วยสารสกัดไບยบาลิปต์ส่วมกับการใช้คลื่นอัลตราโซนิก

1.2.2 ศึกษาการบำบัดสารไกลโฟเซตในดินด้วยปฏิกิริยาเสมือนเฟนตัน โดยใช้เหล็กขนาดนาโนเมตรร่วมกับสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟต

1.2.3 เพื่อศึกษาอนุมูลอิสระซัลเฟต ($\text{SO}_4^{\cdot-}$) และอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (OH^{\cdot}) ต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารไกลโฟเซต

1.3 ขอบเขตการศึกษา

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการสังเคราะห์เหล็กอนุภาคนาโนเมตรโดยใช้สารสกัดจากพืชเพื่อลดการเกาะกลุ่มรวมตัวของเหล็กขนาดนาโนเมตร โดยใช้คลื่นอัลตราโซนิกร่วมด้วย จากนั้นจะนำเหล็กขนาดนาโนเมตรที่สังเคราะห์ได้ไปใช้ในการบำบัดสารไกลโฟเซต

การทดลองส่วนแรกคือการสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรด้วยสารสกัดจากไບยบาลิปต์ส่วมกับคลื่นอัลตราโซนิก โดยมีขอบเขตในการศึกษาดังนี้

- 1) ใช้ไບยบาลิปต์สจากจังหวัดสุรินทร์
- 2) ใช้สารตั้งต้นของการสังเคราะห์เหล็กจะใช้เหล็กเฟอร์รัสซัลเฟต
- 3) คลื่นอัลตราโซนิกที่ใช้ทำการควบคุมที่ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ กำลัง 1000 วัตต์

การทดลองส่วนที่สอง เป็นการบำบัดสารไกลโฟเซตด้วยปฏิกิริยาเสมือนเฟนตันโดยใช้เหล็กขนาดนาโนเมตรที่สังเคราะห์ขึ้นเองมาใช้ร่วมกับสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟต โดยมีขอบเขตในการศึกษาดังนี้

1) ปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสารไกลโฟเซตในน้ำประกอบด้วย ความเข้มข้นของสาร โซเดียมเปอร์ซัลเฟต ปริมาณเหล็กขนาดนาโนเมตร ความเข้มข้นของสารไกลโฟเซต และค่าสถานะความเป็นกรดต่าง

2) อนุมูลอิสระที่สนใจในการศึกษาการบำบัดสารไกลโฟเซตในน้ำประกอบด้วยอนุมูลอิสระซัลเฟต ($\text{SO}_4^{\cdot-}$) และอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (OH^{\cdot}) โดยใช้สาร TBA เป็นสารยับยั้งอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (OH^{\cdot}) ในการทดลอง

3) การบำบัดสารไกลโฟเซตในดิน จะใช้ดินจากแปลงเกษตรอินทรีย์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยทำการทดลองแบบ Lab scale เท่านั้น

1.4 สมมุติฐานของงานวิจัย

1.4.1 เหล็กขนาดนาโนเมตรที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยสารสกัดไບยูคาลิปตัสร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิกจะมีขนาดเล็กลงเมื่อเทียบกับเหล็กขนาดนาโนเมตรที่สังเคราะห์ด้วยสารสกัดไບยูคาลิปตัสแต่ไม่ใส่คลื่นอัลตราโซนิก

1.4.2 ปฏิกริยาเสมือนเฟนต์นโดยใช้เหล็กขนาดนาโนเมตรกับสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟตสามารถบำบัดสารไกลโฟเซตได้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้องค์ความรู้ในการสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรจากสารสกัดไບยูคาลิปตัสโดยการใส่คลื่นอัลตราโซนิก

1.5.2 สามารถลดการใช้สารเคมีสำหรับสังเคราะห์เหล็กและได้เหล็กขนาดนาโนเมตรที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก

1.5.3 ได้ทราบถึงปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น ความเข้มข้นของสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟต ปริมาณเหล็กขนาดนาโนเมตร ความเข้มข้นของสารไกลโฟเซต และค่าความเป็นกรดต่างในการบำบัดสารไกลโฟเซต

บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สารกำจัดศัตรูพืช (Pesticides)

สารกำจัดศัตรูพืชหมายถึง สารเคมีที่มีการนำมาใช้โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อควบคุม ป้องกัน และกำจัด ศัตรูของพืชชนิดต่างๆ เช่น วัชพืช แมลง รวมถึงสัตว์ฟันแทะ ทำให้ผลผลิตทางการเกษตรเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งยังช่วยป้องกันและกำจัดโรคที่เกิดจากสัตว์เป็นพาหะได้อีกทางหนึ่งด้วย ทั้งนี้ ในทางกฎหมาย สารกำจัดศัตรูพืชทุกชนิดจัดเป็นวัตถุอันตราย ตามพระราชบัญญัติวัตถุอันตราย พ.ศ.2535 จึงจำเป็นต้องมี มาตรการควบคุมเพื่อจำกัดการผลิต การนำเข้าและการส่งออก ซึ่งสารบางชนิดจำเป็นต้องมีการขออนุญาต เพื่อการมีไว้ในครอบครองอีกด้วย

สำหรับการแบ่งกลุ่มของสารกำจัดศัตรูพืชหากใช้ชนิดของศัตรูพืชที่ต้องการจะกำจัดเป็นเกณฑ์จะสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 กลุ่มหลัก ได้แก่

- 1) สารเคมีที่ใช้เพื่อการกำจัดแมลง (Insecticides)
- 2) สารเคมีที่ใช้เพื่อการกำจัดหนูและสัตว์ฟันแทะ (Rodenticides)
- 3) สารเคมีที่ใช้เพื่อการกำจัดเชื้อรา (Fungicides)
- 4) สารเคมีที่ใช้เพื่อการกำจัดวัชพืช (Herbicides)

ปัจจุบันมีการใช้สารกำจัดวัชพืชมากกว่าสารกำจัดศัตรูพืชทางการเกษตรชนิดอื่นๆ การป้องกันกำจัดวัชพืชโดยการใช้สารเคมีนั้นเป็นวิธีที่กำลังได้รับความนิยมและใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน นอกจากนี้ยังสามารถใช้ได้สะดวกรวดเร็วแล้ว ในหลายกรณียังใช้ต้นทุนที่ต่ำกว่าวิธีอื่นๆ โดยเฉพาะในสภาพที่แรงงานหายากและราคาค่าแรงแพง อย่างไรก็ตามการใช้สารกำจัดวัชพืชให้ได้ผลนั้นผู้ใช้จะต้องมีความรู้ที่เพียงพอ เนื่องจากสารกำจัดวัชพืชที่ใช้อาจเป็นอันตรายต่อพืชปลูก มนุษย์ สัตว์ และสิ่งแวดล้อมได้ (ทศพล, 2545) จากข้อมูลสถิติการจำหน่ายและการนำเข้าวัตถุอันตรายทางการเกษตร ในปัจจุบันการควบคุมวัชพืชโดยใช้สารกำจัดวัชพืชนั้นเป็นวิธีการที่มีความสำคัญอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องจากการปรับปรุงวิธีการปลูก การขยายพื้นที่เพาะปลูก ประกอบกับการเปลี่ยนแปลงสังคมภาคการเกษตร ไปเป็นสังคมภาคกึ่งการอุตสาหกรรม ทำให้แรงงานในภาคการเกษตรขาดแคลนและมีค่าจ้างแรงงานสูงขึ้นทำให้ไม่คุ้มค่าต่อการลงทุนและไม่สามารถทำงานได้ทันเวลากับการเจริญเติบโตของวัชพืช โดยในประเทศไทยมีการนำเข้าสารกำจัดศัตรูพืชมาใช้ในการเกษตรในปริมาณเพิ่มขึ้นทุกปี และสารกำจัดวัชพืชมีการนำเข้าสูงที่สุดในทุกๆ ปี ตามข้อมูล

ของสำนักควบคุมพืชและวัสดุการเกษตร กรมวิชาการเกษตร ซึ่งได้รวบรวมไว้ในตารางปริมาณการนำเข้าวัตถุดิบทางการเกษตรของประเทศไทยในปี พ.ศ. 2556-2560 (ตารางที่ 2.1) และสารกำจัดวัชพืชที่มีการนำเข้าสูงที่สุดคือ สารไกลโฟเซต โดยมียอดจำหน่ายสูงที่สุดทั้งในสหรัฐอเมริกาและประเทศอื่นๆ อีกหลายประเทศ โดยมีการจดทะเบียนเป็นสารเคมีเกษตรใน 130 ประเทศทั่วโลก นอกจากนี้ยังมีการประชาสัมพันธ์สรรพคุณของสารไกลโฟเซตว่าเป็นสารกำจัดวัชพืชได้หลายชนิดและมีประสิทธิภาพสูง (กฤษณา, 2547) ทั้งนี้สำนักควบคุมพืชและวัสดุทางการเกษตร กรมวิชาการเกษตรได้รวบรวมข้อมูลปริมาณการนำเข้าสารกำจัดศัตรูพืชที่มีการนำเข้ามากที่สุด 10 อันดับแรกของประเทศไทยไว้จากข้อมูลเบื้องต้นพบว่าในปี พ.ศ. 2550-2560 ประเทศไทยได้มีการนำเข้าสารไกลโฟเซตมากที่สุดเป็นอันดับ 1 (ตารางที่ 2.2)



ตารางที่ 2.1 ปริมาณการนำเข้าวัตถุอันตรายทางการเกษตรของประเทศไทยปี พ.ศ. 2555-2560 (สำนักควบคุมพืชและวัสดุการเกษตร, 2561ก)

ประเภทของวัตถุอันตราย	ปริมาณ (กก.)					
	ปี พ.ศ.					
	2555	2556	2557	2558	2559	2560
สารกำจัดวัชพืช (herbicide)	106,860,024.20	77,122,826.97	117,645,359.22	119,971,878.64	125,596,273.77	148,421,250.64
สารกำจัดแมลง (insecticide)	16,796,966.18	12,660,992.44	13,910,544.20	12,927,521.42	16,056,069.19	21,601,165.07
สารป้องกันและกำจัดโรคพืช (fungicide)	6,971,703.72	4,763,646.36	10,988,224.79	11,088,374.01	12,915,972.25	19,923,099.29
สารควบคุมการเจริญเติบโตของพืช (plant growth regulator)	2,374,630.50	1,054,931.00	1,600,430.00	2,242,580.90	2,708,208.02	3,837,433.16
สารรมควันพิษ (fumigants)	945,361.00	745,204.00	1,480,959.00	1,384,395.00	1,331,431.80	1,693,955.52
สารกำจัดหอยและหอยทาก (molluscicide)	233,389.00	27,064.00	212,046.00	205,018.00	206,000.00	812,351.00
สารกำจัดไร (acaricide)	195,088.29	418,716.50	1,296,700.41	1,395,319.52	1,699,234.45	1,838,503.60
สารกำจัดหนู (rodenticide)	10	-	135,600.00	243,600.00	173,900.00	113,005.00
สารกำจัดไส้เดือนฝอย (nematocide)	4.01	6	65	0.0006	0	0
สารอื่นๆ (Other)	3	-	-	-	-	-
รวม (total)	134,377,179.90	96,793,387.27	147,269,928.62	149,458,687.49	159,355,657.68	197,646,763.28

ตารางที่ 2.2 ปริมาณการนำเข้าสารกำจัดศัตรูพืชที่มีการนำเข้าสูงสุด 10 อันดับแรกในปี พ.ศ. 2550-2560 (สำนักควบคุมพืชและวัสดุการเกษตร, 2561ข)

ลำดับ	ปี พ.ศ.									
	2551		2552		2553		2554		2555	
	ชื่อสาร	ปริมาณ (ล้าน ก.ก.)	ชื่อสาร	ปริมาณ (ล้าน ก.ก.)	ชื่อสาร	ปริมาณ (ล้าน ก.ก.)	ชื่อสาร	ปริมาณ (ล้าน ก.ก.)	ชื่อสาร	ปริมาณ (ล้าน ก.ก.)
1	glyphosate	19.17	glyphosate	39.81	glyphosate	26.02	glyphosate	47.17	glyphosate	40.31
2	paraquat	19.74	paraquat	21.69	paraquat	21.02	paraquat	28.86	paraquat	26.72
3	2,4-D sodium salt	4.25	carbofuran	4.45	ametryn	5.14	acetic acid	4.45	ametryn	8.34
4	Atrazine	3.76	abamectin	4.2	2,4-D sodium salt	4.13	ametryn	4.79	acetic acid	6.65
5	Ametryn	4.06	2,4-D sodium salt	3.56	atrazine	4.3	2,4-D sodium salt	3.81	atrazine	5.87
6	Butachlor	2.59	atrazine	2.79	acetic acid	3.92	Butachlor	3.87	2,4-D sodium salt	4.48
7	Colopyrifos	2.35	glyphosate acid	2.69	butachlor	2.18	Atrazine	3.2	diuron	2.41
8	acetic acid	2.51	acetic acid	2.19	diuron	2.18	chlorpyrifos	3.48	butachlor	2.28
9	Mancozeb	2.14	butachlor	2.02	chlorpyrifos	1.89	Diuron	2.29	acetochlor	2.36
10	Propanil	1.79	ametryn	1.6	glyphosate acid	1.64	Mancozeb	1.86	mancozeb	1.4

ตารางที่ 2.2 (ต่อ) ปริมาณการนำเข้าสารกำจัดศัตรูพืชที่มีการนำเข้าสูงสุด 10 อันดับแรกในปี พ.ศ. 2550-2560 (สำนักควบคุมพืชและวัสดุการเกษตร, 2561ข)

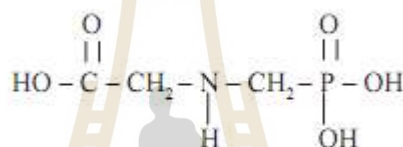
ลำดับ	ปี พ.ศ.									
	2556		2557		2558		2559		2560	
	ชื่อสาร	ปริมาณ (ล้าน ก.ก.)	ชื่อสาร	ปริมาณ (ล้าน ก.ก.)	ชื่อสาร	ปริมาณ (ล้าน ก.ก.)	ชื่อสาร	ปริมาณ (ล้าน ก.ก.)	ชื่อสาร	ปริมาณ (ล้าน ก.ก.)
1	glyphosate	29.15	glyphosate	63.17	glyphosate	58.08	glyphosate	61.80	glyphosate	59.82
2	paraquat	20.12	paraquat	21.33	paraquat	30.44	paraquat	31.52	paraquat	44.50
3	acetic acid	4.76	acetic acid	6.79	acetic acid	5.93	acetic acid	6.99	acetic acid	9.83
4	ametryn	4.74	atrazine	4.10	Atrazine	3.98	atrazine	3.61	atrazine	4.83
5	atrazine	3.55	ametryn	3.60	Ametryn	3.99	2,4-D-sodium salt	2.62	ametryn	4.50
6	2,4-D sodium salt	3.54	2,4-D sodium salt	2.61	2,4-D-sodium salt	2.10	ametryn	2.94	2,4-D-sodium salt	3.46
7	carbosulfan	3.33	butachlor	2.68	Propineb	2.44	diuron	2.49	diuron	3.92
8	cartap hydrochloride	1.94	chlorpyrifos	2.38	Diuron	2.40	chlorpyrifos	2.07	propineb	3.73
9	fipronil	1.94	acetochlor	2.25	chlorpyrifos	1.98	mancozeb	2.07	chlorpyrifos	3.32
10	diuron	1.87	mancozeb	1.79	mancozeb	1.85	butachlor	1.95	mancozeb	2.77

2.2 ไกลโฟเซต (glyphosate)

สารไกลโฟเซตเป็นสารประกอบของสารกำจัดวัชพืชกลุ่มออร์กาโนฟอสเฟต ซึ่งโครงสร้างโมเลกุลมีพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนจับกับฟอสฟอรัส (C-P) ที่มีความเสถียร สารไกลโฟเซตเป็นสารออกฤทธิ์ในการกำจัดวัชพืชที่มีการนำไปใช้อย่างแพร่หลายในการทำเกษตรกรรม การใช้สารไกลโฟเซตฉีดพ่นเพื่อกำจัดวัชพืชจะทำให้ใบของวัชพืชเกิดสีเหลืองและตาย ซึ่งเกิดจากการไปยับยั้งการสังเคราะห์กรดอะมิโนชนิดอะโรมาติก (Rueppel et al., 1977) สารไกลโฟเซตมีคุณสมบัติดังนี้คือ

2.2.1 คุณสมบัติทางเคมี

สูตร โครงสร้างทางเคมี



IUPAC Name:	เอน - ฟอสฟอนอเมทิล ไกลซีน
Empirical formula:	$\text{C}_3\text{H}_8\text{NO}_5\text{P}$
Molecular weight:	169.07
Physical Feature:	ของแข็ง สีขาว ไม่มีกลิ่น
Melting point:	200 องศาเซลเซียส
Water solubility:	ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ละลายในน้ำได้ 1.2 เปอร์เซ็นต์
Vapor pressure:	$< 1 \times 10^{-5}$
Solubility in Organic solvent:	ไม่ละลาย
Dipole moment:	$9.7 \mu^b \text{ (D)}$
Parachor:	$313 \text{ cm}^3 \text{ g}^{1/4} / \text{s}^{1/2} \text{ mol}$
Log K_{ow} :	0.0017, -4.1
K_{oc} :	24,000
Henrys Const (Kh):	1.443×10^{-12}
Soil Adsorp. Coeff (Kd) g/cm^3 :	61
Anaerobic $t_{1/2}$ (day):	22

Aerobic t1/2 (day): 96

(พรชัย, 2531; ทศพล, 2545; Kollman et al., 1995)

2.2.2 การนำไปใช้ในทางการเกษตร

สารไกลโฟเซตจัดเป็นสารกำจัดวัชพืชที่สามารถกำจัดได้ทั้งวัชพืชใบแคบและวัชพืชใบกว้าง เป็นสารที่ดูดซึมเข้าไปในต้นวัชพืช ในสหรัฐอเมริกานิยมใช้สารไกลโฟเซตเพื่อกำจัดวัชพืชที่ขึ้นในแปลงปลูกข้าวโพด ข้าวสาลี ข้าวฟ่าง ส้ม แอปเปิล ท้อ มันฝรั่ง หอมใหญ่ หน่อไม้ฝรั่ง กาแฟ ถั่วลิสง สับปะรด ไม้ดอกไม้ประดับ หญ้าสนาม และในแปลงปลูกป่านอกจากนี้ยังใช้กำจัดวัชพืชที่ขึ้นในบริเวณที่ไม่ใช่ทำการเกษตรด้วย เช่น ริมนน ทางรถไฟ และตามบ้านเรือน เป็นต้น (กฤษณา, 2547) สารไกลโฟเซตเป็นสารที่ใช้ทางใบ และใช้ในการควบคุมวัชพืชแบบหลังออกและไม่เลือกทำลาย สามารถควบคุมวัชพืชพวกวงศ์หญ้า วัชพืชใบกว้างปีเดียว และวัชพืชข้ามปีพวกหญ้าคา ตลอดจนพวกวัชพืชไม้พุ่มเนื้อแข็ง เช่น ไมยราบยักษ์ แต่ส่วนใหญ่จะเป็นพิษรุนแรงกับวัชพืชพวกวงศ์หญ้าปีเดียว สารสามารถดูดซึมเข้าทางใบหรือส่วนที่มีสีเขียวอื่นๆ ภายหลังฉีดพ่น สารออกฤทธิ์จะเคลื่อนย้ายหรือถูกดูดซึมเข้าสู่ท่อลำเลียงอาหาร ไปยังส่วนต่างๆ ของต้นพืช แล้วทำลายจุดเจริญของพืชทั้งส่วนยอดและราก (Thomson, 1993)

2.2.3 กลไกการกำจัดวัชพืชของสารไกลโฟเซต

กลไกการทำงานของไกลโฟเซตในการกำจัดวัชพืช เกิดจากการยับยั้งการสังเคราะห์ aromatic amino acids (phenylalanine, tyrosine, และ tryptophan) กรดอะมิโนเหล่านี้ใช้สำหรับการสังเคราะห์โปรตีนและสารอื่นๆ ที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตและการอยู่รอดของพืช ไกลโฟเซตจะไปแย่งจับกับตำแหน่งจับของ phosphoenolpyruvate (PEP) บนเอนไซม์ 5-enolpyruvylshikimate-3-phosphate synthase (EPSPs) กระบวนการนี้เรียกว่า การยับยั้งแบบแข่งขัน (competitive inhibitor) เนื่องจาก PEP นี้เป็น precursors สำหรับการสร้าง aromatic amino acid เมื่อ PEP นี้ไม่สามารถเข้าจับกับเอนไซม์ EPSPs ได้ จึงส่งผลให้ไม่เกิดการสร้างกรดอะมิโน (Tu et al., 2001) นอกจากนี้ไกลโฟเซตยังอาจยับยั้งเอนไซม์อื่นๆ อีก 2 ชนิด คือ chlorismatemutase และ prephrenatehydratase ซึ่งเกี่ยวข้องกับขั้นตอนอื่นๆ ในกระบวนการสังเคราะห์กรดอะมิโนชนิดเดียวกัน เอนไซม์เหล่านี้อยู่ในกระบวนการที่เรียกว่า shikimic acid pathway ซึ่งพบในพืชชั้นสูงและจุลินทรีย์ แต่กระบวนการนี้ไม่พบในสัตว์ (Gilchrist and Kosuge, 1980) นอกจาก shikimate biosynthetic pathway จะเป็น pathway ที่จำเป็นสำหรับการสร้าง aromatic amino acids แล้วยังเกี่ยวข้องกับการสร้าง auxin, phytoalexins, folic acid, lignin, plastoquinones และ secondary products อื่นๆ อีกหลายชนิด เนื่องจากเป็นที่เข้าใจถึงกระบวนการในการออกฤทธิ์ของไกลโฟเซตเป็นอย่างดีว่าเกี่ยวข้องกับ shikimate pathway เท่านั้น จึงเชื่อว่าสารกำจัดวัชพืชนี้มีพิษต่อสัตว์และสิ่งมีชีวิตอื่นๆ ในระดับต่ำ

(Giesy et al., 2000; WHO, 1996) ลักษณะอาการที่พืชได้รับพิษหลังจากที่พืชได้รับสารไกลโฟเซตภายใน 4-7 วัน จะมีผลในการยับยั้งการเจริญเติบโตของพืชทันที และวัชพืชวงศ์หญ้าที่อ่อนแอจะแสดงอาการได้รับพิษภายใน 10-20 วัน ทำให้ใบที่ยังไม่แก่เต็มที่และจุดเจริญถูกทำลายไป การรับพิษจากการดูดซึมจะทำให้พืชดูดซึมสารไกลโฟเซตโดยผ่านทางวิถีเคล็ดซึ่งสารไกลโฟเซตที่อยู่ในรูปเกลือจะสามารถเข้าสู่พืชได้เร็วกว่าสารที่อยู่ในรูปกรด การรับพิษจากการเคลื่อนย้ายเกิดจากสารไกลโฟเซตจะเคลื่อนย้ายจากบริเวณส่วนของใบไปสู่เนื้อเยื่อ โดยเฉพาะส่วนที่อยู่บริเวณเนื้อเยื่อเจริญ เนื้อเยื่อที่สะสมอาหาร เนื้อเยื่อที่อยู่ใต้ดิน และใบที่ยังไม่แก่เต็มที่ ดังนั้นอวัยวะของพืชที่ทำหน้าที่สะสมอาหาร เช่น หัว เหง้า และไหล จึงมีสารไกลโฟเซตไปสะสมอยู่ในปริมาณที่ค่อนข้างสูง เป็นผลทำให้มีประสิทธิภาพสามารถควบคุมวัชพืชอายุข้ามปีได้ดี (ทศพล, 2545)

2.2.4 ความเป็นพิษของสารไกลโฟเซต

ค่าความเป็นพิษเฉียบพลันในหนู ทางปาก มีค่า LD50 เท่ากับ 5,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และค่าความเป็นพิษเฉียบพลันในกระต่ายทดลอง ทางผิวหนัง มีค่า LD50 เท่ากับ 5,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ทศพล, 2545) จากการศึกษาผลของสารไกลโฟเซตที่มีต่อหนูทดลองพบว่าเมื่อหนูทดลองได้รับสารไกลโฟเซตเข้าสู่ร่างกายจะมีน้ำหนักตัวลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าหนูตัวผู้เป็นเนื้องอกในตับและตับอ่อนมากขึ้น ในขณะที่หนูตัวเมียเป็นมะเร็งที่ต่อมไทรอยด์มากขึ้นด้วย ทั้งนี้เนื่องจากสารไกลโฟเซตมีสารประกอบพวกเอ็น ไนโตร โซ (N - nitroso compounds) ที่เป็นสารก่อมะเร็ง (กฤษฎา, 2547)

2.2.5 ค่ามาตรฐานการปนเปื้อนของสารไกลโฟเซตในสิ่งแวดล้อม

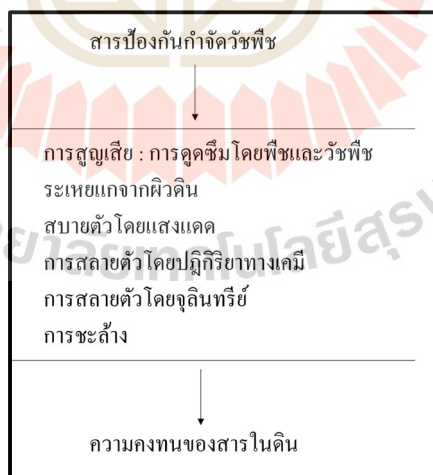
การกำหนดค่ามาตรฐานของการปนเปื้อนสารไกลโฟเซตที่มีกำหนดอยู่ในปัจจุบันคือองค์กร environmental protection agency (EPA) ของประเทศสหรัฐอเมริกาซึ่งได้กำหนดค่ามาตรฐานการปนเปื้อนสารไกลโฟเซตที่พบได้ในน้ำดื่มของประเทศสหรัฐอเมริกาไว้ตาม safedrinkng water act ว่าค่า maximum contaminant level (MCL) ต้องไม่เกิน 0.7 มิลลิกรัมต่อลิตร (EPA, 2009) จากการคำนวณของ EPA ค่าการสัมผัสจากสิ่งแวดล้อมต่อวันที่ยังปลอดภัย (referencedose; RfD) ของสารไกลโฟเซตอยู่ที่ 2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมต่อวัน (EPA, 1993) และจากเกณฑ์คุณภาพน้ำที่ความเข้มข้นสูงสุดของไกลโฟเซตที่ยอมให้มีอยู่ในน้ำได้ 4.8 มิลลิกรัมต่อลิตร (กรมประมง, 2530)

2.3 การเคลื่อนย้ายสารไกลโฟเซตปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม

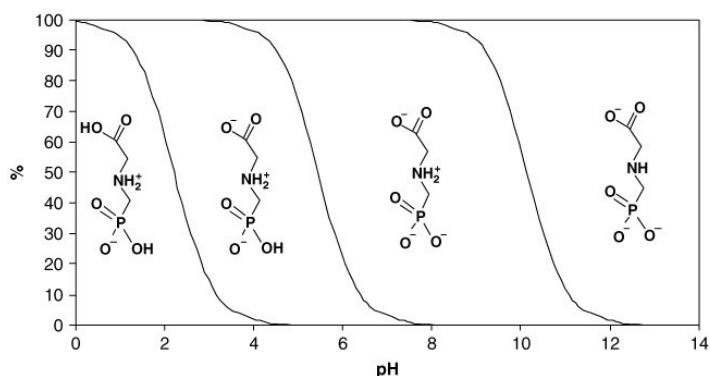
เกษตรกรนำสารไกลโฟเซตมาใช้ในรูปแบบของสารละลายเพื่อฉีดพ่นลงไปสู่วัชพืช ซึ่งการนำสารเคมีกำจัดศัตรูพืชมาใช้นั้นมีเพียงส่วนน้อยที่มีผลโดยตรงกับศัตรูพืช สารส่วนมากจะ

กระจายไปสู่สิ่งแวดล้อม โดยมีรายงานว่าสารกำจัดศัตรูพืชมีแค่ 0.1% เท่านั้นที่เข้าไปทำลายสิ่งมีชีวิตเป้าหมาย ส่วนที่เหลืออีก 99.9% จะปนเปื้อนและตกค้างสู่สิ่งแวดล้อม (Pimentel, 1995) ซึ่งความคงทนของสารตกค้างในสิ่งแวดล้อมจะอยู่ได้ในช่วงระยะเวลายาวนานแตกต่างกันไปตามส่วนที่เลื้อยจากพฤติกรรมต่างๆ ที่ทำให้เกิดการสูญเสีย ได้แก่ การดูดซึมโดยพืชและวัชพืช การระเหยออกจากผิวดิน การสลายตัวโดยแสงแดดหรือโดยปฏิกิริยาทางเคมีในดิน การสลายตัวโดยจุลินทรีย์ในดิน และการชะล้าง เป็นต้น (ภาพ 2.1) สำหรับการเคลื่อนย้ายสารไกลโฟเซตสู่สิ่งแวดล้อมนั้น เมื่อพิจารณาค่าความดันไอ (Vapor pressure $< 1 \times 10^{-5}$) ของสารไกลโฟเซตนั้น พบว่ามีความสามารถระเหยได้ต่ำ นั่นหมายความว่าในส่วนกิจกรรมของการเตรียมสารไกลโฟเซต การฉีดพ่นลงสู่วัชพืชรวมไปถึงการระเหยออกจากผิวดิน อาจไม่เกิดการระเหยสู่อากาศ และเนื่องจากสารไกลโฟเซตไม่สลายตัวเนื่องจากแสงแดด (Chen, Yong, et al., 2014) ทำให้เกิดการตกค้างในดิน และมีค่าครึ่งชีวิตในดินเท่ากับ 44-60 วัน (Kollman et al., 1995) โดยการสลายตัวของไกลโฟเซตตามธรรมชาติเป็นไปได้เพียงวิธีเดียว โดยการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ในดิน ได้แก่ สคาร์บอนไดออกไซด์และกรดอะมิโนเมธิล ฟอสฟอนิก (AMPA) เป็นผลิตภัณฑ์ซึ่งยังคงมีความเป็นพิษและถูกดูดซับได้ดีในดิน โดยมีอัตราการสลายตัวช้า (2 mg/kg soil) ใน 42 วัน (Zhang et al., 2015) เนื่องจากไกลโฟเซตมีหมู่ฟังก์ชันแบบมีขั้ว 3 หมู่ ซึ่งจะจับกันได้ดีกับแร่ดิน สารไกลโฟเซตที่อยู่ในดินส่วนใหญ่ (ดินที่ pH 4-8) จะอยู่ในรูป monovalent และ divalent anions ซึ่งจะจับกันได้ดีกับ Al^{3+} และ Fe^{3+} บนผิวของอนุภาคดิน (Borggsaard and Gimsing, 2008) มีการรายงานการดูดซับของสารกำจัดวัชพืชไกลโฟเซต พบว่า ไกลโฟเซตดูดซับได้ง่ายในดิน ร่วนปนเหนียวมากกว่าดินร่วนปนทราย การเพิ่มไอออนบวกของดินเหนียวบน โทไนด์แสดงดังต่อไปนี้ ตามลำดับ $Ca^{2+} < Mn^{2+} < Zn^{2+} < Mg^{2+} < Fe^{3+} < Al^{3+}$ (Sprankle et al., 1975) การศึกษาการดูดซับของสารไกลโฟเซตโดยใช้วิธี Chromatographic (HPLC) พบว่า การดูดซับไกลโฟเซต แปรปรวนผกผันกับค่าสภาพความเป็นกรดต่างของการตอบสนองต่อดินเหนียว และกลไกการแลกเปลี่ยนไอออนบวกมีบทบาทสำคัญในกระบวนการดูดซับของไกลโฟเซตในดินเหนียวที่มีไอออนบวกอิมตัว โดยไกลโฟเซตมีการแยกตัวออกอย่างคงที่ด้วยสมมูลกรด มีลำดับดังต่อไปนี้ (pKa) < 2.0 2.6 5.6 และ 10.6 ตามที่แสดงในภาพ 2.2 ที่ pH ต่ำกว่า 2.0 ไกลโฟเซตมีประจุบวกซึ่งมีส่วนช่วยในการดูดซับของดินเหนียวและดินอินทรีย์ที่มีประจุลบ ที่ pH สูงกว่า 2.6 ไกลโฟเซตมีประจุเป็นศูนย์ ที่ pH สูงกว่า 5.6 ไกลโฟเซตมีประจุเป็นลบ และจำนวนประจุลบเพิ่มขึ้นด้วยหากค่าความเป็นกรดเพิ่มขึ้นซึ่งทำให้ดูดซับได้ดีกับแร่ในดินที่มีประจุบวก แต่ที่ pH สูงกว่า 12 ไกลโฟเซตอยู่ในรูปแบบ 3 ไอออน (Sprankle et al., 1975) และการดูดซับของไกลโฟเซตในดินที่มีระดับของอินทรีย์วัตถุสูงเกิดขึ้นเร็วกว่าการย่อยสลายของจุลินทรีย์ และการสูญเสียของกิจกรรม herbicidal เป็นส่วนใหญ่ (Morillo et al., 1994) จาก

คุณสมบัติของสารไกลโฟเซตเป็นโมเลกุลมีขั้วและละลายในน้ำได้ 1.2 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ไกลโฟเซตจับกับสารอื่นได้ง่าย จับได้แน่นกับอนุภาคดิน ส่งผลให้มีความคงทนในดินถึง 170 วัน จากปกติที่มีค่าครึ่งชีวิต (half-life) ประมาณ 45-60 วัน (Peruzzo et al., 2008) ซึ่งการกระจายตัวของสารไกลโฟเซตในดินได้รับผลกระทบอย่างมากจากอุณหภูมิและความชื้นในดิน แต่แสงไม่มีผลต่อการกระจายตัว กล่าวคือไกลโฟเซตยังคงอยู่ในดินนานเมื่ออุณหภูมิต่ำและในดินที่แห้ง โดยอัตราการกระจายตัวเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น (Bento CPM et al., 2016) ในการศึกษาการตกค้างของสารไกลโฟเซตและ AMPA ในไร่ถั่วเหลืองในประเทศอาร์เจนตินา พบว่าในดินที่ไม่มีการไถพรวนมีปริมาณสารไกลโฟเซตมากกว่า 60% และ AMPA มากกว่า 80% พบอยู่ในดินลึกไม่เกิน 20 เซนติเมตร และจะพบน้อยลงตามระดับความลึก แต่ในดินที่มีการไถพรวนที่พบเพียง 47% ใน 20 เซนติเมตรแรก เนื่องจากการไถพรวนดินของเกษตรกรทำให้อินทรีย์คาร์บอนและความจุแลกเปลี่ยนไอออนบวกเพิ่มมากขึ้นในชั้นดินที่ลึกลงไปส่งผลให้สารไกลโฟเซตสามารถกระจายลงไปได้ในระดับที่ลึกขึ้น (Soracco et al., 2018) และจากการศึกษาการปนเปื้อนของไกลโฟเซตในบริเวณรอบพื้นที่ปลูกถั่วเหลืองในประเทศอาร์เจนตินา ซึ่งมีการใช้ไกลโฟเซตที่อัตรา 1.0-1.5 kg/ha พบการปนเปื้อนของไกลโฟเซตในแหล่งน้ำ 0.1-0.7 mg/L ปนเปื้อนในดินและตะกอนดิน 0.5-5.0 mg/kg ระดับการปนเปื้อนจะขึ้นอยู่กับปริมาณไกลโฟเซตที่ใช้ และปริมาณน้ำฝนในแต่ละพื้นที่โดยน้ำฝนช่วยลดความเข้มข้นของไกลโฟเซตในดิน โดยการชะล้างไกลโฟเซตจากดินลงสู่แหล่งน้ำ (Peruzzo et al., 2008)

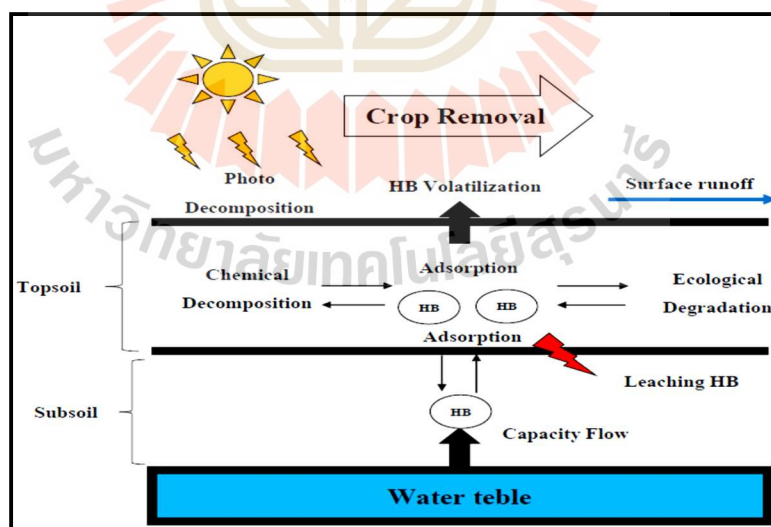


รูปที่ 2.1 การเกิดความคงตัวของสารกำจัดวัชพืชในดิน
(ที่มา : ดัดแปลงจาก Ross and Lembi, 2009)



รูปที่ 2.2 รูปแบบของสารไกลโฟเซตเมื่อสภาวะความเป็นกรดต่างแตกต่างกัน;
(pKa) 2.0 2.6 5.6 และ 10.6 (ที่มา : Borggsaard and Gimsing, 2008)

สารกำจัดวัชพืชมีการสะสมในแหล่งดิน ดังนั้นจำเป็นต้องศึกษาพฤติกรรมและการสลายตัวของสารกำจัดวัชพืช เพื่อให้ทราบถึงระยะทางของการเคลื่อนย้ายสารกำจัดวัชพืชที่เกิดปฏิกิริยาและความคงทนที่อยู่ในดิน ซึ่งจะส่งผลต่อการฟื้นฟูสภาพของดิน เนื่องจากสารกำจัดวัชพืชสามารถเกิดการดูดซึม (adsorption) เกิดการเคลื่อนย้าย (transport / movement) และการย่อยสลาย (degradation) ได้ โดยกระบวนการสลายตัวของสารวัชพืชดังกล่าวสามารถอธิบายดังภาพ 2.2



รูปที่ 2.3 กระบวนการการสลายตัวในสิ่งแวดล้อมของสารกำจัดวัชพืช (HB : herbicides)
(ที่มา : ดัดแปลงจาก Ross and Lembi, 2009)

คุณสมบัติที่สำคัญของสารกำจัดวัชพืชในดิน คือ สภาพการละลายได้ (solubility) ซึ่งจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงความสามารถในการเคลื่อนที่ของสารในน้ำและดิน ความดันไอ (vapor pressure) จะบอกถึงศักยภาพในการระเหยของสารกำจัดวัชพืชออกไปจากดิน ความสามารถในการดูดซับ (sorption to adsorb) จะบ่งบอกถึงความสามารถในการถูกดูดซับของสารละลายกับสารอินทรีย์ในดิน สภาพที่มีขั้ว (polarity) ประจุ (charge) และค่าสภาวะความเป็นกรดต่างในสารละลายรวมทั้งอัตราการใช้สารวัชพืช ซึ่งอาจจะทำให้เกิดการตกค้างของสารกำจัดวัชพืชในดินได้ ถ้าใช้ในปริมาณที่มากเกินไปจนเกินเกณฑ์ที่กำหนดหรือใช้ในระยะเวลาที่นาน

2.3.1 ความสัมพันธ์ของสารกำจัดวัชพืชในดินและกลไกการดูดซับ

การดูดซับสารชนิดหนึ่งๆ ในดินส่วนใหญ่จะเกิดจากการดูดซับน้ำ และไอออนในสารละลายดิน โดยการที่ดินเกิดการดูดซับสารได้มากหรือน้อยจะขึ้นกับพื้นที่ผิวจำเพาะ ซึ่งสิ่งที่เป็นปัจจัยในการดูดซับสารของดินคือ อนุภาคของดินเหนียวและอินทรีย์วัตถุ เนื่องจากมีอนุภาคที่เล็กจึงทำให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะในการดูดซับสูง ประกอบกับการที่มีประจุลบจำนวนมาก ทำให้สามารถดูดซับไอออนที่เป็นประจุบวกได้ดี ดังนั้นในกรณีที่น้ำถูกดูดซับในดินจึงอาจเกิดในกระบวนการนี้ได้ เนื่องจากน้ำเป็นสารประกอบที่มีขั้ว (polar compound) การดูดซับของสารกำจัดวัชพืชในดิน แบ่งออกเป็น 2 กระบวนการคือ กระบวนการทางฟิสิกส์ ซึ่งจะเกิดที่บริเวณผิวหน้าของอนุภาคดิน อย่างเช่น การดูดซับแบบแรงแรงแวนเดอร์วาลส์ และแรงดูดซับทางประจุไฟฟ้า สำหรับกระบวนการทางเคมี จะเกิดจากปฏิกิริยาร่วมของหลายกระบวนการที่บริเวณพื้นที่ผิวภายในที่ซับซ้อนของอนุภาคดิน โดยจะเกิดในช่วงระยะเวลาที่สั้นๆ ได้แก่ การเกิดพันธะโคเวเลนต์ พันธะไฮโดรเจน และกระบวนการแลกเปลี่ยนประจุภายใน เป็นต้น (ศุภมาส พนิชศักดิ์พัฒนา, 2545; ชัยยศ ตั้งสถิตกุลชัย, 2554)

2.3.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับสารกำจัดวัชพืชในดิน

ปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับสารกำจัดวัชพืชในดินอธิบายได้ดังต่อไปนี้

1) ชนิดและปริมาณของรูปสารละลายคอลลอยด์ในดิน เช่น ชนิดของแร่ดินเหนียว ที่มีพื้นที่ผิวมากที่สุด มีความสามารถในการยึดเกาะระหว่างอนุภาคที่สูง และมีประจุลบจำนวนมากทำให้เกิด ionic double layer กล่าวคือดินเหนียวจะมีประจุสองชั้น ได้แก่ชั้นในที่เป็นประจุลบที่ผิว และชั้นนอกที่เป็นประจุบวกของแคตไอออนที่ถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวของดินเหนียว ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนในดินได้ สำหรับคอลลอยด์อินทรีย์ (organic colloidal) ซึ่งได้แก่ ฮิวมัส (humus) จะมีความสามารถในการดูดซับน้ำได้สูง และมีประจุลบมาก โดยเกิดจากหมู่คาร์บอกซิล (carboxyl) ที่มีการแตกตัวของ H^+ นอกจากนี้ค่าสภาวะความเป็นกรดต่างก็ส่งผลต่อการดูดซับด้วย คือถ้าค่าสภาวะความเป็นกรดสูงจะเกิดการแตกตัวของกรดสูงทำให้ปริมาณประจุลบของคอลลอยด์อินทรีย์สูงขึ้น นอกจากนี้ดินที่มีอินทรีย์วัตถุหรือมีสาร humic acid เป็นองค์ประกอบ

จะมีความสามารถในการจับตัวหรือยึดเกาะได้ดีกว่า และมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกได้สูงกว่าดินเหนียว เนื่องจากบนพื้นที่ผิวที่ผิวของอินทรีย์วัตถุมีประจุลบอยู่จำนวนมาก ทำให้เกิดการดึงดูดสารกำจัดวัชพืชในดินได้ ดังนั้นองค์ประกอบของดินจึงมีความสำคัญต่อการดูดซับสารกำจัดวัชพืช และการเคลื่อนย้ายของสารเคมีในดิน (สุชาติ กรูณา, 2548)

2) ค่าสถานะความเป็นกรดต่างในดิน การวิเคราะห์ค่าสถานะความเป็นกรดต่างในดินจะคล้ายกับการวิเคราะห์ค่าสถานะความเป็นกรดต่างในน้ำ แต่จะแตกต่างกันที่ในดินนั้นมีความเป็นกรด 2 ชนิด คือ กรดจริง และกรดแฝง ซึ่งเกิดจากการแตกตัวของประจุ โดยที่ไฮโดรเจนไอออน (H^+) ที่มีประจุบวก เมื่อถูกดูดซับในดินจะเรียกว่า สภาพกรดแฝง (potential acidity) ซึ่งจะพบในดินเหนียวมากกว่าดินทราย เนื่องจากภายในดินเหนียวจะมีประจุลบสูงกว่าจึงมีสภาพเป็นกรดแฝงสูงกว่า และจะเกิดการปลดปล่อยกรดออกมาบางส่วน ซึ่งจะคล้ายกับการแตกตัวของกรดอ่อน สำหรับไฮโดรเจนไอออน (H^+) ที่ไม่ถูกดูดซับจะเรียกว่า สภาพกรดจริง (activity acidity) โดยค่าสถานะความเป็นกรดต่างที่วัดได้คือเป็นกรดจริง ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับสภาพการละลายได้ (solubility) ของธาตุ การเจริญเติบโตของพืช และจุลินทรีย์ในดิน

