



การย่อยสลายฟีนอลด้วยกระบวนการพลาสมาวัฏภาคของเหลว
DEGRADATION OF PHENOL BY LIQUID PHASE PLASMA PROCESS



นายพิสิฐ อ่อนพุ่ม รหัส 54360469
นายสิทธิพล อนันตระกูลศิลป์ รหัส 54360520

พิมพ์ที่คณะวิทยาศาสตร์
วันที่ 30 ต.ค. 2558
เลขที่..... 16899249
..... ๗๕๖
..... นว ๗๗๘ ๑

2557

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ปีการศึกษา 2557



ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงการ การย่อยสลายพืชนอลด้วยกระบวนการพลาสมาวิภาคของเหลว

ผู้ดำเนินโครงการ นายพิสิฐ อ่อนพุ่ม รหัส 54360469
 นายสิทธิพล อนันตระกูลศิลป์ รหัส 54360520

ที่ปรึกษาโครงการ ดร.อิศราวุธ ประเสริฐสังข์
 ดร.ธนพล เพ็ญรัตน์

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

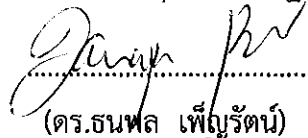
ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหกรรม

ปีการศึกษา 2557


คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี


.....ที่ปรึกษาโครงการ


(ดร.อิศราวุธ ประเสริฐสังข์)


.....ที่ปรึกษาโครงการ

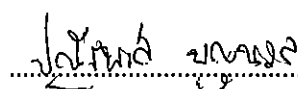
(ดร.ธนพล เพ็ญรัตน์)


.....กรรมการ

(ดร.นพวรรณ ไม้ทอง)


.....กรรมการ

(ดร.ภมรรัตน์ จันทร์ธรรม)


.....กรรมการ

(ดร.ปณัฐพงศ์ บุญवाल)

ชื่อหัวข้อโครงการ	การย่อยสลายพินอลด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลว		
ผู้ดำเนินโครงการ	นายพิสิฐ	อ่อนพุ่ม	รหัส 54360469
	นายสิทธิพล	อนันตระกูลศิลป์	รหัส 54360520
ที่ปรึกษาโครงการ	ดร.อิศราวุธ	ประเสริฐสังข์	
	ดร.ชนพล	เพ็ญรัตน์	
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี		
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหกรรม		
ปีการศึกษา	2557		

บทคัดย่อ

ในโครงการวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงการย่อยสลายพินอลด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลว โดยตัวแปรที่ศึกษา คือ ชนิดของขั้วอิเล็กโทรดในการทำให้เกิดพลาสมา 3 ชนิดคือ ทั้งสแตน เหล็กและทองแดง ระยะเวลาที่ใช้ในการย่อยสลายพินอลเป็นเวลา 0 – 180 นาทีและพลังงานของพลาสมาโดยการปรับความถี่ที่ต่างกันคือ 15 – 30 กิโลเฮิร์ตซ์ จากผลการวัดปริมาณของพินอลที่ผ่านการทรูทด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลว พบว่า ขั้วอิเล็กโทรดชนิดทั้งสแตนให้เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายพินอลได้มากถึง 73.59 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมากกว่าขั้วอิเล็กโทรดที่เป็นเหล็กและทองแดง ที่ความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์ และเมื่อทำการเพิ่มพลังงานพลาสมาโดยการปรับความถี่เป็น 22.5 และ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ พบว่าขั้วอิเล็กโทรดที่เป็นทั้งสแตนให้ค่าเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายพินอลได้มากกว่าขั้วอิเล็กโทรดที่เป็นเหล็กและทองแดง แต่ค่าเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายที่ความถี่ 22.5 และ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ จะมีค่าเป็น 80.49 และ 78.89 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมากกว่าที่ความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์ แต่จะเห็นได้ว่าที่ความถี่ 22.5 และ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ นั้นได้ค่าเปอร์เซ็นต์ในการย่อยสลายพินอลไม่แตกต่างกันมากนัก ดังนั้นความเหมาะสมในการย่อยสลายพินอลของงานวิจัยชิ้นนี้คือ ใช้ขั้วอิเล็กโทรดที่เป็นทั้งสแตนโดยการปรับความถี่ 22.5 กิโลเฮิร์ตซ์ และเมื่อมาศึกษาด้านจลนพลศาสตร์ของการย่อยสลายพินอลด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลว พบว่าการอันดับการเกิดปฏิกิริยาของการย่อยสลายพินอลด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลว นั้นเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง โดยมีค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา 0.0085 นาที⁻¹

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือของหลายๆท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ดร.อิศรารุธ ประเสริฐสังข์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่ได้ให้คำแนะนำคำปรึกษาแนะนำวิธีแก้ปัญหา รวมถึงข้อคิดเห็นต่างๆ ตลอดจนความดูแลเอาใจใส่ ติดตามการดำเนินโครงการมาโดยตลอดและขอขอบพระคุณอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเคมีและอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนเรศวรทุกท่าน ที่ได้ให้ความความรู้ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

คุณค่าของปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้ศึกษาหวังเป็นอย่างยิ่งว่าจะก่อให้เกิดประโยชน์ทางวิชาการแก่บุคคลทั่วไป นิสิต นักศึกษาที่สนใจค้นคว้าและเพิ่มพูนความรู้เกี่ยวกับการศึกษาถึงการย่อยสลายพืชนอลด้นกระบวนการพลาสมาวัฏภาคของเหลว