3) คุณสมบัติของอนุภาคหรือประจุของสาร (ionization properties) อนุภาคของสารวัชพืชที่เป็นประจุบวกจะมีโมเลกุลในการยึดเกาะดินได้ดี เนื่องจากดินมีอนุภาคที่เป็นประจุลบ ดังนั้นค่าสถานะความเป็นกรดต่างจึงมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงประจุบางส่วนบนพื้นที่ผิวนอกของวัสดุดูดซับ ซึ่งสารกำจัดวัชพืชแบ่งออกเป็น 4 กลุ่มตามคุณสมบัติของไอออน คือ กลุ่มกรดอ่อน (weak acid) กลุ่มประจุบวก (cationic) กลุ่มเบสอ่อน (weak base) โดยที่ค่าสถานะความเป็นกรดต่างเป็นกรดจะมีสภาพเป็นไอออนบวก และกลุ่มที่ไม่มีประจุ (nonionic) ซึ่งค่าสถานะความเป็นกรดต่างจะส่งผลต่อสารกำจัดวัชพืชประเภทกรดอ่อนๆ หรือต่าง นอกจากนี้ สารเคมีที่มีกลุ่มฟังก์ชัน $-OH$, $-NH_2$, $-NHR$, $-CONH_2$, $-COOR$, และ $-NR_3$ และสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่จะถูกดูดซับได้ดีรวมถึงปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินด้วย ถ้าในดินมีปริมาณมากจะดูดซับสารเหล่านี้ได้ดี รวมทั้งยังขึ้นกับชนิดและปริมาณแร่ดินเหนียวด้วย

4) ความชื้นในดิน (soil moisture) ความชื้นในดินจะรบกวนการดูดซับโมเลกุลของสารกำจัดวัชพืชเพราะน้ำเป็นตัวแข่งขันในการยึดเกาะของสารในดิน ซึ่งส่วนใหญ่จะเกี่ยวข้องกับการระเหยของสารกำจัดวัชพืช ซึ่งการวิเคราะห์จำนวนน้ำในดินได้จากระดับความชื้น (water content) คือสัดส่วนระหว่างปริมาณของน้ำกับปริมาณของดินที่มีน้ำอยู่ ซึ่งหาได้จากการคำนวณระดับความชื้นโดยมวล (mass water content) และ ระดับความชื้นโดยปริมาตร (volume water content)

5) ความจุแลกเปลี่ยนไอออน (Cation exchange capacity ; CEC) หมายถึงความสามารถของปริมาณแคตไอออนทั้งหมดที่ดินหรือคอลลอยด์จะดูดซับได้ มีหน่วยเป็น meq (milliequivalents) ต่อ 100 กรัมของดิน ซึ่งค่า CEC สามารถใช้เป็นหลักเกณฑ์ในการบ่งบอกลักษณะของเนื้อดินได้ โดยที่องค์ประกอบของแร่ดินเหนียวสูงจะมีค่า CEC สูง มักจะเป็นเนื้อดินที่ละเอียด นอกจากนี้ดินที่มีฮิวมัสเป็นองค์ประกอบมากจะให้ค่า CEC ที่ค่อนข้างสูงด้วย ค่าความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของดินจะขึ้นกับชนิดของดินนั้นๆ เช่น ฮิวมัส มีค่า CEC เท่ากับ 200 มิลลิอิควิวาเลนต์ (meq) ต่อ 100 กรัม มอนต์มอริลโลไนต์ มีค่า CEC เท่ากับ 100 มิลลิอิควิวาเลนต์ (meq) ต่อ 100 กรัม และ ไฮดร็อกไซด์ของเหล็กและอลูมิเนียม มีค่า CEC เท่ากับ 4 มิลลิอิควิวาเลนต์ (meq) ต่อ 100 กรัม เป็นต้น (Ross and Lembi, 2009; ทศพล พรพรหม, 2545; ศุภมาส พนิชศักดิ์พัฒนา, 2545; ธวัชชัย รัตนชเลศ, 2540)

2.3.3 ผลกระทบจากการใช้สารไกลโฟเซตจากการทำการเกษตร

การใช้สารไกลโฟเซตในประเทศไทยมีมานานแล้ว โดยที่ปริมาณการใช้ไม่ได้ลดลงมีแต่เพิ่มขึ้นตามปริมาณผลผลิตที่ต้องการ จึงทำให้มีการแพร่กระจายของสารไกลโฟเซตต่างๆ ในสิ่งแวดล้อมมากขึ้นด้วยและทำให้เกิดผลกระทบทั้งทางตรงและทางอ้อมต่อระบบนิเวศมากมาย นอกจากนี้สารเคมีเหล่านี้มีความคงทนและยากต่อการย่อยสลาย เนื่องจากมีโครงสร้างที่ซับซ้อนจึงสามารถสะสมอยู่ในสิ่งแวดล้อมได้เป็นระยะเวลานาน (ศิริพรหม, 2550) องค์การอนามัยโลกได้มีการรวบรวมองค์ความรู้งานวิจัยที่เชื่อมโยงผลกระทบระหว่างพิษภัยจากสารเคมีเกษตรดกค้างที่มีต่อสุขภาพ และมลพิษในสภาพแวดล้อม เพื่อให้ตระหนักถึงภัยและความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการใช้สารเคมีเกินขนาด (WHO, 2011) การใช้สารเคมีเกษตรในประเทศไทยมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แม้ว่าจะมีส่วนช่วยเพิ่มผลผลิตด้านการเกษตร แต่ปริมาณการใช้ที่เพิ่มขึ้นมากผนวกกับการใช้ที่ไม่ถูกต้องได้ก่อให้เกิดผลกระทบรุนแรงต่อทั้งสุขภาพและสิ่งแวดล้อม (วารภรณ์, 2550) ในปัจจุบันเกษตรกรได้เห็นถึงอันตรายที่เกิดขึ้นจากการใช้สารเคมีกำจัดวัชพืชมากขึ้น ไม่ว่าจะเป็นพิษที่เกิดขึ้นกับพืช คน สัตว์ และสิ่งแวดล้อม อีกทั้งสารเคมีบางชนิดยังเกิดการสะสมอยู่ในดินเป็นเวลานาน ทำให้ส่งผลกระทบต่อปะการังและสิ่งแวดล้อมในบริเวณใกล้เคียง และสามารถคงทนอยู่ในดินได้เป็นเวลานานทำให้ความอุดมสมบูรณ์ของดินและผลผลิตของพืชปลูกลดลง (รังสิต, 2526) ผลกระทบของการใช้สารไกลโฟเซตในการทำการเกษตรกรรม ได้แก่

2.3.3.1 ผลกระทบของสารไกลโฟเซตต่อพืช

ผลกระทบของสารไกลโฟเซตที่มีต่อคุณภาพของพืช เช่น การใช้สารไกลโฟเซตในแปลงฝ้าย มีผลทำให้คุณภาพของเมล็ดฝ้ายต่ำ คือทำให้ความงอกลดลง 24-85 เปอร์เซ็นต์ ต้นกล้าอ่อนแอ และไม่สามารถตั้งตัวได้ดีเมื่อนำไปปลูกในแปลง เป็นต้น

นอกจากนี้สารไกลโฟเซตยังมีผลกระทบทำให้พืชเป็นโรคมมากขึ้น เช่น ทำให้ประชากรเชื้อที่เป็นสาเหตุโรครากเน่าในถั่วที่อาศัยอยู่ในดินเพิ่มขึ้น และสารไกลโฟเซตที่เข้าไปในต้นสนจะยับยั้งกลไกการป้องกันตัวของต้นสนจากเชื้อรา จึงทำให้ต้นสนเป็นโรคได้ง่าย การใช้สารไกลโฟเซตพ่นเพื่อกำจัดวัชพืชในแปลงแห่งหนึ่งหลังจากนั้นประมาณหนึ่งเดือนได้ปลูกผักกาดหอมและอีกสี่เดือนต่อมาได้นำผักกาดหอมเหล่านั้นไปวิเคราะห์สารตกค้างพบว่ามีการใช้สารไกลโฟเซตปนเปื้อนอยู่ เช่นเดียวกับกรณีข้าวบาร์เลย์ที่ปลูกภายหลังการใช้สารไกลโฟเซตกำจัดวัชพืชในแปลงหนึ่งเดือนและอีกสี่เดือนต่อมาพบว่าข้าวบาร์เลย์ที่เก็บไปวิเคราะห์นั้นมีการใช้สารไกลโฟเซตปนเปื้อนอยู่ นอกจากนี้การนำวัชพืชไปอบเพื่อนำไปทำเป็นอาหารไม่ได้ช่วยให้พืชตกค้างจากสารไกลโฟเซตลดลงได้ (กฤษณา, 2547)

2.3.3.2 ผลกระทบของสารไกลโฟเซตต่อสิ่งแวดล้อม

ปัญหาเกี่ยวกับสารกำจัดวัชพืชตกค้างในสิ่งแวดล้อมนั้น ไม่ได้เกิดขึ้นเฉพาะที่ที่มีการใช้สารนี้เท่านั้นแต่สามารถแพร่กระจายและตกค้างในบริเวณกว้าง ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมตามมา เริ่มจากสารพิษตกค้างในดินและลำต้นพืชหลังการฉีดพ่นอาจเกิดการสะสมในบางส่วน บางส่วนฟุ้งกระจายไปในอากาศ บางส่วนซึมลงไปดิน และบางส่วนก็ถูกฝนชะและพัดพาไปกับน้ำไหลบ่าหน้าดินไหลลงสู่แหล่งน้ำ (นวลศรี, 2533)

นอกจากนี้สารเคมีป้องกันกำจัดวัชพืชที่ฉีดพ่นลงในพื้นที่นาข้าวนั้น มีการสะสมในดินได้ในปริมาณที่ไม่เท่ากัน การสลายตัวขึ้นกับค่าครึ่งชีวิต (half-life) ของสารแต่ละชนิด หากสลายตัวได้ช้าโอกาสที่จะแพร่กระจายลงสู่แหล่งน้ำย่อมเป็นไปได้สูง (สำนักจัดการคุณภาพน้ำ, 2554) ในการพ่นสารไกลโฟเซตแต่ละครั้งการฟุ้งกระจายของละอองสารเคมีย่อมเกิดขึ้นได้เสมอเนื่องจากกระแสลมในแปลงทำให้ละอองสารเคมีปลิวไปตกที่อื่นได้ไม่ว่าจะเป็นการใช้เครื่องพ่นสารเคมีชนิดใดก็ตาม การศึกษาเรื่องระยะทางที่ละอองสารเคมีปลิวไปนั้นมีกรณีหนึ่งในรัฐแคลิฟอร์เนียที่พบว่าละอองสารไกลโฟเซตสามารถปลิวไปได้ไกลประมาณ 800 เมตร

การพ่นสารกำจัดวัชพืชลงพื้นดินโดยใช้เครื่องพ่นติดตั้งกันรถแทรกเตอร์สามารถทำให้ต้นกล้าที่อยู่ห่างจากจุดพ่นสาร 20 เมตร ตายไปประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ และต้นกล้าที่อ่อนแอมากๆ จะตายได้แม้ที่อยู่ห่างจากจุดพ่นสารไกลโฟเซตไกลถึง 40 เมตร และการพ่นสารกำจัดวัชพืชทางอากาศโดยใช้เฮลิคอปเตอร์นิยมใช้พ่นสารกำจัดวัชพืชในบริเวณกว้าง เช่น แปลงปลูกพืชที่มีขนาดใหญ่ หรือพื้นที่ป่า เป็นต้น การพ่นสารทางอากาศเช่นนี้ทำให้ละอองสารปลิวได้ไกลเป็นระยะทาง 200 เมตร ขึ้นไป และในสหรัฐอเมริกาได้มีรายงานว่าการพ่นสารไกลโฟเซตเพียงครั้งเดียวโดยใช้เครื่องบินพ่นสามารถก่อให้เกิดความเสียหายมากมาย เช่น ทำให้ต้นไม้ใหญ่ถูกทำลายประมาณ 1,000 ต้น ข้าวโพดตาย 250 เอเคอร์ มะเขือเทศตาย 155 เอเคอร์เป็นต้น (กฤษณา, 2547)

2.3.3.3 ผลกระทบของสารไกลโฟเซตต่อสิ่งมีชีวิต

1) ผลกระทบของสารไกลโฟเซตต่อแมลง

ถ้ามีสารไกลโฟเซตปนเปื้อนอยู่ที่บริเวณผิวน้ำ แสงแดด หรือน้ำ ไม่สามารถทำให้สารไกลโฟเซตแตกตัวได้ทันที การสลายตัวของสารไกลโฟเซตในน้ำใช้เวลาประมาณ 70-84 วันและในดินประมาณ 47-174 วัน แต่ทั้งนี้ไม่ได้หมายความว่า จะสลายตัวทั้งหมด การสลายตัวนี้จะสลายตัวไปเพียงครึ่งหนึ่งเท่านั้น ดังนั้นการปนเปื้อนของสารไกลโฟเซตในดิน หรือน้ำจึงมีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตต่างๆ ในสภาพแวดล้อมได้ เช่น แมลงที่มีประโยชน์พวกแตนเบียน แมลงช้างปีกใส และด้วงเต่า เป็นต้น (กฤษณา, 2547)

2) ผลกระทบของสารไกลโฟเซตต่อสัตว์

การพ่นสารไกลโฟเซตลงดินติดต่อกันหลายๆ ครั้งมีผลต่อการเจริญและการมีชีวิตรอดของไส้เดือน ถ้าพ่นลงน้ำจะมีพิษเฉียบพลันต่อปลาโดยที่อุณหภูมิของน้ำ และค่าความเป็นกรด-ด่าง ยิ่งสูงทำให้ความเป็นพิษรุนแรงขึ้น นอกจากนี้การพ่นสารไกลโฟเซตเพื่อกำจัดวัชพืชน้ำให้ไม่มีพืชน้ำเจริญเติบโตให้ร่มเงา น้ำจึงมีอุณหภูมิสูงขึ้นทำให้เกิดอันตรายต่อปลาหรือสัตว์น้ำบางชนิดที่ไม่ชอบอุณหภูมิสูงได้ ทั้งนี้สารไกลโฟเซตยังมีผลกระทบโดยอ้อมต่อนกและสัตว์เลื้อยคลานด้วยนม เนื่องจากสารไกลโฟเซตไปทำลายพืช อาหาร และที่อยู่อาศัยของสัตว์จึงทำให้ประชากรสัตว์เหล่านี้ลดลง ซึ่งการพ่นสารไกลโฟเซตนี้ทำในบริเวณกว้างจึงมีผลกระทบต่อสัตว์ ในขณะที่ออสเตรเลียมีกฎหมายห้ามใช้สารไกลโฟเซตในน้ำหรือใช้ใกล้แหล่งน้ำเพราะสารชนิดนี้อาจมีผลกระทบต่อกบทั้งในระยะตัวอ่อนและเต็มวัย (กฤษณา, 2547)

3) ผลกระทบของสารไกลโฟเซตต่อมนุษย์

สารกำจัดวัชพืชทำให้เกิดปัญหาเนื่องจากสารกลุ่มนี้ดูดซึมทางผิวหนังได้ดี โดยเฉพาะถ้ามีบาดแผล พิษเฉียบพลัน มักมีผลต่อดับ ปอด อาจมีเลือดออกในทางเดินอาหาร พิษเรื้อรัง มีอาการเป็นพังผืดที่ปอด นอกจากนั้นสารกำจัดวัชพืชที่มีแนวโน้มถูกนำมาใช้มากขึ้นในปัจจุบันอีกชนิดหนึ่งสารคือ ไกลโฟเซต ซึ่งสารกลุ่มนี้ทำให้เกิดอาการคลื่นไส้ อาเจียน แน่นหน้าอกอาการรุนแรง อาจมีอาการป็นเลือด ปัสสาวะออกน้อย ไตวาย ปอดบวม อาการทางผิวหนัง ผื่นคันผิวหนังไหม้ ตาอักเสบได้ (สำนักระบาดวิทยา, 2546) สำหรับผลการศึกษาด้านสาธารณสุขทั้งในประเทศไทยและในต่างประเทศพบว่า พิษภัยจากสารเคมีเกษตรมีผลกระทบที่สำคัญต่อระบบประสาท ระบบทางเดินอาหาร ระบบสืบพันธุ์ ระดับฮอร์โมนเพศ รวมทั้งความพิการแต่กำเนิด (ปัตพงษ์ และคณะ, 2547)

การที่ร่างกายของคนเราจะได้รับสารไกลโฟเซตนั้นมีได้หลายทาง เช่น จากการทำงานที่เกี่ยวข้องกับสารไกลโฟเซตโดยตรง ทั้งการผลิต การขนส่ง การจำหน่าย และการนำไปใช้การรับประทานอาหารที่มีสารไกลโฟเซตปนเปื้อน ละอองสารไกลโฟเซตจากบริเวณที่มีการพ่นสารปลิวมาถูกตัว การสัมผัสดินที่มีไกลโฟเซตปนเปื้อนอยู่ การดื่มน้ำหรืออาบน้ำในบริเวณที่ใกล้กับบริเวณที่มีการใช้สารไกลโฟเซต เป็นต้น ดังนั้นจะเห็นได้ว่าคนที่ไม่ได้มีอาชีพเกษตรกรรมก็มีโอกาสได้รับสารไกลโฟเซตเข้าสู่ร่างกายได้เช่นกัน สำหรับผลกระทบที่เกิดขึ้นกับชาวสวนที่ทำงานเกี่ยวข้องกับสารไกลโฟเซตนั้นมีรายงานว่าชาวสวนมักได้รับอันตรายที่บริเวณดวงตาและผิวหนังมากที่สุด เช่น ทำให้เกิดการแสบร้อนที่ตาและผิวหนัง มองเห็นไม่ชัด ผิวหนังลอกคลั่งไส้ ปวดศีรษะ อาเจียน ท้องร่วง เจ็บหน้าอก เวียนศีรษะ ซา และหายใจมีเสียงหวีดเนื่องจากหลอดลมตีบ อย่างไรก็ตามสารไกลโฟเซตก็ไม่ใช้สารที่ปลอดภัยต่อมนุษย์และสัตว์ร้อยละ 95 เพราะในการผลิตสารไกลโฟเซตนั้นได้มีการผสมสารไม่ออกฤทธิ์ลงไปด้วย และมีงานวิจัยสรุปว่าสารไม่ออกฤทธิ์เหล่านั้นเป็นตัวทำให้เกิดอันตรายต่อระบบต่างๆ ของร่างกายคนได้ การศึกษาพิษเฉียบพลันในคนที่เกิดจากการใช้สารไกลโฟเซตเพื่อฆ่าตัวตาย เป็นกรณีศึกษาของแพทย์ชาวญี่ปุ่นต่อผู้ป่วย 9 ราย ที่ถึงแก่กรรมจากการดื่มน้ำสารไกลโฟเซตเข้าไปประมาณ 200 ซีซี หรือสามในสี่ถ้วย พบว่าหลังจากการกลืนสารไกลโฟเซตเข้าไปแล้วเกิดอาการปวดท้อง อาเจียน มีของเหลวในปอดมาก น้ำท่วมปอด และเม็ดเลือดแดงถูกทำลาย นอกจากนี้การศึกษาในผู้ป่วยรายอื่นๆ ก็พบอาการใกล้เคียง เช่น การทำงานของปอดผิดปกติ ทางเดินอาหารถูกทำลาย คลื่นหัวใจผิดปกติ ความดันโลหิตต่ำ ไตถูกทำลาย เป็นต้น การได้รับสารไกลโฟเซตเข้าสู่ร่างกายปริมาณเล็กน้อยก็มีผลต่อร่างกายได้เช่นกัน ยกตัวอย่างถ้าละอองสารปลิวเข้าตาทำให้ตาบวม ซิพจรเต้นเร็วและความดันโลหิตผิดปกติ เป็นต้น ในขณะที่การศึกษาอาการของผู้ป่วยชาวอเมริกาที่ได้รับสารไกลโฟเซตเข้าสู่ร่างกายพบว่าผู้ป่วยมีอาการเจ็บตา ปวดศีรษะ ท้องร่วง และมีอาการคล้ายไข้หวัดใหญ่ นอกจากนี้ยังพบอาการอื่นๆ อีก เช่น ดวงตา ไบหน้า และข้อต่อต่างๆ บวม ซาบบริเวณไบหน้า ผิวหนังไหม้ คัน เป็นแผลพุพอง ซิพจรเต้นเร็ว แน่นหน้าอก ไอ และคลั่งไส้ อาเจียน เป็นต้น (กฤษณา, 2547)

2.4 การฟื้นฟูดินทางเคมีโดยใช้วิธีการออกซิเดชันทางเคมี (Chemical Remediation)

การฟื้นฟูดินทางเคมีโดยใช้วิธีการออกซิเดชันทางเคมี (Chemical Remediation) ใช้หลักการกระบวนการออกซิเดชันทางเคมี (chemical oxidation) เป็นกระบวนการลดพิษ (detoxify) ของสารปนเปื้อนโดยการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของสารปนเปื้อนให้อยู่ในรูปของสารที่มีพิษน้อยลง เช่น การใช้สาร oxidizing agent ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) โอโซน (O_3) เปอร์แมงกาเนต (MnO_4^-) เปอร์ซัลเฟต ($S_2O_8^{2-}$) และคลอรีน เป็นต้น เนื่องจากสารเคมีกลุ่มนี้เป็นสารเคมีที่หาง่าย

มีความเป็นพิษต่ำเมื่อเทียบกับสารออกซิแดนท์ประเภทอื่นและง่ายต่อการใช้งานเพื่อมาทำลายโครงสร้างของสารปนเปื้อนอินทรีย์จนได้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้าย อย่างไรก็ตามการเลือกใช้สารออกซิแดนท์ในการฟื้นฟูดินต้องคำนึงถึงชนิดของสารปนเปื้อน ความสะดวกและความชำนาญของผู้ปฏิบัติงานเป็นสำคัญ แนวทางการฟื้นฟูดิน โดยวิธี Chemical oxidation นั้นสามารถทำการฟื้นฟูได้สองระดับคือ การปนเปื้อนดินระดับต้น (top soil) จากผิวดิน จนถึงความลึกประมาณไม่เกิน 20 เซนติเมตร สามารถทำได้โดยการนำสารออกซิแดนท์ และตัวเร่งปฏิกิริยาใส่และคลุกเคล้ากับดินปนเปื้อนได้โดยตรง สำหรับการปนเปื้อนในระดับลึกที่อาจเกิดจากการรั่วไหลของถังบรรจุสารเคมีใต้ดิน (underground storage tank) ต้องทำการศึกษาการแพร่กระจายของสารปนเปื้อนในพื้นที่ก่อนจากนั้นสามารถทำการขุดและฉีด (inject) สารออกซิแดนท์ลงไปในพื้นที่ปนเปื้อนได้

2.4.1 ปฏิกิริยาเฟนตัน (Fenton)

การใช้ปฏิกิริยาเฟนตัน ซึ่งค้นพบเมื่อ 100 กว่าปีมาแล้ว โดย H.J.H. Fenton พบว่า ศักยภาพของปฏิกิริยานี้มีมากในระดับที่สามารถออกซิไดส์สารอินทรีย์ในน้ำเสียให้กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำได้อย่างสมบูรณ์ (Bigda R.J., 1995)

ปฏิกิริยาเฟนตัน คือ ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วของสารประกอบอินทรีย์ในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) กับไอออนของเฟอร์รัส (Fe^{2+}) ซึ่งจะก่อให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิล (Hydroxyl radicals) ดังนี้ (Walling C., 1975)

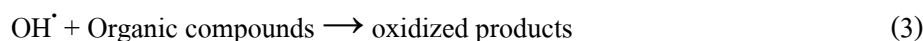


เมื่อปฏิกิริยา (1) เกิดขึ้นในน้ำเสีย ซึ่งมีสารประกอบอินทรีย์หลายๆ ประเภทพลังงานของการถ่ายโอนอิเล็กตรอนเริ่มแรกที่อนุมูลไฮดรอกซิล สามารถที่จะเหนี่ยวนำให้มีการย่อยสลายของสารประกอบอินทรีย์ได้ อนึ่งปฏิกิริยาการเกิดอนุมูลไฮดรอกซิลของสารละลายในปฏิกิริยา (1) สามารถกระตุ้นให้เกิดได้มากขึ้น เมื่อมีแสงเหนือม่วง (Ultraviolet) หรือ ก๊าซโอโซน (O_3) เป็น คะตะ ลิสต์ (Arslan I., et al., 2000; Chou S., et al., 1999)

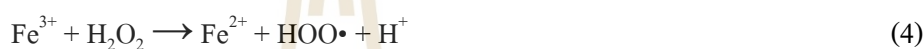
ปฏิกิริยาต่อมาก็คืออนุมูลไฮดรอกซิลจะทำปฏิกิริยากับไอออนของเฟอร์รัส (Fe^{2+}) แล้วให้ ไอออนของเฟอร์ริก (Fe^{3+}) ดังนี้



หรือในเวลาเดียวกันอนุมูลไฮดรอกซิลจะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารประกอบอินทรีย์ในสารละลายดังนี้



ต่อมาปฏิกิริยาจะมีการทำซ้ำโดยไอออนเฟอร์ริก (Fe^{3+}) จะช่วยเร่งให้มีการแตกตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไปเป็นก๊าซออกซิเจนและอนุมูลเปอร์ไฮดรอกซิล (Perhydroxyl radicals) โดยที่ความเข้มข้นของไอออนของเฟอร์รัส (Fe^{2+}) จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆ ในขณะที่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะลดลงเรื่อยๆ ดังนี้ (Walling C., 1975)



และ



อนุมูลเปอร์ไฮดรอกซิลเป็นตัวออกซิไดซ์ที่อ่อน (ระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเปอร์แมงกานัต) แต่มีความสำคัญในกระบวนการเกิดไอออนของเฟอร์รัส (Fe^{2+}) โดยเมื่อทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จะทำให้อนุมูลไฮดรอกซิลเพิ่มมากขึ้น ซึ่งอนุมูลไฮดรอกซิลจะสามารถทำปฏิกิริยากับสารประกอบอินทรีย์เกือบทั้งหมดและให้ผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำในขั้นสุดท้าย ซึ่งปัญหาโดยตรงของปฏิกิริยานี้คือการควบคุมสารเคมี (Reagents) และสภาพความเป็นกรดต่าง (pH) ซึ่งหากมีการควบคุมองค์ประกอบเหล่านี้ไม่ดีพอก็จะทำให้ผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาเป็นเพียงน้ำและออกซิเจนเท่านั้น (Ghaly Montaser Y., et al., 2001)

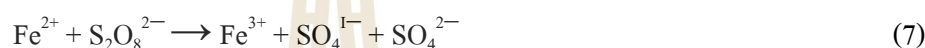
2.4.2 ปฏิกิริยาเสมือนเฟนตัน (Fenton-Like)

ปัจจุบันอนุมูลอิสระซัลเฟต ($\text{SO}_4^{\cdot-}$) เป็นอนุมูลอิสระที่ได้รับความนิยมเนื่องจากมีค่าศักย์ภาพการเกิดออกซิเดชัน 2.6 V น้อยกว่าอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (HO^\bullet) มีค่าศักย์ภาพการเกิดออกซิเดชัน 2.8 V แต่อนุมูลอิสระซัลเฟตมีเสถียรภาพที่สูงกว่าอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล ($\text{SO}_4^{\cdot-}$, $t_{1/2} = 30\text{--}40 \mu\text{s}$ และ HO^\bullet , $t_{1/2} = 1 \mu\text{s}$) สำหรับกลไกการกำจัดสารพิษของทั้งสองอนุมูลอิสระเป็นปฏิกิริยาเดียวกันซึ่งอนุมูลอิสระทั้งสองสามารถผลิตขึ้นมาจากปฏิกิริยาเสมือนเฟนตันเป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างโซเดียมเปอร์ซัลเฟตกับเหล็ก (SPS/ Fe^{3+}) ในกระบวนการนี้สามารถผลิตอนุมูล

อิสระได้ทั้งอิสระซัลเฟต (SO_4^{1-}) และอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (HO^{\cdot}) โดยกลไกการสร้างอนุมูลอิสระซัลเฟต (SO_4^{1-}) คือ เปอร์ซัลเฟต ($\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$, PS) ทำปฏิกิริยากับเหล็ก (Fe^{3+}) ในสภาวะที่มีน้ำหรือความชื้นจะได้ผลิตภัณฑ์หลักคือ Fe^{2+} และ $\text{S}_2\text{O}_8^{1-}$ สมการ (6)



นอกจากนี้เปอร์ซัลเฟต ($\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$, PS) เข้าทำปฏิกิริยากับเหล็ก (Fe^{2+}) ที่ได้จากปฏิกิริยาข้างต้นได้ผลิตภัณฑ์คืออนุมูลอิสระซัลเฟต (SO_4^{1-}) Fe^{3+} และ SO_4^{2-} สมการ (7)



นอกจากการเปลี่ยนเหล็ก Fe^{3+} ให้เป็นเหล็ก Fe^{2+} จากการทำปฏิกิริยากับเปอร์ซัลเฟต ($\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$, PS) เพื่อใช้เหล็ก Fe^{2+} ในการสร้างอนุมูลอิสระซัลเฟต (SO_4^{1-}) แล้วยังสามารถสร้างอนุมูลอิสระซัลเฟต (SO_4^{1-}) จากเหล็ก Fe^{3+} ได้โดยตรงคือเหล็ก Fe^{3+} ทำปฏิกิริยากับเปอร์ซัลเฟต ($\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$, PS) ในสภาวะที่มีออกซิเจนละลายน้ำภายในสารละลายดังสมการ (8)



และในสภาวะสารละลายเป็นกรดจะมี H^+ ทำให้เปอร์ซัลเฟต ($\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$, PS) แตกตัวออกมาเป็นอนุมูลอิสระซัลเฟต (SO_4^{1-}) ดังสมการ (9-10)



นอกจากปฏิกิริยาการสร้างอนุมูลอิสระซัลเฟต ($\text{SO}_4^{\cdot-}$) แล้วยังมีปฏิกิริยาการยับยั้งอนุมูลอิสระซัลเฟต ($\text{SO}_4^{\cdot-}$) คืออนุมูลอิสระซัลเฟต ($\text{SO}_4^{\cdot-}$) ทำปฏิกิริยากับน้ำ เกิดเป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (HO^{\cdot}) ดังสมการ (11)



อนุมูลอิสระซัลเฟต ($\text{SO}_4^{\cdot-}$) ยังสามารถทำปฏิกิริยากันเองเกิดเป็นเปอร์ซัลเฟต ($\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$, PS) อีกครั้ง ดังสมการ (12)



ในกรณีที่มีเหล็ก Fe^{2+} ละลายอยู่มากทำให้เข้าทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระซัลเฟต ($\text{SO}_4^{\cdot-}$) เกิดเป็นเหล็ก Fe^{3+} ดังสมการ (13)



และเมื่ออนุมูลอิสระซัลเฟต ($\text{SO}_4^{\cdot-}$) เข้าทำปฏิกิริยากับเปอร์ซัลเฟต ($\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$, PS) เกิดเป็น $\text{S}_2\text{O}_8^{\cdot-}$ ดังสมการ (14)



ในกรณีสภาวะที่เป็นด่างอนุมูลอิสระซัลเฟต ($\text{SO}_4^{\cdot-}$) ทำปฏิกิริยากับ OH^- เกิดเป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (HO^{\cdot}) ดังสมการ (15)



ในการอธิบายข้างต้นนอกจากการสร้างและระงับการเกิดอนุมูลอิสระซัลเฟต ($\text{SO}_4^{\cdot-}$) ยังเห็นการสร้างอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (HO^{\cdot}) จากกลไกการระงับอนุมูลอิสระซัลเฟต ($\text{SO}_4^{\cdot-}$) แต่อนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (HO^{\cdot}) ก็สามารถถูกระงับได้เช่นกันจากสมการ (16) ในกรณีที่

เหล็ก Fe^{2+} ละลายอยู่มากทำให้เหล็ก Fe^{2+} เข้าทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (OH^\cdot) เกิดเป็นเหล็ก Fe^{3+}



และอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (OH^\cdot) เข้าทำปฏิกิริยากับเปอร์ซัลเฟต ($\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$, PS) เกิดเป็น $\text{S}_2\text{O}_8^{\cdot-}$ ดังสมการ (17) และอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (OH^\cdot) เข้าทำปฏิกิริยากันเองเกิดเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ดังสมการ (18) (NiinaDulova และคณะ 2016)

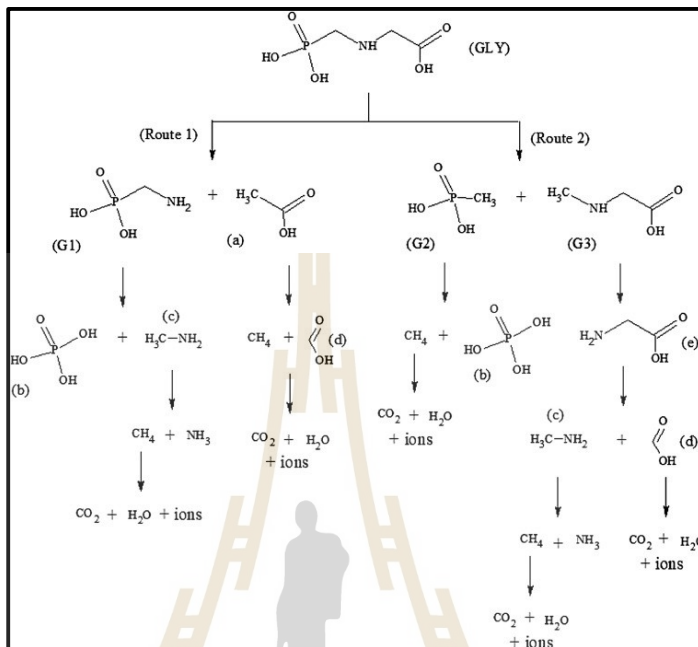


อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่ามีข้อจำกัด เช่น ในกรณีที่มีปริมาณเหล็กมาก ความเข้มข้นของสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟตสูง จะเกิดการระงับอนุมูลอิสระซัลเฟต ($\text{SO}_4^{\cdot-}$) และอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (OH^\cdot) ส่งผลให้การบำบัดสารพิษมีประสิทธิภาพลดลง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการควบคุมปัจจัยต่างๆ ให้มีความเหมาะสมเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการบำบัดที่เพิ่มขึ้น

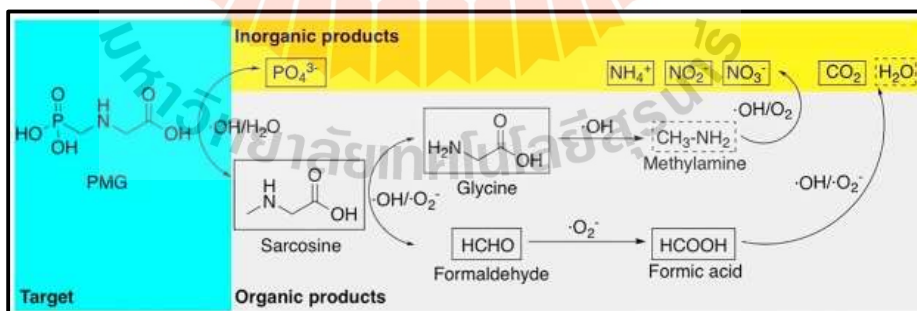
2.4.3 กลไกการย่อยสลายของไกลโฟเซตด้วยอนุมูลอิสระ

กลไกการย่อยสลายสารไกลโฟเซตนั้นมีเส้นทางการย่อยสลายสามารถแบ่งออกเป็น 2 เส้นทางหลักได้แก่ เส้นทางที่ 1 การย่อยสลายของไกลโฟเซตซึ่งเกิดจากการสลายตัวของพันธะ C-N ทำให้เกิดสารประกอบ G1 Amino-methylphosphonic acid (AMPA) และกรดอะซิติก (acetic acid) ทำให้เกิดการปลดปล่อย methylamine และกรดฟอสฟอรัส (phosphoric acid) เกิดการออกซิเดชันต่อทำให้เกิดสารอนินทรีย์เช่น แอมโมเนีย ในส่วนของเส้นทางที่ 2 การย่อยสลายของไกลโฟเซตซึ่งเกิดจากการสลายตัวของพันธะ C-P ทำให้เกิดเป็นการก่อตัวของอนุพันธ์ G2 Methylphosphonic acid พร้อมด้วย G3 Sarcosine ต่อมาเกิดการเกิด mineralization ของ G3 นำไปสู่การก่อตัวของ glycine, metialamine, formic acid และ N-anorganic species การเกิดออกซิเดชันที่สมบูรณ์ทำให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ (Barbosa และคณะ 2018) แสดงในรูปแบบที่ 2.4 นอกจากนี้มีการอธิบายการย่อยสลายไกลโฟเซตโดยอาศัยการออกซิไดซ์ของอนุมูลอิสระ OH^\cdot ($E_0 = 1.78 \text{ V}$) จะทำการตัดพันธะระหว่าง C-P สามารถย่อยสลายสารไกลโฟเซตไปเป็น PO_4^{3-} , NH_4^+ ,

NO_2^- , NO_3^- , CO_2 และ H_2O ได้อย่างสมบูรณ์ซึ่งเป็นแร่ธาตุพื้นฐานในดินและไม่เป็นพิษ (Yang และคณะ 2018) แสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 กลไกการย่อยสลายสารไกลโฟเฟต (a) acetic acid, (b) phosphoric acid, (c) methylamine, (d) formic acid และ (e) glycine



รูปที่ 2.5 เส้นทางการย่อยสลายของไกลโฟเฟตโดยการออกซิไดซ์ของอนุมูลอิสระ

2.5 การสังเคราะห์หลักขนาดนาโนเมตร

2.5.1 การสังเคราะห์เคมีสีเขียว

“Green Chemistry” หรือ “เคมีสีเขียว” เป็นศาสตร์แขนงหนึ่งที่ยึดหลักปรัชญาในกระบวนการออกแบบและสังเคราะห์วัสดุหรือสารเคมี โดยการลด ละ หลีกเลี่ยงการใช้หรือสังเคราะห์สาร ที่ก่อให้เกิดอันตรายและเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม โดยเน้นไปที่รากเหง้าอันเป็นบ่อเกิดและจุดเริ่มต้นของปัญหามลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม โดยสรุปหลักการของ “เคมีสีเขียว” ได้ดังนี้

- 1) การออกแบบกระบวนการสังเคราะห์ให้ได้ผลผลิตมากที่สุด
- 2) การเลือกใช้กระบวนการที่ปลอดภัยและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม
- 3) การออกแบบและเลือกใช้กระบวนการที่ใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด
- 4) สิ่งที่ดีที่สุดของการจัดการของเสียคือการไม่สร้างของเสีย

จากความก้าวหน้าในด้านนาโนเทคโนโลยีนำไปสู่การพัฒนาวัสดุนาโนใหม่ๆ ซึ่งจะเพิ่มศักยภาพด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมในการบำบัดมลพิษเนื่องจากวัสดุนาโนจะทำให้ช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวในการบำบัด ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดมลพิษสูงขึ้น ประกอบกับกระบวนการที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมสำหรับการสังเคราะห์โลหะอนุภาคนาโน เพื่อลดการใช้สารเคมี ลดต้นทุนของสารเคมีที่ใช้และเกิดของเสียในปริมาณที่น้อย วัสดุที่เคยถูกนำมาใช้ในการสังเคราะห์โลหะอนุภาคนาโน เช่น แบคทีเรีย สาหร่ายและสารสกัดพืช จากข้อมูลพืชในประเทศไทยที่สามารถนำมาใช้ในการสังเคราะห์โลหะอนุภาคนาโนและมีต้นทุนต่ำคือ ใบยูคาลิปตัส ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้

ในกระบวนการตัดต้นยูคาเพื่อนำส่งไปผลิตกระดาษ

2.5.2 ยูคาลิปตัส



รูปที่ 2.6 ใบยูคาลิปตัส

ชื่อสามัญ: Blue gum

ชื่อวิทยาศาสตร์: *Eucalyptus globulus* Labill

ชื่อท้องถิ่น: ยูคา

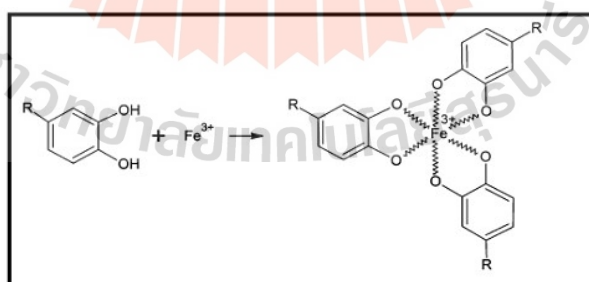
ลักษณะทางพฤกษศาสตร์:

- 1) ลำต้น จัดเป็น ไม้ยืนต้น ลำต้นตั้งตรงมีความสูงได้ประมาณ 10-25 เมตร เรือนยอดเป็นพุ่มหนาที่บดก่อนข้างกลม แตกกิ่งก้านมาก เปลือกต้นบางเรียบเป็นมันและลอกออกง่าย เปลือกต้นเป็นสีน้ำตาลอ่อนปนขาว หรือมีสีเทาสลับสีขาวและสีน้ำตาลแดงเป็นบางแห่ง เปลือกนอกจะแตกร่อนเป็นแผ่นๆ และหลุดออกจากผิวของลำต้น เมื่อแห้งจะลอกได้ง่าย กิ่งก้านเล็กเป็นเหลี่ยม มีจุดตากลม
- 2) ใบ เป็นใบเดี่ยว ออกเรียงสลับเป็นคู่ ใบห้อยลง ลักษณะของใบเป็นรูปหอก ปลายใบแหลม ใบมีขนาดกว้างประมาณ 2-7 เซนติเมตร และยาวประมาณ 12-30 เซนติเมตร แผ่นใบหนาเป็นสีเขียวอมสีน้ำเงิน มีผงคล้ายแป้งปกคลุม เส้นใบมองเห็นได้ชัดเจน ก้านใบสั้น ก้านใบยาวประมาณ 2 เซนติเมตร
- 3) ดอก ใบเป็นใบเดี่ยว ออกเรียงสลับเป็นคู่ ใบห้อยลง ลักษณะของใบเป็นรูปหอก ปลายใบแหลม ใบมีขนาดกว้างประมาณ 2-7 เซนติเมตร และยาวประมาณ 12-30 เซนติเมตร แผ่นใบหนาเป็นสีเขียวอมสีน้ำเงิน มีผงคล้ายแป้งปกคลุม เส้นใบมองเห็นได้ชัดเจน ก้านใบสั้น ก้านใบยาวประมาณ 2 เซนติเมตร

4) ผลมีลักษณะเป็นรูปครึ่งวงกลมหรือคล้ายรูปถ้วย ปลายผลแหลม ผลอ่อนเป็นสีเขียว และจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเมื่อแก่ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.8-2 เซนติเมตร เปลือกผลหนา มีรอยเส้นสีเหลี่ยม 4 เส้น เมื่อผลแก่ปลายผลจะแยกออก

2.5.3 การสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรด้วยไบยูกาลิปตัส

การใช้ประโยชน์ส่วนของลำต้นยูคาลิปตัสในการทำกระดาษมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนการใช้ประโยชน์ของไบยูกาลิปตัสเป็นการนำไปมาสกัดเป็นน้ำมัน น้ำยาหอมระเหย ไอระเหย แก้วหัด แต่เป็นสัดส่วนน้อยที่มีการนำไบยูกาลิปตัสไปใช้ประโยชน์ ทำให้ไบของยูคาลิปตัสจะถูกทิ้งเป็นปริมาณมาก จากหลายงานวิจัยพบว่า สาร polyphenols เป็นสารสกัดจากการต้มไบยูกาลิปตัส ซึ่งเป็นสารในกลุ่มสารประกอบฟีนอลิก (Phenolic Compound) มีโครงสร้างทางเคมีเป็นวงแหวนอะโรมาติก (Aromatic Ring) ที่มีจำนวนหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl Group) รวมอยู่ในโมเลกุล ตั้งแต่ 2 วงขึ้นไป ซึ่ง polyphenols มีคุณสมบัติเป็น Capping agent ของกระบวนการการสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตร ซึ่งจะช่วยลดการเกาะกลุ่มรวมตัวของเหล็กขนาดนาโนเมตร (Santos et al., 2012) โดยมีกลไกการสังเคราะห์คือ เหล็กเฟอร์รัสซัลเฟต Fe^{2+} ตั้งต้นจะเกิดการออกซิไดซ์กับออกซิเจน ทำให้เกิดเป็นเหล็กเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) จากนั้นสาร polyphenols จากพืชนั้นจะทำการเกิดกับเหล็กเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) ทำให้สารประกอบเชิงซ้อนที่มีโลหะถูกจับอยู่ในโมเลกุลไม่เปิดโอกาสให้ประจุลบจากที่อื่นเข้าทำปฏิกิริยาได้ (Fe^{3+} -polyphenol complexes) ซึ่งสารละลายที่ได้หลังการเกิดปฏิกิริยาจะมีสีดำและมีตะกอนคอลลอยด์ของ Fe^{3+} -polyphenol complexes (Wang et al., 2015) ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การเกิด Iron polyphenol complexes

2.5.4 คลื่นอัลตราโซนิก

คลื่นเสียงอัลตราโซนิกเป็นคลื่นเสียงความถี่สูงมากกว่า 20 กิโลเฮิร์ตซ์ จนถึง 106 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งเป็นช่วงความถี่ที่หูของคนปกติไม่สามารถได้ยิน เพราะหูของคนปกติได้ยินเสียงในช่วงความถี่ 16 –16,000 เฮิร์ตซ์) ความถี่ที่สูงนี้ก่อให้เกิดทั้งผลทางเคมี (chemical effect) ผลทางชีววิทยา(biological effect) และผลทางฟิสิกส์(physical effect) ในรูปแบบต่างๆ กล่าวคือคลื่นเสียงอัลตราโซนิกที่มีความแรงมากจะทำให้เกิดฟองอากาศ เกิดความดันสูงและเกิดความร้อนเฉพาะที่ ซึ่งเป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางชีววิทยา เช่น การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอช ของเลือด ตัวอ่อนในครรภ์เกิดความผิดปกติ เกิดการทำลายเอนไซม์ ฆ่าเชื้อแบคทีเรีย การเลือก ทำลายเฉพาะเซลล์มะเร็ง ทำให้เส้นประสาทเกิดความร้อนได้มากกว่าเนื้อเยื่ออื่นๆ และมีผลต่อการทำงานของหัวใจ เป็นต้น สำหรับผลทางเคมีพบว่าทำให้เกิดการออกซิเดชัน(oxidation) การสลายตัว (decomposition) การเปล่งแสง (luminescence) การเกิดผลึก(crystallization) ฯลฯ. ส่วนผลทางฟิสิกส์ มักเป็นผลรวมทางตรงหรือทางอ้อมที่เกิดจากผลทางเคมีและผลทางชีววิทยาดังกล่าวข้างต้น ได้แก่การเกิดฟองอากาศ เกิดความร้อน เกิดความดันและเกิดหมอก (fog) เป็นต้น คลื่นเสียงอัลตราโซนิกเป็นคลื่นเสียงที่ค่อนข้างปลอดภัย ไม่ก่อมลภาวะ มีราคาถูก และมีคุณสมบัติที่หลากหลายขึ้นอยู่กับความถี่ (ตารางที่ 2.3) ทำให้คลื่นเสียงอัลตราโซนิกถูกนำมาประยุกต์ใช้งานมากมายทั้งในด้านการแพทย์ ด้านการสื่อสาร ด้านอุตสาหกรรม รวมทั้งใช้ในชีวิตประจำวัน

ตารางที่ 2.3 ผลของความถี่ต่างๆ ของคลื่นเสียงอัลตราโซนิก

ความถี่ (กิโลเฮิร์ตซ์)	ผล	ความถี่ (กิโลเฮิร์ตซ์)	ผล
3	Cavitation	330	มีผลต่อไวรัสมาก
4,8	Depolymerization	350	epolymerization
5,7	ผลต่อไวรัสเล็กน้อย	365	Cavitation
8	Dispersion	380	การเกิดตะกอน
9	Cavitation		ผลทางเคมี
	Depolymerization	395	Emulsion
15	Cavitation	400	epolymerization
20-100	Depolymerization	500	การเปล่งแสง
25	Cavitation	530	Degassing
100-500	ผลทางเคมี	575	Cavitation

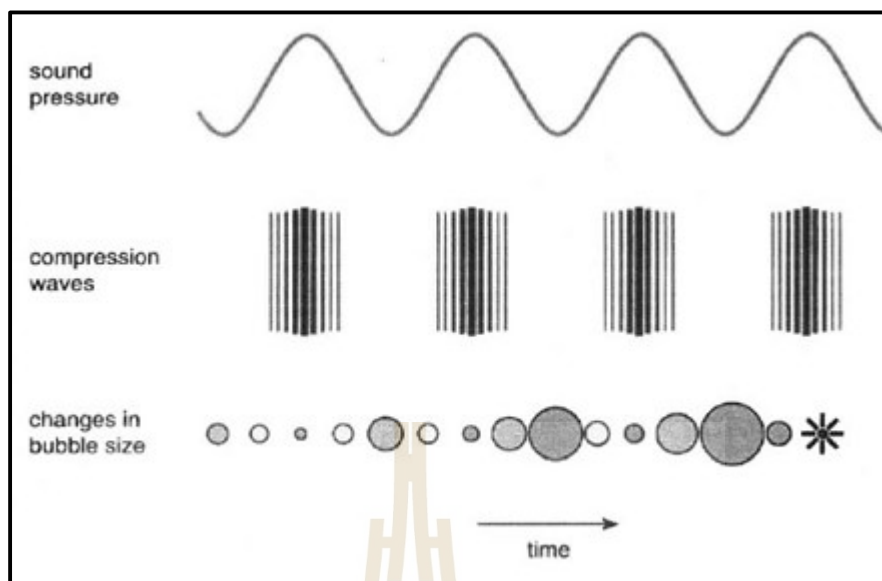
ตารางที่ 2.3 (ต่อ) ผลของความถี่ต่างๆ ของคลื่นเสียงอัลตราโซนิก

ความถี่ (กิโลเฮิรตซ์)	ผล	ความถี่ (กิโลเฮิรตซ์)	ผล
175	Cavitation	600-700	Emulsion
194	Degassing		Dispersion
200-500	Emulsion	722	Depolymerization
200-840	ผสมสารละลาย	800	Cavitation
214	Degassing	1160	Emulsion (น้อย)
	Cavitation	4,250-15,000	ไม่เกิด cavitation
	Emulsion		
284	Depolymerization		
289	ผลทางเคมี		
300	Cavitation		
	Depolymerization		
	ผลทางเคมี		
	ผลทางฟิสิกส์		

มีการประยุกต์ใช้คลื่นอัลตราโซนิกในการลดขนาดอนุภาคของวัสดุให้มีขนาดนาโนเมตร มีงานวิจัยใช้คลื่นอัลตราโซนิกร่วมกับโซเดียมโบโรไฮไดรด์ (NaBH_4) เพื่อช่วยในการสังเคราะห์เหล็กประจุศูนย์ขนาดนาโนเมตรพบว่า สามารถทำให้ขนาดอนุภาคลดลงจาก 90.3 นาโนเมตร เป็น 29.9 นาโนเมตรและมีพื้นที่ผิวของอนุภาคนาโนเพิ่มขึ้นจาก 10 ตารางเมตรต่อกรัม เป็น 42 ตารางเมตรต่อกรัม (Jamei และคณะ 2014) โดยใช้คลื่นอัลตราโซนิกที่ความถี่ 20 กิโลเฮิรตซ์ เป็นการใช้คลื่นอัลตราโซนิกที่มีความถี่ต่ำและความเข้มพลังงานที่สูง

2.5.4.1 หลักการของคลื่นอัลตราโซนิก

คลื่นเสียงอัลตราโซนิกทำให้เกิดการและสลายฟองอากาศขนาดเล็กจำนวนมากอย่างรวดเร็ว เรียกระบวนการนี้ว่า cavitation แสดงในรูปที่ 2.8 และ 2.9 ซึ่งการที่ฟองอากาศเกิดขึ้นได้นั้นเนื่องมาจากโครงสร้างของของเหลวที่ได้รับคลื่นอัลตราซาวนด์จะถูกบีบอัด (compress) และคลายตัว (stretch) ซ้ำไปมาเป็นจำนวนหลายพันรอบ ทำให้เกิดฟองอากาศขึ้น (Atchley and Crum, 1998)



รูปที่ 2.8 การเกิดฟองอากาศในตัวกลางเนื่องจากคลื่นอัลตราโซนิก ที่มา : Suslick (1994)

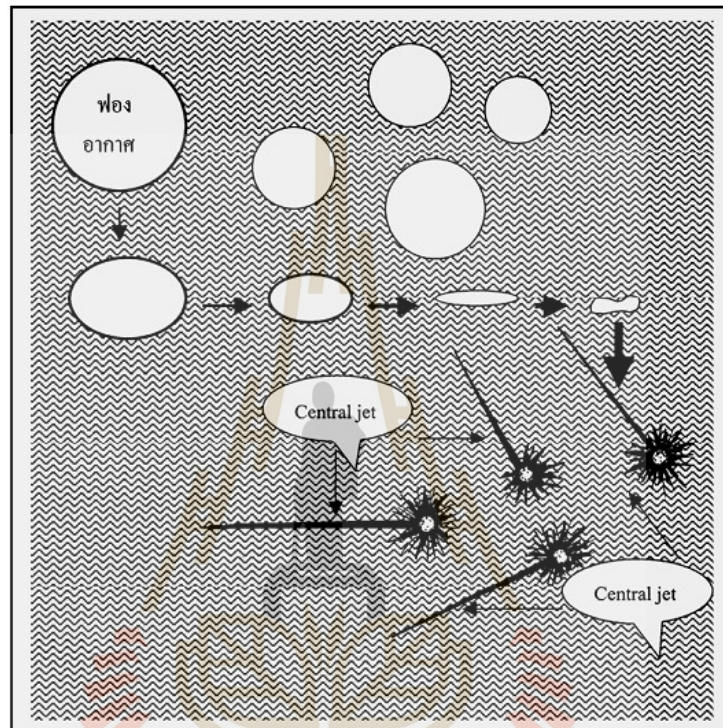
ฟองอากาศที่เกิดขึ้นมีขนาดแตกต่างกัน มีทั้งชนิดที่เกิดขึ้นแล้วแตกทันที (temporary bubble) และชนิดที่เป็นฟองอยู่ระยะเวลาหนึ่งแล้วจึงแตก (stable bubble) การแตกของฟองอากาศจะเกิดแรงดันต่อผิวอนุภาคหรือวัตถุที่สัมผัสทำให้อนุภาคแตกออกจากกัน ปรากฏการณ์ดังกล่าวแบ่งออกได้เป็น 3 ระยะคือ

1) ระยะเริ่มต้น (initial phase) หรือ bubble phase เป็นระยะสร้างฟองอากาศขนาดใหญ่ และขนาดเล็กซึ่งเกิดจากคลื่นเสียงอัลตราโซนิกทำให้เกิดความดัน 2 ทิศทาง (dielectric pressure) ที่ตรงกันข้าม ทำให้เกิดฟองสุญญากาศ (vacuum bubble) เนื่องจากมโนเวทเคลียส ซึ่งอาจเป็นไอน้ำที่เกิดจากโครงสร้างโมเลกุลของน้ำถูกทำลาย หรือเป็นแก๊สที่เกิดขึ้นเนื่องจากความร้อน หรือเป็นอนุภาคขนาดเล็ก (5×10^{-5} - 10^3 เซนติเมตร) อยู่ในตัวกลาง

2) ระยะทำลายฟองขนาดใหญ่ (catastrophic phase) โดยคลื่นเสียงอัลตราโซนิก ทำให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็กไม่กี่ไมครอนจนถึงหลายร้อยไมครอน จำนวนนับล้านฟอง

3) ระยะสุดท้าย (final phase) เป็นระยะสร้างความดันสูง เกิดขึ้นเนื่องจากฟองอากาศยุบตัวแตกออก (collapse) แล้วเกิดแรงดันของของเหลว (hydrostatic pressure) พุ่งออกมาเป็นลำจากฟองอากาศแต่ละฟองที่เรียกว่าเซนทรัลเจต (central jet) ซึ่งมีความดันสูงถึง 1,800 atm (รูปที่ 2.8) ดังนั้นถ้าใช้ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์จะมีแรงดันกระทำต่อผิวอนุภาคในความเร็วถึง 20,000 ครั้ง/วินาที และถ้าวัตถุอนุภาคในฟองอากาศแต่ละฟองพบว่ามีความถี่สูงถึง

2,000-5,000 องศาเซลวิน นอกจากนี้จำนวนฟองอากาศ และแรงระเบิดของฟองอากาศซึ่งนอกจากจะขึ้นอยู่กับความถี่และความแรงของคลื่นเสียงอัลตราโซนิกแล้ว ยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของตัวกลาง กล่าวคือถ้า อุณหภูมิสูงกว่า จำนวนฟองอากาศจะเกิดมากแต่แรงดันของของเหลวจะน้อยกว่าที่อุณหภูมิต่ำกว่า



รูปที่ 2.9 การเกิดแรงดันของของเหลวเนื่องจากการแตกของฟองอากาศขนาดเล็ก

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.6.1 การสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรโดยกระบวนการสังเคราะห์เคมีสีเขียว

วิธีทางกายภาพและทางเคมีกำลังถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางสำหรับการผลิตเหล็กขนาดนาโนเมตร อย่างไรก็ตามการผลิตนี้ต้องการใช้ตัวรีดิวซ์เช่นโซเดียมโบราไฮไดรด์และไฮดราซีนซึ่งเป็นพิษก่อให้เกิดผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมสิ่งมีชีวิตพืชและสัตว์ ดังนั้นการเลือกใช้กระบวนการเคมีสีเขียวที่มีประสิทธิภาพและเชื่อถือได้สำหรับการผลิตวัสดุนาโนวัสดุจากธรรมชาติหลายชนิดทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ที่สะอาดเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและยั่งยืนในการผลิตอนุภาคนาโนที่มีเสถียรภาพและมีประสิทธิภาพดี (Saif และคณะ, 2016) ถึงแม้ว่าวัสดุจากธรรมชาติหลายชนิดสามารถนำมาสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรด้วยกระบวนการเคมีสีเขียวเช่นจุลินทรีย์ แต่การผลิตวัสดุนาโนจากจุลินทรีย์จะสามารถผลิตได้น้อยลงและอัตราการสังเคราะห์ช้ากว่าการสังเคราะห์จากพืช (Dhillon GS และคณะ, 2012) การสังเคราะห์สีเขียวของเหล็กขนาดนาโนเมตรจากส่วนต่างๆ ของพืชเช่น ใบ ลำต้น รากและเมล็ด ความเหมาะสมขึ้นอยู่กับชนิดของพืชและค่าใช้จ่ายในการจัดซื้อ นอกจากนี้สมุนไพรและพืชต่างๆ มีปริมาณสารโพลีฟีนอลแตกต่างกันซึ่งมีอยู่ในองค์ประกอบของพฤษเคมีใน เมล็ด ผลไม้ ใบและลำต้น จากการศึกษาการสังเคราะห์จากสารสกัดจากใบจากพืชหลายชนิดเช่น ชาเขียว องุ่น ยูคาลิปตัส ทับทิม และว่านหางจระเข้ ซึ่งเป็นพืชที่หาได้ในประเทศไทยได้แสดงขนาดของอนุภาคที่สังเคราะห์ได้จากพืชชนิดต่างๆ และการนำไปประยุกต์ใช้ในตารางที่ 2.4 เนื่องจากใบยูคาลิปตัสเป็นพืชที่มีปลูกเป็นจำนวนมากในประเทศไทย ส่วนใหญ่ถูกปลูกเพื่อนำลำต้นไปผลิตกระดาษส่วนใบนั้นจะถูกทิ้งเป็นเศษวัสดุเหลือใช้ ดังนั้นจึงทำการเลือกศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมในการสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรจากใบยูคาลิปตัส แสดงสัดส่วนและสถานะที่เหมาะสมดังในตารางที่ 2.5

จากการศึกษาวิจัยที่มีผลต่อการสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรแสดงตารางที่ 2.5 โดยใช้สารสกัดจากใบยูคาลิปตัส ทำการเตรียมใบยูคาลิปตัส 60 กรัมในน้ำ DI 1 ลิตร ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน (60 70 และ 80 องศาเซลเซียส) มีผลต่อการสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตร (Fe NPs) เมื่ออุณหภูมิในการสกัดสูงขึ้นชี้ให้เห็นว่าการสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรได้ปริมาณมากขึ้นเนื่องจากสารสกัดที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ทำให้สารชีวโมเลกุลในใบยูคาลิปตัสได้รับการสกัดออกมาอย่างเพียงพอและด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิด Fe NPs ปริมาณที่สูงขึ้น ต่อมาศึกษาอัตราส่วนปริมาตรของสารสกัดจากใบยูคาลิปตัสและสารละลาย Fe^{3+} ที่อัตราส่วน 3:1 2:1 และ 1.5:1 พบว่าที่อัตราส่วน 2:1 เหมาะสมที่สุดในการสังเคราะห์ ปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้ด้วยเหตุผลดังต่อไปนี้ที่อัตราส่วน 1.5:1 ปริมาณสารสกัดที่น้อยเกินไป ไม่เพียงพอต่อการเข้าทำปฏิกิริยาส่งผลให้ปริมาณ อนุภาค Fe NPs ที่ได้ลดลง สำหรับที่อัตราส่วน 3:1 เนื่องด้วยสารสกัดจากใบยูคา

ลิปต์สมิ์คุณสมบัติเป็นสาร capping ดังนั้นสารสกัดที่มากเกินไปจะไปทำหน้าที่คลุมอยู่บนผิวหน้าของเหล็กให้มีความหนามากขึ้น สำหรับผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ Fe^{3+} ตั้งแต่ 0.075 0.1 และ 0.125 โมลาร์ พบว่าที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ มีความเหมาะสมมากที่สุด เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของ Fe^{3+} มากขึ้นส่งผลให้ปริมาณ Fe NPs เพิ่มขึ้น แต่เมื่อการเพิ่มความเข้มข้นของ Fe^{3+} มากเกินไปประกอบกับปริมาณสารสกัดเท่าเดิม ทำให้ปริมาณของสารสกัดไม่เพียงพอต่อการเข้าทำปฏิกิริยา ส่งผลให้ปริมาณอนุภาค Fe NPs ที่ได้ลดลง นอกจากนี้การศึกษาค่าสถานะความเป็นกรดต่างที่ 4 6 และ 8 พบว่าสถานะความเป็นกรดต่างมีผลกระทบต่ออัตราการสังเคราะห์ สรุปสถานะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ได้แก่ ทำการสกัดใบยูคาลิปตัสที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส สังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรที่อัตราส่วนปริมาตรของสารสกัดจากใบยูคาลิปตัสและสารละลาย Fe^{3+} ที่อัตราส่วน 2:1 และความเข้มข้นของ Fe^{3+} 0.1 โมลาร์ โดยค่าสถานะความเป็นกรดต่างมีผลกระทบต่ออัตราการสังเคราะห์ (YongLiu และคณะ, 2018)



ตารางที่ 2.4 การสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรที่ได้จากพืชชนิดต่างๆ ขนาดของอนุภาคและการนำไปประยุกต์ใช้

อ้างอิง	ชนิดพืช	ส่วนที่นำมาใช้	ขนาดที่สังเคราะห์ได้	การนำไปใช้
Hoag และคณะ, 2009	Camellia sinensis (Green Tea)	Leaf	5–15 nm	Bromothymol blue degradation (organic contamination)
Shahwan และคณะ, 2011	Green tea	Leaf	40–60 nm	Degradation of aqueous cationic and anionic dyes
Nadagouda และคณะ, 2010	Tea	Tea powder	40–50 nm	-
Wang, 2013	Eucalyptus Tereticornis	Leaf	40–60 nm	Adsorption of azo dyes
Luo และคณะ, 2014	Grape	Leaf	15–100 nm	Azo dyes such as acid Orange
Rao และคณะ, 2013	Punica granatum	Leaf	100–200 nm	Hexavalent chromium removal
Ahmmad และคณะ, 2013	Green tea	Leaf	40–80 nm	Photo catalytic activity
Phumying และคณะ, 2012	Aloe vera	-	6–30 nm	-
Madhavi และคณะ, 2013	Eucalyptus globules	Leaf	50–80 nm	Adsorption of hexavalent chromium
Wang และคณะ, 2014	Eucalyptus	Leaf	20–80 nm	Treatment of eutrophic wastewater
Wang และคณะ, 2014	Green tea and eucalyptus	Leaf	20–80 nm	Nitrates removal
Yong Liu และคณะ, 2018	Eucalyptus	Leaf	90–100 nm	Degradation of chromium

ตารางที่ 2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรจากไบยูลิปดัส

อ้างอิง	พืช	การสกัดสารสกัดจากพืช			การสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตร					ขนาด	หมายเหตุ
		ปริมาณ ต่อน้ำ 1 L	อุณหภูมิ (°C)	ระยะเวลา	ความเข้มข้นเหล็ก (FeII/FeIII)	สัดส่วนสารสกัด: เหล็ก (FeII/FeIII)	pH	อุณหภูมิ	ระยะเวลา		
Wang และ คณะ, 2014	ไบยูลิปดัส	60 g	80	1 ชม.	0.1 M	2:1	-	อุณหภูมิ ห้อง	black color indicated	80 nm	ใช้เหล็ก $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (FeII)
											ในสารสกัดจากไบยูลิปดัสมีสารโพลีฟีนอล
Yong Liu และคณะ, 2018	ไบยูลิปดัส	60 g	80	1 ชม.	0.1 M	2:1	4-8	อุณหภูมิ ห้อง	30 นาที	95 ± 5 nm	ใช้เหล็ก $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (FeIII)
											อุณหภูมิในการสกัดสารมีผลต่อสารชีวโมเลกุลจากไบยูลิปดัสที่อุณหภูมิสูงๆ ทำให้สกัดสารออกมาได้มาก
											สัดส่วนสารสกัด:เหล็ก (FeII/FeIII) ที่ 2:1 เป็นสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการสังเคราะห์
											pH มีผลกระทบต่ออัตราการสังเคราะห์

2.6.2 การบำบัดสารสารกำจัดศัตรูพืชด้วยอนุมูลอิสระ

การศึกษาการบำบัดสารละลายไกลโฟเซตในงานวิจัยนี้เป็นการผลิตอนุมูลอิสระจากปฏิกิริยาเสมือนเฟนตันโดยใช้โซเดียมเปอร์ซัลเฟตร่วมกับเหล็กขนาดนาโนเมตร ($\text{SPS}/\text{Fe}^{3+}$) ซึ่งจะได้อนุมูลอิสระ Sulfate radical ($\text{SO}_4^{\cdot-}$) และ Hydroxyl radical (OH^{\cdot}) โดยอนุมูลอิสระทั้งสองชนิดนี้จะเข้าทำตัดพันธะของสารไกลโฟเซต กลายเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความเป็นอันตรายน้อยลง ซึ่งได้ทำการรวบรวมงานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องดังนี้ (ตารางที่ 2.6)

จากการศึกษาบำบัดสารอิมิดาโคลพริคในน้ำด้วยปฏิกิริยาเสมือนเฟนตันระหว่างเหล็ก ($\text{Fe}^0, \text{Fe}^{3+}$) กับโซเดียมเปอร์ซัลเฟต ซึ่งสารสารอิมิดาโคลพริคคือสารกำจัดศัตรูพืช โดยทำการบำบัดสารสารอิมิดาโคลพริคที่ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณเหล็กที่เติม 3 กรัมต่อลิตร และโซเดียมเปอร์ซัลเฟต 5 มิลลิโมลาร์ สภาวะความเป็นกรดต่างเท่ากับ 7 ทำการกวนที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อวินาที เป็นระยะเวลา 60 นาที พบว่ามีประสิทธิภาพในการบำบัดมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ และนอกจากการนี้ยังมีการเติม TBA 1 โมลาร์ เพื่อศึกษาผลการบำบัดจากอนุมูลอิสระซัลเฟตสามารถระบุได้ว่าอนุมูลอิสระหลักที่มีผลต่อการบำบัดสารอิมิดาโคลพริคในน้ำด้วยปฏิกิริยาเสมือนเฟนตันระหว่างเหล็ก ($\text{Fe}^0, \text{Fe}^{3+}$) กับโซเดียมเปอร์ซัลเฟต คืออนุมูลอิสระ Sulfate radical ($\text{SO}_4^{\cdot-}$) และได้อธิบายข้อจำกัดของปฏิกิริยาเสมือนเฟนตันระหว่างเหล็ก (Fe^0 และ Fe^{3+}) กับโซเดียมเปอร์ซัลเฟต เช่น ในกรณีที่มีปริมาณเหล็กมาก ความเข้มข้นโซเดียมเปอร์ซัลเฟตสูง จะเกิดการระงับของอนุมูลอิสระซัลเฟต ($\text{SO}_4^{\cdot-}$) และอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (OH^{\cdot}) ส่งผลให้การบำบัดสารพิษมีประสิทธิภาพลดลง (Hayat และคณะ, 2019)

จากการศึกษาการบำบัดสารละลายไกลโฟเซตด้วยกระบวนการ electro-Fenton ใช้ Filter-press reactor, DSA/carbon felt, อัดอากาศ 1 ลิตรต่อนาที, สารละลาย Na_2SO_4 1 ลิตร ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ กระแสไฟฟ้าที่ปล่อย 1 แอมแปร์ เวลา 60 นาที เพื่อผลิต H_2O_2 ได้ 78.17 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการทำปฏิกิริยาร่วมกับ เหล็ก Fe^{2+} เข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ ที่ความเข้มข้นไกลโฟเซต 0.13 มิลลิโมลาร์ สภาวะความเป็นกรดต่างเท่ากับ 3 ที่อุณหภูมิห้อง พบว่ามีประสิทธิภาพในการบำบัดสารไกลโฟเซตสูงถึง 100 เปอร์เซ็นต์ (Barbosa, Marcus Paulo Rosa, et al. , 2018) กระบวนการดังกล่าวใช้หลักการทาง Fenton คือต้องการผลิต OH^{\cdot} ($E^\circ = 2.8$ โวลต์) เข้าออกซิไดซ์กับสารไกลโฟเซต ให้ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ (Barbosa และคณะ, 2018)

จากการศึกษาเปรียบเทียบการบำบัดสารไกลโฟเซตด้วย goethite และ magnetite ซึ่งเป็นแร่เหล็กที่สามารถฉายแสงด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV) ได้ด้วยช่องว่างแถบ 2.10 อิเล็กตรอนโวลต์และ 1.84 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ และใน magnetite มีปริมาณ $\text{Fe(II)}/\text{Fe(III)}$ สูงกว่า ทำให้ง่ายต่อการเกิดปฏิกิริยา photocatalysis ในการทดลองที่ความเข้มข้นไกลโฟเซตเริ่มต้น

10 มิลลิกรัมต่อลิตร และใช้ goethite และ magnetite 0.4 กรัมต่อลิตร ภายในเวลา 120 นาที พบว่าการใช้ magnetite/UV มีประสิทธิภาพการบำบัดสูงกว่า goethite/UV โดยช่วงประสิทธิภาพของการบำบัดคือ 58.0–99.3 เปอร์เซ็นต์ และ 43.4–92.0 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สำหรับหลักการในการบำบัดอาศัย OH^{\cdot} ทำลายพันธะ C-P ของสารไกลโฟเฟต ซึ่งได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็น PO_4^{3-} NH_4^+ NO_2^- NO_3^- CO_2 และ H_2O นอกจากนี้ในการทดลองยังอธิบายถึงค่าสถานะความเป็นกรดต่างในช่วง 3-9 ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารไกลโฟเฟตพบว่า เมื่อค่าสถานะความเป็นกรดต่างเพิ่มขึ้นทำให้ประจุที่ผิว (surface charge) ของ goethite และ magnetite ทั้งหมดกลายเป็นประจุลบมากขึ้น ซึ่งยับยั้งการดึงดูดระหว่างไกลโฟเฟตกับผิวเหล็กออกไซด์ ในขณะที่สถานะกรด ไม่มีผลต่อการยับยั้งการดูดซับแล้วยังมีปริมาณ H^+ ปริมาณมากซึ่งส่งผลต่อการเพิ่มปริมาณของอนุมูลอิสระ OH^{\cdot} จากปฏิกิริยาระหว่าง Fe^{2+} กับ H^+ จากการแตกตัวของกรดในน้ำ (YingYang และคณะ, 2018)



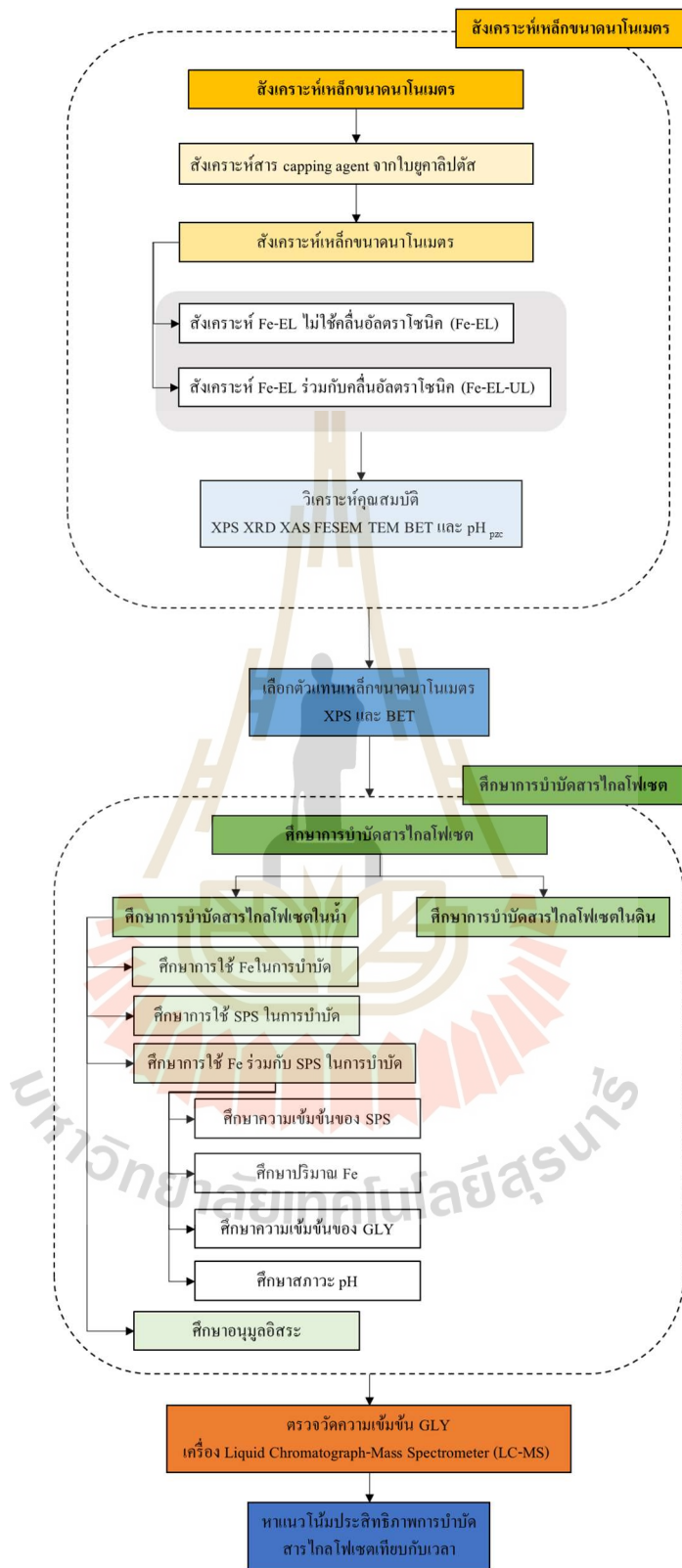
ตารางที่ 2.6 การบำบัดสารไกลโฟเซตด้วยอนุพลอิสระ

อ้างอิง	กระบวนการบำบัด	เงื่อนไข	สัดส่วน	ระยะเวลา	อุณหภูมิ	ประสิทธิภาพ	หมายเหตุ
Hayat และคณะ, 2019	บำบัดสารอิมิดาโคลพริด ในน้ำด้วยเหล็กกับ SPS	สารอิมิดาโคลพริด	30 ppm	60 นาที	อุณหภูมิห้อง	>90%	มีการเติม TBA 1 M เพื่อศึกษาผลการบำบัดจากอนุพลอิสระซัลเฟต
		Fe ⁰	3 g/l				
		Fe ³⁺					
		SPS	5 mM				
		pH	7				
การก่อกวน	150 rpm						
Barbosa และคณะ, 2018	electro-Fenton in filter-press reactor ในน้ำ	ไกลโฟเซต	0.13 mM	60 นาที	อุณหภูมิห้อง	100%	ใช้ Filter-press reactor, DSA/carbon felt, อัตราอากาศ 1 L/min สารละลาย Na ₂ SO ₄ 1 L ความเข้มข้น 0.05 M กระแสไฟฟ้าที่ปล่อย 1 A เวลา 60 นาที เพื่อผลิต H ₂ O ₂ ได้ 78.17 mg/L
		Fe ²⁺	1.00 mM				
		กระแสไฟฟ้า	1.00 A				
		pH	3				
YingYang และคณะ, 2018	Adsorption and photo-degradation ในน้ำ	ไกลโฟเซต	10 mg/L	120 นาที	อุณหภูมิห้อง	58.0%–99.3%	goethite และ magnetite เป็นแร่เหล็ก (Fe(II)/Fe(III)) pH ต่ำๆ เพิ่มการดูดติดสารไกลโฟเซตกับผิวของ goethite และ magnetite และยังมี H ⁺ ปริมาณมากซึ่งส่งผลต่อการเพิ่มปริมาณของอนุพลอิสระ ในการทำลายพันธะ C-P ของไกลโฟเซต

บทที่ 3

การศึกษาดำเนินงาน

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตร โดยใช้สารสกัดจากใบยูคาลิปตัสเพื่อลดการเกาะกลุ่มรวมตัวของเหล็กขนาดนาโนเมตรโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิกพร้อมด้วย จากนั้นจะนำเหล็กขนาดนาโนเมตรที่สังเคราะห์ได้ไปใช้ในการบำบัดสารไกลโฟเซต ซึ่งการทดลองส่วนแรกคือการสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรด้วยสารสกัดจากใบยูคาลิปตัสร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิกและจะทำการเลือกเหล็กขนาดนาโนเมตรที่ได้จากการสังเคราะห์จากการนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติด้วยเทคนิคต่างๆ ได้แก่ X-Ray Photoemission spectroscopy (XPS) X-ray absorption spectroscopy (XAS) X-Ray Diffractometer (XRD) Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) Transmission electron microscope (TEM) salt addition และ Brunauer-Emmett-Teller (BET) โดยจะเลือกตัวแทนเหล็กขนาดนาโนเมตร ที่มีความเหมาะสมที่สุดจากค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นเหล็กด้วยเทคนิค XPS และค่าพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยเทคนิค BET ส่วนเทคนิคอื่นๆจะนำมาใช้ในการอธิบายลักษณะด้านอื่นๆ ของเหล็กขนาดนาโนเมตรที่ได้รับเลือก จากนั้นจะเป็นการทดลองส่วนที่สองคือการบำบัดสารไกลโฟเซตด้วยปฏิกิริยาเสมือนเฟนต์ โดยใช้ตัวแทนเหล็กขนาดนาโนเมตรที่สังเคราะห์ขึ้นเองจากการทดลองข้างต้นมาใช้ร่วมกับสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟต ซึ่งได้แบ่งการศึกษาผลการบำบัดออกเป็น การบำบัดสารไกลโฟเซตในน้ำและการบำบัดสารไกลโฟเซตในดิน โดยการบำบัดสารไกลโฟเซตในน้ำจะทำการศึกษาปัจจัยของการบำบัดสารไกลโฟเซตครั้งนี้ การใช้เหล็กเพียงอย่างเดียว การใช้สารโซเดียมเปอร์ซัลเฟตเพียงอย่างเดียวและการใช้เหล็กร่วมกับสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟต (SPS) ซึ่งเป็นการบำบัดสารไกลโฟเซตด้วยปฏิกิริยาเสมือนเฟนต์ โดยทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ความเข้มข้นของสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟต ปริมาณเหล็ก ความเข้มข้นของไกลโฟเซต สภาพความเป็นกรดและอุณหภูมิอิสระ ส่วนการทดลองการบำบัดสารไกลโฟเซตในดินจะใช้ดินจากแปลงเกษตรอินทรีย์มาจำลองดินชุ่มน้ำเพื่อทำการศึกษาการบำบัดสารไกลโฟเซต ซึ่งความเข้มข้นของสารไกลโฟเซตได้รับการตรวจวัดด้วยเครื่อง Liquid Chromatograph-Mass Spectrometer (LC-MS) แล้วนำผลหาแนวโน้มประสิทธิภาพการบำบัดการบำบัดสารไกลโฟเซตเทียบกับเวลา โดยการทดลองทั้งหมดที่กล่าวมามีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยและขั้นตอนการทดลอง ดังนี้



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี เครื่องมือ และอุปกรณ์

3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

สารเคมีที่ใช้ในเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตร การเตรียมสารละลายไกลโฟเซต รวมถึงสารเคมีในการปรับค่าสภาพความเป็นกรดต่าง ได้แก่ ไบยูคาลิปตัส น้ำ DI (deionized water) เหล็ก Ferrous Sulfate Heptahydrate $\text{FeSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$ เอทานอล (Ethanol) กรดไฮโดรคลอริก (HCl) แก๊สไนโตรเจน (Nitrogen gas) แอมโมเนียมอะซิเตต (Ammonium acetate) กรดฟอร์มิก (Formic acid) อะซิโตนไนไตรท์ (Acetonitrile) ไกลโฟเซต (สารไกลโฟเซต) Tert-Butyl alcohol (TBA) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) แต่ไม่รวมสารเคมีที่ใช้วิเคราะห์คุณสมบัติของเหล็กขนาดนาโนเมตร

3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องมือหลักที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ คลื่นอัลตราโซนิก เครื่องเขย่า (Shaker) เตาอบ เครื่องวัดค่าความเป็นกรดต่าง เตาให้ความร้อน (Hotplate) เครื่องซังทศนิยม 4 ตำแหน่ง เครื่องกรองสุญญากาศ (Vacuum pump) เครื่อง X-Ray Photoemission spectroscopy (XPS) เครื่อง X-ray absorption spectroscopy (XAS) เครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD) เครื่อง Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) เครื่อง Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) เครื่อง Transmission electron microscope (TEM) เครื่อง BET Surface Area Pore Size and Pore Volume Distribution Analyzer และ เครื่อง Liquid Chromatograph-Mass Spectrometer (LC-MS) และเครื่องแก้วต่างๆ

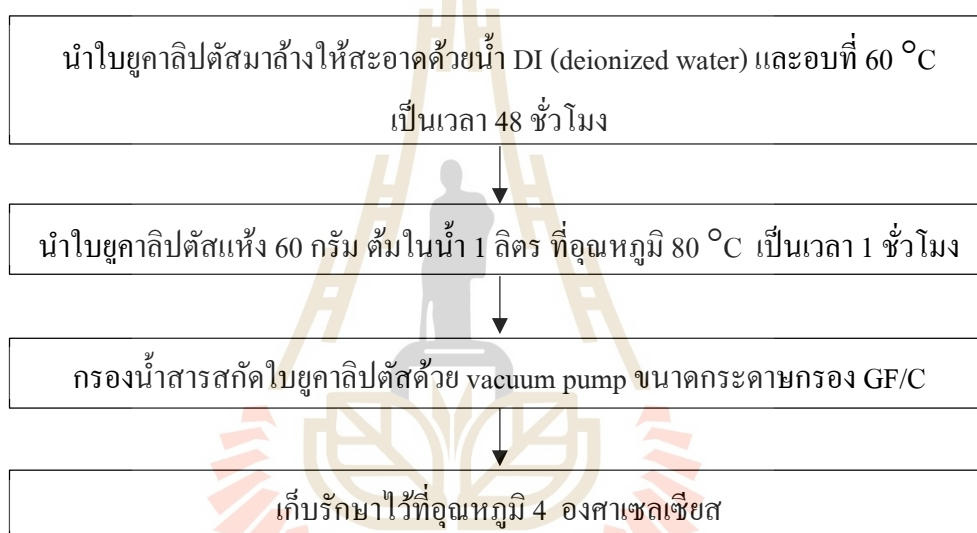
3.2 การสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตร (Fe-NPs)

การศึกษาการสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรโดยใช้สารสกัดจากสารสกัดไบยูคาลิปตัส โดยใช้คลื่นอัลตราโซนิกร่วมด้วย จะทำการสังเคราะห์น้ำสารสกัดไบยูคาลิปตัสแล้วนำไปใช้ในการสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรทั้งแบบใช้ร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิกและไม่ใช้ร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิก และทำการเลือกเหล็กขนาดนาโนเมตรที่ได้จากการสังเคราะห์โดยนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติด้วยเทคนิคต่างๆ ได้แก่ X-Ray Photoemission spectroscopy (XPS) X-ray absorption spectroscopy (XAS) X-Ray Diffractometer (XRD) Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) Transmission electron microscope (TEM) salt addition และ Brunauer-Emmet-Teller (BET) ซึ่งจะเลือกตัวแทนเหล็กขนาดนาโนเมตรที่มีความเหมาะสมที่สุดจากค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นเหล็กด้วยเทคนิค XPS และค่าพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยเทคนิค

BET ส่วนเทคนิคอื่นๆจะนำมาใช้ในการอธิบายลักษณะด้านอื่นๆ ของเหล็กขนาดนาโนเมตรที่ได้รับเลือก โดยการทดลองทั้งหมดที่กล่าวมามีขั้นตอนการทดลองดังนี้

3.2.1 การสังเคราะห์สารสกัดจากไบยูกาลิปตัส

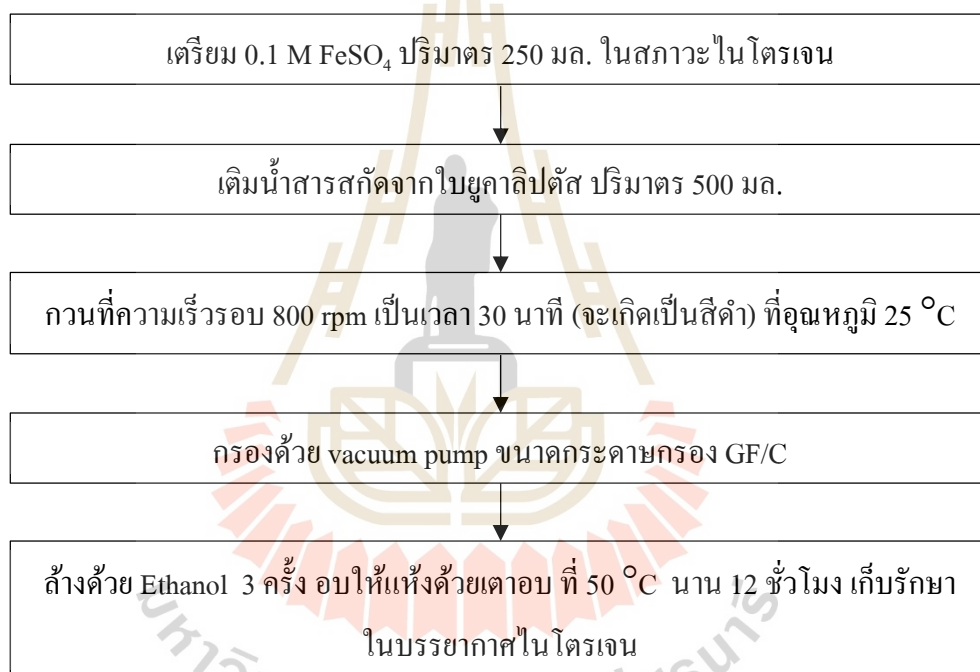
การสังเคราะห์สารสกัดจากไบยูกาลิปตัสสามารถทำได้โดยนำไบยูกาลิปตัสมาล้างให้สะอาดด้วยน้ำ DI (deionized water) และอบแห้งที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นนำไบยูกาลิปตัสแห้ง 60 กรัม ต้มในน้ำ DI 1 ลิตร ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำมากรองด้วย vacuum pump ขนาดกระดวยกรอง GF/C ทำการเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อใช้ในการสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรต่อไป



รูปที่ 3.2 วิธีการสังเคราะห์สารสกัดจากไบยูกาลิปตัส

3.2.2 การสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรจากสารสกัดจากใบยูคาลิปตัส

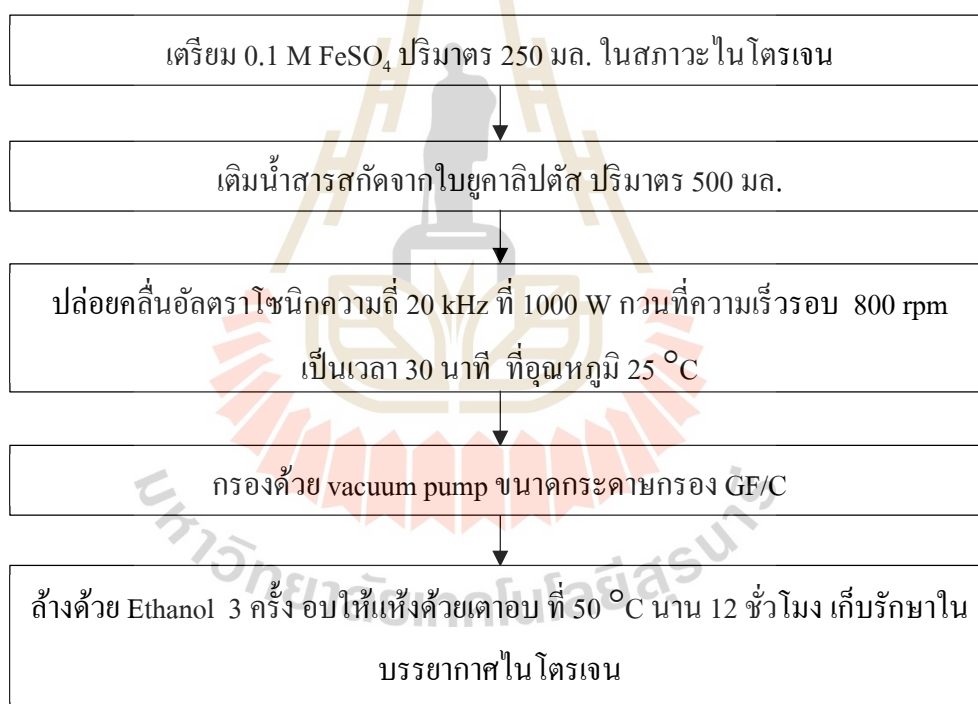
การสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรจากสารสกัดจากใบยูคาลิปตัส สามารถทำได้จากการเตรียม 0.1 โมลาร์ ของ FeSO_4 ในน้ำ DI ปริมาตร 250 มล. ในสถานะไนโตรเจนเพื่อไล่ออกซิเจนในสารละลาย เติมน้ำสารสกัดจากใบยูคาลิปตัสปริมาตร 500 มล. ทำการกวนที่ความเร็วรอบ 800 รอบต่อวินาที เป็นเวลา 30 นาที (จะเกิดเป็นสีดำ) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นำสารละลายสีดำมากรองด้วย vacuum pump ขนาดกระดาศกรอง GF/C จากนั้นล้างด้วย Ethanol 3 ครั้ง ทำการล้างอย่างรวดเร็ว นำมาอบให้แห้งด้วยเตาอบ ที่ 50 องศาเซลเซียส นาน 12 ชั่วโมง เก็บรักษาในบรรยากาศไนโตรเจนนำไปวิเคราะห์ลักษณะคุณสมบัติ



รูปที่ 3.3 วิธีการสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรจากสารสกัดจากใบยูคาลิปตัส

3.2.3 การสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรจากสารสกัดใบยูคาลิปตัสร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิก

การสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรจากสารสกัดจากใบยูคาลิปตัสร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิก สามารถทำได้จากการเตรียม 0.1 โมลาร์ ของ FeSO_4 ปริมาตร 250 มล. ในสถานะในโตรเจนเพื่อไล่ออกซิเจนในสารละลาย เติมน้ำสารสกัดจากใบยูคาลิปตัส ปริมาตร 500 มล. และปล่อยคลื่นอัลตราโซนิกความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ ที่ 1000 วัตต์ กวณที่ความเร็วรอบ 800 รอบต่อวินาที เป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นำสารละลายสีดามากรองด้วย vacuum pump ขนาดกระดาศกรอง GF/C จากนั้นล้างด้วย Ethanol 3 ครั้ง ทำการล้างอย่างรวดเร็ว นำมาอบให้แห้งด้วยเตาอบที่ 50 องศาเซลเซียส นาน 12 ชั่วโมง เก็บรักษาในบรรยากาศในโตรเจนนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติ



รูปที่ 3.4 วิธีการสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรจากสารสกัดใบยูคาลิปตัสร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิก

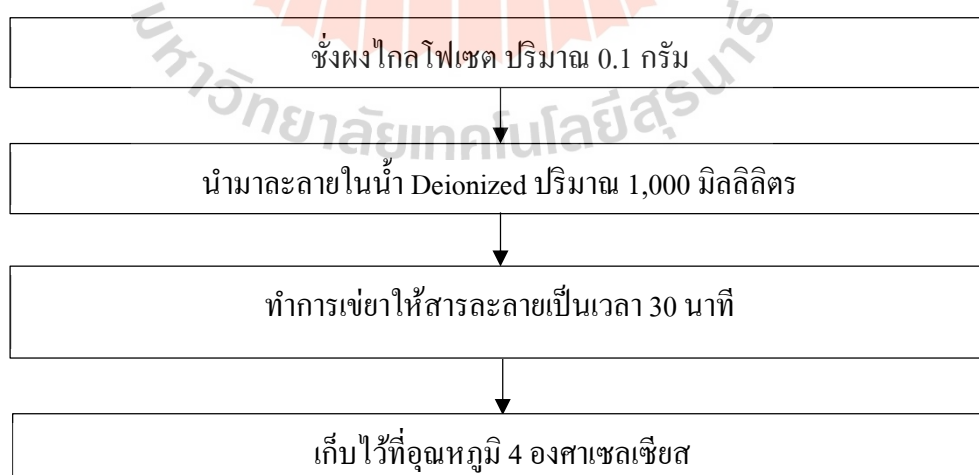
3.2.4 การวิเคราะห์คุณลักษณะสมบัติของเหล็กขนาดนาโนเมตร

การวิเคราะห์คุณลักษณะสมบัติของเหล็กขนาดนาโนเมตรประกอบด้วย การวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์ความเป็นเหล็กด้วยเทคนิค X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) การวิเคราะห์พื้นที่ผิว (Surface area) ของตัวอย่างด้วยวิธี Brunauer-Emmet-Teller (BET) การระบุชนิดและสถานะทางเคมีของธาตุที่เป็นองค์ประกอบ X-ray absorption spectroscopy (XAS) การถ่ายภาพ Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) และ Transmission electron microscope (TEM) เพื่อศึกษาขนาดของวัสดุสังเคราะห์ การวิเคราะห์หาสารประกอบด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray Diffractometer) จากนั้นนำผลจากการวิเคราะห์ที่ได้มาเปรียบเทียบกับเปอร์เซ็นต์ความเป็นเหล็กด้วยเทคนิค XPS และเปรียบเทียบพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยเทคนิค BET เพื่อเลือกตัวแทนเหล็กที่สังเคราะห์ด้วยสารสกัดจากใบยูคาลิปตัสที่มีปริมาณเหล็กสูงและมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง

3.3 การบำบัดสารไกลโฟเซต

3.3.1 การเตรียมสารละลายไกลโฟเซต

การเตรียมสารละลายไกลโฟเซตจะเตรียมที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร (Stock solution) โดยทำการชั่งผงไกลโฟเซต ปริมาณ 0.1 กรัม และนำมาละลายในน้ำ Deionized ปริมาณ 1,000 มิลลิตรทำการเขย่าให้สารละลายเป็นเวลา 30 นาที และเก็บ stock solution สารละลายไกลโฟเซตไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส



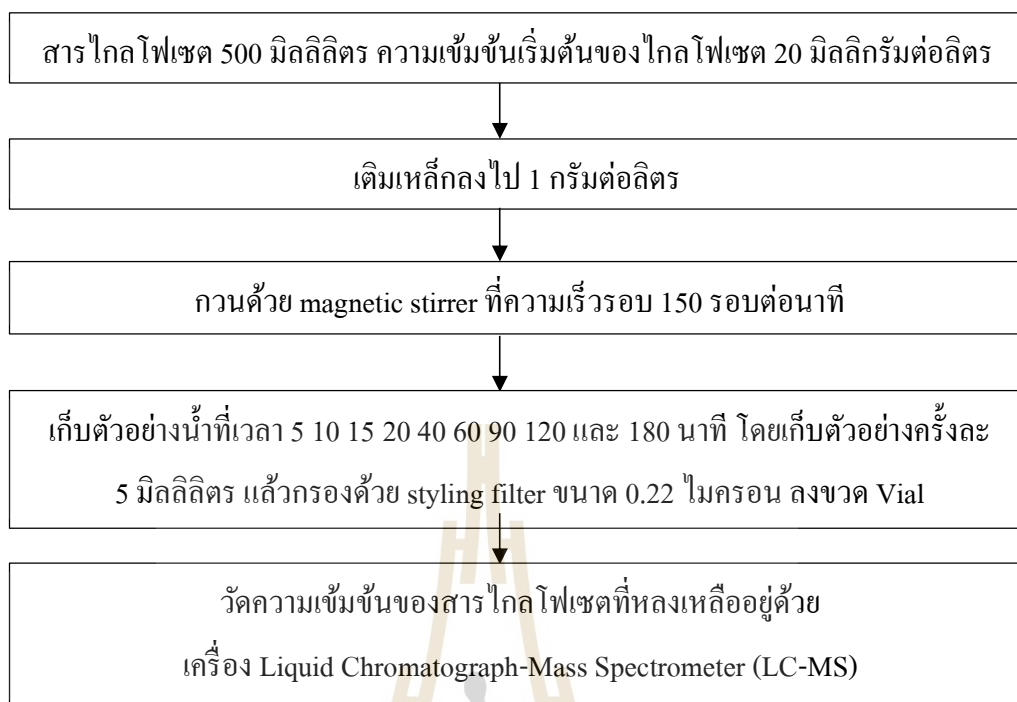
รูปที่ 3.5 วิธีเตรียมสารละลายไกลโฟเซต

3.3.2 การศึกษาปัจจัยในการบำบัดสารไกลโฟเซต

การศึกษาการบำบัดสารไกลโฟเซตด้วยปฏิกิริยาเสมือนเฟนตัน โดยใช้ตัวแทนเหล็กขนาดนาโนเมตรที่สังเคราะห์ขึ้นเองจากการทดลองข้างต้นมาใช้ร่วมกับสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟต ซึ่งได้แบ่งการศึกษาผลการบำบัดออกเป็น การบำบัดสารไกลโฟเซตในน้ำและการบำบัดสารไกลโฟเซตในดิน โดยการบำบัดสารไกลโฟเซตในน้ำจะทำการศึกษาปัจจัยของการบำบัดสารไกลโฟเซตดังนี้ การใช้เหล็กเพียงอย่างเดียว การใช้สารโซเดียมเปอร์ซัลเฟตเพียงอย่างเดียวและการใช้เหล็กร่วมกับสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟต (SPS) ซึ่งเป็นการบำบัดสารไกลโฟเซตด้วยปฏิกิริยาเสมือนเฟนตัน โดยทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ความเข้มข้นของสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟต ปริมาณเหล็ก ความเข้มข้นของไกลโฟเซต สภาพความเป็นกรดและอนุโมลอิสระ ส่วนการทดลองการบำบัดสารไกลโฟเซตในดินจะใช้เป็นดินจากแปลงเกษตรอินทรีย์มาจำลองดินชุ่มน้ำเพื่อทำการศึกษาการบำบัดสารไกลโฟเซต ซึ่งความเข้มข้นของไกลโฟเซตจะได้รับการตรวจวัดด้วยเครื่อง Liquid Chromatograph-Mass Spectrometer (LC-MS) แล้วหาแนวโน้มประสิทธิภาพการบำบัดสารไกลโฟเซตเทียบกับเวลา โดยการทดลองทั้งหมดที่กล่าวมามีขั้นตอนการทดลอง ดังนี้

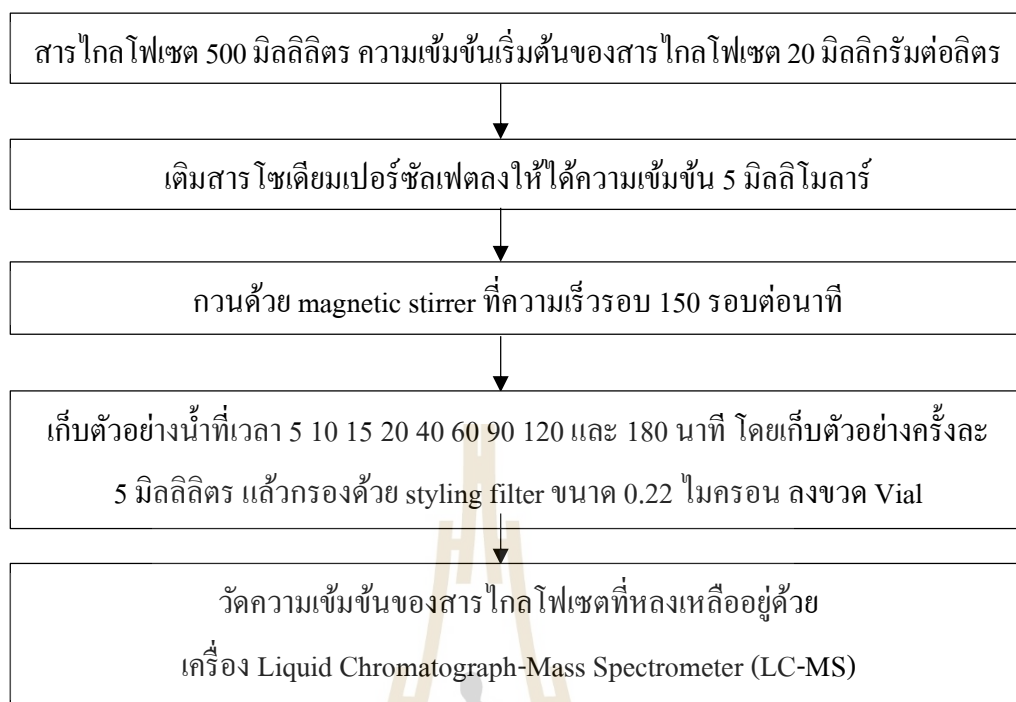
3.3.2.1 การศึกษาปัจจัยในการบำบัดสารไกลโฟเซตในน้ำด้วยปฏิกิริยาเสมือนเฟนตัน

1) การศึกษาการบำบัดสารไกลโฟเซตด้วยเหล็กขนาดนาโนเมตร การทดลองการศึกษาการบำบัดสารไกลโฟเซตด้วยเหล็กขนาดนาโนเมตร (Fe-NPs, Fe) จะทำการดำเนินการในการทดลองแบบเบทช์ในบีกเกอร์ 1000 มิลลิลิตร โดยมีปริมาตรสารไกลโฟเซต 500 มิลลิลิตร ทำการควบคุมความเข้มข้นเริ่มต้นของไกลโฟเซต 20 มิลลิกรัมต่อลิตร และเติมเหล็ก (Fe-NPs, Fe) ลงไป 1 กรัมต่อลิตรโดยทำการกวนด้วย magnetic stirrer ที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เพื่อทำให้เกิดการผสมกันตลอดเวลาทำปฏิกิริยา เริ่มเก็บตัวอย่างน้ำที่เวลา 5 10 15 20 40 60 90 120 และ 180 นาที โดยเก็บตัวอย่างครั้งละ 5 มิลลิลิตร แล้วกรองด้วย styling filter ขนาด 0.22 ไมครอน ลงขวด Vial แล้วนำไปวัดความเข้มข้นของสารไกลโฟเซตที่หลงเหลืออยู่ด้วยเครื่อง Liquid Chromatograph-Mass Spectrometer (LC-MS) ดังรูปที่ 3.5 การบำบัดสารไกลโฟเซตด้วยเหล็ก



รูปที่ 3.6 วิธีการบำบัดสารไกลโคเซตด้วยเหล็กขนาดนาโนเมตร

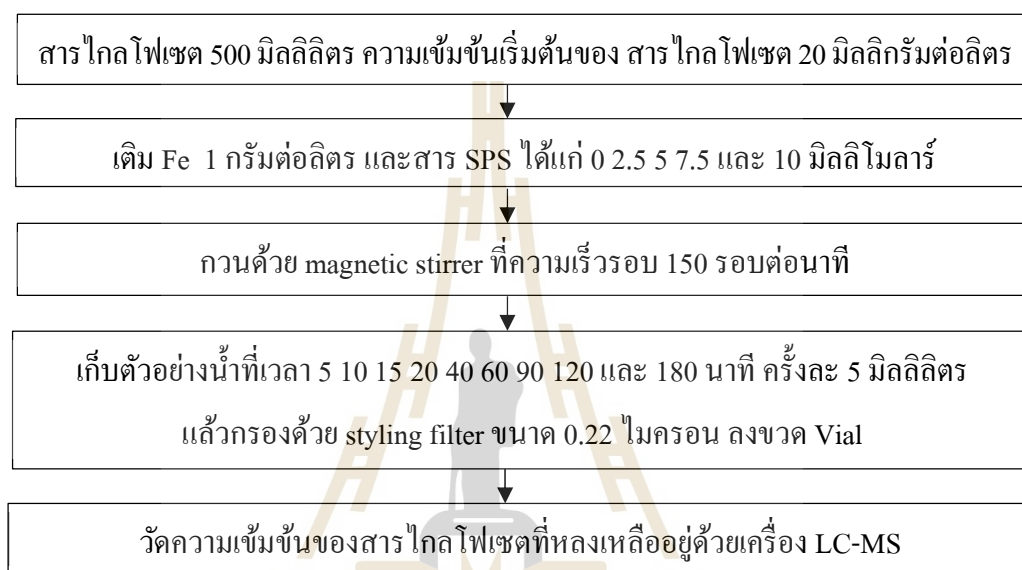
- 2) การศึกษาการบำบัดสารไกลโคเซตด้วยสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟต การทดลองการศึกษาการบำบัดสารไกลโคเซตด้วยสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟต (SPS) จะทำการดำเนินการในการทดลองแบบแบทช์ในบีกเกอร์ 1000 มิลลิลิตร โดยมีปริมาตรสารไกลโคเซต 500 มิลลิลิตร ทำการควบคุมความเข้มข้นเริ่มต้นของสารไกลโคเซต 20 มิลลิกรัมต่อลิตร และเติมสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟตลงให้ได้ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ โดยทำการกวนด้วย magnetic stirrer ที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เพื่อทำให้เกิดการผสมกันตลอดเวลาทำปฏิกิริยา เริ่มเก็บตัวอย่างน้ำที่เวลา 5 10 15 20 40 60 90 120 และ 180 นาที โดยเก็บตัวอย่างครั้งละ 5 มิลลิลิตร แล้วกรองด้วย styling filter ขนาด 0.22 ไมครอน ลงขวด Vial แล้วนำไปวัดความเข้มข้นของสารไกลโคเซตที่หลงเหลืออยู่ด้วยเครื่อง Liquid Chromatograph-Mass Spectrometer (LC-MS)



รูปที่ 3.7 วิธีการบำบัดสารไกลโฟเซตด้วยสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟต

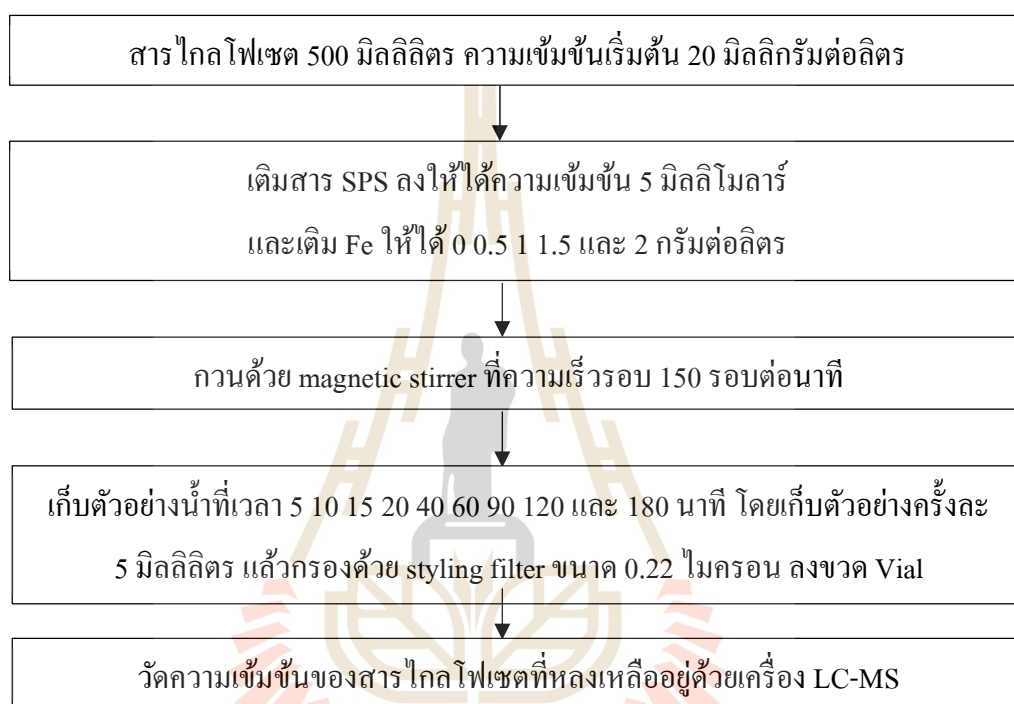
3) การศึกษาการบำบัดสารไกลโฟเซตด้วยปฏิกิริยาเสมือนเฟ้นต้น การทดลองการศึกษาการบำบัดสารไกลโฟเซตด้วยปฏิกิริยาเสมือนเฟ้นต้นระหว่างเหล็กขนาดนาโนเมตร (Fe-NPs, Fe) กับสาร โซเดียมเปอร์ซัลเฟต (SPS) จะทำการดำเนินการในการทดลองแบบแบทช์ในบีกเกอร์ 1000 มิลลิลิตร โดยมีปริมาตรสารไกลโฟเซต 500 มิลลิลิตร โดยทำการกวนด้วย magnetic stirrer ที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เพื่อทำให้เกิดการผสมกันตลอดเวลาทำปฏิกิริยา เริ่มเก็บตัวอย่างน้ำที่เวลา 5 10 15 20 40 60 90 120 และ 180 นาที โดยเก็บตัวอย่างครั้งละ 5 มิลลิลิตร แล้วกรองด้วย styling filter ขนาด 0.22 ไมครอน ลงขวด Vial แล้วนำไปวัดความเข้มข้นของสารไกลโฟเซตที่หลงเหลืออยู่ด้วยเครื่อง Liquid Chromatograph-Mass Spectrometer (LC-MS) โดยจะมีการทดลองย่อยเพื่อหาปัจจัยในการบำบัดได้แก่ ความเข้มข้นของสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟต ปริมาณเหล็ก ความเข้มข้นของไกลโฟเซต สภาวะความเป็นกรดต่าง ดังการทดลองย่อยต่อไปนี้

3.1) การศึกษาความเข้มข้นของสาร โซเดียมเปอร์ซัลเฟต (SPS) ที่มีผลต่อการบำบัด สารไกลโฟเซต ที่ความเข้มข้นของสาร โซเดียมเปอร์ซัลเฟต 0 2.5 5 7.5 และ 10 มิลลิโมลาร์ โดยทำการควบคุมความเข้มข้นเริ่มต้นของสาร ไกลโฟเซต 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของเหล็กขนาดนาโนเมตร 1 กรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้อง สภาวะความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 7



รูปที่ 3.8 วิธีการศึกษาความเข้มข้นของสาร โซเดียมเปอร์ซัลเฟตที่มีผลต่อการบำบัดสาร ไกลโฟเซต ด้วยปฏิกิริยาเสมือนเฟนตัน

3.2) การศึกษาความเข้มข้นของเหล็กขนาดนาโนเมตร (Fe-NPs, Fe) ที่มีผลต่อการบำบัดสารสารไกลโฟเซต ที่ความเข้มข้นของเหล็กขนาดนาโนเมตร (Fe-NPs, Fe) 0 0.5 1 1.5 และ 2 กรัมต่อลิตร โดยทำการควบคุมความเข้มข้นเริ่มต้นของสารไกลโฟเซต 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟต (SPS) 5 มิลลิโมลาร์ ที่อุณหภูมิห้อง สภาวะความเป็นกรดต่างเท่ากับ 7



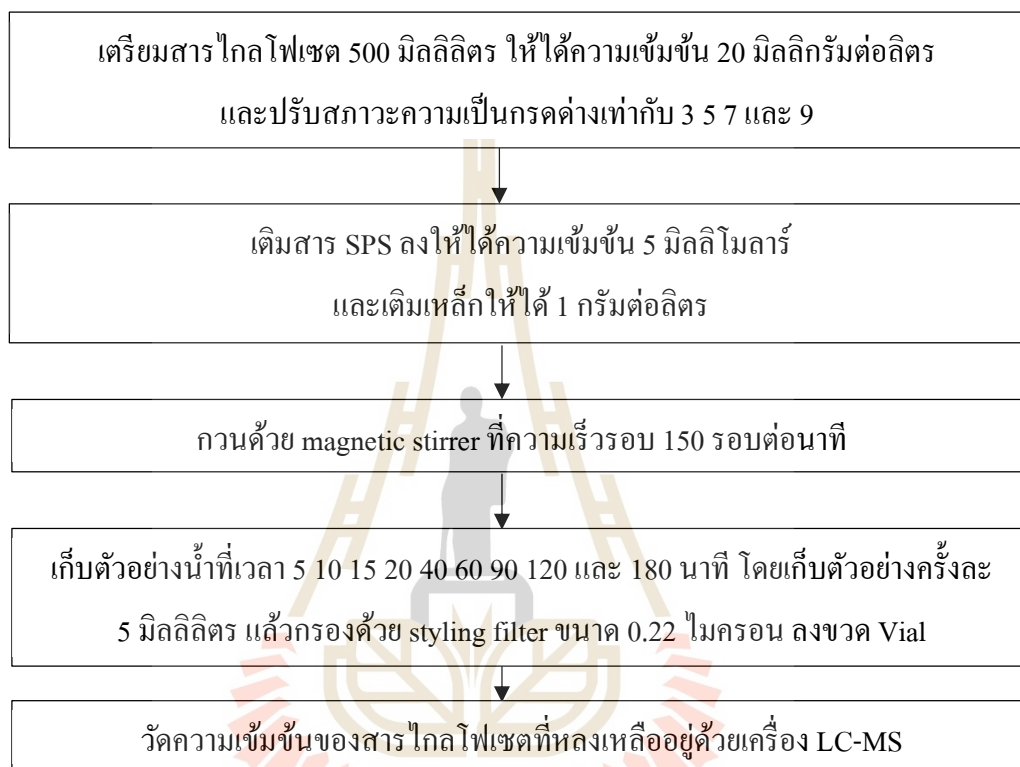
รูปที่ 3.9 วิธีการศึกษาความเข้มข้นของเหล็กที่มีผลต่อการบำบัดสารไกลโฟเซต ด้วยปฏิกิริยาเสมือนเฟนต์ัน

3.3) การศึกษาความเข้มข้นของสาร ไกลโฟเซต (glyphosate) เริ่มต้นที่มีผลต่อการบำบัดสาร สารไกลโฟเซต ที่ความเข้มข้นของสารไกลโฟเซตเริ่มต้น 10 20 30 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยทำการควบคุมความเข้มข้นเริ่มต้นของเหล็กขนาดนาโนเมตร (Fe-NPs, Fe) 1 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของสาร โซเดียมเปอร์ซัลเฟต (SPS) 5 มิลลิโมลาร์ ที่อุณหภูมิห้อง สภาวะความเป็นกรดต่างเท่ากับ 7



รูปที่ 3.10 วิธีการศึกษาความเข้มข้นของสาร ไกลโฟเซตเริ่มต้นที่มีผลต่อการบำบัดสารไกลโฟเซต ด้วยปฏิกิริยาเสมือนเฟนตัน

3.4) การศึกษาสภาวะความเป็นกรดต่างที่มีผลต่อการบำบัดสารไกลโฟเซต ที่สภาวะความเป็นกรดต่างเริ่มต้นเท่ากับ 3 5 7 และ 9 โดยทำการควบคุมความเข้มข้นเริ่มต้นของสาร ไกลโฟเซต 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของเหล็กขนาดนาโนเมตร (Fe-NPs, Fe) 1 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของสาร โซเดียมเปอร์ซัลเฟต (SPS) 5 มิลลิโมลาร์

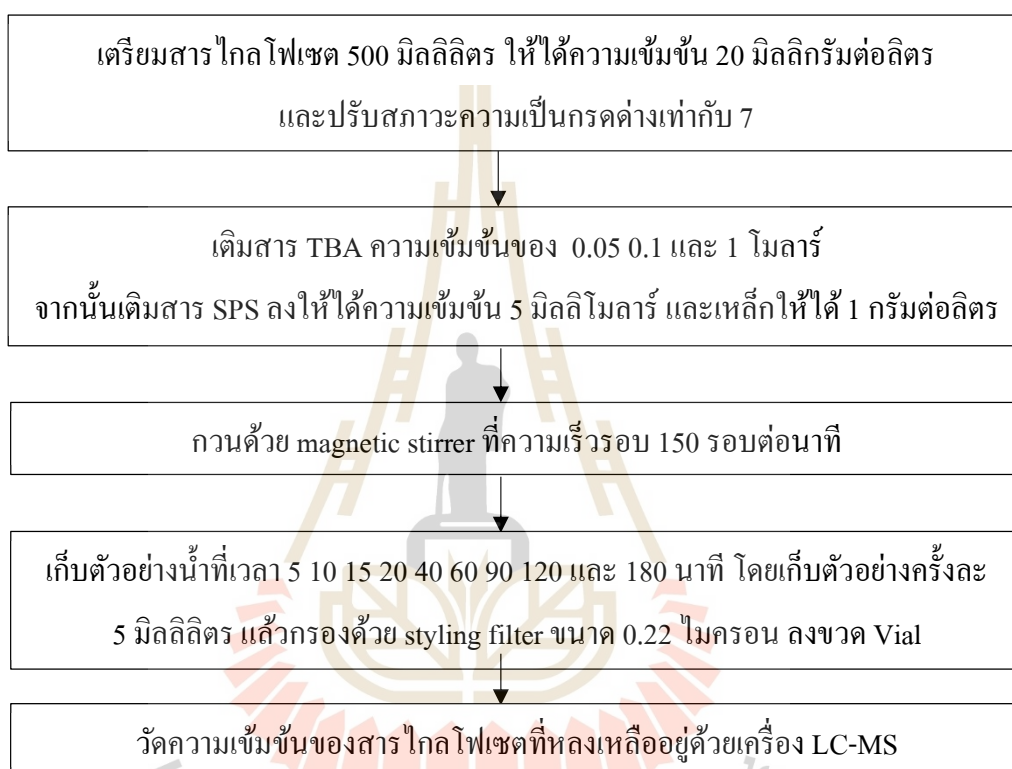


รูปที่ 3.11 วิธีการศึกษาสภาวะความเป็นกรดต่างเริ่มต้นที่มีผลต่อการบำบัดสารไกลโฟเซต ด้วยปฏิกิริยาเสมือนเฟนตัน

4) การศึกษาผลของอนุโมลอิสระต่อการบำบัดสารไกลโฟเซตด้วยปฏิกิริยาเสมือนเฟนตัน

การทดลองการศึกษาผลของอนุโมลอิสระจากปฏิกิริยาเสมือนเฟนตันระหว่างเหล็กขนาดนาโนเมตร (Fe-NPs, Fe) กับสาร โซเดียมเปอร์ซัลเฟต (SPS) ทำการดำเนินการในการทดลองแบบแบทช์ ในบีกเกอร์ 1000 มิลลิลิตร โดยมีปริมาตรสารไกลโฟเซต 500 มิลลิลิตร โดยทำการควบคุมความเข้มข้นเริ่มต้นของสารไกลโฟเซตเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของเหล็กขนาดนาโนเมตร (Fe-NPs, Fe) 1 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของสาร โซเดียมเปอร์ซัลเฟต (SPS) 5 มิลลิโมลาร์ ที่อุณหภูมิห้อง สภาวะสภาวะความเป็นกรดต่างเท่ากับ 7 จากนั้น

จะเติมสาร TBA ความเข้มข้น 0.05 0.1 และ 1 โมลาร์ โดยทำการกวนด้วย magnetic stirrer ที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เพื่อทำให้เกิดการผสมกันตลอดเวลาทำปฏิกิริยา เริ่มเก็บตัวอย่างน้ำที่เวลา 5 10 15 20 40 60 90 120 และ 180 นาที โดยเก็บตัวอย่างครั้งละ 5 มิลลิลิตร แล้วกรองด้วย styling filter ขนาด 0.22 ไมครอน ลงขวด Vial แล้วนำไปวัดความเข้มข้นของสารไกลโคไซด์ที่หลงเหลืออยู่ด้วยเครื่อง Liquid Chromatograph-Mass Spectrometer (LC-MS)



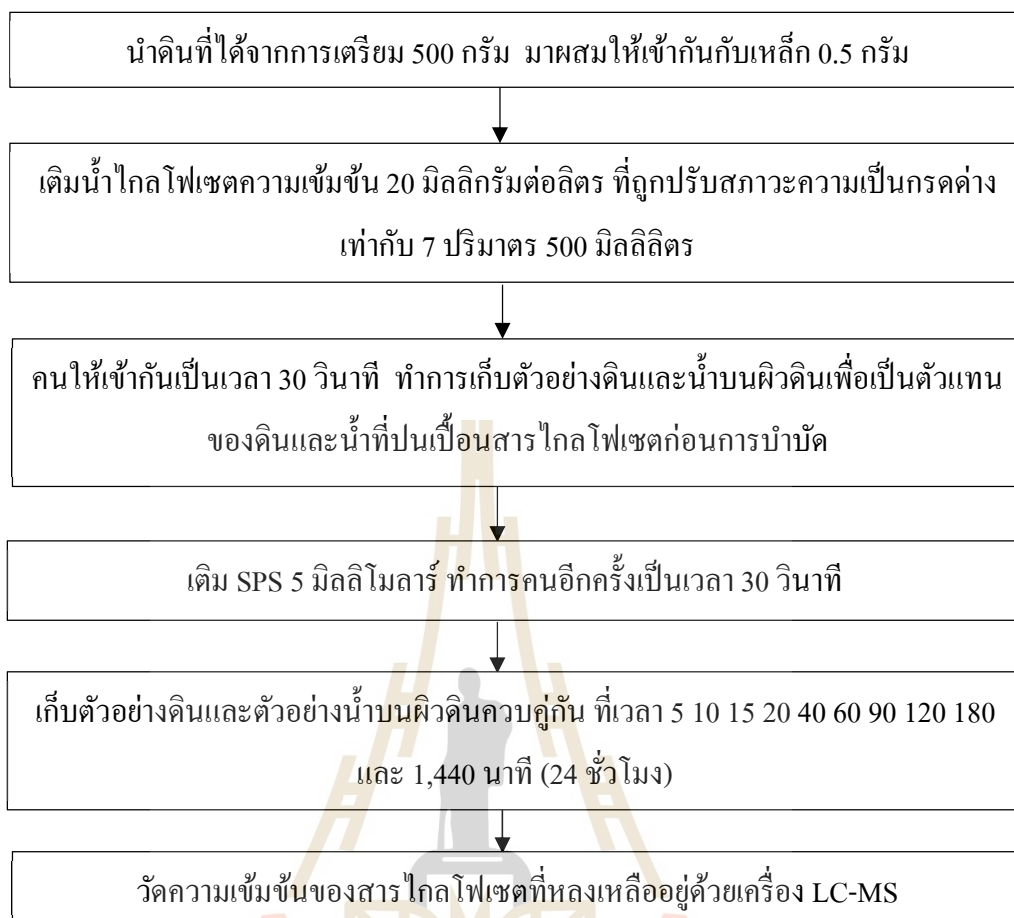
รูปที่ 3.12 วิธีการศึกษาผลของอนุมูลอิสระต่อการบำบัดสารไกลโคไซด์ด้วยปฏิกิริยาเสมือนเฟ้นต้น

3.3.2.2 การบำบัดสารไกลโฟเซตในดินชุ่มน้ำ

การศึกษากการบำบัดสารไกลโฟเซตในดินโดยการนำดินจากแปลงเกษตรอินทรีย์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มาทำการอบแห้งที่ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และทำการคัดขนาด จากนั้นทำการจำลองการบำบัดสารไกลโฟเซตในรูปแบบดินชุ่มน้ำดังรูปที่ 3.5 โดยนำดินที่ได้ 500 กรัม มาผสมกับเหล็ก 0.5 กรัม แล้วทำการเติมสารละลายไกลโฟเซตที่ถูกเตรียมไว้ให้มีความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 500 มิลลิตร ปรับสภาพความเป็นกรดต่างเท่ากับ 7 ทำการคนให้เข้ากันเป็นเวลา 30 วินาที ทำการเก็บตัวอย่างดินและน้ำบนผิวดินเพื่อเป็นตัวแทนของดินและน้ำที่ปนเปื้อนสารไกลโฟเซตก่อนการบำบัด จากนั้นเติมสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟต (SPS) 5 มิลลิโมลาร์ ทำการคนอีกครั้งเป็นเวลา 30 วินาที เริ่มเก็บตัวอย่างดินและน้ำบนผิวดินคววคู่กัน ที่เวลา 5 10 15 20 40 60 90 120 180 และ 1,440 นาที (24 ชั่วโมง) โดยเก็บตัวอย่างดินและน้ำบนผิวดินอย่างละ 5 มิลลิตร บริเวณจุดเก็บตัวอย่างดินจะทำการเก็บบริเวณกึ่งกลางของบีกเกอร์ที่ระดับความลึกของดิน 2.5 เซนติเมตร นำมาทำการสกัด ส่วนตัวอย่างน้ำบนผิวดินจะทำการเก็บบริเวณกึ่งกลางของบีกเกอร์เหนือผิวดินขึ้นมา 2.5 เซนติเมตร และนำตัวอย่างไปวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นของสารไกลโฟเซตต่อไป



รูปที่ 3.13 แบบจำลองการบำบัดสารไกลโฟเซตในรูปแบบดินชุ่มน้ำ



รูปที่ 3.14 วิธีการบำบัดสารไกลโฟเซตในดินชุ่มน้ำ

3.4 การวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของสารไกลโฟเซต

ทดสอบความเข้มข้นหลงเหลือของไกลโฟเซต ด้วยเครื่อง Liquid Chromatograph-Mass Spectrometer (LC-MS) รุ่น 6490 Triple Quadrupole LC/MS เป็นเครื่องมือสำหรับแยกวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณสารในสถานะของเหลว โดยใช้ตัวตรวจวัด (Detector) เป็นแบบเครื่องวิเคราะห์มวลสาร (Mass Spectrometer) โดยเตรียมสารละลายไกลโฟเซตมาตรฐานความเข้มข้น 0.5 1 5 10 20 50 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายไกลโฟเซต ซึ่งกำหนดสถานะที่เหมาะสมดังตารางที่ 3.1 จากนั้นนำความเข้มข้นของไกลโฟเซตมาหาแนวโน้มประสิทธิภาพการบำบัดสารไกลโฟเซตเทียบกับเวลา

ตารางที่ 3.1 การวิเคราะห์สารไกลโคไซด์โดยเทคนิค Liquid Chromatograph-Mass Spectrometer

ตัวแปร	สถานะที่เหมาะสม
1. คอลัมน์	HILIC
2. ประเภทของการวัด	Negative
3. มวลสารที่ตรวจวัด	168
4. ปริมาตรของสารที่ฉีดเข้าเครื่อง	5 ไมโครลิตร
5. อุณหภูมิในคอลัมน์	30 องศาเซลเซียส
6. สัดส่วนเฟดเคลื่อนที่	A (80%) คือ Ammonium acetate + 2% Formic acid B (20%) คือ Acetonitrile
7. อัตราการไหล	0.3 มิลลิลิตร/นาที
8. ระยะเวลาการวิเคราะห์ตั้งต้น	10 นาที

คำนวณประสิทธิภาพการบำบัดสารไกลโคไซด์

$$\text{ประสิทธิภาพ (Efficiency)} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100$$

เมื่อ C_0 คือ ความเข้มข้นของสารไกลโคไซด์เริ่มต้น

C_t คือ ความเข้มข้นของสารไกลโคไซด์หลังการบำบัด ณ เวลาต่างๆ

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตร โดยใช้สารสกัดจากใบยูคาลิปตัสร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิก จากนั้นทำเลือกตัวแทนเหล็กขนาดนาโนเมตรที่สังเคราะห์ได้ไปใช้ในการบำบัดสารไกลโฟเซต ดังนั้นผลการศึกษาจะประกอบด้วย 2 ผลการศึกษาคือ การศึกษาได้แก่ ส่วนแรกคือผลการศึกษาลักษณะสมบัติของเหล็กขนาดนาโนเมตร (Fe-NPs) และส่วนที่สองคือผลการศึกษาการบำบัดสารไกลโฟเซต

4.1 ผลการศึกษาลักษณะสมบัติของเหล็กขนาดนาโนเมตร (Fe-NPs)

จากการสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรทั้งหมด 8 แบบ และนำไปวิเคราะห์ลักษณะสมบัติด้วยเทคนิคต่างๆ ได้แก่ X-Ray Photoemission spectroscopy (XPS) X-ray absorption spectroscopy (XAS) X-Ray Diffractometer (XRD) Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) Transmission electron microscope (TEM) salt addition และ Brunauer-Emmet-Teller (BET) แล้วทำเลือกตัวแทนเหล็กขนาดนาโนเมตรที่มีความเหมาะสมที่สุด จากค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นเหล็กด้วยเทคนิค XPS และค่าพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยเทคนิค BET ส่วนเทคนิคอื่นๆ จะนำมาใช้ในการอธิบายลักษณะด้านอื่นๆ ของเหล็กขนาดนาโนเมตรที่ได้รับเลือก สามารถอธิบายลักษณะสมบัติของเหล็กขนาดนาโนเมตร (Fe-NPs) ได้ดังนี้

4.1.1 เทคนิค X-Ray Photoemission spectroscopy (XPS)

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XPS เป็นเทคนิคที่ใช้ในการระบุชนิดและสถานะทางเคมีของธาตุที่เป็นองค์ประกอบบริเวณพื้นผิวของสารที่ต้องการวิเคราะห์ จากเทคนิคดังกล่าวสามารถระบุสัดส่วนความเป็นเหล็ก คาร์บอน และออกซิเจน ดังตารางที่ 4.1 และแสดง XPS spectrum เพื่ออธิบายหุมฟังก์ชันที่เกิดขึ้นจากการสังเคราะห์ดังรูปที่ 4.1

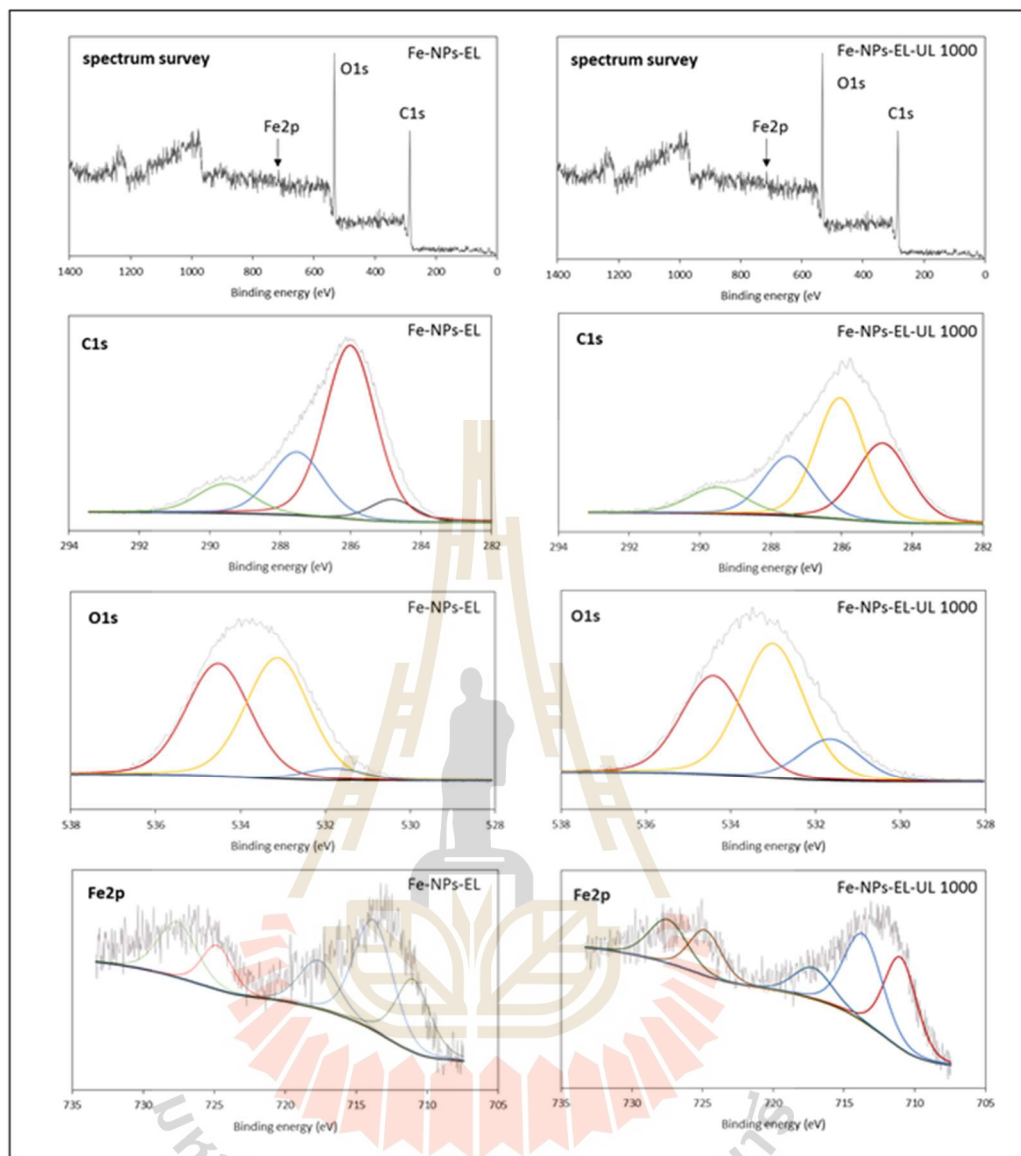
ตารางที่ 4.1 ค่า Atomic Concentration ของเหล็กขนาดนาโนเมตร (Fe-NPs)

ตัวอย่าง	Atomic Concentration (%)		
	C1s	O1s	Fe2p3
Fe-NPs 1 chem 0.1 M Fe	23.74	56.39	19.87
Fe-NPs 2 chem + Ultrasonic 1000W 0.1 M Fe	16.72	57.46	25.83
Fe-NPs 3 Euca extract 0.1 M Fe	69.04	29.34	1.61
Fe-NPs 4 Euca extract 0.2 M Fe	68.60	29.53	1.87
Fe-NPs 5 Euca extract + Ultrasonic 100W 0.1 M Fe	66.23	31.82	1.94
Fe-NPs 6 Euca extract + Ultrasonic 1000W 0.1 M Fe	65.77	31.86	2.37
Fe-NPs 7 Euca extract + Ultrasonic 1000W 0.05 M Fe	66.73	31.6	1.67
Fe-NPs 8 Euca extract + Ultrasonic 1000W 0.2 M Fe	61.43	35.96	2.61

จากตารางที่ 4.1 ได้ทำการสังเคราะห์เหล็กทั้งหมด 8 แบบ ได้แก่ แบบที่ 1 Fe-NPs 1 การสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรด้วยสาร โซเดียมโบโรไฮไดรด์และใช้เหล็กเฟอร์รัสซัลเฟตเข้มข้น 0.1 โมลลาร์ แบบที่ 2 Fe-NPs 2 การสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรด้วยสาร โซเดียมโบโรไฮไดรด์ร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิกกำลัง 1000 วัตต์ โดยใช้เหล็กเฟอร์รัสซัลเฟตเข้มข้น 0.1 โมลลาร์ แบบที่ 3 Fe-NPs 3 การสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรด้วยสารสกัดใบยูคาลิปตัสโดยใช้เหล็กเฟอร์รัสซัลเฟตเข้มข้น 0.1 โมลลาร์ แบบที่ 4 Fe-NPs 4 การสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรด้วยสารสกัดใบยูคาลิปตัสโดยใช้เหล็กเฟอร์รัสซัลเฟตเข้มข้น 0.2 โมลลาร์ แบบที่ 5 Fe-NPs 5 การสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรด้วยสารสกัดใบยูคาลิปตัสร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิกกำลัง 100 วัตต์ โดยใช้เหล็กเฟอร์รัสซัลเฟตเข้มข้น 0.1 โมลลาร์ แบบที่ 6 Fe-NPs 6 การสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรด้วยสารสกัดใบยูคาลิปตัสร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิกกำลัง 1000 วัตต์ โดยใช้เหล็กเฟอร์รัสซัลเฟตเข้มข้น 0.1 โมลลาร์ แบบที่ 7 Fe-NPs 7 การสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรด้วยสารสกัดใบยูคาลิปตัสร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิกกำลัง 1000 วัตต์ โดยใช้เหล็กเฟอร์รัสซัลเฟตเข้มข้น 0.05 โมลลาร์ แบบที่ 8 Fe-NPs 8 การสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรด้วยสารสกัดใบยูคาลิปตัสร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิกกำลัง 1000 วัตต์ โดยใช้เหล็กเฟอร์รัสซัลเฟตเข้มข้น 0.2 โมลลาร์

จากตารางที่ 4.1 สามารถอธิบายสัดส่วนความเป็นเหล็ก คาร์บอน และออกซิเจนของเหล็กขนาดนาโนเมตรที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการต่างๆได้ดังนี้ Fe-NPs 1 และ Fe-NPs 2 เป็นการสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรด้วยการใช้สาร โซเดียมโบโรไฮไดรด์เป็น reduction agent และมี

ความเข้มข้นเหล็กเฟอร์รัสตั้งต้น 0.1 โมลาร์ แต่ Fe-NPs 2 จะเพิ่มการใช้คลิ่นอัลตราโซนิกกำลัง 1000 วัตต์ร่วมด้วย จากผลการทดลองพบว่า การใช้คลิ่นอัลตราโซนิกร่วมกับการใช้สารโซเดียมโบโรไฮไดรด์เพื่อสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตร ทำให้มีเปอร์เซ็นต์ความเป็นเหล็ก เพิ่มขึ้นจาก 19.87 เปอร์เซ็นต์เป็น 25.83 เปอร์เซ็นต์และทำให้เปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนลดลงจาก 23.74 เปอร์เซ็นต์เป็น 16.72 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรด้วยสารสกัดไบบูคาลิปตัสได้แก่ Fe-NPs 3- Fe-NPs 7 พบว่า Fe-NPs 3 และ Fe-NPs 4 เป็นการสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรด้วยความเข้มข้นเหล็กเฟอร์รัสตั้งต้น 0.1 โมลาร์ และ 0.2 โมลาร์ ตามลำดับ แต่ไม่ใช้คลิ่นอัลตราโซนิก จะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณเหล็กตั้งต้นเพิ่มขึ้นจะทำให้มีเปอร์เซ็นต์ความเป็นเหล็กเพิ่มขึ้นด้วย ส่วน Fe-NPs 5-8 เป็นการสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรด้วยสารสกัดไบบูคาลิปตัสร่วมกับคลิ่นอัลตราโซนิก โดย Fe-NPs 5 ใช้คลิ่นอัลตราโซนิก 100 วัตต์ และ Fe-NPs 6-8 ใช้คลิ่นอัลตราโซนิก 1000 วัตต์ โดย Fe-NPs 6-8 มีความต่างกันออกไปคือ มีปริมาณความเข้มข้นของเหล็กเฟอร์รัสตั้งต้นต่างกันได้แก่ 0.1 0.05 และ 0.2 โมลาร์ ตามลำดับ จากการรายงานในตารางที่ 4.1 ซึ่งสามารถอธิบายสัดส่วนความเป็นเหล็ก คาร์บอน และออกซิเจน ของเหล็กขนาดนาโนเมตรที่สังเคราะห์ได้ดังนี้ จากผลการวิเคราะห์เห็นได้ชัดเจนว่า Fe-NPs 3 Fe-NPs 5 และ Fe-NPs 6 ที่มีความเข้มข้นของเหล็กเฟอร์รัสตั้งต้น 0.1 โมลาร์ เท่ากันแต่มีการใช้คลิ่นอัลตราโซนิกที่กำลังต่างกัน ทำให้ได้เปอร์เซ็นต์ความเป็นเหล็ก ได้แก่ 1.61 เปอร์เซ็นต์ 1.94 เปอร์เซ็นต์และ 2.37 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้คลิ่นอัลตราโซนิกที่กำลังสูงขึ้น ค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นเหล็กก็สูงขึ้นด้วย และจากผลการทดลองยังพบว่า เปอร์เซ็นต์ความเป็นเหล็กตรงข้ามกับเปอร์เซ็นต์คาร์บอน โดยเปอร์เซ็นต์คาร์บอนจะมีค่าลดลงเมื่อใช้คลิ่นอัลตราโซนิกที่กำลังสูงขึ้น ได้แก่ 69.04 เปอร์เซ็นต์ 66.23 เปอร์เซ็นต์ และ 65.77 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ เนื่องจากที่ผิวของเหล็กที่สังเคราะห์ด้วยสารสกัดจากไบบูคาลิปตัส จะมีสารจำพวกกลุ่ม polyphenol ปกคลุมเป็นชั้นหนานบนผิวของเหล็ก (Des et al., 2010) แต่เมื่อใช้คลิ่นอัลตราโซนิกอาจเป็นไปได้ว่าการใช้คลิ่นอัลตราโซนิกมีผลทำให้อินทรีย์คาร์บอนที่ผิวของเหล็กขนาดนาโนเมตรที่สังเคราะห์ได้ลดลง ส่งผลให้ชั้นผิวของเหล็กอนุภาคนาโนเมตรที่มีพวกรสชาติโมเลกุลปกคลุมอยู่มีความบางลง ทำให้ตรวจวัดเปอร์เซ็นต์ความเป็นเหล็กสูงขึ้น ในขณะที่เปอร์เซ็นต์ความเป็นคาร์บอนลดลง ซึ่งมีความคล้ายกับงานวิจัย (Jamei et al., 2014) เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรโดยการใส่สารเคมีอย่างเดียวยุติกับการใช้สารเคมีร่วมกับคลิ่นอัลตราโซนิกกำลัง 1000 วัตต์ พบว่า การใช้คลิ่นทำให้เห็นพิกของความเป็นเหล็กชัดเจนขึ้น เนื่องจากการใช้คลิ่นทำให้อนุภาคของสารตกค้างอื่นๆ หลุดออกไป



รูปที่ 4.1 รูปแบบ XPS spectrum ของ Fe-NPs-EL และ Fe-NPs-EL-UL 1000

จากผลเปอร์เซ็นต์ความเป็นเหล็กที่ได้รายงานในข้างต้นทำให้เห็นได้ว่าตัวอย่างเหล็กขนาดนาโนเมตรที่สังเคราะห์ด้วยสารสกัดใบยูคาลิปตัส ที่จะเหมาะสมในการบำบัดสารไกลโฟเซตต่อไป คือเหล็กขนาดนาโนเมตรที่สังเคราะห์ด้วยสารสกัดใบยูคาลิปตัสร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิกโดยใช้ความเข้มข้นของสารเหล็กเฟอร์รัสตั้งต้น 0.2 โมลาร์ (Fe-NPs 8 Euca extract + Ultrasonic 1000W 0.2 M Fe) เนื่องจากมีเปอร์เซ็นต์ความเป็นเหล็กสูงที่สุด 2.37 เปอร์เซ็นต์ จึงได้นำตัวอย่างเหล็กขนาดนาโนเมตรนี้ ไปวิเคราะห์ XPS spectrum ทั้ง Full spectrum survey spectrum C1s และ spectrum Fe_{2p_{3/2}} ดังรูปที่ 4.1 แสดง XPS spectrum ของเหล็กขนาดนาโนเมตรที่สังเคราะห์

ด้วยสารสกัดไบยูกาลิปตัส (Fe-NPs-EL) และเหล็กขนาดนาโนเมตรที่สังเคราะห์ด้วยสารสกัดไบยูกาลิปตัสร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิก (Fe-NPs-EL-UL 1000W) จากผล Full spectrum survey พบว่า เหล็กขนาดนาโนเมตรที่สังเคราะห์ด้วยสารสกัดไบยูกาลิปตัสมีความบริสุทธิ์ กล่าวคือบนพื้นผิวของเหล็กขนาดนาโนเมตรที่สังเคราะห์ได้ พบเพียงธาตุเหล็ก คาร์บอน และออกซิเจนบนผิวของเหล็ก ต่างจากการสังเคราะห์ด้วยสารเคมีที่จะมีการปนเปื้อนของสารโซเดียมตกค้างที่พื้นผิวของเหล็ก ซึ่งตกค้างมาจากการใช้สารโซเดียมโบโรไฮไดรด์ และจาก spectrum Fe $2p_{3/2}$ พบพีคที่ 711 อิเล็กตรอนโวลต์ และ 712.7 อิเล็กตรอนโวลต์ สามารถระบุได้ว่าเป็น Fe(II) และ Fe(III) ในรูปของเหล็กออกไซด์ ส่วนพีค 714.9 อิเล็กตรอนโวลต์ สามารถระบุได้ว่าเป็น Fe (III) ในกลุ่มไฮดรอกไซด์ และผล spectrum C1s พบพีคทั้งหมด 4 พีค ได้แก่ พีค 284.9 อิเล็กตรอนโวลต์ ระบุได้ว่าเป็น C-C พีค 285.4 อิเล็กตรอนโวลต์ ระบุได้ว่าเป็น C-OH พีค 286.8 อิเล็กตรอนโวลต์ ระบุได้ว่าเป็น C-O และพีค 288.9 อิเล็กตรอนโวลต์ ระบุได้ว่าเป็น C=O (Luo et al., 2016) ซึ่งช่วยยืนยันสารจำพวกกลุ่ม polyphenol ปกคลุมบนผิวของเหล็ก (Des et al., 2010)

จากข้อมูลเปอร์เซ็นต์ความเป็นเหล็กด้วยเทคนิค XPS พบว่าการสังเคราะห์ด้วยสารเคมีจะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นเหล็กสูงกว่าการใช้สารสกัดจากไบยูกาลิปตัส แต่ในงานวิจัยนี้ยังยืนยันที่จะเลือกใช้เหล็กขนาดนาโนเมตรที่สังเคราะห์ด้วยสารสกัดไบยูกาลิปตัสร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิกกำลัง 1000 วัตต์ โดยใช้ความเข้มข้นของสารเหล็กตั้งต้น 0.2 โมลาร์ (Fe-NPs 8 Euca extract + Ultrasonic 1000W 0.2 M Fe) เนื่องจากวิธีสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรด้วยสารเคมีทำให้มีการตกค้างของสารเคมีและมีค่าใช้จ่ายสูง จึงเป็นเหตุให้ในงานวิจัยนี้เลือกใช้การสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรด้วยการใช้สารสกัดไบยูกาลิปตัส ที่เป็นเศษวัสดุเหลือทิ้งจากการตัดต้นยูกาลิปตัสไปทำกระดาษและในส่วนของสารสกัดไบยูกาลิปตัสไม่ส่งผลให้เกิดอันตรายที่ร้ายแรงเหมือนการใช้สารเคมี

4.1.2 เทคนิค Brunauer-Emmet-Teller (BET)

Brunauer-Emmet-Teller (BET) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิว (Surface area) ของสารที่ต้องการวิเคราะห์ โดยอาศัยเทคนิคการแทนที่พื้นที่ผิว หรือรูพรุนด้วยแก๊สไนโตรเจน ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เทคนิคนี้ในการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะของเหล็กขนาดนาโนเมตร ซึ่งจากข้อมูลของเทคนิค XPS ที่ได้กล่าวไปข้างต้นสามารถเลือกเหล็กขนาดนาโนเมตรจากการพบเปอร์เซ็นต์ความเป็นเหล็กสูงที่สุดคือ เหล็กขนาดนาโนเมตรที่สังเคราะห์ด้วยสารสกัดไบยูกาลิปตัสร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิกกำลัง 1000 วัตต์ โดยใช้ความเข้มข้นของสารเหล็กเฟอร์รัสซัลเฟตเข้มข้น 0.2 โมลาร์ (Fe-NPs 8 Euca extract + Ultrasonic 1000W 0.2 M Fe) ดังนั้นจึง

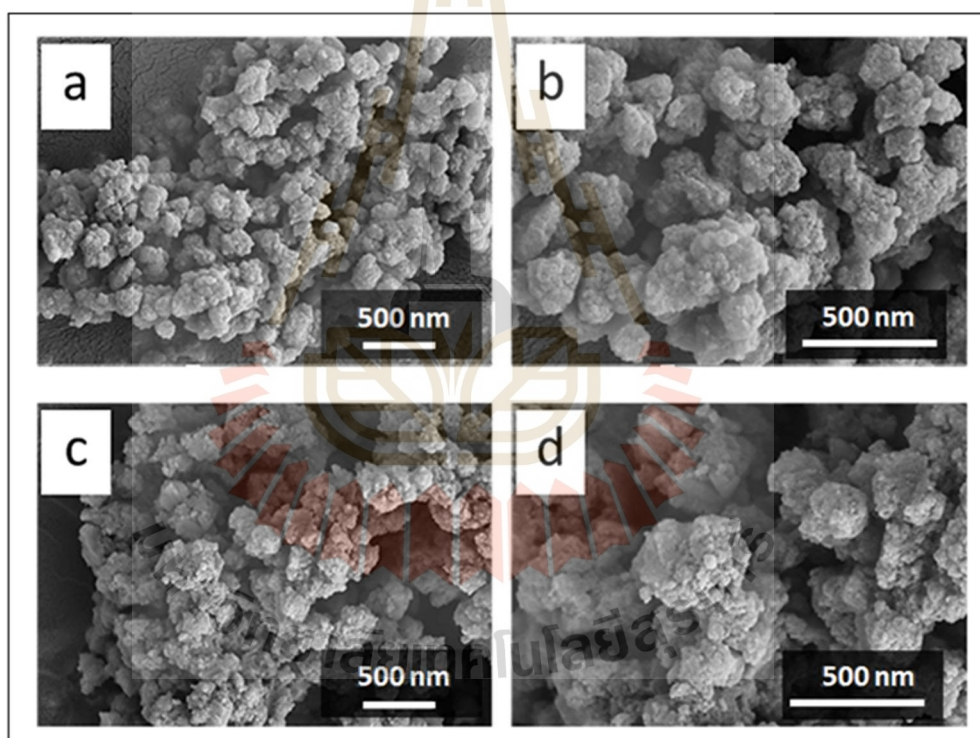
ได้นำตัวอย่างเหล็ก Fe-NPs 8 Euca extract + Ultrasonic 1000W 0.2 M Fe ไปวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะและเปรียบเทียบกับพื้นที่ผิวจำเพาะของเหล็กขนาดนาโนเมตรแบบที่ 4 Fe-NPs 4 การสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรด้วยสารสกัดไບยูคาลิปตัสโดยใช้เหล็กเฟอร์รัสซัลเฟตเข้มข้น 0.2 โมลาร์ (Fe-NPs 4 Euca extract 0.2 M Fe)

โดยจากชุดข้อมูลสองชุดนี้จะสามารถชี้ให้เห็นถึงความแตกต่างของพื้นที่ผิวจำเพาะระหว่างการสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรด้วยสารสกัดไບยูคาลิปตัสร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิคและการสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรด้วยสารสกัดไບยูคาลิปตัสโดยไม่ใช้คลื่นอัลตราโซนิค พบว่า Fe-NPs 8 Euca extract + Ultrasonic 1000W 0.2 M Fe มีพื้นที่ผิว 26.805 ตารางเมตรต่อกรัม นั่นหมายความว่าในปริมาณ 1 กรัมของเหล็กขนาดนาโนเมตรที่นำไปใช้ในการบำบัดสารไกลโฟเซต จะมีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเหล็กและสารไกลโฟเซตประมาณ 26.8 ตารางเมตร ส่วน Fe-NPs 4 Euca extract 0.2 M Fe มีพื้นที่ผิว 12.77 ตารางเมตรต่อกรัม นั่นหมายความว่าในปริมาณ 1 กรัมของเหล็กขนาดนาโนเมตรที่นำไปใช้ในการบำบัดสารไกลโฟเซต จะมีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเหล็กและสารไกลโฟเซตประมาณ 12.77 ตารางเมตร โดยจะเห็นได้ว่าการสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรด้วยสารสกัดไບยูคาลิปตัสร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิคจะทำให้เหล็กขนาดนาโนเมตรมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่าการสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรด้วยสารสกัดไບยูคาลิปตัสโดยไม่ใช้คลื่นอัลตราโซนิค ทั้งนี้พื้นที่ผิวที่ตรวจสอบได้อาจจะไม่ได้มากเหมือนวัสดุที่ถูกสังเคราะห์มาเป็นวัสดุดูดซับเช่น ถ่านกัมมันต์ แต่เนื่องด้วยกลไกในการทดลองของงานวิจัยนี้เป็นการใช้อินทรีย์ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างเหล็กและโซเดียมเปอร์ซัลเฟต ดังนั้นพื้นที่ผิวไม่ใช่ปัจจัยหลักในการบำบัดสารไกลโฟเซตด้วยเหล็กร่วมกับโซเดียมเปอร์ซัลเฟต

จากชุดข้อมูลเปอร์เซ็นต์ความเป็นเหล็กของเทคนิค XPS และค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของเทคนิค BET สามารถเลือกเหล็กขนาดนาโนเมตรที่มีความเป็นเหล็กสูง มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากและที่สำคัญคือเป็นการสังเคราะห์ด้วยสารสกัดจากพืชคือสารสกัดจากไບยูคาลิปตัส โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้เหล็กขนาดนาโนเมตรที่สังเคราะห์ด้วยสารสกัดไບยูคาลิปตัสร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิคกำลัง 1000 วัตต์ โดยใช้ความเข้มข้นของสารเหล็กตั้งต้น 0.2 โมลาร์ (Fe-NPs 8 Euca extract + Ultrasonic 1000W 0.2 M Fe) เพื่อที่จะนำบำบัดสารไกลโฟเซต เนื่องด้วยวิธีสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรด้วยสารเคมีทำให้มีการตกค้างของสารเคมีและมีค่าใช้จ่ายสูง จึงเป็นเหตุให้ในงานวิจัยนี้เลือกใช้การสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรด้วยการใช้สารสกัดไບยูคาลิปตัส ที่เป็นเศษวัสดุ

เหลือทิ้งจากการตัดต้นยูคาลิปตัสไปทำกระดาษ และในส่วนของสารสกัดใบยูคาลิปตัสไม่ส่งผลให้เกิดอันตรายที่ร้ายแรงเหมือนการใช้สารเคมี จึงเป็นที่มาของการเลือกใช้สารสกัดจากใบยูคาลิปตัสเป็นสาร capping agent ทำให้ช่วยลดการเกาะกลุ่มรวมตัวของเหล็กขนาดนาโนเมตร อย่างไรก็ตามเหล็กที่สังเคราะห์ด้วยสารสกัดจากพืชโดยส่วนใหญ่พื้นที่ผิวจำเพาะต่ำ เนื่องจากมีสารอินทรีย์คาร์บอนของ polyphenols ปกคลุมบริเวณโดยรอบเหล็กทำให้เหล็กที่สังเคราะห์ด้วยสารสกัดจากพืชมีขนาดใหญ่ (Santos และคณะ, 2012) จึงมีการใช้คลื่นอัลตราโซนิกเข้ามาร่วมในการสังเคราะห์เพื่อลดอินทรีย์คาร์บอนที่บริเวณผิวของเหล็กส่งผลให้พบความเป็นเหล็กสูงขึ้น

4.1.3 เทคนิค Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM)



รูปที่ 4.2 ภาพถ่าย FESEM ของ Fe-NPs-EL ที่กำลังขยาย 30000X (a) กับ 60000X (b) และภาพ FESEM ของ Fe-NPs-EL-UL 1000 W ที่กำลังขยาย 30000X (c) กับ 60000X (d)

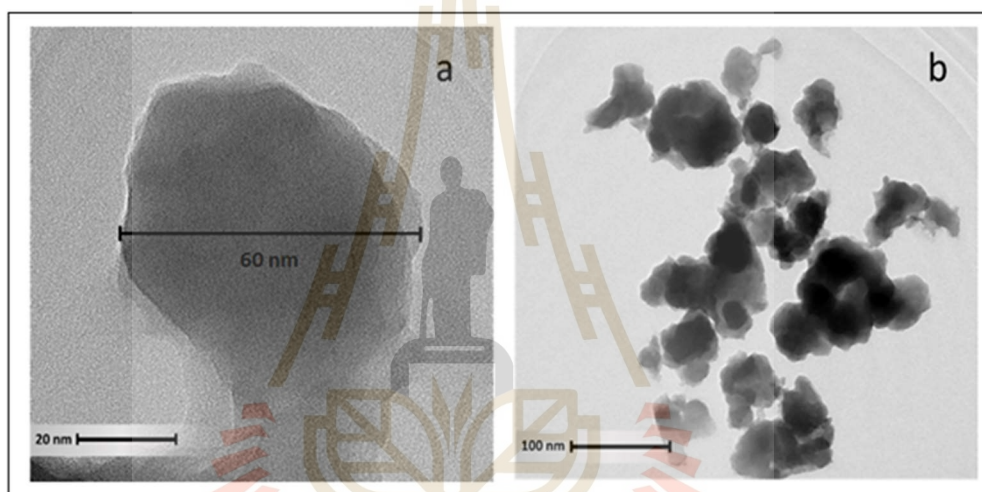
จากรูปที่ 4.2 แสดงภาพถ่าย FESEM ที่กำลังขยาย 30000X และ 60000X ได้นำตัวอย่างเหล็กขนาดนาโนเมตรที่สังเคราะห์ด้วยสารสกัดไບยูคาลิปตัสร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิกกำลัง 1000 วัตต์ โดยใช้ความเข้มข้นของสารเหล็กตั้งต้น 0.2 โมลาร์ (Fe-NPs 8 Euca extract + Ultrasonic 1000W 0.2 M Fe, Fe-NPs-EL-UL 1000 W) ไปถ่าย FESEM และเปรียบเทียบกับเหล็กขนาดนาโนเมตรแบบที่ 4 Fe-NPs 4 การสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรด้วยสารสกัดไບยูคาลิปตัสโดยใช้เหล็กเฟอร์รัสซัลเฟตเข้มข้น 0.2 โมลาร์ (Fe-NPs 4 Euca extract 0.2 M Fe, Fe-NPs-EL)

จากรูปที่ 4.2 แสดงภาพถ่าย FESEM ของเหล็กขนาดนาโนเมตรที่สังเคราะห์ด้วยสารสกัดไບยูคาลิปตัสร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิกโดยใช้ความเข้มข้นของสารเหล็กตั้งต้น 0.2 โมลาร์ (Fe-NPs-EL-UL 1000 W) และเหล็กขนาดนาโนเมตรที่สังเคราะห์ด้วยสารสกัดไບยูคาลิปตัสโดยไม่ใช้คลื่นอัลตราโซนิกซึ่งมีความเข้มข้นของสารเหล็กตั้งต้น 0.2 โมลาร์ (Fe-NPs-EL) ที่กำลังขยาย 30000X และ 60000X สามารถอธิบายลักษณะสัณฐานภายนอกของเหล็กขนาดนาโนเมตรได้ว่าขนาดของเหล็กขนาดนาโนเมตร Fe-NPs-EL ขนาดส่วนใหญ่ประมาณ 100 นาโนเมตร ในขณะที่เหล็กขนาดนาโนเมตร Fe-NPs-EL-UL 1000W มีขนาดแตกต่างกันออกไปตั้งแต่ 20 – 100 นาโนเมตร เนื่องจากการสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรที่สังเคราะห์ด้วยสารสกัดไບยูคาลิปตัสร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิกที่ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ กำลัง 1000 วัตต์ จะมีผลทำให้อนุภาคเหล็กที่สังเคราะห์ได้มีขนาดเล็กและได้ขนาดแตกต่างกันไป เกิดขึ้นได้นั้นเนื่องมาจากโครงสร้างของเหลวที่ได้รับคลื่นอัลตราซาวนด์จะถูกบีบอัด (compress) และคลายตัว (stretch) ซ้ำไปมาเป็นจำนวนหลายพันรอบ ทำให้เกิดฟองอากาศขึ้น ซึ่งฟองอากาศจะเกิดการยุบตัวแตกออก (collapse) แล้วเกิดแรงดันของของเหลว (hydrostatic pressure) พุ่งออกมาเป็นลำจากฟองอากาศแต่ละฟองที่เรียกว่า เซนทรัลเจต (central jet) (Atchley and Crum, 1998) ซึ่งเซนทรัลเจตจะพุ่งเข้าชนกับอนุภาคของเหล็ก อนุภาคเหล็กจึงเกิดการตักออกจากกันทำให้เหล็กที่สังเคราะห์ได้มีขนาดอนุภาคแตกต่างกันออกไป อย่างไรก็ตาม โดยภาพรวมของภาพถ่าย FESEM จากทั้งสองวิธีการในการสังเคราะห์เหล็ก ทำให้ได้เหล็กขนาดนาโนเมตรที่มีลักษณะมีทั้งแบบทรงกลม (spherical) และแบบไม่ใช่ทรงกลม (non-spherical) อนุภาคเล็กๆ เกาะกลุ่มกันเป็นก้อนใหญ่ขึ้น เนื่องจากอนุภาคที่มีขนาดเล็กที่ระดับนาโนเมตรมีพลังงานของพื้นผิวสูงและมีแนวโน้มที่จะจับเป็นก้อน (Wang et al., 2014) ในอีกด้านหนึ่งได้อธิบายถึงความแตกต่างของขนาดของอนุภาค อาจเป็นเพราะว่าในสารสกัดจากไບยูคาลิปตัสมีสาร capping agent หลายชนิด ซึ่งเป็นกลุ่มฟินอลชนิดต่างๆ ทำให้มีคุณสมบัติในการเป็นสาร capping agent แตกต่างกันไป ดังนั้นจึงพบอนุภาคบางส่วนมีลักษณะอนุภาครวมตัวกัน ในงานวิจัยนี้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Jamei et al., 2014) เป็นการสังเคราะห์เหล็กจากสารโซเดียมโบโรไฮไดรด์ร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิกที่ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ กำลัง 1000 วัตต์ โดยขนาด

ของอนุภาคที่สังเคราะห์ได้มีขนาดเล็กกว่า 100 นาโนเมตร และลักษณะของอนุภาคมีทั้งแบบทรงกลม (spherical) และแบบไม่ใช่ทรงกลม (non-spherical)

4.1.4 เทคนิค Transmission electron microscope (TEM)

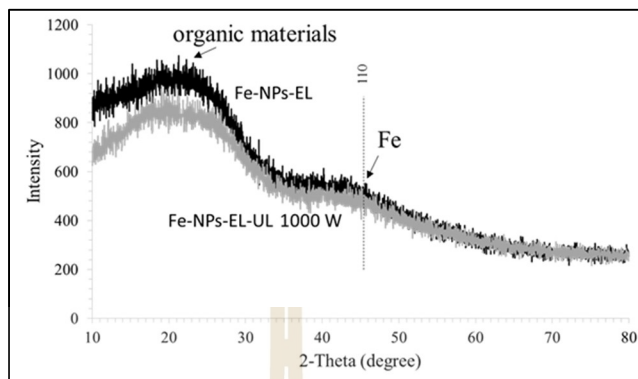
จากการได้ตัวอย่างเหล็กขนาดนาโนเมตรที่เหมาะสมในการเลือกไปใช้ในการบำบัดสารไกลโฟเซต คือเหล็กขนาดนาโนเมตรที่สังเคราะห์ด้วยสารสกัดไบยูลิปิดส์ร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิกโดยใช้ความเข้มข้นของสารเหล็กตั้งต้น 0.2 โมลาร์ (Fe-NPs-EL-UL 1000 W) เมื่อไปถ่ายภาพ TEM เพื่ออธิบายลักษณะและยืนยันขนาดของอนุภาคของเหล็กที่สังเคราะห์ได้เป็นไปดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ภาพถ่าย Transmission electron microscope (TEM) ของ Fe-NPs-EL-UL 1000W

จากภาพถ่าย TEM ของเหล็กขนาดนาโนเมตรที่สังเคราะห์ด้วยสารสกัดไบยูลิปิดส์ร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิกโดยใช้ความเข้มข้นของสารเหล็กตั้งต้น 0.2 โมลาร์ (Fe-NPs-EL-UL 1000 W) สามารถรายงานผลได้ว่า ขนาดของอนุภาคนี้มีขนาดประมาณ 60 นาโนเมตร ซึ่งเป็นขนาดของอนุภาคเหล็กนาโนที่จะถูกใช้ในการบำบัดสารไกลโฟเซต โดยลักษณะรูปทรงของเหล็กขนาดนาโนเมตร Fe-NPs-EL-UL 1000W มีลักษณะคล้ายทรงกลม และแต่ละอนุภาคมีการเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนซึ่งสอดคล้องกับผลจากภาพถ่าย FESEM

4.1.5 เทคนิค X-Ray Diffractometer (XRD)



รูปที่ 4.4 รูปแบบ XRD patterns ของ Fe-NPs-EL และ Fe-NPs-EL-UL 1000 W

จากรูปแบบ XRD ได้นำตัวอย่างเหล็กขนาดนาโนเมตรที่สังเคราะห์ด้วยสารสกัดไບยูคาลิปตัสร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิกกำลัง 1000 วัตต์ โดยใช้ความเข้มข้นของสารเหล็กตั้งต้น 0.2 โมลาร์ (Fe-NPs 8 Euca extract + Ultrasonic 1000W 0.2 M Fe, Fe-NPs-EL-UL 1000 W) ไปวิเคราะห์ XRD และเปรียบเทียบกับเหล็กขนาดนาโนเมตรแบบที่ 4 Fe-NPs 4 การสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรด้วยสารสกัดไບยูคาลิปตัสโดยใช้เหล็กเฟอร์รัสซัลเฟตเข้มข้น 0.2 โมลาร์ (Fe-NPs 4 Euca extract 0.2 M Fe, Fe-NPs-EL)

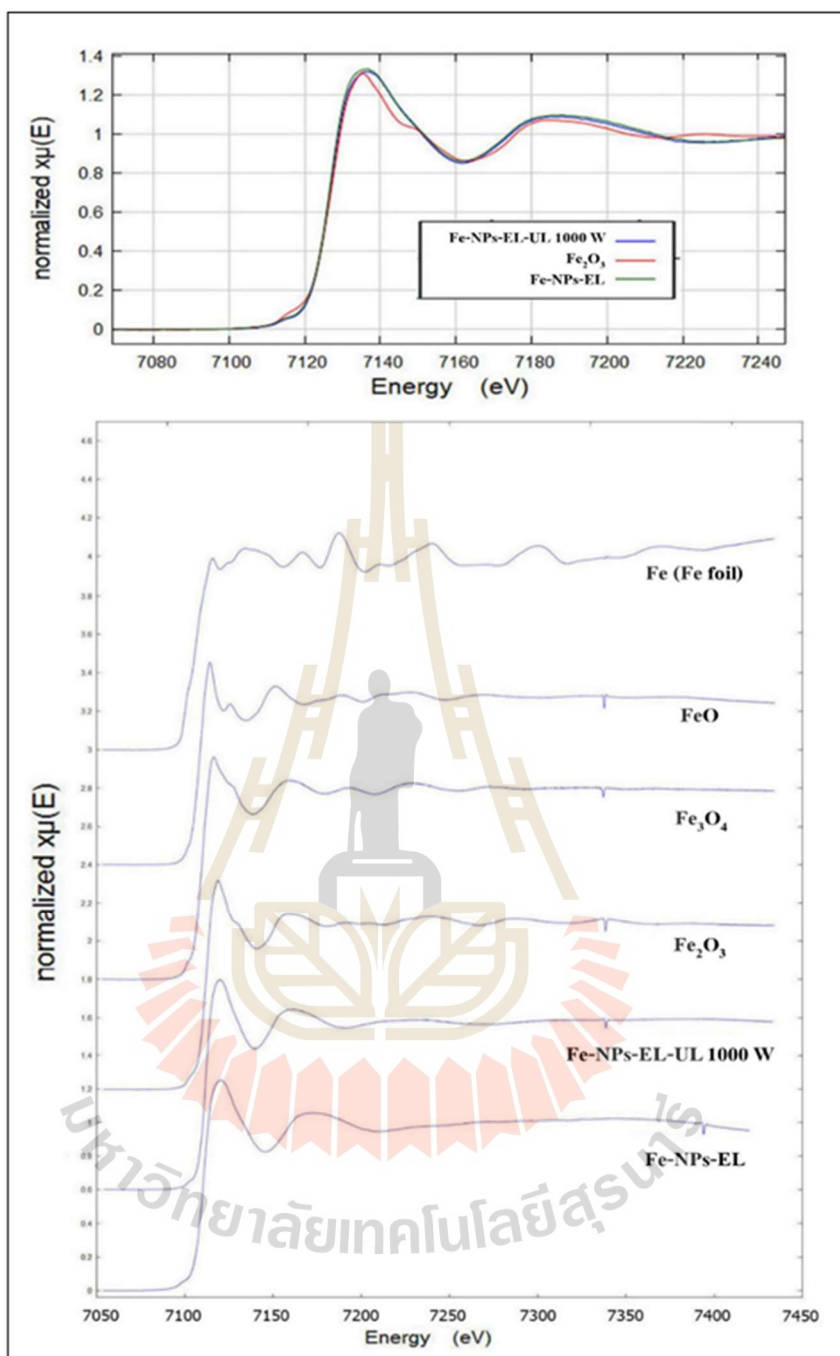
จากรูปแบบ XRD ของเหล็กขนาดนาโนเมตรที่สังเคราะห์ด้วยสารสกัดไບยูคาลิปตัสร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิกกำลัง 1000 วัตต์ โดยใช้ความเข้มข้นของสารเหล็กตั้งต้น 0.2 โมลาร์ (Fe-NPs-EL-UL 1000 W) และเหล็กขนาดนาโนเมตรที่สังเคราะห์ด้วยสารสกัดไບยูคาลิปตัสโดยไม่ใช้คลื่นอัลตราโซนิก ซึ่งมีความเข้มข้นของสารเหล็กตั้งต้น 0.2 โมลาร์ (Fe-NPs-EL) แสดงดังรูปที่ 4.4 ซึ่งรูปแบบของ Fe-NPs-EL และ Fe-NPs-EL-UL 1000 W มีลักษณะเป็น amorphous ตามธรรมชาติ จากรูปข้างต้นจะเห็นได้ว่าการสังเคราะห์ทั้งสองแบบยังไม่สามารถระบุพิกของความเป็นเหล็กได้ ที่ 45° เนื่องการสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรด้วยสารสกัดจากพืชจะทำให้เกิดสาร organic materials ปกคลุมบนผิวของวัสดุ โดยระบุได้จากลักษณะพิกที่ 25° มีความเด่นชัด สามารถอธิบายได้ว่ามีความเป็น organic materials จากสารสกัดไບยูคาลิปตัสที่ใช้ในการสังเคราะห์ ซึ่งพิกของ organic ที่ตรวจพบมีคุณสมบัติเป็น capping หรือ stabilizing agents คล้ายในงานวิจัยอื่นที่เกี่ยวกับการสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรจากพืช เช่นเดียวกับ green tea (Wang et al., 2014) ส่งผลต่อความสามารถในการระบุพิกของความเป็นเหล็กจากเทคนิค XRD นอกจากนี้

ยังสังเกตพบว่าลักษณะรูปแบบ XRD ของเหล็กขนาดนาโนเมตรที่สังเคราะห์ด้วยสารสกัดไบยูกาลิปตัสร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิกกำลัง 1000 วัตต์ มีระดับฟีดของ organic materials ต่ำกว่าเหล็กอนุภาค นาโนเมตรที่สังเคราะห์ด้วยสารสกัดไบยูกาลิปตัสโดยไม่ใช้คลื่นอัลตราโซนิก เนื่องจาก organic materials ถูกกำจัดออกได้ด้วยคลื่นอัลตราโซนิกกำลัง 1000 วัตต์ ที่ใส่ลงไป ในขณะที่สังเคราะห์ โดยกระบวนการนี้เกิดจากคลื่นอัลตราโซนิกที่ปล่อยลงไปใต้น้ำส่งผลให้เกิดการสั่นสะเทือน และคลายตัว (stretch) เข้าไปมาเป็นจำนวนหลายพันรอบ ทำให้เกิดฟองอากาศขึ้น (central jet) ซึ่งมีคุณสมบัติทำให้เกิดแรงดันรุนแรง โดยการแตกของฟองอากาศจะเกิดแรงดันต่อผิวอนุภาคหรือวัตถุที่สัมผัสทำให้อนุภาคแตกออกจากกัน (Atchley and Crum, 1998) จากเหตุนี้ทำให้การใช้คลื่นอัลตราโซนิกส่งผลให้ organic materials ถูกกำจัดออกไป

ดังนั้นจากผลของ XRD ร่วมกับผลของ XPS สามารถยืนยันได้ว่าเหล็กขนาดนาโนเมตรที่สังเคราะห์ด้วยสารสกัดไบยูกาลิปตัสร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิกกำลัง 1000 วัตต์ (Fe-NPs-EL-UL 1000 W) จะมีสารชีวโมเลกุลบนผิวของเหล็กต่ำกว่าเหล็กขนาดนาโนเมตรที่สังเคราะห์ด้วยสารสกัดไบยูกาลิปตัสที่ไม่ใช้คลื่นอัลตราโซนิก (Fe-NPs-EL) ซึ่งจะช่วยให้พบเปอร์เซ็นต์ของความเป็นเหล็กสูงขึ้น ด้วยเหตุนี้เองจึงเป็นอีกหนึ่งเหตุผลในการสนับสนุนให้เลือกใช้วิธีการสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรจากสารสกัดไบยูกาลิปตัสร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิกกำลัง 1000 วัตต์

4.1.6 เทคนิค X-ray absorption spectroscopy (XAS)

จากการเลือกใช้เหล็กขนาดนาโนเมตรที่สังเคราะห์ด้วยสารสกัดไบยูกาลิปตัสร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิก โดยใช้ความเข้มข้นของสารเหล็กตั้งต้น 0.2 โมลาร์ (Fe-NPs 8 Euca extract + Ultrasonic 1000W 0.2 M Fe) เป็นตัวแทนเพื่อไปใช้บำบัดสารไกลโฟเซต โดยได้นำเหล็กขนาดนาโนเมตรนี้ไปวิเคราะห์ชนิดและสถานะทางเคมีของธาตุที่เป็นองค์ประกอบ การใช้เทคนิค X-ray absorption spectroscopy (XAS) มาใช้ในการระบุสถานะ oxidation states ของเหล็กที่สังเคราะห์ได้ โดยเทคนิค XAS เป็นการฉายรังสีเอกซ์ส่องผ่านวัสดุที่ต้องการศึกษาและวัดอัตราส่วนการดูดกลืนรังสีเอกซ์ที่พลังงานต่างๆ ซึ่งข้อมูลดังกล่าวสามารถใช้บ่งบอกถึงวิเคราะห์ Oxidation state ของตัวอย่างโดยศึกษาสเปกตรัมช่วง X-ray Absorption Near Edge Structure (XANES) ดังรูปที่ 4.5

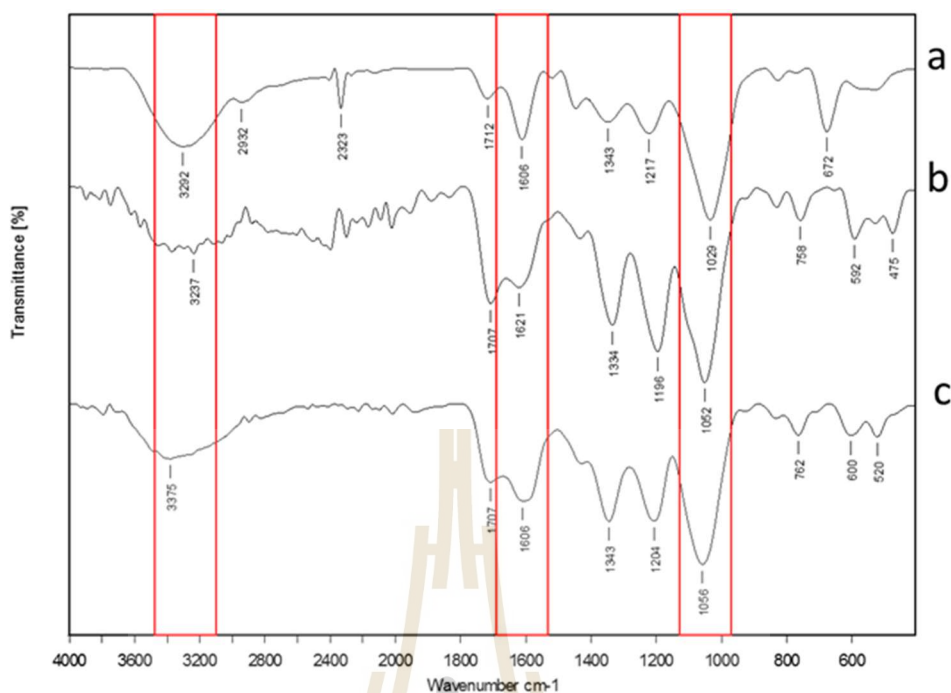


รูปที่ 4.5 รูปแบบ XANES Spectra ของเหล็กขนาดนาโนเมตรเทียบกับเหล็กมาตรฐาน

จากการนำตัวอย่างเหล็กขนาดนาโนเมตรที่สังเคราะห์ด้วยสารสกัดใบยูคาลิปตัส ร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิกกำลัง 1000 วัตต์ โดยใช้ความเข้มข้นของสารเหล็กตั้งต้น 0.2 โมลาร์ (Fe-NPs-EL-UL 1000 W) และเหล็กขนาดนาโนเมตรที่สังเคราะห์ด้วยสารสกัดใบยูคาลิปตัสโดยไม่ใช้คลื่นอัลตราโซนิก ซึ่งมีความเข้มข้นของสารเหล็กตั้งต้น 0.2 โมลาร์ (Fe-NPs-EL-UL 1000 W) ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XAS และทำการเทียบค่า Spectra กับเหล็กมาตรฐานได้แก่ Fe (Fe Foil) FeO Fe₂O₃ และ Fe₃O₄ ซึ่งเป็นตัวแทนของการระบุ oxidation states 0 +2 +3 และ +2/+3 ตามลำดับ โดยจากรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าเส้นกราฟของเหล็ก Fe Foil ซึ่งบ่งบอก oxidation states 0 จะมีพีคที่ค่าพลังงาน 7112 อิเล็กตรอน โวลต์ (Htay Aung Pyae, 2019) เมื่อนำเส้นกราฟของเหล็กขนาดนาโนเมตรที่สังเคราะห์ได้มาเทียบพบว่า เหล็กขนาดนาโนเมตรที่สังเคราะห์ขึ้นมาได้ มีความใกล้เคียงกับเหล็ก Hematite (Fe₂O₃) หรือเหล็กเฟอร์ริกไอออน (Fe³⁺) เนื่องจากเหล็กเฟอร์รัส (Fe²⁺) ออกซิไดซ์กับออกซิเจนทำให้เกิดเป็นเฟอร์ริกไอออน (Fe³⁺) และสารโพลีฟีนอลจากพืชนั้นจำทำการคีเลตกับเฟอร์ริกไอออน (Fe³⁺) ทำให้สารประกอบเชิงซ้อน Fe³⁺-polyphenol complexes โดยการที่ Fe³⁺ ถูกจับกับ polyphenol ซึ่งมี polyphenol อยู่รอบเหล็กเฟอร์ริกไอออน (Fe³⁺) (Wang, 2015) ซึ่งเหล็ก Hematite (Fe₂O₃) จะเป็นแหล่งในการให้เหล็ก Fe³⁺ ในการบำบัดสารไกลโฟเซต โดยใช้ร่วมกับโซเดียมเปอร์ซัลเฟตเพื่อให้เกิดเป็นอนุมูลอิสระ เข้าบำบัดสารอินทรีย์ต่างๆได้

4.1.7 Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR)

ผลของ FTIR ได้ทำการเปรียบเทียบลักษณะ spectrum ของสารสกัดใบยูคาลิปตัส กับเหล็กขนาดนาโนเมตรที่สังเคราะห์ด้วยสารสกัดใบยูคาลิปตัสร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิกโดยใช้ความเข้มข้นของสารเหล็กตั้งต้น 0.2 โมลาร์ (Fe-NPs-EL-UL 1000 W) และเหล็กขนาดนาโนเมตรที่สังเคราะห์ด้วยสารสกัดใบยูคาลิปตัสโดยไม่ใช้คลื่นอัลตราโซนิกซึ่งมีความเข้มข้นของสารเหล็กตั้งต้น 0.2 โมลาร์ (Fe-NPs-EL)

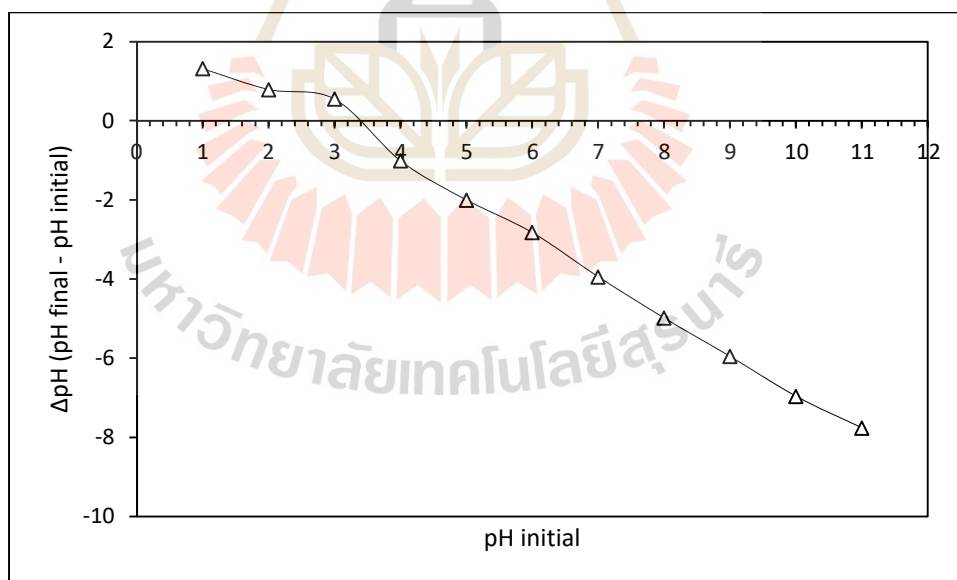


รูปที่ 4.6 รูปแบบ FTIR bands ของสารสกัดไบบูคาลิปตัส (a) Fe-NPs-EL (b) และ Fe-NPs-EL-UL 1000 W (c)

จากรูปที่ 4.6 จะพบว่า spectrum ของทั้งสามเส้นมี band ที่ประมาณ 3292 cm^{-1} , 3371 cm^{-1} และ 3375 cm^{-1} ซึ่งระบุถึงพันธะ O-H ของสาร polyphenols (Wang et al., 2014; Kumar et al., 2013) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยอื่นกล่าวไว้ว่า ที่ผิวของเหล็กขนาดนาโนเมตรที่สังเคราะห์ด้วยสารสกัดจากไบบูคาลิปตัส จะมีสารจำพวกกลุ่ม polyphenol ปกคลุมเป็นชั้นหนานบนผิวของเหล็ก (Des et al., 2010) ทำให้เหล็กขนาดนาโนเมตรที่สังเคราะห์จากสารสกัดไบบูคาลิปตัส ทั้งวิธี Fe-NPs-EL และ Fe-NPs-EL-UL 1000 W ตรวจพบสาร polyphenols ซึ่งมีคุณสมบัติเป็น capping หรือ stabilizing agents แม้ว่าการใช้คลื่นอัลตราโซนิกจะสามารถกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอนที่บริเวณผิวของเหล็กขนาดนาโนเมตรออกได้ แต่ก็ยังไม่สามารถกำจัดออกได้หมด ซึ่งจะเห็นได้จาก spectrum ของ Fe-NPs-EL-UL 1000 W ยังพบพีกที่ 3375 cm^{-1} นอกจากนี้ผล FTIR spectrum ของสารสกัดไบบูคาลิปตัสยังสามารถอธิบายถึงสารประกอบที่พบในสารสกัดไบบูคาลิปตัสก่อนการนำไปสังเคราะห์ได้แก่ บริเวณพีก 1606 cm^{-1} ตรงกับพันธะ C=C (aromatic ring) ของ phenolic compounds (Zhuang et al., 2015) บริเวณพีก 1029 cm^{-1} ตรงกับพันธะ C-N ของ aliphatic amines และพีก 1343 cm^{-1} ตรงกับพันธะ C-N ของ aromatic amines (Das et al., 2010) ในส่วนของพีกเล็กๆ บริเวณ 2932 cm^{-1} ตรงกับพันธะ C-H และ CH_2 ของ aliphatic hydrocarbons และที่พีก

1711 cm^{-1} สามารถระบุได้ว่าเป็น carbonyl groups จาก aliphatic acids (Zhuang et al., 2015) หลังจากการสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรด้วยสารสกัดใบยูคาลิปตัสไม่ใช้คลื่นอัลตราโซนิก (Fe-NPs-EL) และจากการสังเคราะห์เหล็กอนุภาคนาโนเมตรด้วยสารสกัดใบยูคาลิปตัสร่วมกับคลื่น อัลตราโซนิกกำลัง 1000 วัตต์ (Fe-NPs-EL-UL 1000 W) รูปที่ 4.4 (b) และ (c) พบว่าพีคเด่นๆที่ 3371 cm^{-1} และ 3375 cm^{-1} ระบุตรงกับพันธะ O-H และที่พีค 1052 cm^{-1} และพีค 1056 cm^{-1} ระบุถึงพันธะ C-N ซึ่งจะเห็นได้ว่าหลังจากสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรด้วยสารสกัดใบยูคาลิปตัสความยาวของพีคเหล่านี้ลดลง เนื่องจากสารชีวโมเลกุลต่างๆเช่น ฟีนอลที่อยู่ในสารสกัดใบยูคาลิปตัสได้เข้าไปทำปฏิกิริยาเป็นสาร capping agent เพื่อลดการรวมตัวของอนุภาคนาโนเมตร (Zhuang et al., 2015) และในอีกงานวิจัยยืนยันว่าพบสารโพลีฟีนอลบนพื้นผิวของเหล็กขนาดนาโนเมตรซึ่งช่วยเป็นสาร capping ในการรักษาเสถียรภาพของเหล็ก (Kumar et al., 2013) และในส่วนของพีคที่พบใน Fe-NPs-EL และ Fe-NPs-EL-UL 1000 W แต่ไม่พบในสารสกัดใบยูคาลิปตัสคือ พีค 592 cm^{-1} และ 600 cm^{-1} ซึ่งสามารถระบุถึงความเป็นเหล็กออกไซด์ Fe-O (Kumar et al., 2013)

4.1.8 Point zero charge ด้วยเทคนิค salt addition



รูปที่ 4.7 ผลของค่าสภาวะความเป็นกรดด่างที่พื้นผิวประจุเป็นศูนย์ (Point zero charge, pH_{pzc}) ของ Fe-NPs-EL-UL 1000 W

จากรูปที่ 4.7 แสดงผลของสภาวะความเป็นกรดต่างที่พื้นผิวประจุเป็นศูนย์ (Point zero charge, pH_{pzc}) ของเหล็กขนาดนาโนเมตรที่สังเคราะห์ด้วยสารสกัดใบยูคาลิปตัสร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิกกำลัง 1000 วัตต์ โดยใช้ความเข้มข้นของสารเหล็กตั้งต้น 0.2 โมลาร์ (Fe-NPs-EL-UL 1000 W) จะเห็นได้ว่ามีค่า pH_{pzc} เท่ากับ 3.4 หมายความว่า ประจุบนพื้นผิวของ Fe-NPs-EL-UL 1000 W ในสารละลายที่สภาวะ pH เท่ากับ 3.4 จะเป็นศูนย์ คือเป็นจุดประจุบวกและประจุลบบนพื้นผิวมีค่าเท่ากัน ถ้าสภาวะความเป็นกรดต่างของสารละลายน้อยกว่า 3.4 ($\text{pH} < \text{pH}_{\text{pzc}}$) ประจุบนพื้นผิวของ Fe-NPs-EL-UL 1000 W ในสารละลายจะเป็นบวก ดังนั้นจะทำให้ Fe-NPs-EL-UL 1000 W มีความสามารถในการดูดซับสารที่มีประจุลบได้ดี และเมื่อสภาวะความเป็นกรดต่างของสารละลายมากกว่า 3.4 ($\text{pH} > \text{pH}_{\text{pzc}}$) ประจุบนพื้นผิวของ Fe-NPs-EL-UL 1000 W ในสารละลายจะเป็นลบ ดังนั้นจะทำให้ Fe-NPs-EL-UL 1000 W มีความสามารถในการดูดซับสารที่มีประจุบวกได้ดี

ตารางที่ 4.2 สรุปคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของเหล็กขนาดนาโนเมตร

เทคนิค	คุณสมบัติ
XPS-เหล็กขนาดนาโนเมตรที่ได้รับเลือก	Fe-NPs 8 Euca extract + Ultrasonic 1000W 0.2 M Fe
▪ C (%)	61.43
▪ O (%)	35.96
▪ Fe (%)	2.61
BET-Surface area (m^2/g)	26,805
FESEM-ขนาดอนุภาค (nm)	20–100
TEM-ขนาดอนุภาค (nm)	60
XRD	ระบุพีคที่ 25° มี organic materials ปกคลุมบนผิวของเหล็ก
XAS	เหล็ก Hematite (Fe_2O_3)
FTIR-ฟังก์ชันที่ผิว	O-H
	C-N
	เหล็กออกไซด์ Fe-O
Point zero charge, pH_{pzc}	3.4

จากตารางที่ 4.2 สรุปคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของเหล็กขนาดนาโนเมตร พบว่า เหล็กขนาดนาโนเมตรที่สังเคราะห์ด้วยสารสกัดใบบูคาลิปต์ร่วมกับคลีนอัลตราโซนิคกำลัง 1000 วัตต์ โดยใช้ความเข้มข้นของสารเหล็กเฟอร์รัสตั้งต้น 0.2 โมลาร์ (Fe-NPs-EL-UL 1000 W) มีความเหมาะสมที่จะใช้ในการบำบัดสารไกลโฟเซต เนื่องจากพบว่ามีปริมาณสัดส่วนความเป็นเหล็กสูงที่สุด ซึ่งเป็นผลจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XPS ทั้งนี้การใช้คลีนอัลตราโซนิคร่วมในระหว่างการสังเคราะห์จะทำให้อินทรีย์คาร์บอนบางชนิดหลุดออกทำให้สัดส่วนความเป็นเหล็กสูงขึ้นโดยเป็นผลดีต่อการจะนำไปใช้งาน และพบว่ามีพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับการสังเคราะห์ด้วยสารสกัดใบบูคาลิปต์แต่ไม่ใช้คลีนอัลตราโซนิค นอกจากนี้การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XAS สามารถรายงานได้ว่า เหล็กขนาดนาโนเมตรสังเคราะห์ด้วยสารสกัดใบบูคาลิปต์ส เป็นเหล็กฮีมาไทต์ (Fe_2O_3) โดยเหล็ก Fe_2O_3 จะเป็นแหล่งในการปลดปล่อย Fe^{3+} เพื่อเข้าทำปฏิกิริยาร่วมกับ โซเดียมเปอร์ซัลเฟต เกิดเป็นอนุมูลอิสระ เพื่อใช้ในการบำบัดสารไกลโฟเซต

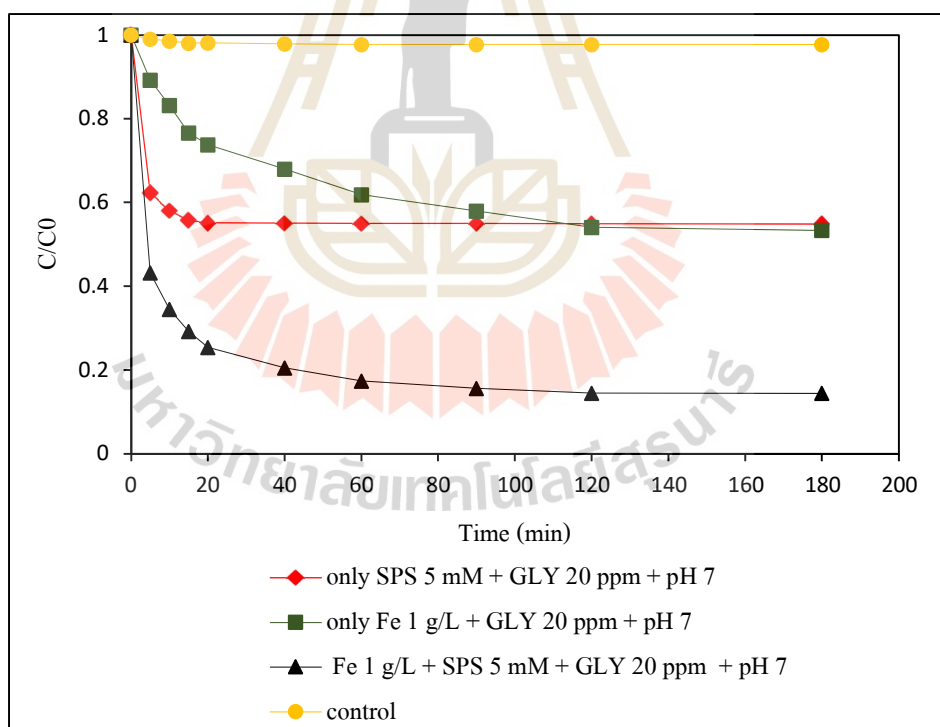
4.2 ผลการศึกษาการบำบัดสารไกลโฟเซต

การศึกษากการบำบัดสารไกลโฟเซตได้แบ่งการศึกษาผลการบำบัดออกเป็นกรบำบัดสารไกลโฟเซตในน้ำและการบำบัดสารไกลโฟเซตในดิน ซึ่งเป็นการบำบัดสารไกลโฟเซตด้วยปฏิกิริยาเสมือนเฟ้นตันโดยใช้ตัวแทนเหล็กขนาดนาโนเมตรที่สังเคราะห์ขึ้นเองจากการทดลองข้างต้นมาใช้ร่วมกับสาร โซเดียมเปอร์ซัลเฟต (SPS) ซึ่งเหล็กที่นำมาใช้ คือเหล็กขนาดนาโนเมตรที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยสารสกัดใบบูคาลิปต์ร่วมกับคลีนอัลตราโซนิคกำลัง 1000 วัตต์ โดยใช้ความเข้มข้นของสารเหล็กเฟอร์รัสตั้งต้น 0.2 โมลาร์ ดังนั้นในการอธิบายผลการทดลองถัดไปจากนี้ ขอรายงานผลโดยใช้คำว่าเหล็ก (Fe) แทนเหล็กขนาดนาโนเมตรที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยสารสกัดใบบูคาลิปต์ร่วมกับคลีนอัลตราโซนิคกำลัง 1000 วัตต์ โดยใช้ความเข้มข้นของสารเหล็กเฟอร์รัสตั้งต้น 0.2 โมลาร์ สำหรับการบำบัดสารไกลโฟเซตในน้ำจะทำการศึกษาปัจจัยของการบำบัดสารไกลโฟเซตดังนี้ การใช้เหล็ก (Fe) เพียงอย่างเดียว การใช้สาร โซเดียมเปอร์ซัลเฟต (SPS) เพียงอย่างเดียวและการใช้เหล็ก (Fe) ร่วมกับ โซเดียมเปอร์ซัลเฟต (SPS) ในการบำบัดสารไกลโฟเซต ซึ่งการใช้เหล็ก (Fe) ร่วมกับ โซเดียมเปอร์ซัลเฟต (SPS) จะทำการศึกษาความเข้มข้นของสาร โซเดียมเปอร์ซัลเฟต (SPS) ปริมาณเหล็ก (Fe) ความเข้มข้นของไกลโฟเซต สภาวะความเป็นกรด่างและอนุมูลอิสระ ส่วนการทดลองการบำบัดสารไกลโฟเซตในดินจะใช้เป็นดินจากแปลงเกษตรอินทรีย์มาจำลองดินชุ่มน้ำเพื่อทำการศึกษากการบำบัดสารไกลโฟเซต ซึ่งความเข้มข้นของไกลโฟเซตจะได้รับการตรวจวัดด้วยเครื่อง Liquid Chromatograph-Mass Spectrometer (LC-MS) แล้วนำผลหาแนวโน้มประสิทธิผลการบำบัดสารไกลโฟเซตเทียบกับเวลา

4.2.1 ผลการศึกษาปัจจัยในการบำบัดสารไกลโฟเซตในน้ำด้วยปฏิกิริยาเสมือนเฟนตัน

การศึกษาการบำบัดสารไกลโฟเซตในน้ำโดยการใช้น้ำป้อนเป็นอนไกลโฟเซตสังเคราะห์จากการละลายสารไกลโฟเซตและนำมาทำการเจือจางให้ได้ความเข้มข้นที่ต้องการ โดยในการทดลองทำการทดลองในบีเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร ใช้ปริมาณน้ำ 500 มิลลิลิตร ซึ่งการบำบัดสารไกลโฟเซตในน้ำจะทำการศึกษาปัจจัยของการบำบัดสารไกลโฟเซตดังนี้ การใช้เหล็กเพียงอย่างเดียว การใช้สารโซเดียมเปอร์ซัลเฟตเพียงอย่างเดียวและการใช้เหล็กร่วมกับสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟต (SPS) ซึ่งเป็นการบำบัดสารไกลโฟเซตด้วยปฏิกิริยาเสมือนเฟนตัน โดยทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ความเข้มข้นของสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟต ปริมาณเหล็ก ความเข้มข้นของ ไกลโฟเซต สภาพความเป็นกรดต่างและอนุมูลอิสระ โดยรายงานผลประสิทธิภาพการบำบัดสารไกลโฟเซตเทียบกับเวลา

4.2.1.1 ผลของการใช้เหล็ก สารโซเดียมเปอร์ซัลเฟตและเหล็กร่วมกับสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟตต่อการบำบัดสารไกลโฟเซต



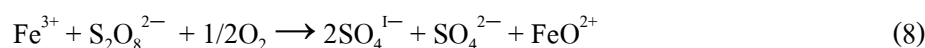
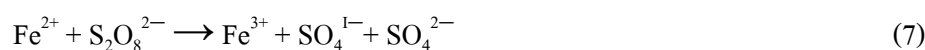
รูปที่ 4.8 ผลของการใช้เหล็ก สารโซเดียมเปอร์ซัลเฟตและเหล็กร่วมกับสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟตต่อการบำบัดสารไกลโฟเซต

จากรูปที่ 4.8 แสดงผลของการบำบัดสารไกลโฟเซตที่ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร สภาวะความเป็นกรดต่างเท่ากับ 7 โดยการเปรียบเทียบระหว่างการบำบัดโดยใช้สารโซเดียมเปอร์ซัลเฟต (SPS) อย่างเดียวเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ (เส้นกราฟสีแดง) การบำบัดโดยใช้เหล็กขนาดนาโนเมตร (Fe) เพียงอย่างเดียว 1 กรัมต่อลิตร (เส้นกราฟสีเขียว) การบำบัดโดยใช้เหล็กขนาดนาโนเมตร (Fe) 1 กรัมต่อลิตร ร่วมกับสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟต (SPS) เข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ (เส้นกราฟสีดำ) และเส้นกราฟสีเหลืองคือชุดควบคุมคือการปล่อยสารไกลโฟเซตทิ้งไว้ตามเวลา โดยไม่มีการเติมเหล็กหรือสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟต

จากการทดลองการบำบัดสารไกลโฟเซตโดยใช้สารโซเดียมเปอร์ซัลเฟต (SPS) เพียงอย่างเดียวเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ (เส้นกราฟสีแดง) จะเห็นได้ว่าภายใน 5 นาทีแรกของปฏิกิริยาไปจนถึง 180 นาที มีสารไกลโฟเซตเหลือประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ นั้นหมายความว่า สารโซเดียมเปอร์ซัลเฟตเพียงอย่างเดียวเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารไกลโฟเซตที่ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร สภาวะกรดต่างเท่ากับ 7 ได้ประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากเมื่อเติมสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟตลงไปจะทำให้สภาวะกรดต่างของระบบที่เคยปรับไว้จากสภาวะกรดต่างเท่ากับ 7 ลดลงเหลือ 3.2 ซึ่งจะสัมพันธ์กับเรื่องปัจจัยของสภาวะกรดต่างที่มีผลต่อการบำบัด ดังสมการที่ 10 โดยในสภาวะความเป็นกรดจะสามารถช่วยแตกตัวของโซเดียมเปอร์ซัลเฟตกลายเป็นอนุมูลอิสระซัลเฟต $\text{SO}_4^{\cdot-}$ ทำให้เกิดอนุมูลอิสระ $\text{SO}_4^{\cdot-}$ ขึ้นในระบบ จึงเกิดการบำบัดของสารไกลโฟเซตเกิดขึ้น

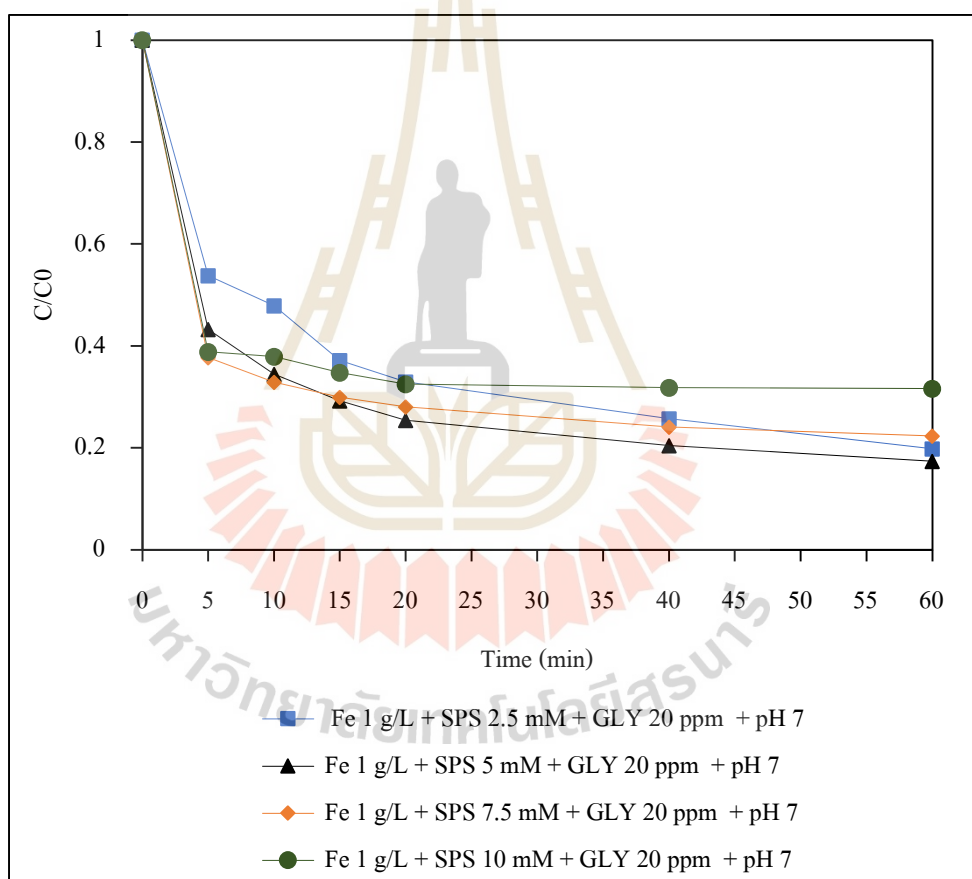
จากการทดลองการบำบัดสารไกลโฟเซตโดยใช้เหล็กขนาดนาโนเมตรเพียงอย่างเดียว 1 กรัมต่อลิตร (เส้นกราฟสีเขียว) จะเห็นได้ว่าความเข้มข้นของสารไกลโฟเซตจะค่อยๆลดลงเมื่อเวลาผ่านไปและเริ่มคงที่เมื่อเข้านาทีที่ 120 นาที พบสารไกลโฟเซตเหลือประมาณ 55 เปอร์เซ็นต์ นั้นหมายความว่า การใช้เหล็กเพียงอย่างเดียว 1 กรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารไกลโฟเซตที่ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร สภาวะความเป็นกรดต่างเท่ากับ 7 ได้ประมาณ 45 เปอร์เซ็นต์ โดยกลไกของการบำบัดสารไกลโฟเซตโดยใช้เหล็กคือสารไกลโฟเซตจะถูกดูดซับไว้ที่ผิวของเหล็ก เนื่องจากเหล็กขนาดนาโนเมตรที่นำมาใช้มีค่า pH_{pzc} เท่ากับ 3.4 และเมื่อสภาวะความเป็นกรดต่างของสารละลายประมาณ 7 ($\text{pH} > \text{pH}_{\text{pzc}}$) ประจุบนพื้นผิวของเหล็กในสารละลายจะเป็นลบของกลุ่มไฮดรอกไซด์ (OH^-) รอบพื้นผิวของเหล็ก ดังนั้นจะทำให้เหล็กเกิดการดูดซับกับสารไกลโฟเซตที่ประจุบวก

จากการทดลองการบำบัดสารไกลโฟเซตโดยใช้เหล็กขนาดนาโนเมตร (Fe) 1 กรัมต่อลิตร ร่วมกับสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟต (SPS) เข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ (เส้นกราฟสีดำ) จะเห็นว่าภายใน 5 นาทีแรกของปฏิกิริยาสามารถบำบัดสารไกลโฟเซตได้มากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นความเข้มข้นของสารไกลโฟเซตจะค่อยๆลดลงเมื่อเวลาผ่านไปและเริ่มคงที่เมื่อเข้าวันที่ที่ 120 นาที โดยประสิทธิภาพในการบำบัดได้ประมาณ 96 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งการบำบัดสารไกลโฟเซตด้วยปฏิกิริยาเสมือนเฟนตันโดยใช้เหล็กร่วมกับสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟตจะทำให้ได้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงขึ้นเมื่อเทียบกับการบำบัดโดยใช้เหล็กเพียงอย่างเดียวหรือการบำบัดโดยใช้สารโซเดียมเปอร์ซัลเฟตเพียงอย่างเดียว สามารถอธิบายได้ว่าการใช้เหล็กร่วมกับสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟตนั้นสารไกลโฟเซตส่วนหนึ่งจะเกิดการดูดติดสารไกลโฟเซตที่ผิวเหล็ก เนื่องจากเมื่อเติมสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟตลงไปจะทำให้สภาวะกรดต่างของระบบที่เคยปรับไว้จากสภาวะกรดต่างเท่ากับ 7 ลดลงเหลือ 3.2 ซึ่ง pH_{pzc} เท่ากับ 3.4 และเมื่อสภาวะความเป็นกรดต่างของสารละลายประมาณ 3.2 ($pH < pH_{pzc}$) ประจุบนพื้นผิวของเหล็กในสารละลายจะเป็นบวกของกลุ่ม H^+ รอบพื้นผิวของเหล็ก ดังนั้นจะทำให้เหล็กเกิดการดูดติดกับสารไกลโฟเซตที่ประจุลบ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (YingYang และคณะ, 2018) พบว่าที่สภาวะความเป็นกรดจะเพิ่มการดูดติดสารไกลโฟเซตกับผิวของ goethite และ magnetite นอกจากนี้ที่สภาวะกรดยังมี H^+ ปริมาณมากซึ่งส่งผลต่อการเพิ่มปริมาณของอนุมูลอิสระในการทำลายพันธะ C-P ของไกลโฟเซต โดยเหล็กขนาดนาโนเมตรที่ใช้เป็นเหล็ก Fe^{3+} ซึ่งในระหว่างการดูดติดสารไกลโฟเซตไว้ที่ผิวของเหล็ก เหล็ก Fe^{3+} จะเข้าทำปฏิกิริยากับโซเดียมเปอร์ซัลเฟตกลายเป็นสารอนุมูลอิสระซัลเฟตและอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล ดังสมการที่ 6-10 และ 11 ซึ่งหลักการในการบำบัดสารไกลโฟเซตอาศัยอนุมูลอิสระเข้าทำลายพันธะ C-P ของสารไกลโฟเซต ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็น PO_4^{3-} NH_4^+ NO_2^- NO_3^- CO_2 และ H_2O โดยผลิตภัณฑ์เหล่านี้เป็นแร่ธาตุที่พบได้ในธรรมชาติ (YingYang และคณะ, 2018)



จากการบำบัดโดยใช้เหล็กร่วมกับสาร โซเดียมเปอร์ซัลเฟตจะทำให้ได้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงขึ้นเมื่อเทียบกับการบำบัดโดยใช้เหล็กเพียงอย่างเดียวหรือการบำบัดโดยใช้สาร โซเดียมเปอร์ซัลเฟตเพียงอย่างเดียว ทำให้ผลการทดลองถัดไปจะเป็นผลการทดลองการใช้เหล็ก (Fe) ร่วมกับโซเดียมเปอร์ซัลเฟต (SPS) โดยทำการศึกษาความเข้มข้นของสาร โซเดียมเปอร์ซัลเฟต (SPS) ปริมาณเหล็ก (Fe) ความเข้มข้นของไกลโฟเซต สภาพความเป็นกรดและอนุพลอิสระ

4.2.1.2 ผลของความเข้มข้นสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟตต่อการบำบัดสารไกลโฟเซตด้วยปฏิกิริยาเสมือนเฟนต์ัน

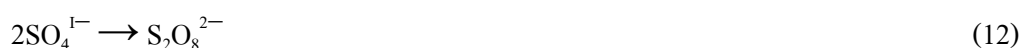


รูปที่ 4.9 ผลของความเข้มข้นสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟตต่อการบำบัดสารไกลโฟเซตด้วยปฏิกิริยาเสมือนเฟนต์ัน

จากรูปที่ 4.9 แสดงผลการบำบัดสารไกลโฟเซตโดยใช้เหล็กร่วมกับสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟต ที่ความเข้มข้นของสารไกลโฟเซต 20 มิลลิกรัมต่อลิตร สภาวะความเป็นกรดต่างเท่ากับ 7 ใช้เหล็ก 1 กรัมต่อลิตร โดยควบคุมสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟตที่ความเข้มข้นต่างๆ ได้แก่ 2.5 มิลลิโมลาร์ 5 มิลลิโมลาร์ 7.5 มิลลิโมลาร์ และ 10 มิลลิโมลาร์

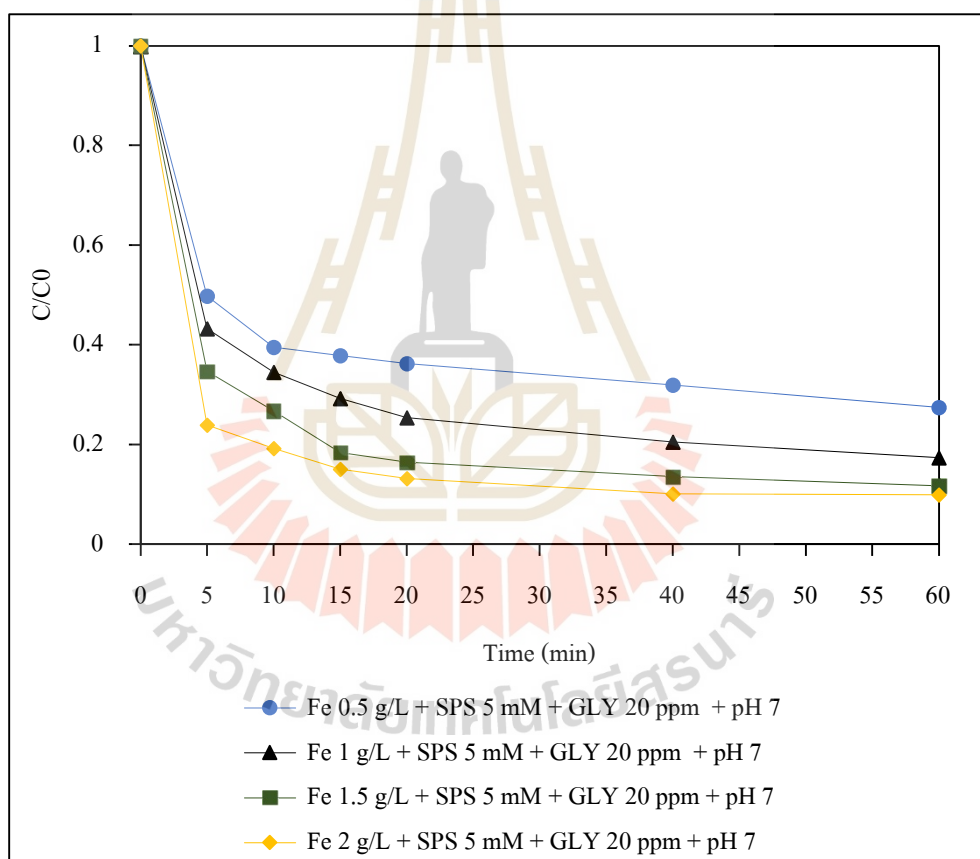
จากการทดลองจะเห็นภาพรวมได้ว่า เมื่อเวลาผ่านไปสารไกลโฟเซตจะค่อยๆลดลงไปเรื่อยๆ และยังพบว่าที่ 5 นาทีแรก ที่ความเข้มข้นของสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟตที่ความเข้มข้นสูงที่สุด จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดได้ดีที่สุด เรียงลำดับประสิทธิภาพในการบำบัดที่ 5 นาทีแรกจากมากไปน้อย 10 มิลลิโมลาร์ 7.5 มิลลิโมลาร์ 5 มิลลิโมลาร์ และ 2.5 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ แต่เมื่อเข้าถึงนาทีที่ 10 พบว่าความเข้มข้นที่ 7.5 มิลลิโมลาร์ มีประสิทธิภาพในการบำบัดได้ดีที่สุด รองลงมาเป็น 5 มิลลิโมลาร์ 10 มิลลิโมลาร์ และ 2.5 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ เมื่อเข้านาทีที่ 15 และ 20 จะเห็นได้ว่า ความเข้มข้นที่ 5 มิลลิโมลาร์ มีประสิทธิภาพในการบำบัดได้ดีที่สุด รองลงมาเป็น 7.5 มิลลิโมลาร์ 10 มิลลิโมลาร์ และ 2.5 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับและเมื่อเวลาเข้าสู่ นาทีที่ 40 และ 60 จะเห็นได้ว่า ความเข้มข้นที่ 5 มิลลิโมลาร์ มีประสิทธิภาพในการบำบัดได้ดีที่สุด รองลงมาเป็น 2.5 มิลลิโมลาร์ 7.5 มิลลิโมลาร์ และ 10 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ

อาจเป็นเพราะว่าที่ความเข้มข้นสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟตเข้มข้นสูงๆ เช่น 10 มิลลิโมลาร์ และ 7.5 มิลลิโมลาร์ มีความสามารถในการผลิตอนุมูลอิสระได้มากเกินไป ทำให้เกิดปฏิกิริยาการยับยั้งอนุมูลอิสระซัลเฟตและอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล ที่เกิดขึ้นในระบบดั่งสมการที่ 12-14 และ 16-18 จะเห็นได้ว่าการสลายตัวของอนุมูลอิสระจากการที่อนุมูลอิสระซัลเฟต ($\text{SO}_4^{\cdot-}$) และอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (OH^{\cdot}) โดยอนุมูลอิสระจะเข้าทำปฏิกิริยากับเหล็ก (Fe^{2+}) และอนุมูลอิสระซัลเฟต ($\text{SO}_4^{\cdot-}$) และอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (OH^{\cdot}) จะทำปฏิกิริยากับตัวมันเองทำให้เกิดการย่อยสลายของตัวอนุมูลอิสระนั้นๆ แทนที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับสารไกลโฟเซต ดังนั้นถ้าดูในภาพรวมการบำบัดสารไกลโฟเซตความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร สภาวะความเป็นกรดต่างเท่ากับ 7 โดยใช้เหล็ก 1 กรัมต่อลิตร ร่วมกับสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟต 5 มิลลิโมลาร์ มีประสิทธิภาพสูงที่สุด





4.2.1.3 ผลของความเข้มข้นเหล็กต่อการบำบัดสารไกลโฟเซตด้วยปฏิกิริยา เสมือนเฟนตัน



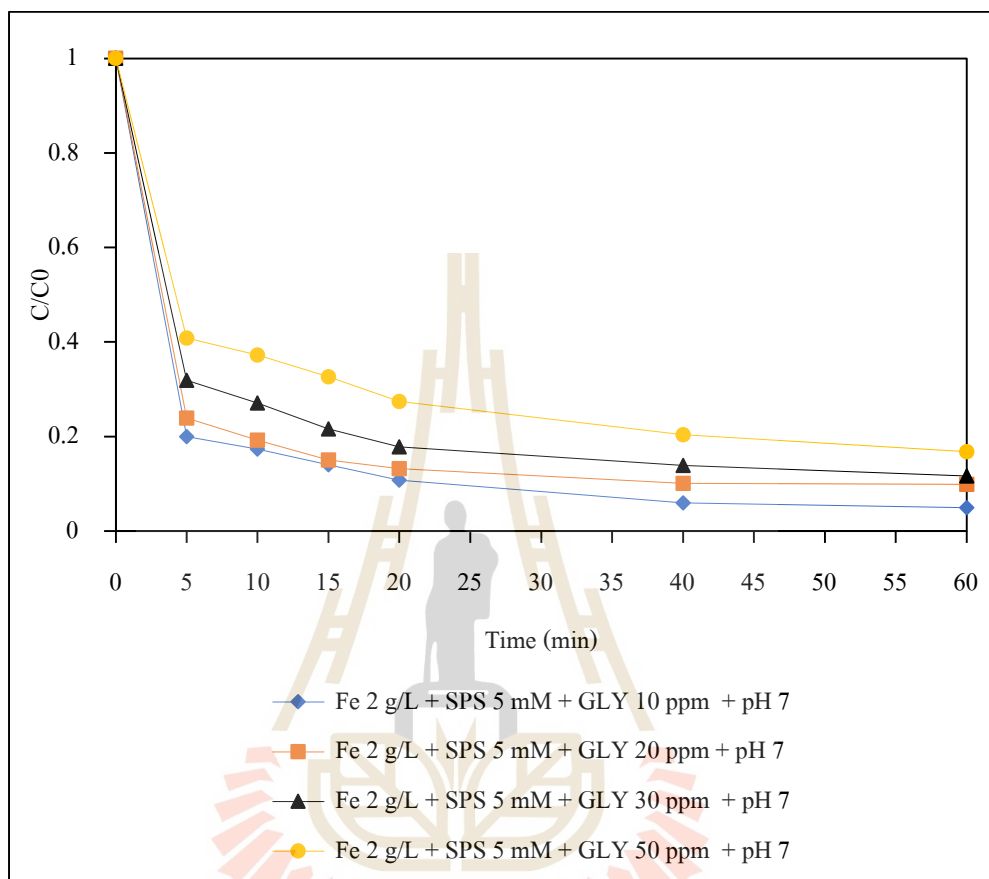
รูปที่ 4.10 ผลของความเข้มข้นของเหล็กต่อการบำบัดสารไกลโฟเซต
ด้วยปฏิกิริยาเสมือนเฟนตัน

จากรูปที่ 4.10 แสดงผลการบำบัดสาร ไกลโฟเซตโดยใช้เหล็กร่วมกับสาร โซเดียมเปอร์ซัลเฟต ที่ความเข้มข้นของสารไกลโฟเซต 20 มิลลิกรัมต่อลิตร สภาพความเป็นกรด ต่างเท่ากับ 7 ใช้สารโซเดียมเปอร์ซัลเฟต 5 มิลลิโมลาร์ โดยควบคุมเหล็กที่ปริมาณต่างกัน ได้แก่ 0.5 กรัมต่อลิตร 1 กรัมต่อลิตร 1.5 กรัมต่อลิตร และ 2 กรัมต่อลิตร

จากการทดลองจะเห็นภาพรวมว่าเมื่อเวลาผ่านไปสารไกลโฟเซตจะลดลงไปเรื่อยๆ โดยที่ปริมาณเหล็กมากจะทำให้มีประสิทธิภาพการบำบัดสูง เรียงลำดับประสิทธิภาพการบำบัด จากมากไปน้อย ดังนี้ 2 กรัมต่อลิตร 1.5 กรัมต่อลิตร 1 กรัมต่อลิตร และ 0.5 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ

เนื่องจากปริมาณเหล็กที่มากขึ้นจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับสาร ไกลโฟเซต เพราะการเมื่อเติมสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟตลงไปจะทำให้สภาวะกรดของระบบที่เคย ปรับไว้จากสภาวะกรดต่างเท่ากับ 7 ลดลงเหลือ 3.2 ซึ่ง pH_{pzc} เท่ากับ 3.4 และเมื่อสภาวะความเป็น กรดต่างของสารละลายประมาณ 3.2 ($pH < pH_{pzc}$) ประจุบนพื้นผิวของเหล็กในสารละลายจะเป็น บวกของกลุ่ม H^+ รอบพื้นผิวของเหล็ก ดังนั้นจะทำให้เหล็กเกิดการดูดติดกับสารไกลโฟเซต ที่ประจุลบ ดังนั้นปริมาณเหล็กที่มากขึ้นจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับสารไกลโฟเซตมากขึ้น และปริมาณเหล็กที่มากขึ้นจะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการผลิตอนุมูลอิสระได้มากขึ้น เพราะ ปริมาณเหล็กที่มากขึ้นส่งผลให้เหล็กจะเข้าทำปฏิกิริยากับโซเดียมเปอร์ซัลเฟตกลายเป็นสารอนุมูล อิสระซัลเฟตและอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลได้มากขึ้นดังสมการที่ 1-4 และ 8-10 ส่งผลให้ให้ ประสิทธิภาพในการบำบัดดีขึ้น ดังนั้นจากการทดลองการใช้เหล็กที่ 2 กรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพ สูงสุดในการบำบัดสารไกลโฟเซต

4.2.1.4 ผลของความเข้มข้นสารไกลโฟเซตต่อการบำบัดสารไกลโฟเซตด้วย ปฏิกิริยาเสมือนเฟนตัน



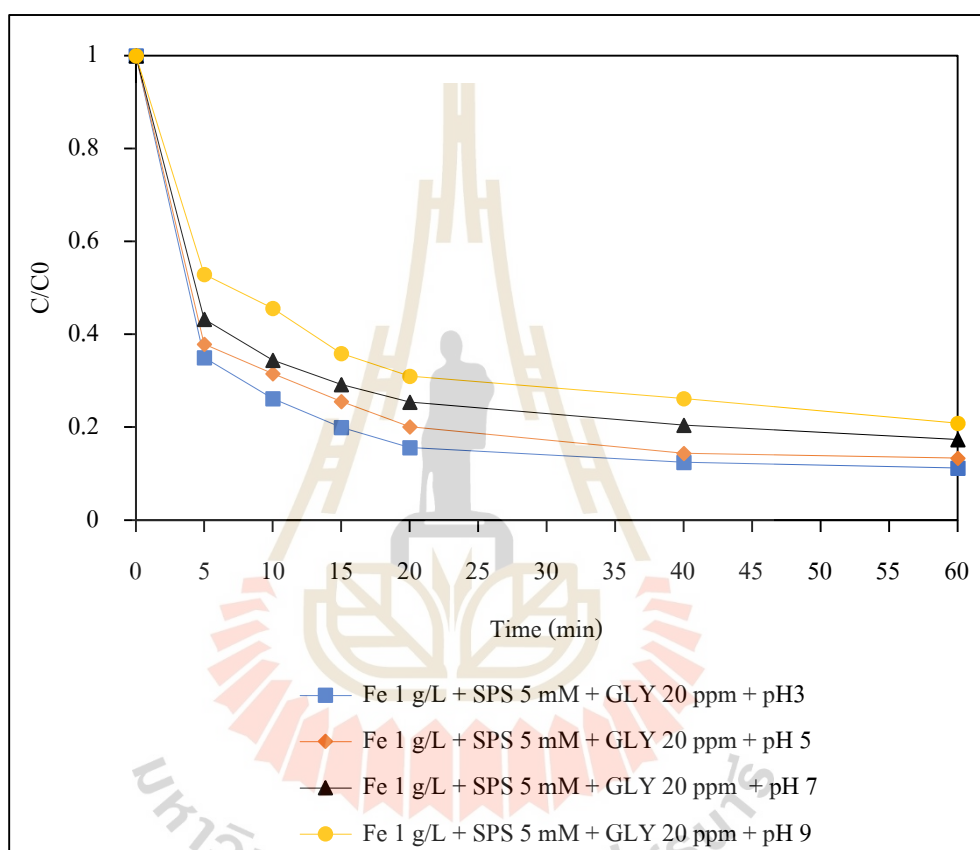
รูปที่ 4.11 ผลของความเข้มข้นสารไกลโฟเซตต่อการบำบัดสารไกลโฟเซต
ด้วยปฏิกิริยาเสมือนเฟนตัน

จากรูปที่ 4.11 แสดงผลการบำบัดสารไกลโฟเซตโดยใช้เหล็กร่วมกับสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟต สภาวะความเป็นกรดต่างเท่ากับ 7 ใช้สารโซเดียมเปอร์ซัลเฟต 5 มิลลิโมลาร์ ใช้เหล็ก 2 กรัมต่อลิตร โดยควบคุมความเข้มข้นไกลโฟเซตที่ต่างกันได้แก่ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร 20 มิลลิกรัมต่อลิตร 30 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากการทดลองจะเห็นภาพรวมได้ว่า เมื่อเวลาผ่านไปสารไกลโฟเซตจะค่อยๆ ลดลงเรื่อยๆ โดยที่ความเข้มข้นไกลโฟเซตที่น้อยๆ จะมีประสิทธิภาพการบำบัดได้ดีเรียงลำดับประสิทธิภาพการบำบัดจากมากไปน้อย ดังนี้ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร 20 มิลลิกรัมต่อลิตร 30 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

เนื่องจากขณะที่ในระบบมีปริมาณเหล็กและปริมาณ โซเดียมเปอร์ซัลเฟต เท่ากันดังนั้นความสามารถในการดูดซับและการผลิตอนุมูลอิสระจึงได้เท่ากัน เมื่อมีความเข้มข้นของไกลโฟเซตน้อยกว่า การบำบัดจึงเป็นไปได้ง่าย ค่าประสิทธิภาพในการบำบัดจึงบำบัดได้สูง

4.2.1.5 ผลของสถานะความเป็นกรดต่อการบำบัดสารไกลโฟเซตด้วยปฏิกิริยาเสมือนเฟนตัน



รูปที่ 4.12 ผลของสถานะความเป็นกรดต่อการบำบัดสารไกลโฟเซตด้วยปฏิกิริยาเสมือนเฟนตัน

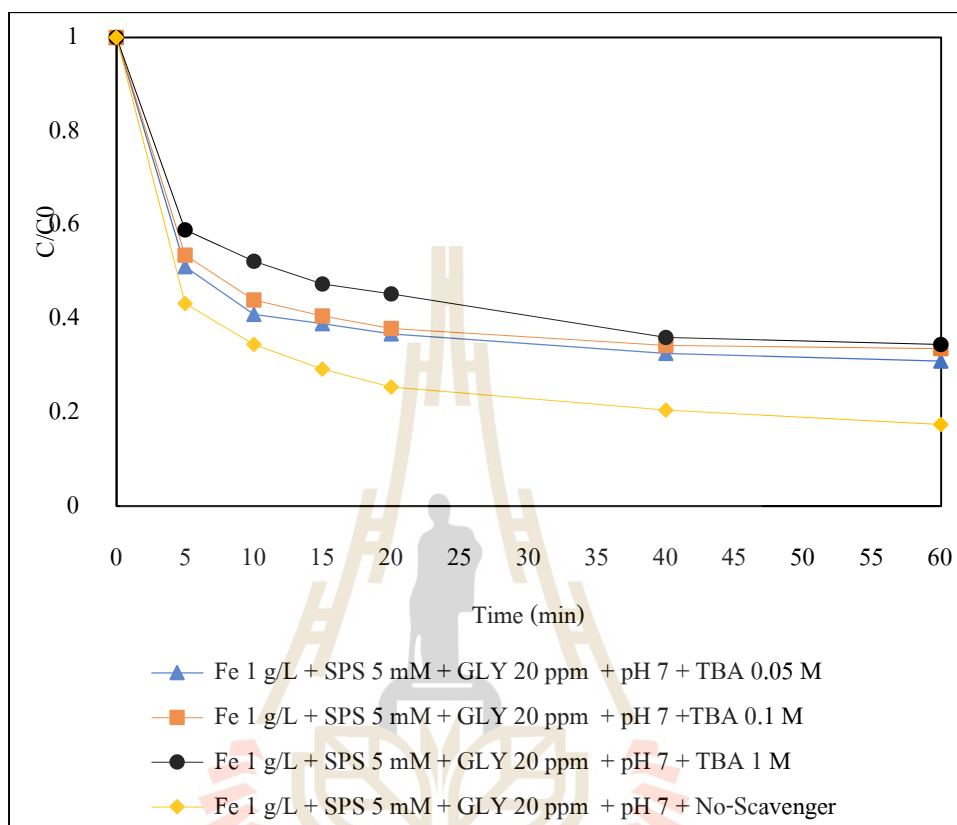
จากรูปที่ 4.12 แสดงผลการบำบัดสาร ไกลโฟเซตโดยใช้เหล็กร่วมกับสาร โซเดียมเปอร์ซัลเฟต ที่ความเข้มข้นของสารไกลโฟเซต 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้สารโซเดียมเปอร์ซัลเฟต 5 มิลลิโมลาร์ ใช้เหล็ก 2 กรัมต่อลิตร โดยควบคุมสถานะความเป็นกรดต่างเท่ากับต่างกัน ได้แก่ 3 5 7 และ 9

จากการทดลองจะเห็นภาพรวมได้ว่า เมื่อเวลาผ่านไปสารไกลโฟเซตจะค่อยๆ ลดลงไปเรื่อยๆ โดยที่สถานะเป็นกรด (pH 3) จะมีประสิทธิภาพการบำบัดได้ดี เรียงลำดับประสิทธิภาพการบำบัดจากมากไปน้อย ดังนี้สถานะความเป็นกรดต่าง 3 5 7 และ 9 ตามลำดับ

เนื่องจากที่สถานะกรด (pH 3) เป็นช่วงสถานะที่สามารถผลิตอนุมูลอิสระเปอร์ซัลเฟตได้มากกว่าที่ช่วงสถานะความเป็นกรดต่างๆ และในสภาพความเป็นกรดส่งผลต่อการกัดกร่อนอย่างรวดเร็วของเหล็ก (LAI, Bo, et al., 2013) เมื่อเหล็กหลุดออกมาจาก อนุมูลอิสระก็จะเกิดได้มากขึ้นในระบบ (HUSSAIN, Imtyaz, et al., 2017) และในสถานะความเป็นกรดจะสามารถช่วยแตกตัวของโซเดียมเปอร์ซัลเฟตกลายเป็นอนุมูลอิสระเปอร์ซัลเฟตตั้งสมการที่ 10 ทำให้อนุมูลอิสระ ($\text{SO}_4^{\cdot-}$) ในระบบเพิ่มขึ้น และที่สถานะกรดเป็นสถานะที่สารละลายมีค่าความเป็นกรดต่างต่ำกว่า pH_{pzc} ($\text{pH} < \text{pH}_{\text{pzc}}$) ส่งผลให้ประจุบนพื้นผิวของเหล็กในสารละลายจะเป็นบวกของกลุ่ม H^+ รอบพื้นผิวของเหล็ก ดังนั้นจะทำให้เหล็กเกิดการดูดติดกับสารไกลโฟเซตที่ประจุลบได้ดี ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (YingYang และคณะ, 2018) พบว่าที่สถานะความเป็นกรดจะเพิ่มการดูดติดสารไกลโฟเซตกับผิวของ goethite และ magnetite ส่วนในสถานะเป็นด่าง (pH 9) จะเกิดการยับยั้งอนุมูลซัลเฟต ($\text{SO}_4^{\cdot-}$) ให้กลายเป็นอนุมูลไฮดรอกซิล (OH^{\cdot}) ซึ่งมีเสถียรภาพที่ต่ำกว่าอนุมูลซัลเฟต ($\text{SO}_4^{\cdot-}$; $t_{1/2} = 30\text{--}40 \mu\text{s}$, OH^{\cdot} ; $t_{1/2} = 1 \mu\text{s}$) ดังสมการที่ 15 ดังนั้นในสถานะกรดจึงเป็นสถานะที่ช่วยเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดการย่อยสลายเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการบำบัดสารไกลโฟเซตสถานะความเป็นกรดต่างเท่ากับ 7 ยังมีความสามารถบำบัดสารไกลโฟเซตได้มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ถ้ากำหนดระยะเวลาในการบำบัดให้เหมาะสม



4.2.1.6 ผลของอนุมูลอิสระต่อการบำบัดสารไกลโฟเซตด้วยปฏิกิริยา เสมือนเฟนต์ัน



รูปที่ 4.13 ผลของอนุมูลอิสระต่อการบำบัดสารไกลโฟเซตด้วยปฏิกิริยาเสมือนเฟนต์ัน

การศึกษาผลการควบคุมอนุมูลอิสระในการบำบัดสารไกลโฟเซตในน้ำ เพื่อระบุนุมูลอิสระที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารไกลโฟเซต โดยการเติมสาร TBA เนื่องจากสาร TBA มีคุณสมบัติในการยับยั้งอนุมูลไฮดรอกซิล OH^\cdot ($3.8-7.6 \times 10^8$ โมลาร์⁻¹วินาที⁻¹) ซึ่งรุนแรงกว่าการยับยั้งอนุมูลซัลเฟต $\text{SO}_4^{\cdot-}$ ($4-9.1 \times 10^8$ โมลาร์⁻¹วินาที⁻¹) มากถึง 418-1900 เท่า (HUSSAIN, Imtyaz, et al., 2018) ดังนั้นการเติมสาร TBA เพื่อเข้าไปยับยั้งอนุมูลไฮดรอกซิล (OH^\cdot) ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดสารไกลโฟเซตส่วนใหญ่เกิดจากจากอนุมูลซัลเฟต ($\text{SO}_4^{\cdot-}$)

จากการทดลองทำการควบคุมความเข้มข้นของสาร TBA ได้แก่ เติมสาร TBA 0.05 โมลาร์ 0.1 โมลาร์ และ 1 โมลาร์ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่เติมสาร TBA (ปฏิกิริยาเกิดอนุมูลอิสระทั้ง $\text{SO}_4^{\cdot-}$ และ OH^\cdot , เส้นกราฟสีเหลือง) พบว่า การเติมสาร TBA ลงไปประสิทธิภาพ

ในการบำบัดสารไกลโฟเซตจะลดลง และเมื่อความเข้มข้นของสาร TBA เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการบำบัดสารไกลโฟเซตจะลดลงด้วย โดยที่ความเข้มข้นของสาร TBA 1 โมลาร์ จะพบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดสารไกลโฟเซตต่ำที่สุด

เนื่องจากการเติม TBA 1 M ทำให้อนุมูลอิสระที่หลงเหลือในปฏิกิริยามีอนุมูลอิสระ $\text{SO}_4^{-1} > \text{OH}^{\cdot}$ ดังนั้นประสิทธิภาพในการบำบัดสารไกลโฟเซตของกราฟเส้นสีดำเป็นการบำบัดโดยอนุมูลอิสระซัลเฟต (SO_4^{-1}) เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งประสิทธิภาพในการบำบัดประมาณ 54 เปอร์เซ็นต์ และจะเห็นได้ว่าในขณะที่บำบัดสารไกลโฟเซตจากอนุมูลอิสระทั้ง 2 ชนิด (SO_4^{-1} และ OH^{\cdot} , เส้นกราฟสีเหลือง) จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดประมาณ 83 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นสามารถระบุได้ว่าอนุมูลอิสระหลักที่ใช้ในการบำบัดสารไกลโฟเซตโดยใช้เหล็กขนาดนาโนเมตรร่วมกับโซเดียมเปอร์ซัลเฟตในปฏิกิริยาเสมือนเฟ้นตันคือ อนุมูลซัลเฟต (SO_4^{-1})

4.2.2 การบำบัดสารไกลโฟเซตในดิน

4.2.2.1 คุณลักษณะของดิน

ดินที่นำมาศึกษาเป็นดินจากแปลงปลูกพืชอินทรีย์ในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ทำการเก็บตัวอย่างดินเพียงครั้งเดียวในปริมาณที่เพียงพอต่อการเป็นตัวแทนของดินตลอดการทดลอง โดยนำมาทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อกำจัดจุลินทรีย์ภายในดิน จากนั้นนำมาทำการคัดขนาดและนำตัวอย่างดินบางส่วนส่งวิเคราะห์คุณลักษณะ ได้แก่ Moisture Soil Texture pHw OM และ CEC แสดงผลดังตารางที่ 4.3

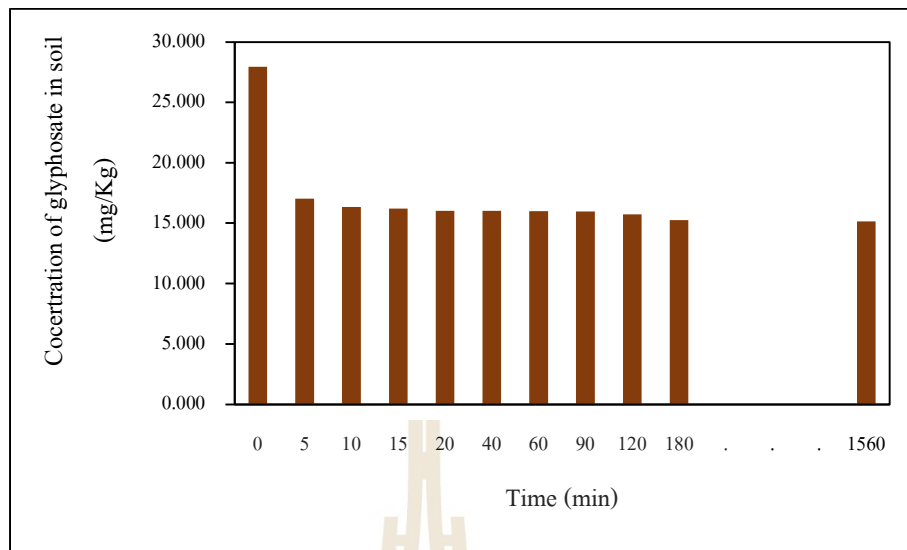
ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของดิน

พารามิเตอร์	ผลการวิเคราะห์
Moisture (%) (Conventional oven method)	1.13
Sand (%)	71.20
Silt (%)	17.74
Clay (%)	11.06
Texture (Hydrometer method)	Sandy loam
pHw (1:2.5) (pH meter)	6.80
OM (%) (Walkley & Black method)	0.58
CEC (cmol(+)/kg) (1 N NH_4OAc pH 7 & Distillation method)	12.19

เนื่องจากคุณลักษณะของดินที่ต่างกัน ส่งผลผลการดูดซับไกลโฟเซตไว้ในดินได้ต่างกัน จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาลักษณะของดินที่นำมาใช้ในการทดลอง จากผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของดินพบว่า ดินที่นำมาทดลองเป็นดินร่วนปนทราย (sandy loam) โดยมีเปอร์เซ็นต์ดินเหนียว 11.06 เปอร์เซ็นต์และเปอร์เซ็นต์ทรายแป้งบวก 17.74 เปอร์เซ็นต์ และทราย 71.20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีองค์ประกอบอินทรีย์ (OM) อยู่ 0.58 เปอร์เซ็นต์ และค่าความจุการแลกเปลี่ยนไอออนบวก (CEC) 12.19 เซนติโมลของประจุ (+) ต่อกิโลกรัม

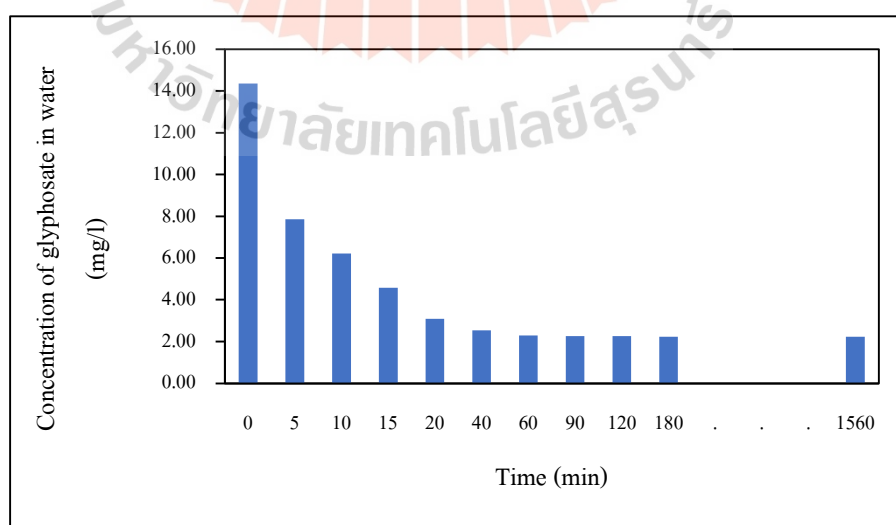
4.2.2.2 ผลการบำบัดสารไกลโฟเซตในดินชุ่มน้ำ

จากการทดลองผลของการบำบัดสารไกลโฟเซตในดินร่วนปนทรายชุ่มน้ำ โดยใช้สารละลายสารไกลโฟเซตเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 500 มล. สภาพความเป็นกรดต่างเท่ากับ 7 สารโซเดียมเปอร์ซัลเฟตเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ปริมาณเหล็ก 0.5 กรัม ในดิน 500 กรัม ได้จัดตั้งการทดลองโดยการจำลองสภาพดินชุ่มน้ำดังรูปที่ 3.5 เริ่มจากการผสมดิน 500 กรัม กับเหล็กขนาดนาโนเมตร 0.5 กรัม แล้วเก็บตัวอย่างดินเพื่อใช้เป็นตัวอย่างดินก่อนมีปนเปื้อนไกลโฟเซต จากนั้นนำมาจำลองการปนเปื้อนสารไกลโฟเซตโดยการเติมน้ำไกลโฟเซตที่เตรียมไว้มีความเข้มข้นประมาณ 17.68 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 500 มล. สภาพความเป็นกรดต่างเท่ากับ 7 ทำการคนให้สารละลายผสมเข้ากันกับดินเป็นเวลา 30 วินาที จากนั้นเก็บตัวอย่างดินและน้ำเหนือผิวดินเพื่อใช้เป็นตัวอย่างดินปนเปื้อนไกลโฟเซตเริ่มต้น พบว่ามีไกลโฟเซตปนเปื้อนลงในดินเริ่มต้นเพียง 27.93 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในขณะที่ในน้ำเหนือผิวดินพบสารไกลโฟเซตเข้มข้น 14.35 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นเริ่มการทดลองต่อโดยการเติมสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟตลงไปและทำการคนเป็นเวลา 30 วินาที เริ่มจับเวลาเพื่อเก็บตัวอย่างดินและน้ำที่เวลาต่างๆ ซึ่งผลได้แสดงดังรูปที่ 4.14 รูปที่ 4.15 และรูปที่ 4.16



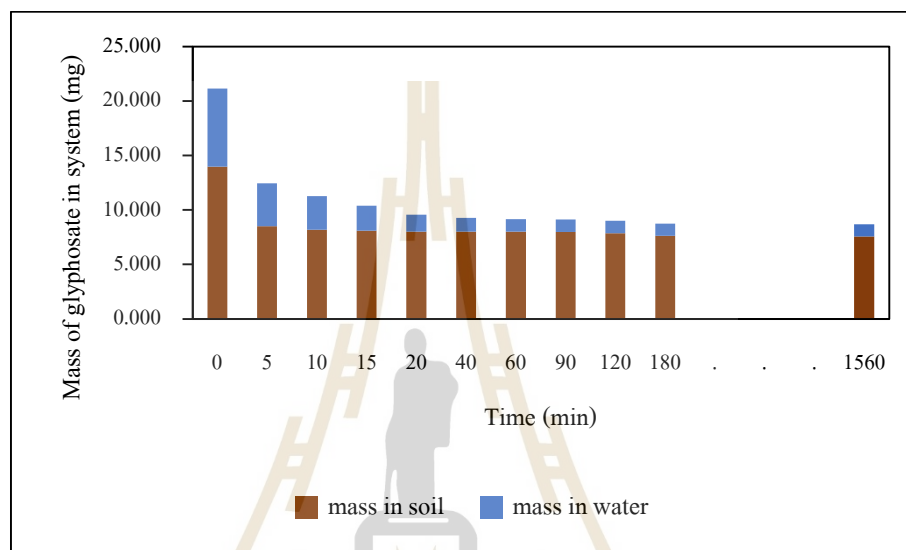
รูปที่ 4.14 ผลความเข้มข้นของสารไกลโฟเซตในดินเทียบกับเวลา

จากรูปที่ 4.14 ในส่วนของการบำบัดสารไกลโฟเซตในดินจากการทดลองพบว่า ที่ 5 นาทีแรก มีความเข้มข้นของสารไกลโฟเซตในดินลดลงจากความเข้มข้นของสารไกลโฟเซตเริ่มต้นในดิน 27.93 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เหลือ 17.02 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และเมื่อเวลาผ่านไปเรื่อยๆ พบว่าการบำบัดสารไกลโฟเซตในดินลดลงอีกเพียงเล็กน้อย โดยจากการทำการทดลองทิ้งไว้ครบ 24 ชั่วโมง พบความเข้มข้นของสารไกลโฟเซตในดินตกค้างประมาณ 15.15 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม



รูปที่ 4.15 ผลความเข้มข้นของสารไกลโฟเซตในน้ำเหนือผิวดินเทียบกับเวลา

จากรูปที่ 4.15 ในส่วนของการบำบัดสารไกลโฟเซตในน้ำเหนือผิวดิน พบว่าการบำบัดสารไกลโฟเซตในน้ำที่อยู่เหนือผิวดินพบสารไกลโฟเซตความเข้มข้นเริ่มต้นในน้ำเหนือผิวดิน 14.35 มิลลิกรัมต่อลิตร และพบว่ามีความเร็วของการบำบัดสารไกลโฟเซตลดลงเรื่อยๆ เมื่อเวลาผ่านไป โดยจากการทำการทดลองทิ้งไว้ครบ 24 ชั่วโมง พบความเข้มข้นของสารไกลโฟเซตในน้ำเหนือผิวดินตกค้างประมาณ 2.23 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.16 มวลของสารไกลโฟเซตในระบบดินชุ่มน้ำ

จากรูปที่ 4.16 จากภาพรวมทั้งหมดในการบำบัดสารไกลโฟเซตในดินชุ่มน้ำ พบว่าการบำบัดสารไกลโฟเซตในน้ำที่อยู่เหนือผิวดินมีความเร็วของการบำบัดสารไกลโฟเซตในดินมีการบำบัดแค่ช่วง 5 นาทีแรกเท่านั้น ซึ่งจากการบำบัดสารไกลโฟเซตภายใน 24 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพการบำบัดสารไกลโฟเซตจากส่วนของดินคิดเป็น 30.23 เปอร์เซ็นต์ และในน้ำเหนือผิวดินคิดเป็น 28.67 เปอร์เซ็นต์ โดยผลของประสิทธิภาพในการบำบัดสารไกลโฟเซตจากดินชุ่มน้ำทั้งหมดคิดเป็น 58.90 เปอร์เซ็นต์

จากข้อมูลชุดนี้พบว่า การบำบัดสารไกลโฟเซตในเฟตของดินและในน้ำเหนือผิวดินมีประสิทธิภาพในการบำบัดใกล้เคียงกัน แต่จะเห็นได้ว่าการบำบัดของสารไกลโฟเซตในดินจะมีการบำบัดแค่ในช่วง 5 นาทีแรกเท่านั้น เนื่องจากในการทดลองหลังกระบวนการเติมสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟตลงไปผสมกับดินที่มีเหล็กในน้ำไกลโฟเซต และทำการคนให้เข้ากันเป็นเวลา 30 วินาที ทำให้เกิดการสร้างอนุมูลอิสระซัลเฟต ($\text{SO}_4^{\cdot-}$) และอนุมูลไฮดรอกซิล (OH^{\cdot}) จากปฏิกิริยาระหว่างเหล็กกับสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟตได้เล็กน้อยดังสมการที่ 6-8 และ 11 ซึ่งอนุมูลอิสระจะเข้าทำลายพันธะ C-P ของสารไกลโฟเซตบางส่วน ส่วนของไกลโฟเซตที่ถูกตัดพันธะ C-P จะกลายเป็น PO_4^{3-} NH_4^+ NO_2^- NO_3^- CO_2 และ H_2O (YingYang และคณะ, 2018) เนื่องจากอนุมูลอิสระที่ผลิตได้มีปริมาณน้อยเพียงการสัมผัสระหว่างเหล็กและสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟตแค่ 30 วินาที ทำให้สารไกลโฟเซตยังคงค้างอยู่ในดินและการดูดติดกับออร์แกนิกคาร์บอนในดินทำให้ไม่เกิดการคายซับจากดินสู่น้ำเหนือผิวดิน (ค่าการดูดซับของสารไกลโฟเซตในดิน 61 g/cm^3) (Borggsaard and Gimsing, 2008)

สำหรับการบำบัดสารไกลโฟเซตในน้ำเหนือผิวดิน พบว่ามีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ ตามเวลา เนื่องจากอนุมูลอิสระที่เกิดจากสองกรณีคือ กรณีแรกจากการทดลองการบำบัดสารไกลโฟเซตในดินชุ่มน้ำหลังกระบวนการเติมสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟตลงไปผสมกับดินที่มีเหล็กในน้ำไกลโฟเซต และทำการคนให้เข้ากันเป็นเวลา 30 วินาที ทำให้เกิดการสร้างอนุมูลอิสระซัลเฟต ($\text{SO}_4^{\cdot-}$) และอนุมูลไฮดรอกซิล (OH^{\cdot}) จากปฏิกิริยาระหว่างเหล็กกับสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟตได้เล็กน้อย ดังสมการที่ 6-8 และ 11 และอีกกรณีคือจากข้อมูลรูปที่ 4.8 สารโซเดียมเปอร์ซัลเฟต เพียงอย่างเดียวก็มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารไกลโฟเซตได้ถึง 40 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากการเติมสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟตทำให้ในดินและน้ำมีสถานะเป็นกรด ($\text{pH} < 3$) ส่งผลให้เกิดจากการแตกตัวของโซเดียมเปอร์ซัลเฟต กลายเป็นอนุมูลอิสระซัลเฟต ($\text{SO}_4^{\cdot-}$) จากสมการที่ 10 ซึ่งอนุมูลอิสระที่ผลิตได้จากทั้งสองกรณี จะเข้าทำลายพันธะ C-P ของสารไกลโฟเซตบางส่วน ส่วนของไกลโฟเซตที่ถูกตัดพันธะ C-P จะกลายเป็น PO_4^{3-} NH_4^+ NO_2^- NO_3^- CO_2 และ H_2O (YingYang และคณะ, 2018) ด้วยเหตุนี้ทำให้เกิดการบำบัดสารไกลโฟเซตในน้ำเหนือผิวดินมีแนวโน้มลดลงมากกว่าในดิน จากรูปที่ 4.16 จะเห็นได้ว่าสารไกลโฟเซตในดินหลังนาที่ที่ 5 มีการตกค้างในดินแบบคงที่ไม่แปรไม่มีการเปลี่ยนแปลง สามารถอธิบายประกอบกันได้ว่า ดินไม่สามารถดูดซับสารไกลโฟเซตได้เพิ่มเนื่องจากถึงจุดที่อิ่มตัวแล้ว

ตารางที่ 4.4 สรุปผลการบำบัดสารไกลโฟเซต

ผลการศึกษา	เปอร์เซ็นต์ของประสิทธิภาพในการบำบัดภายใน 60 นาที
<p>การบำบัดสารไกลโฟเซตในน้ำ</p> <ul style="list-style-type: none"> ● ผลการใช้เหล็กในการบำบัดสารไกลโฟเซต (Fe 1 กรัมต่อลิตร + GLY 20 มิลลิกรัมต่อลิตร + pH 7) 38.11 ● ผลการใช้ SPS ในการบำบัดสารไกลโฟเซต (SPS 5 มิลลิโมลาร์ + GLY 20 มิลลิกรัมต่อลิตร + pH 7) 45.02 ● ผลการใช้เหล็กร่วมกับ SPS ในการบำบัดสารไกลโฟเซต (Fe 1 กรัมต่อลิตร + SPS 5 มิลลิโมลาร์ + GLY 20 มิลลิกรัมต่อลิตร + pH 7) 82.64 	
<p>ผลของอนุมูลอิสระในการบำบัดสารไกลโฟเซต (Fe 1 กรัมต่อลิตร + SPS 5 มิลลิโมลาร์ + GLY 20 มิลลิกรัมต่อลิตร + pH 7 + TBA 1 โมลาร์)</p> <ul style="list-style-type: none"> ● TBA 1 M ทำให้อนุมูลอิสระที่หลงเหลือในปฏิกิริยามีอนุมูลอิสระ $\text{SO}_4^{-1} > \text{OH}^1$ 54.17 	
<p>ผลของการบำบัดสารไกลโฟเซตในดินชุ่มน้ำ</p> <ul style="list-style-type: none"> ● ในส่วนของดิน 28.24 ● ในส่วนของน้ำเหนือผิวดิน 28.52 ● ในส่วนของดินและน้ำเหนือผิวดินรวมกัน 56.76 	

จากตารางที่ 4.4 สรุปผลการบำบัดสารไกลโฟเซตพบว่าการบำบัดสารไกลโฟเซตในน้ำโดยใช้เหล็กขนาดนาโนเมตรเพียงอย่างเดียว ($\text{Fe } 1 \text{ g/L} + \text{GLY } 20 \text{ ppm} + \text{pH } 7$) มีประสิทธิภาพในการบำบัดภายใน 60 นาที คิดเป็น 38.11 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการใช้สารโซเดียมเปอร์ซัลเฟตเพียงอย่างเดียวในการบำบัดสารไกลโฟเซต ($\text{SPS } 5 \text{ mM} + \text{GLY } 20 \text{ ppm} + \text{pH } 7$) มีประสิทธิภาพในการบำบัดภายใน 60 นาที คิดเป็น 45.02 เปอร์เซ็นต์ และการใช้เหล็กร่วมกับสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟตซึ่งเป็นการบำบัดสารไกลโฟเซตด้วยปฏิกิริยาเสมือนเฟรนด์ ($\text{Fe } 1 \text{ g/L} + \text{SPS } 5 \text{ mM} + \text{GLY } 20 \text{ ppm} + \text{pH } 7$) มีประสิทธิภาพในการบำบัดภายใน 60 นาที คิดเป็น 82.64 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นได้ว่าการบำบัดสารไกลโฟเซตในน้ำโดยใช้เหล็กร่วมกับสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟตมีประสิทธิภาพในการบำบัดดีกว่าการใช้เหล็กหรือสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟต อย่างใดอย่างหนึ่ง เนื่องจากเหตุผล 2 ประการคือ 1) การใช้เหล็กร่วมกับสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟต นั้นจะทำให้เกิดอนุมูลอิสระเกิดขึ้นทั้งอนุมูลอิสระซัลเฟต ($\text{SO}_4^{\cdot-}$) และอนุมูลไฮดรอกซิล (OH^{\cdot}) 2) การใช้เหล็กร่วมกับสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟต ส่งผลให้ค่าสภาวะความเป็นกรดต่างของสารละลายเป็นกรด ($\text{pH} < 3$) ซึ่งเป็นช่วง $\text{pH} < \text{pH}_{\text{pzc}}$ ทำให้ผิวของเหล็กเกิดการดูดซับสารไกลโฟเซตได้ดีและที่ช่วงสภาวะเป็นกรดจะสามารถช่วยในแตกตัวของโซเดียมเปอร์ซัลเฟตกลายเป็นอนุมูลอิสระซัลเฟตได้ง่ายขึ้น และอนุมูลอิสระหลักในการบำบัดสารไกลโฟเซตจากการใช้ปฏิกิริยาเสมือนเฟรนด์คืออนุมูลอิสระซัลเฟต ($\text{SO}_4^{\cdot-}$) นอกจากนี้พบว่าผลการบำบัดสารไกลโฟเซตในดินชุ่มน้ำภายใน 60 นาที มีประสิทธิภาพทั้งหมดในการบำบัดสารไกลโฟเซตได้ประมาณ 56.76 เปอร์เซ็นต์ โดยสามารถแจกแจงประสิทธิภาพการบำบัดสารไกลโฟเซตจากส่วนของดินคิดเป็น 28.24 เปอร์เซ็นต์ และในน้ำเหนือผิวดินคิดเป็น 28.52 เปอร์เซ็นต์

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตร โดยใช้สารสกัดจากใบยูคาลิปตัสร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิก จากนั้นทำเลือกตัวแทนเหล็กขนาดนาโนเมตรที่สังเคราะห์ได้ไปใช้ในการบำบัดสารไกลโฟเซต ดังนั้นสามารถสรุปผลการศึกษาได้เป็น 2 ผลการศึกษาหลักๆ ได้แก่ ส่วนแรกคือผลการศึกษาลักษณะสมบัติของเหล็กขนาดนาโนเมตร (Fe-NPs) และส่วนที่สองคือผลการศึกษาการบำบัดสารไกลโฟเซต โดยจากผลการศึกษาแต่ละส่วนสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 สรุปการศึกษาลักษณะสมบัติของเหล็กขนาดนาโนเมตร

การศึกษาคูสมบัติของเหล็กขนาดนาโนเมตรได้ทำการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ และองค์ประกอบเคมี เพื่อนำข้อมูลของส่วนต่างๆ มาใช้ประกอบการตัดสินใจสำหรับการเลือกเหล็กขนาดนาโนเมตรจากการสังเคราะห์ด้วยวิธีการแบบต่างๆ มาใช้ในการบำบัดสารไกลโฟเซต โดยจากการทดลองการสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรสังเคราะห์ด้วยสารสกัดใบยูคาลิปตัสพบว่าเหล็กขนาดนาโนเมตรที่สังเคราะห์ด้วยสารสกัดใบยูคาลิปตัสร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิก ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ กำลัง 1000 วัตต์ โดยใช้ความเข้มข้นของสารเหล็กเฟอร์รัสตั้งต้น 0.2 M (Fe-NPs-EL-UL 1000 W) มีความเหมาะสมที่จะใช้ในการบำบัดสารไกลโฟเซต เนื่องจากพบว่ามีปริมาณสัดส่วนความเป็นเหล็กสูงที่สุดคิดเป็น 2.61 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นผลจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XPS ทั้งนี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะ Surface area 26.805 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับการสังเคราะห์ด้วยสารสกัดใบยูคาลิปตัสแต่ไม่ใช้คลื่นอัลตราโซนิก นอกจากนี้ผลจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FESEM พบขนาดอนุภาคมีขนาดแตกต่างกันออกไปในช่วง 20–100 นาโนเมตร และมีลักษณะรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน และผลจาก TEM พบขนาดอนุภาคอยู่ที่ประมาณ 60 นาโนเมตร และจากผล FTIR พบพันธะต่างๆ ได้แก่ O-H และ C-N บนผิวของเหล็กขนาดนาโนเมตร ซึ่งเป็นสารฟีนอลที่อยู่ในสารสกัดใบยูคาลิปตัสมีหน้าที่เป็นสาร capping agent ลดการรวมตัวของอนุภาคขนาดนาโนเมตร แต่ถ้ามีปริมาณสารโพลีฟีนอลมากเกินไปก็จะทำให้อนุภาคเหล็กมีขนาดใหญ่ เนื่องจากจะทำให้มีชั้นหนาๆ ของสารอินทรีย์คาร์บอนที่ผิวของเหล็ก

ทั้งนี้จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XPS และ XRD ซึ่งให้เห็นว่าการใช้คลื่นอัลตราโซนิกร่วมในระหว่างการสังเคราะห์จะทำให้สารอินทรีย์คาร์บอนบางชนิดหลุดออกและทำให้สัดส่วนความเป็นเหล็กสูงขึ้น อย่างไรก็ตามจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XAS สามารถรายงานได้ว่า Fe-NPs-EL-UL เป็นเหล็กฮีมาไทต์ (Fe_2O_3) โดยเหล็ก Fe_2O_3 จะเป็นแหล่งในการปลดปล่อย Fe^{3+} เพื่อเข้าทำปฏิกิริยาร่วมกับโซเดียมเปอร์ซัลเฟตเกิดเป็นอนุมูลอิสระต่างๆ เพื่อใช้ในการบำบัดสารไกลโฟเซต และจากผลของค่าสถานะความเป็นกรดค่าที่ทำให้พื้นผิวเหล็กประจุเป็นศูนย์ (Point zero charge, pH_{pzc}) มีค่า pH_{pzc} เท่ากับ 3.4 หมายความว่า ประจุบนพื้นผิวของ Fe-NPs-EL-UL 1000 W ในสารละลายที่สถานะความเป็นกรดค่าเท่ากับ 3.4 จะเป็นศูนย์ คือเป็นจุดประจุบวกและประจุลบบนพื้นผิวมีค่าเท่ากัน ถ้าสถานะความเป็นกรดค่าของสารละลายน้อยกว่า 3.4 ($\text{pH} < \text{pH}_{\text{pzc}}$) ประจุบนพื้นผิวของ Fe-NPs-EL-UL 1000 W ในสารละลายจะเป็นบวก และเมื่อสถานะความเป็นกรดค่าของสารละลายมากกว่า 3.4 ($\text{pH} > \text{pH}_{\text{pzc}}$) ประจุบนพื้นผิวของ Fe-NPs-EL-UL 1000 W ในสารละลายจะเป็นลบ

5.1.2 สรุปการศึกษาการบำบัดสารไกลโฟเซต

การศึกษาการบำบัดสารไกลโฟเซตได้แบ่งการศึกษาผลการบำบัดออกเป็น การบำบัดสารไกลโฟเซตในน้ำและการบำบัดสารไกลโฟเซตในดิน ซึ่งเป็นการบำบัดสารไกลโฟเซตด้วยปฏิกิริยาเสมือนเฟ้นต้น โดยใช้ตัวแทนเหล็กขนาดนาโนเมตร (Fe-NPs, Fe) ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยสารสกัดไบยูกาลิปตัสร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิกกำลัง 1000 วัตต์ โดยใช้ความเข้มข้นของสารเหล็กเฟอร์รัสตั้งต้น 0.2 โมลาร์ มาใช้ร่วมกับสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟต (SPS) ซึ่งการบำบัดสารไกลโฟเซตนั้นได้แบ่งการศึกษาเป็น 2 หัวข้อคือ การศึกษาการบำบัดสารไกลโฟเซตในน้ำและการศึกษาการบำบัดสารไกลโฟเซตในดิน ดังนี้

5.1.2.1 สรุปการศึกษาการบำบัดสารไกลโฟเซตในน้ำ

จากผลการศึกษาการบำบัดสารไกลโฟเซตในน้ำพบว่าการใช้เหล็กขนาดนาโนเมตร เพียงอย่างเดียวในการบำบัดสารไกลโฟเซต (Fe 1 กรัมต่อลิตร + GLY 20 มิลลิกรัมต่อลิตร + pH 7) มีประสิทธิภาพในการบำบัดภายใน 60 นาที คิดเป็น 38.11 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการใช้สารโซเดียมเปอร์ซัลเฟตเพียงอย่างเดียวในการบำบัดสารไกลโฟเซต (SPS 5 มิลลิโมลาร์ + GLY 20 มิลลิกรัมต่อลิตร + pH 7) มีประสิทธิภาพในการบำบัดภายใน 60 นาที คิดเป็น 45.02 เปอร์เซ็นต์ และการใช้เหล็กร่วมกับสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟตซึ่งเป็นการบำบัดสารไกลโฟเซตด้วยปฏิกิริยาเสมือนเฟ้นต้น (Fe 1 กรัมต่อลิตร + SPS 5 มิลลิโมลาร์ + GLY 20 มิลลิกรัมต่อลิตร + pH 7) มีประสิทธิภาพในการบำบัดภายใน 60 นาที คิดเป็น 82.64 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นได้ว่าการบำบัดสารไกลโฟเซตในน้ำโดยใช้เหล็กร่วมกับสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟตมีประสิทธิภาพในการบำบัดดีกว่าการใช้เหล็กหรือสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟตอย่างใดอย่างหนึ่ง เนื่องจากเหตุผล 2 ประการคือ 1) การใช้

เหล็กร่วมกับสาร โซเดียมเปอร์ซัลเฟตนั้นจะทำให้เกิดอนุมูลอิสระเกิดขึ้นทั้งอนุมูลอิสระซัลเฟต (SO_4^{-1}) และอนุมูลไฮดรอกซิล (OH^1) 2) การใช้เหล็กร่วมกับสาร โซเดียมเปอร์ซัลเฟตส่งผลให้ค่าสถานะความเป็นกรดต่างของสารละลายเป็นกรด ($\text{pH} < 3$) ซึ่งเป็นช่วง $\text{pH} < \text{pH}_{\text{pzc}}$ ผิวของเหล็กเกิดการดูดซับสาร ไกลโฟเซต ได้ดี และในช่วงสถานะเป็นกรดจะสามารถช่วยในแตกตัวของ โซเดียมเปอร์ซัลเฟตกลายเป็นอนุมูลอิสระซัลเฟตได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อการบำบัดสาร ไกลโฟเซตด้วยปฏิกิริยาเสมือนเฟ้นต้น ได้แก่ 1) ความเข้มข้นของสาร โซเดียมเปอร์ซัลเฟต 2) ปริมาณเหล็ก 3) ความเข้มข้นไกลโฟเซต 4) ค่าสถานะความเป็นกรดต่าง และ 5) การระบุนอนุมูลอิสระที่มีผลต่อการบำบัด ได้ผลดังนี้

1) ความเข้มข้นของสาร โซเดียมเปอร์ซัลเฟต พบว่าที่ความเข้มข้นเท่ากับ 5 มิลลิโมลาร์ มีประสิทธิภาพในการบำบัดสาร ไกลโฟเซต ได้ดีที่สุด รองลงมาเป็น 2.5 มิลลิโมลาร์ 7.5 มิลลิโมลาร์ และ 10 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ เนื่องจากที่ความเข้มข้นสูงๆ เกิดการยับยั้งกันเองของอนุมูลอิสระ ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดต่ำกว่าที่ 5 มิลลิโมลาร์ และ 2.5 มิลลิโมลาร์ ดังนั้นถ้าดูในภาพรวมการบำบัดสาร ไกลโฟเซตความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่สถานะความเป็นกรดต่างเท่ากับ 7 โดยใช้เหล็ก 1 กรัมต่อลิตร ร่วมกับสาร โซเดียมเปอร์ซัลเฟต 5 มิลลิโมลาร์ มีประสิทธิภาพสูงที่สุด

2) ปริมาณเหล็กพบว่า ปริมาณเหล็กมากจะทำให้มีประสิทธิผลการบำบัดสาร ไกลโฟเซตสูง เรียงลำดับประสิทธิภาพการบำบัดจากมากไปน้อย ดังนี้ 2 กรัมต่อลิตร 1.5 กรัมต่อลิตร 1 กรัมต่อลิตร และ 0.5 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ เนื่องจากปริมาณเหล็กที่มากขึ้นจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับสาร ไกลโฟเซตและประสิทธิภาพในการผลิตอนุมูลอิสระได้มากขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดดีขึ้น ดังนั้นจากการทดลอง การใช้เหล็กที่ 2 กรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัดสาร ไกลโฟเซต

3) ความเข้มข้นไกลโฟเซตพบว่า เมื่อความเข้มข้นของไกลโฟเซตสูงขึ้นประสิทธิภาพการบำบัดสาร ไกลโฟเซตจะลดลง เรียงลำดับประสิทธิภาพการบำบัดจากมากไปน้อย ดังนี้ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร 20 มิลลิกรัมต่อลิตร 30 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เนื่องจากขณะที่ในระบบมีปริมาณเหล็กและปริมาณ โซเดียมเปอร์ซัลเฟตเท่ากัน ดังนั้นความสามารถในการดูดซับและการผลิตอนุมูลอิสระจึงได้เท่ากัน เมื่อมีความเข้มข้นของไกลโฟเซตน้อยกว่า การบำบัดจึงเป็นไปได้ง่าย ค่าประสิทธิภาพในการบำบัดจึงบำบัดได้สูง

4) ค่าสถานะความเป็นกรดต่างพบว่า สถานะความเป็นกรดต่างเท่ากับ 3 จะมีประสิทธิภาพการบำบัดสาร ไกลโฟเซต ได้ดี เรียงลำดับประสิทธิภาพการบำบัดจากมากไปน้อย ดังนี้สถานะความเป็นกรดต่างเท่ากับ 3 5 7 และ 9 ตามลำดับ เนื่องจากที่สถานะความ

เป็นกรดต่าง เท่ากับ 3 เป็นช่วงสภาวะที่สามารถผลิตอนุมูลอิสระซัลเฟตได้มากกว่าในช่วงสภาวะความเป็นกรดต่างอื่นๆ และในสภาวะความเป็นกรดจะสามารถช่วยแตกตัวของโซเดียมเปอร์ซัลเฟตกลายเป็นอนุมูลอิสระซัลเฟต และที่สภาวะกรด ($\text{pH} < \text{pH}_{\text{pzc}}$) ส่งผลให้ประจุบนพื้นผิวของเหล็กในสารละลายจะเป็นบวกของกลุ่ม H^+ รอบพื้นผิวของเหล็ก ดังนั้นจะทำให้เหล็กเกิดการดูดติดกับสารไกลโฟเซตที่ประจุลบได้ดี ส่วนในสภาวะความเป็นกรดต่างเท่ากับ 9 จะเกิดการยับยั้งอนุมูลซัลเฟต (SO_4^{-1}) ให้กลายเป็นอนุมูลไฮดรอกซิล (OH^{\cdot}) ซึ่งมีเสถียรภาพที่ต่ำกว่าอนุมูลซัลเฟต (SO_4^{-1} ; $t_{1/2} = 30\text{--}40 \mu\text{s}$, OH^{\cdot} ; $t_{1/2} = 1 \mu\text{s}$) อย่างไรก็ตามการบำบัดสารไกลโฟเซตที่สภาวะความเป็นกรดต่างเท่ากับ 7 ยังมีความสามารถบำบัดสารไกลโฟเซตได้มากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ ถ้ากำหนดระยะเวลาในการบำบัดให้เหมาะสม

5) การระบุนอนุมูลอิสระที่มีผลต่อการบำบัดสารไกลโฟเซต ซึ่งอนุมูลอิสระจะเข้าทำลายพันธะ C-P ของสารไกลโฟเซตได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็น PO_4^{3-} NH_4^+ NO_2^- NO_3^- CO_2 และ H_2O พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดสารไกลโฟเซตจากอนุมูลอิสระทั้ง 2 ชนิด (SO_4^{-1} และ OH^{\cdot}) โดยประสิทธิภาพในการบำบัดภายใน 60 นาที ประมาณ 83 เปอร์เซ็นต์ โดยเมื่อเติม TBA 1 M ทำให้อนุมูลอิสระที่หลงเหลือในปฏิกิริยามีอนุมูลอิสระซัลเฟตมากกว่าอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล ($\text{SO}_4^{-1} > \text{OH}^{\cdot}$) ดังนั้นประสิทธิภาพในการบำบัดสารไกลโฟเซตจึงเป็นผลจากการบำบัดโดยอนุมูลอิสระซัลเฟต (SO_4^{-1}) เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งประสิทธิภาพในการบำบัดสารไกลโฟเซตประมาณ 54 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นสามารถระบุได้ว่าอนุมูลอิสระหลักที่ใช้ในการบำบัดสารไกลโฟเซตโดยใช้ปฏิกิริยาเสมือนเฟรนด์คือ อนุมูลอิสระซัลเฟต (SO_4^{-1})

ดังนั้นการศึกษาการบำบัดสารไกลโฟเซตในน้ำด้วยปฏิกิริยาเสมือนเฟรนด์สามารถเลือกปัจจัยที่เหมาะสมในการบำบัดไกลโฟเซตในน้ำได้ดังนี้ เหล็กขนาดนาโนเมตร (Fe) 1 กรัมต่อลิตร สารโซเดียมเปอร์ซัลเฟตเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ที่ความเข้มข้นของสารไกลโฟเซตเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่สภาวะความเป็นกรดต่างเท่ากับ 7

5.1.2.2 สรุปการศึกษาการบำบัดสารไกลโฟเซตในดิน

จากการทดลองผลของการบำบัดสารไกลโฟเซตในดินโดยใช้สารละลายสารไกลโฟเซตเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 500 มิลลิลิตร สภาวะความเป็นกรดต่างเท่ากับ 7 ความเข้มข้นของสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟต 5 มิลลิโมลาร์ ปริมาณเหล็กขนาดนาโนเมตร 0.5 กรัม ซึ่งเป็นเหล็กขนาดนาโนเมตรที่ได้จากการสังเคราะห์ขึ้นมาเอง นำมาผสมลงในดิน 500 กรัม โดยจัดตั้งการทดลองในการจำลองสภาวะดินชุ่มน้ำ โดยทำการเก็บตัวอย่างดินและน้ำเหนือผิวดินไปตรวจวัดการตกค้างสารไกลโฟเซต พบว่าจากการทำการทดลองครบ 1 ชั่วโมง พบประสิทธิภาพทั้งหมดในการบำบัดสารไกลโฟเซตได้ประมาณ 56.76 เปอร์เซ็นต์ โดยสามารถแจกแจง

ประสิทธิภาพการบำบัดสารไกลโฟเซตจากส่วนของดินคิดเป็น 28.24 เปอร์เซ็นต์ และในน้ำเหนือผิวดินคิดเป็น 28.52 เปอร์เซ็นต์ แต่จะเห็นได้ว่าการบำบัดของสารไกลโฟเซตในดินจะมีการบำบัดแค่ในช่วง 5 นาทีแรกเท่านั้น ส่วนการบำบัดสารไกลโฟเซตในน้ำที่อยู่เหนือผิวดินมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ ตามเวลา เนื่องจากในการทดลองหลังกระบวนการเติมสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟตลงไปผสมกับดินที่มีเหล็กในน้ำไกลโฟเซต และทำการคนให้เข้ากันเป็นเวลา 30 วินาที ทำให้เกิดการสร้างอนุมูลอิสระซัลเฟต (SO_4^{-1}) และอนุมูลไฮดรอกซิล (OH^1) จากปฏิกิริยาระหว่างเหล็กกับสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟตได้เล็กน้อย ซึ่งอนุมูลอิสระจะเข้าทำลายพันธะ C-P ของสารไกลโฟเซตบางส่วน ส่วนของไกลโฟเซตที่ถูกตัดพันธะ C-P จะกลายเป็น PO_4^{3-} NH_4^+ NO_2^- NO_3^- CO_2 และ H_2O ส่วนไกลโฟเซตที่ไม่ถูกตัดพันธะก็พดก้างอยู่ในดิน ส่วนการบำบัดสารไกลโฟเซตในน้ำเหนือผิวดินเนื่องจากเหตุผล 2 ประการคือ 1) เกิดจากการแตกตัวของโซเดียมเปอร์ซัลเฟตกลายเป็นอนุมูลอิสระซัลเฟต (SO_4^{-1}) ในน้ำ 2) การบำบัดสารไกลโฟเซตเกิดจากอนุมูลอิสระซัลเฟต (SO_4^{-1}) ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างเหล็กกับโซเดียมเปอร์ซัลเฟต ในขณะที่คนสารละลายกับดินให้เข้ากันเป็นเวลา 30 วินาที เกิดการสร้างอนุมูลอิสระซัลเฟต (SO_4^{-1}) และอนุมูลไฮดรอกซิล (OH^1) จากปฏิกิริยาระหว่างเหล็กกับโซเดียมเปอร์ซัลเฟต ซึ่งอนุมูลอิสระจะเข้าทำลายพันธะ C-P ของสารไกลโฟเซตได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็น PO_4^{3-} NH_4^+ NO_2^- NO_3^- CO_2 และ H_2O

5.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะสำหรับการนำงานไปต่อยอดและการนำไปใช้งานมีดังต่อไปนี้

5.2.1 ศึกษาการสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรด้วยสารสกัดใบยูคาลิปตัสร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิกที่ความถี่อื่นๆ และกำลังกำลังไฟฟ้าที่สูงขึ้น เพื่อให้ได้อนุภาคของเหล็กที่เล็กลง

5.2.2 ศึกษาการบำบัดสารไกลโฟเซตในดินชนิดต่างกัน ควรมีการศึกษาความเหมาะสมของแต่ละปัจจัยต่อการบำบัดด้วย

5.2.3 ศึกษาผลิตภัณฑ์ผลย่อยได้ที่เกิดจากการย่อยสลายไกลโฟเซตถึงความเป็นพิษที่เกิดขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- กฤษณา รุ่งโรจน์วิชย์. (2547). สืบสาวราวเรื่องของไกลโฟเสท. วารสารเกษตร. 28(9): 224-229.
- ชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย. (2554). **กระบวนการดูดซับสาร**, นครราชสีมา: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 736 หน้า.
- ทศพล พรพรหม. (2545). **สารกำจัดวัชพืชหลักการและกลไกการทำลาย**. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 274 หน้า
- นวลศรี ทยาพัชร. (2533). **ปัญหาสารพิษทางการเกษตรในประเทศไทย**. กรุงเทพฯ: กองวัดภูมิพิษ
การเกษตร กรมวิชาการเกษตร. 71 น.
- ปัดพงษ์ เกษสมบูรณ์, นุศราพร เกษสมบูรณ์ และนาถธิต วิระปริยากร. (2547). **สารเคมีอันตราย ภัย
คุกคามต่อสุขภาพของคนไทย: แผนงานวิจัยนโยบายทางด้านสาธารณสุข นนทบุรี.
สถาบันวิจัยระบบทางด้านสาธารณสุข. 79 น.**
- พรชัย เหลืองอากาศ. (2531). **สารกำจัดวัชพืช**. เชียงใหม่: ภาควิชาพืชไร่ คณะเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 515 น.
- รังสิต สุวรรณเขตนิคม. (2547). **สารป้องกันกำจัดวัชพืช: พื้นฐานและวิธีการใช้**. กรุงเทพฯ: ภาควิชา
พืชไร่นา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 467 น.
- วรรณวิภา ผลาหาราญ. (2547). **การกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อม โดยใช้เศษผง
เหล็ก**. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- วารภรณ์ ปัญญาวดี. (2550). **เศรษฐศาสตร์ว่าด้วยนโยบายสารเคมีเกษตร**. เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยแม่
โจ้. 182 น.
- วุฒิชัย ทิวพงษ์. (2545). **การกำจัดเฮกซะวาเลนที่โครเมียมและนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยผง
ตะไบเหล็ก**. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ศิริพรรณ สารินทร์. (2550). **จุลชีววิทยาสิ่งแวดล้อม**. พิษณุโลก: คณะวิทยาศาสตร์การแพทย์
มหาวิทยาลัยนเรศวรพิษณุโลก. 302 น.

- ศุภมาส พนิชศักดิ์พัฒนา. (2545). *ภาวะมลพิษของดินจากการใช้สารเคมี*. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 327 หน้า.
- สำนักควบคุมพืชและวัสดุการเกษตร. (2561ก). *รายงานสรุปการนำเข้าวัตถุอันตรายทางการเกษตร*. กรมวิชาการเกษตร. [ระบบออนไลน์]. แหล่งข้อมูล: www.doae.go.th (10 กรกฎาคม 2561).
- (2561ข). *วัตถุอันตรายที่มีการนำเข้าสูงสุด 10 อันดับแรก*. กรมวิชาการเกษตร. [ระบบออนไลน์]. แหล่งข้อมูล: www.doae.go.th (10 กรกฎาคม 2561).
- สำนักจัดการคุณภาพน้ำ. (2554). *รายงานสถานการณ์มลพิษทางน้ำจากน้ำท่วมและการจัดการ*. กรุงเทพฯ: กรมควบคุมมลพิษ. 87 น.
- สุชาดา กรุณา. (2548). *การดูดซับสารอาหารอินทรีย์และอะลาคลอร์ใน 4 ชนิดดิน*. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาปฐพีวิทยา ภาควิชาปฐพีวิทยา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- อุทัย สอนเทศ. (2548). *การกำจัดโครเมียมออกจากน้ำเสียโดยใช้คอลัมน์เศษเหล็ก*. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัย นเรศวร.
- Ahmmad, B., Leonard, K., Shariful Islam, M., Kurawaki, J., Muruganandham, M., Ohkubo, T., and Kuroda, Y. (2013) Green synthesis of mesoporous hematite (Fe₂O₃) nanoparticles and their photocatalytic activity. *Adv. Powder Technol.* 24, 160–167.
- Anastas, P., and Eghbali, N. (2010). Green chemistry: principles and practice. *Chemical Society Reviews*. 39(1), 301-312.
- Atchley, A. A. and L. A. Crum. (1998). Acoustic cavitation and bubbles dynamics. In *Ultrasounds, its chemical, physical and biological effects*. K. S. Suslick (ed.). **VCH Publishers, Inc.** New York. pp. 1- 64.
- Barbosa, M. P. R., Lima, N. S., de Matos, D. B., Felisardo, R. J. A., Santos, G. N., Salazar-Banda, G. R., and Cavalcanti, E. B. (2018). Degradation of pesticide mixture by electro-Fenton in filter-press reactor. *Journal of Water Process Engineering*, 25, 222-235.
- Bento, Célia PM, et al. (2016). Persistence of glyphosate and aminomethylphosphonic acid in loess soil under different combinations of temperature, soil moisture and light/darkness. *Science of the Total Environment*. 572: 301-311.
- Borggaard, O. K. and A. L. Gimsing. (2008). Fate of glyphosate in soil and the possibility of leaching to ground and surfacewaters: a review. *Pest Management Science*. 64: 441-456.

- Chen, Y., Wu, F., Lin, Y., Deng, N., Bazhin, N., and Glebov, E. (2007). Photodegradation of glyphosate in the ferrioxalate system. **Journal of Hazardous Materials**. 148(1-2), 360-365.
- Das, R.K., Borthakur, B.B., and Bora, U. (2010). Green synthesis of gold nanoparticles using ethanolic leaf extract of *Centella asiatica*. **Mater Lett**. 64:1445–7.
- Dulova, N., Kattel, E., and Trapido, M. (2017). Degradation of naproxen by ferrous ion-activated hydrogen peroxide, persulfate and combined hydrogen peroxide/persulfate processes: the effect of citric acid addition. **Chemical Engineering Journal**. 318, 254-263.
- Environmental Protection Agency. (1993). Reregistration Eligibility Decision (R.E.D.) facts sheet for glyphosate. [Online]. Available: www.epa.gov (November 8, 2013).
- Environmental Protection Agency. (2009). National primary drinking water regulation. [Online]. Available: www.epa.gov (November 8, 2013).
- Giesy, J.P., Dobson, S., Solomon, K.R. (2000). Ecotoxicological risk assessment for Roundup herbicide. **Rev Environ Contam Toxicol**. 167:35–120.
- Gilchrist, D.G., Kosuge, T. (1980). Aromatic amino acid biosynthesis and its regulation. In B.J. Miflin, ed, *The biochemistry of plants, amino acids and derivatives*. Academic Press, New York. pp 507-531.
- Helland, B.R., Alvarez, P.J.J., and Schnoor, J.L. (1995). Reductive dechlorination of carbon tetrachloride with elemental iron. **Journal of Hazardous Materials**. 41: 205-216.
- Hensley, D. L., Beuerman, D. S. N., and Carpenter, P. L. (1978). The inactivation of glyphosate by various soils and metal salts. **Weed Research**. 18, 287-291.
- Hoag, G.E., Collins, J.B., Holcomb, J.L., Hoag, J.R., Nadagouda, M.N., and Varma, R.S. (2009). Degradation of bromothymol blue by 'greener' nano-scale zero-valent iron synthesized using tea polyphenols. **J.Mater. Chem**. 19, 8671–8677.
- Htay Aung Pyae, Win Win Aye., and Chatpet Yossapol. (2019). Investigation and characterization of iron powders for zero-valent iron (Fe^0) in synchrotron radiations. **IJEAT**. 8(3), 2249 – 8958.
- Jamei, M. R., Khosravi, M. R., and Anvaripour, B. (2014). A novel ultrasound assisted method in synthesis of NZVI particles. **Ultrasonics sonochemistry**. 21(1), 226-233.
- Kollman, W. and R. Segawa. (1995). Interim report of the pesticide chemistry database.

- Komnitsas, K., Bartzas, G., Fytas, K., and Paspaliaris, I. (2007). Long-term efficiency and kinetic evaluation of ZVI barriers during clean-up of copper containing solutions. **Minerals Engineering**, 20: 1200-1209.
- Kumar, K.M., et al. (2013). Biobased green method to synthesise palladium and iron nanoparticles using Terminalia chebula aqueous extract. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 102: p. 128-133.
- Liu, Y., Jin, X., and Chen, Z. (2018). The formation of iron nanoparticles by Eucalyptus leaf extract and used to remove Cr (VI). **Science of The Total Environment**. 627, 470-479.
- Luo, F., Chen, Z., Megharaj, M., and Naidu, R. (2014). Biomolecules in grape leaf extract involved in one-step synthesis of iron-based nanoparticles. **RSC Adv**. 4, 53467–53474.
- Luo, F., Yang, D., Chen, Z., Megharaj, M., and Naidu, R. (2016). Characterization of bimetallic Fe/Pd nanoparticles by grape leaf aqueous extract and identification of active biomolecules involved in the synthesis. **Science of The Total Environment**. 562, 526-532.
- Madhavi, V., Prasad, T.N., Reddy, A.V., Ravindra Reddy, B., Madhavi, G. (2013). Application of phyto-genic zerovalent iron nanoparticles in the adsorption of hexavalent chromium. *Spectrochim. Acta A*. 116, 17–25.
- Mercurio, P., F. Flores, J. F. Mueller, S. Carter and A. P. Negri. (2014). Glyphosate persistence in seawater. *Marine Pollution Bulletin*. (in press).
- Morillo E., Maqueda C., Bejarano M., Madrid L., and Undabeytia T. (1994). Cu (II)-glyphosate system: a study by anodic stripping voltammetry and the influence on Cu adsorption by montmorillonite. **Chemosphere**. 28, 2185-2196.
- Nadagouda, M.N., Castle, A.B., Murdock, R.C., Hussain, S.M., and Varma, R.S. (2010). In vitro biocompatibility of nanoscale zerovalent iron particles (nZVI) synthesized using tea polyphenols. **Green Chem**. 12, 114–122.
- Peruzzo, P. J., A. A. Porta and A. E. Ronco. (2008). Levels of glyphosate in surface waters, sediments and soils associated with direct sowing soybean cultivation in north pampasic region of Argentina. **Environmental Pollution**. 156(1): 6166.

- Phenrat, T., Thongboot, T., and Lowry, G. V. (2015). Electromagnetic induction of zerovalent iron (ZVI) powder and nanoscale zerovalent iron (NZVI) particles enhances dechlorination of trichloroethylene in contaminated groundwater and soil: proof of concept. **Environmental Science & Technology**. 50(2), 872-880.
- Phumying, S., Labuayai, S., Thomas, C., Amornkitbamrung, V., Swatsitang, E., and Maensiri, S. (2012). Aloe vera plant-extracted solution hydrothermal synthesis and magnetic properties of magnetite (Fe₃O₄) nanoparticles. **Appl. Phys. A**. 111, 1187–1193.
- Pimentel, D. (1995). Amounts of pesticides reaching target pests: environmental impacts and ethics. **Journal of Agricultural and Environmental Ethics**. 8: 17-29.
- Rao, A., Bankar, A., Kumar, A.R., Gosavi, S., and Zinjarde, S. (2013). Removal of hexavalent chromium ions by *Yarrowia lipolytica* cells modified with phyto-inspired Fe⁰/Fe₃O₄ nanoparticles. **J. Contam. Hydrol**. 146, 63–73.
- Ross, A. and Lembi, A. (2009). Applied weed science: including the ecology and management of invasive plants. 3rd edition. Upper Saddle River, N.J.: Pearson Prentice Hall. 561.
- Rueppel, M., B. Brightwell, J. Schaefer and J. Marcel. (1977). Metabolism and degradation of glyphosate in soil and water. **J Agric Food Chem**. 25: 517–528.
- Sawyer, C.N., Mccarty, P.L., and Parkin, G.F. (2003). Chemistry for Environmental Engineering and Science. (5th ed.). Singapore: McGraw-Hill.
- Shahwan, T., Abu Sirriah, S., Nairat, M., Boyacı, E., Ero glu, A.E., Scott, T.B., and Hallam, K.R. (2011). Green synthesis of iron nanoparticles and their application as a fenton-like catalyst for the degradation of aqueous cationic and anionic dyes. **Chem. Eng. J**. 172: 258–266.
- SHOVAL, S. and YARIV, S. (1979). The interaction between Roundup (Glyphosate) and montmorillonite. Part. 1. Infrared study of the sorption of glyphosate by montmorillonite. **Clays Clay Miner**. 27: 19-28.
- Smuleac, V., Varma, R., Sikdar, S., and Bhattacharyya, D. (2011). Green synthesis of Fe and Fe/Pd bimetallic nanoparticles in membranes for reductive degradation of chlorinated organics. **Journal of membrane science**. 379(1-2), 131-137.

- Soracco, C. G., Villarreal, R., Lozano, L. A., Vittori, S., Melani, E. M., and Marino, D. J. (2018). Glyphosate dynamics in a soil under conventional and no-till systems during a soybean growing season. **Geoderma**. 323, 13-21.
- Sprankle, P., Meggitt, W.F., and Penner, D., (1975). Adsorption, mobility, and microbial degradation of glyphosate in the soil. **Weed Sci**. 23, 229–234.
- Thomson, W.T. (1993). Agricultural Chemicals, Book II Herbicides. Fresno: Thomson Publications. 309 p.
- Tu, C.M. (2001). Effects of herbicides and fumigants on microbial activities in soil. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 53: 12-17.
- Vazquez, G., Fontenla, E., Santos, J., Freire, MS., Gonzalez-Alvarez, J., and Antorrena G. (2008). Antioxidant activity and phenolic content of chestnut (*Castanea sativa*) shell and eucalyptus (*Eucalyptus globulus*) bark extracts. **Ind Crop Prod**. 28:279–85
- Wang, T., Jin, X., Chen, Z., Megharaj, M., Naidu, R. (2014). Green synthesis of Fe nanoparticles using Eucalyptus leaf extracts for treatment of eutrophic wastewater. *Sci. Total Environ*. 466–467, 210–213.
- Wang, T., Lin, J., Chen, Z., Megharaj, M., Naidu, R. (2014). Green synthesized iron nanoparticles by green tea and eucalyptus leaves extracts used for removal of nitrate in aqueous solution. **J. Clean. Prod**. 83, 413–419.
- Wang, Z. (2013). Iron complex nanoparticles synthesized by eucalyptus leaves. *ACS Sustain. Chem. Eng*. 1, 1551–1554.
- WHO. (2011). Agrochemicals, health and environment: directory of resources. [Online]. Available: <http://www.who.int/heli/en> (July 12, 2012).
- Xu, X., Ji, F., Fan, Z., and He, L. (2011). Degradation of glyphosate in soil photocatalyzed by Fe₃O₄/SiO₂/TiO₂ under solar light. **International journal of environmental research and public health**. 8(4), 1258-1270.

Yang, Y., Deng, Q., Yan, W., Jing, C., & Zhang, Y. (2018). Comparative study of glyphosate removal on goethite and magnetite: Adsorption and photo-degradation. **Chemical Engineering Journal**. 352, 581-589.

Zhuang, Z.C., Huang, L.L., Wang, F.F., and Chen, Z.L., (2015). Effects of cyclodextrin on the morphology and reactivity of iron-based nanoparticles using Eucalyptus leaf extract. *Ind. Crop. Prod.* 69, 308e313.





ภาคผนวก ก

ผลการบำบัดสารไกลโฟเซต

ตารางที่ ก.1 ผลของการใช้เหล็ก SPS และเหล็กร่วมกับ SPS ในการบำบัดสารไกลโฟเซต

Time	Only SPS 5 mM		Only Fe 1 g/L		Fe 1 g/L + SPS 5 mM		Control	
	Con.	C/C0	Con.	C/C0	Con.	C/C0	Con.	C/C0
0	18.790	1.000	18.710	1.000	16.420	1.000	17.501	1.000
5	11.700	0.623	16.700	0.893	7.100	0.432	17.330	0.990
10	10.900	0.580	15.570	0.832	5.660	0.345	17.247	0.986
15	10.470	0.557	14.330	0.766	4.800	0.292	17.153	0.980
20	10.360	0.551	13.810	0.738	4.170	0.254	17.173	0.981
40	10.340	0.550	12.720	0.680	3.360	0.205	17.122	0.978
60	10.330	0.550	11.580	0.619	2.850	0.174	17.102	0.977
90	10.330	0.550	10.840	0.579	2.560	0.156	17.102	0.977
120	10.320	0.549	10.110	0.540	2.380	0.145	17.102	0.977
180	10.310	0.549	9.980	0.533	2.370	0.144	17.102	0.977

ตารางที่ ก.2 ผลของความเข้มข้นของสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟต ในการบำบัดสารไกลโฟเซต

Time	SPS 2.5 mM		SPS 7.5 mM		SPS 5 mM		SPS 10 mM	
	Con.	C/C0	Con.	C/C0	Con.	C/C0	Con.	C/C0
0	17.930	1.000	18.460	1.000	16.420	1.000	17.840	1.000
5	9.640	0.538	6.960	0.377	7.100	0.432	6.930	0.388
10	8.580	0.479	6.070	0.329	5.660	0.345	6.760	0.379
15	6.660	0.371	5.520	0.299	4.800	0.292	6.200	0.348
20	5.910	0.330	5.180	0.281	4.170	0.254	5.800	0.325
40	4.610	0.257	4.450	0.241	3.360	0.205	5.670	0.318
60	3.550	0.198	4.120	0.223	2.850	0.174	5.640	0.316
90	3.350	0.187	4.040	0.219	2.560	0.156	5.560	0.312
120	3.420	0.191	3.990	0.216	2.380	0.145	5.400	0.303
180	3.420	0.191	3.980	0.216	2.370	0.144	5.370	0.301

ตารางที่ ก.3 ผลของปริมาณเหล็กในการบำบัดสารไกลโฟเซต

Time	Fe 0.5 g/L		Fe 1g/L		Fe 1.5 g/L		Fe 2 g/L	
	Con.	C/C0	Con.	C/C0	Con.	C/C0	Con.	C/C0
0	19.490	1.000	16.420	1.000	19.190	1.000	19.260	1.000
5	9.700	0.498	7.100	0.432	6.660	0.347	4.600	0.239
10	7.700	0.395	5.660	0.345	5.130	0.267	3.700	0.192
15	7.370	0.378	4.800	0.292	3.520	0.183	2.900	0.151
20	7.060	0.362	4.170	0.254	3.150	0.164	2.540	0.132
40	6.220	0.319	3.360	0.205	2.600	0.135	1.940	0.101
60	5.340	0.274	2.850	0.174	2.240	0.117	1.910	0.099
90	4.420	0.227	2.560	0.156	2.180	0.114	1.900	0.099
120	3.970	0.204	2.380	0.145	2.030	0.106	1.890	0.098
180	3.970	0.204	2.370	0.144	2.020	0.105	1.890	0.098

ตารางที่ ก.4 ผลของความเข้มข้นไกลโฟเซต (GLY) ในการบำบัดสารไกลโฟเซต

time	GLY 10 ppm		GLY 20 ppm		GLY 30 ppm		GLY 50 ppm	
	Con.	C/C0	Con.	C/C0	Con.	C/C0	Con.	C/C0
0	10.110	1.000	16.420	1.000	29.180	1.000	49.980	1.000
5	2.020	0.200	7.100	0.432	9.300	0.319	20.400	0.408
10	1.750	0.173	5.660	0.345	7.900	0.271	18.600	0.372
15	1.420	0.140	4.800	0.292	6.300	0.216	16.300	0.326
20	1.090	0.108	4.170	0.254	5.200	0.178	13.700	0.274
40	0.600	0.059	3.360	0.205	4.050	0.139	10.200	0.204
60	0.500	0.049	2.850	0.174	3.400	0.117	8.400	0.168
90	0.500	0.049	2.560	0.156	3.200	0.110	6.700	0.134
120	0.500	0.049	2.380	0.145	3.120	0.107	6.300	0.126
180	0.500	0.049	2.370	0.144	3.100	0.106	6.250	0.125

ตารางที่ ก.5 ผลของสภาวะ pH ในการบำบัดสารไกลโฟเซต

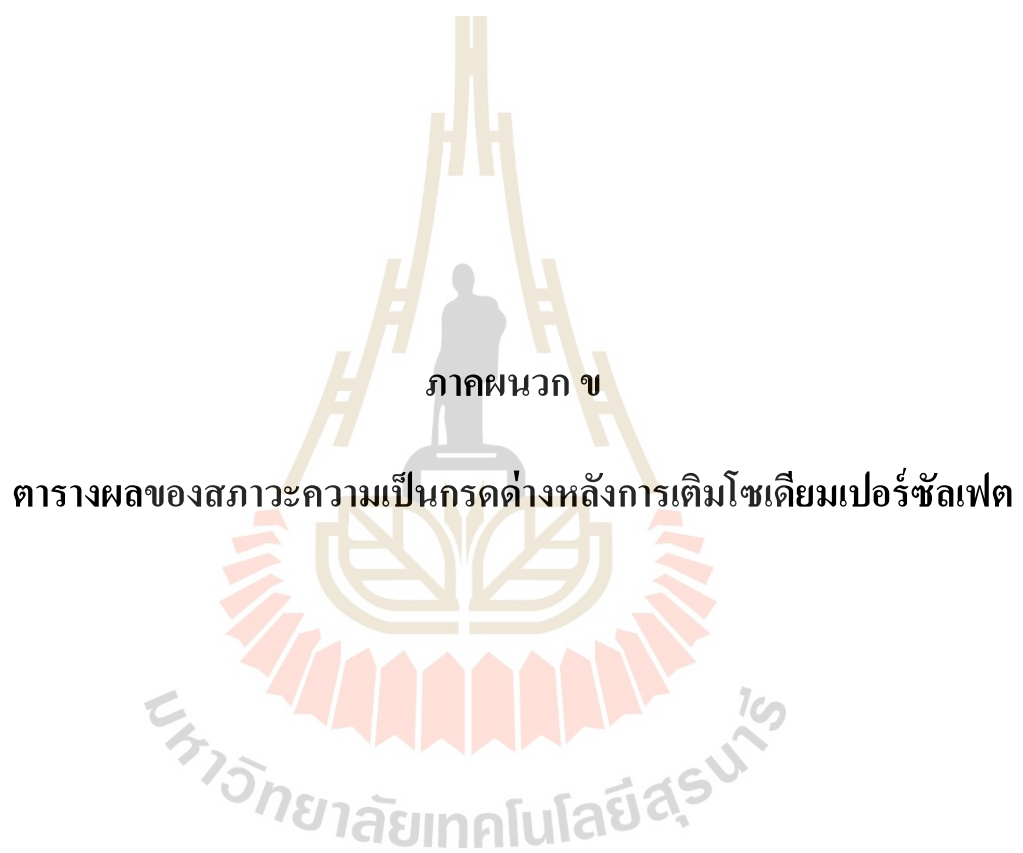
time	pH3		pH 5		pH7		pH 9	
	Con.	C/C0	Con.	C/C0	Con.	C/C0	Con.	C/C0
0	16.040	1.000	17.430	1.000	16.420	1.000	16.450	1.000
5	5.610	0.350	6.600	0.379	7.100	0.432	8.700	0.529
10	4.200	0.262	5.500	0.316	5.660	0.345	7.500	0.456
15	3.200	0.200	4.450	0.255	4.800	0.292	5.900	0.359
20	2.500	0.156	3.500	0.201	4.170	0.254	5.100	0.310
40	2.000	0.125	2.510	0.144	3.360	0.205	4.300	0.261
60	1.800	0.112	2.330	0.134	2.850	0.174	3.430	0.209
90	1.500	0.094	2.080	0.119	2.560	0.156	3.240	0.197
120	1.300	0.081	2.020	0.116	2.380	0.145	2.900	0.176
180	1.300	0.081	2.010	0.115	2.370	0.144	2.800	0.170

ตารางที่ ก.6 ผลของอนุโมลลิสระในการบำบัดสารไกลโฟเซต

Time	TBA 0.05 M		TBA 0.1 M		TBA 1 M	
	Con.	C/C0	Con.	C/C0	Con.	C/C0
0	17.429	1.000	17.241	1.000	16.888	1.000
5	8.899	0.511	9.225	0.535	9.948	0.589
10	7.132	0.409	7.577	0.439	8.817	0.522
15	6.778	0.389	6.985	0.405	8.004	0.474
20	6.396	0.367	6.534	0.379	7.645	0.453
40	5.671	0.325	5.912	0.343	6.073	0.360
60	5.390	0.309	5.784	0.335	5.818	0.345
90	5.353	0.307	5.692	0.330	5.532	0.328
120	5.340	0.306	5.607	0.325	5.278	0.313
180	5.252	0.301	5.490	0.318	5.349	0.317

ตารางที่ ก.7 ผลของการบำบัดสารไกลโฟเซตในดิน

Time (min)	ดิน		น้ำ	
	C	C/C0	C	C/C0
0	2.793	1.000	14.354	1.000
5	1.702	0.609	7.862	0.548
10	1.634	0.585	6.210	0.433
15	1.621	0.580	4.570	0.318
20	1.602	0.573	3.090	0.215
40	1.601	0.573	2.530	0.176
60	1.599	0.572	2.290	0.160
90	1.597	0.572	2.260	0.157
120	1.573	0.563	2.250	0.157
180	1.524	0.546	2.230	0.155
1560	1.515	0.542	2.230	0.155



ภาคผนวก ข

ตารางผลของสภาวะความเป็นกรดต่างหลังการเติมโซเดียมเปอร์ซัลเฟต

ตารางที่ ข.1 ผลของสภาวะความเป็นกรดต่างหลังการเติม โซเดียมเปอร์ซัลเฟต

Time	pH เริ่มต้น			
	pH 3	pH 5	pH 7	pH 9
0	2.13*	2.82*	3.26*	3.36*
5	2.04	2.76	3.15	3.24
10	2.02	2.77	3.07	3.15
15	2.04	2.74	3.03	3.11
20	2.04	2.70	2.93	2.97
40	2.02	2.71	2.82	2.86
60	2.01	2.65	2.65	2.68
90	2.01	2.57	2.58	2.60
120	2.01	2.55	2.55	2.57
180	2.01	2.56	2.55	2.57

หมายเหตุ * วัดค่า pH หลังการเติม SPS ทันที
 การบำบัดสารไกลโฟเซตในน้ำโดยใช้เหล็ก 1 กรัมต่อลิตร โซเดียมเปอร์ซัลเฟต 5 มิลลิโมลาร์ ใน
 สารละลายไกลโฟเซต 20 มิลลิกรัมต่อลิตร



ภาคผนวก ค

รูปประกอบการสังเคราะห์สารสกัดจากใบยูคาลิปตัส

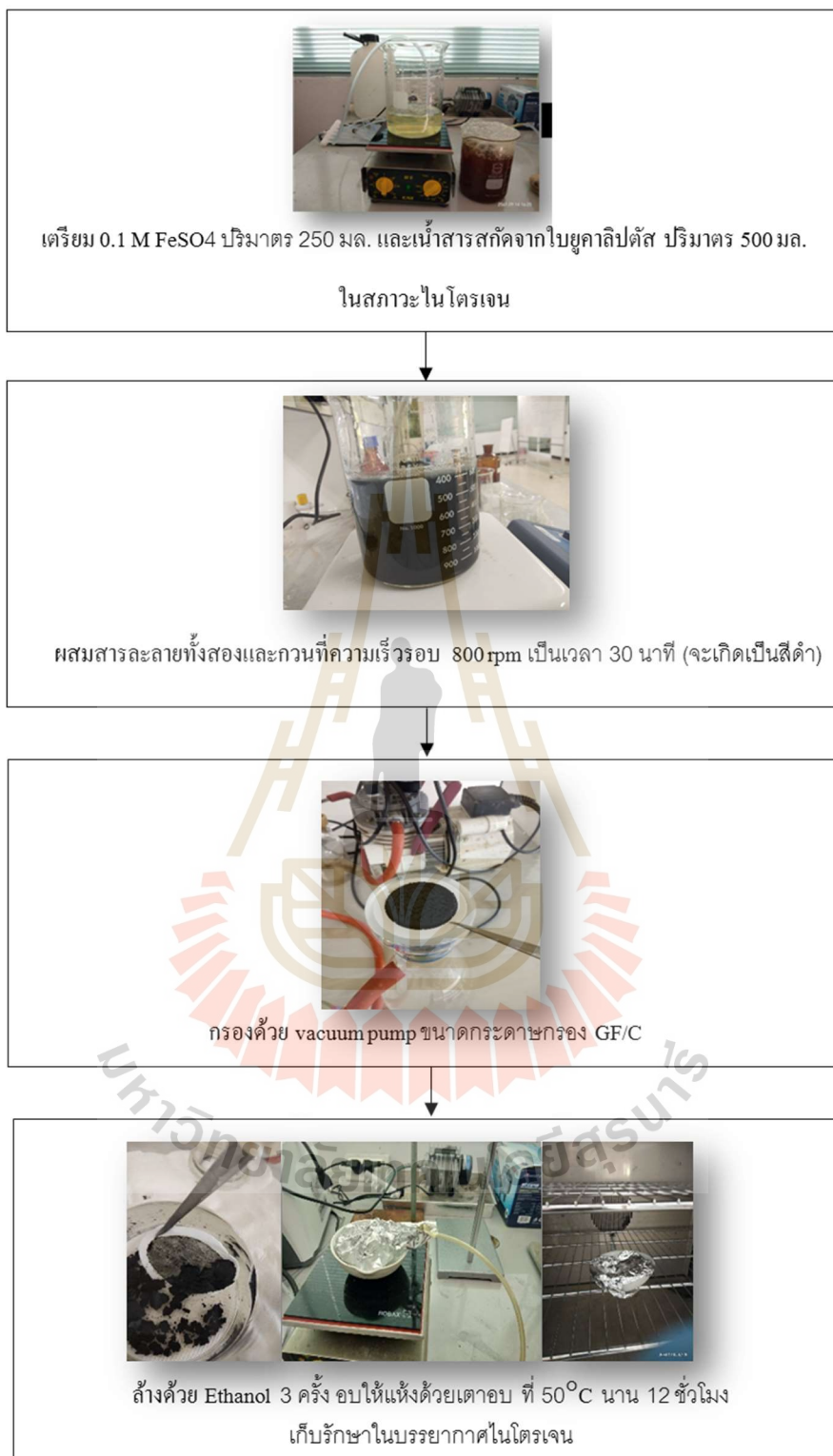


รูปที่ ค.1 การสังเคราะห์สารสกัดจากใบยูคาลิปตัส

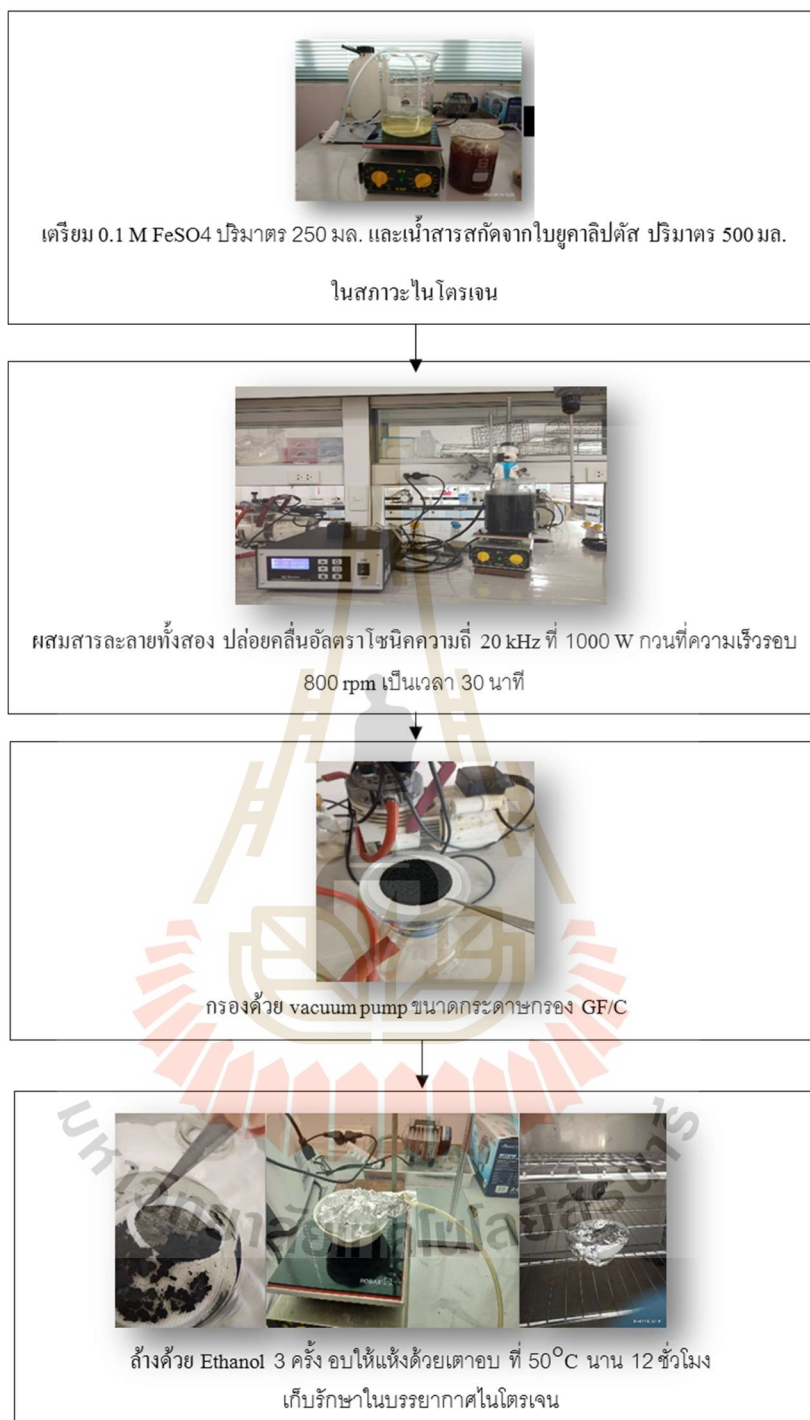


ภาคผนวก ง

รูปประกอบการสังเคราะห์หลักขนานโนเมตร



รูปที่ ง.1 การสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรจากสารสกัดจากไบยูลิปดัส



รูปที่ ๓.2 การสังเคราะห์เหล็กขนาดนาโนเมตรจากสารสกัดจากโปแตสเซียมเปอร์ซัลเฟต ร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิก



ภาคผนวก จ

รูปประกอบการบำบัดสารไกลโฟเซต



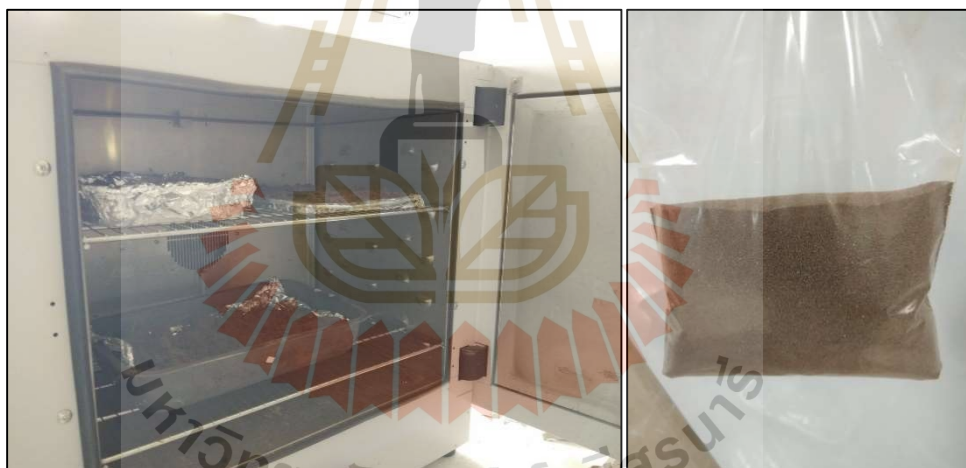
รูปที่ จ.1 การจำลองการบำบัดสารโกลโฟเซตในน้ำ



รูปที่ จ.2 การจำลองการบำบัดสารโกลโฟเซตในดินชุ่มน้ำและลักษณะการเก็บตัวอย่าง



รูปที่ จ.3 การสกัดสาร ไกลโฟเซตออกจากดิน



รูปที่ จ.4 การเตรียมดิน โดยนำไปอบแห้งและคัดขนาด

ประวัติผู้เขียน

นางสาวอนุสรรา แก้วการ เกิดเมื่อวันที่ 2 มีนาคม พ.ศ.2538 ณ จังหวัดสุรินทร์ สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษา จากท่าตูมประชาเสรมวิทย์ อำเภอท่าตูม จังหวัดสุรินทร์ ในปีการศึกษา 2556 ได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาตรี ได้รับทุนการศึกษาเฉลิมพระเกียรติ 84 พรรษา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดย สำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2560 และได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโทในปีการศึกษาถัดมา โดย ได้รับทุนการศึกษากิตติบัณฑิตในการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เมื่อเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทได้ศึกษาและวิจัยในหัวข้อ การสังเคราะห์เหล็ก ขนาดนาโนเมตรด้วยสารสกัดใบยูคาลิปตัสและคลื่นอัลตราโซนิกสำหรับการบำบัดสารไกลโฟเซต ในดินโดยใช้ปฏิกิริยาเสมือนเฟนต์ัน (SYNTHESIS OF IRON NANO-PARTICLES BY EUCALYPTUS LEAF EXTRACT AND ULTRASONIC WAVE IRRADIATION FOR GLYPHOSATE TREATMENT IN SOIL USING FENTON-LIKE REACTION) ในขณะที่ศึกษาอยู่ได้มีโอกาสเป็นผู้ช่วยสอนใน รายวิชาของสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม เพื่อเป็นการเพิ่มพูนความรู้ใหม่ ทักษะการวิจัย รู้จักการ แก้ปัญหา และการทำงานกันเป็นกลุ่มเพื่อบรรลุเป้าหมายที่วางไว้ นอกจากนี้มีโอกาสร่วมการ นำเสนอผลงานวิจัยในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ ในการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อม นานาชาติครั้งที่ 9 “9th International Conference on Environmental Engineering, Science and Management” และได้รับการยืนยันการตีพิมพ์ใน Suranaree Journal of Science and Technology จำนวน 1 ฉบับ