สุดท้ายนี้ผู้ดำเนินโครงการในครั้ขอกราบของพระคุณ บิดา มารดา ที่ได้ให้การดูแล อมรบสั่งสอนและให้กำลังใจด้วยดีเสมอมา ตลอดจนการดำเนินโครงการจนสำเร็จการศึกษา

ผู้ดำเนินโครงการ

นายพิสิฐ อ่อนพุ่ม

นายสิทธิพล อนันตระกูลศิลป์

พฤษภาคม 2558

สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	2
1.3 ขอบเขตในการดำเนินโครงการ.....	3
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี.....	4
2.1 ฟีนอล.....	4
2.2 ปฏิกริยาเฟนตัน.....	5
2.3 กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง.....	9
2.4 พลาสมาวัฏภาคของเหลว.....	9
2.5 Optical Emission Spectrometer (OES).....	12
2.6 UV-VIS Spectrophotometer.....	14
2.7 High Performance Liquid Chromatography (HPLC).....	15
2.8 การวิเคราะห์ Total Organic Carbon (TOC).....	18

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.9 การสำรวจเอกสารงานวิจัย.....	19
บทที่ 3 วิธีการทดลอง.....	23
3.1 สารเคมีและอุปกรณ์.....	23
3.2 วิธีการทดลอง.....	24
3.3 การวิเคราะห์ปริมาณสาร.....	25
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์.....	27
4.1 คุณลักษณะของพลาสติกที่เกิดของจากขี้วัวเล็กโทรดแต่ละชนิด.....	27
4.2 ผลของชนิดขี้วัวเล็กโทรดที่มีผลต่อการย่อยสลายพีนอล.....	29
4.3 ผลของการปรับความถี่ที่มีผลต่อการย่อยสลายพีนอล.....	32
4.4 จลนพลศาสตร์ของการย่อยสลายพีนอล.....	33
4.5 การดีซาร์จด้วยพลาสติกที่มีผลต่อค่า TOC.....	35
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	37
5.1 บทสรุป.....	37
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	37
เอกสารอ้างอิง.....	38
ภาคผนวก ก.....	41
ภาคผนวก ข.....	55

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 แสดงค่า k ของการทดลองที่ชั่ววูอิเล็กทรอนิกส์และความถี่ที่แตกต่างกัน.....	34



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างโมเลกุลของสารประกอบฟีนอล.....	4
2.2 เส้นทางการกลไกของการย่อยสลายฟีนอลโดยใช้ปฏิกิริยาเฟนตัน.....	8
2.3 ภาพถ่ายและแบบจำลองของพลาสมาวิทยุภาคของเหลว.....	10
2.4 ไดอะแกรมของเครื่องกำเนิดพลาสมาวิทยุภาคของเหลว.....	11
2.5 รูปแสดงการเปลี่ยนแปลงพลังงานของอะตอม.....	13
2.6 แผนผังแสดงการทำงานของ Optical Emission Spectrometer.....	13
2.7 รูปแสดงหลักการทำงานของเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer.....	14
2.8 องค์ประกอบของเครื่อง HPLC.....	16
2.9 รูปแบบเครื่องมือของเครื่องวิเคราะห์ TOC.....	19
3.1 แผนผังกระบวนการย่อยสลายฟีนอล.....	24
3.2 อุปกรณ์กำเนิดพลาสมาวิทยุภาคของเหลว.....	25
4.1 แสดงคุณลักษณะของพลาสมาที่เกิดจากข้อผิดพลาดที่ความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์ ด้วยเทคนิค OES.....	27
4.2 แสดงคุณลักษณะของพลาสมาที่เกิดจากข้อผิดพลาดที่ความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์ ด้วยเทคนิค OES.....	28
4.3 แสดงคุณลักษณะของพลาสมาที่เกิดจากข้อผิดพลาดที่ความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์ ด้วยเทคนิค OES.....	28
4.4 เปรียบเทียบการย่อยสลายฟีนอลของข้อผิดพลาดแต่ละชนิดที่ความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์.....	29
4.5 ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ข้อผิดพลาดชนิดต่างๆที่ความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์.....	30

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 แสดงข้อมูลจากเครื่อง HPLC ที่ความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์ ที่เวลา 180 นาที.....	31
4.7 เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายฟีนอลของซั้วอิเล็กทรอนิกส์ทั้งสแตนท์ที่ความถี่ 15 22.5 และ 30 กิโลเฮิร์ตซ์.....	32
4.8 แสดงค่า R^2 ของการย่อยสลายฟีนอลของซั้วอิเล็กทรอนิกส์ทั้ง 3 ชนิด ที่ความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์.....	33
4.9 ค่า TOC ที่ซั้วอิเล็กทรอนิกส์ชนิดต่างๆ ที่ความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์.....	35
4.10 ค่า TOC ที่ซั้วอิเล็กทรอนิกส์ทั้งสแตนท์ที่ความถี่ต่างกัน.....	36



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

ปัจจุบันปัญหาน้ำเสียเป็นปัญหาสำคัญที่ต้องได้รับการแก้ไขอย่างเร่งด่วน ไม่ว่าจะเป็นปัญหาน้ำเสียจากเขตชุมชน น้ำเสียที่มาจากกาการเกษตรหรือน้ำเสียที่มาจากโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งน้ำเสียนี้ยังส่งกลิ่นเหม็นหรืออาจมีสารเคมีและโลหะหนักที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม เมื่อปนเปื้อนอยู่ในน้ำ น้ำเสียเหล่านี้ไหลลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติไม่ว่าจะเป็น แม่น้ำ ลำคลองหรือทะเล จะทำให้แหล่งน้ำธรรมชาติเหล่านี้ปนเปื้อนไปด้วย เมื่อนำน้ำที่มีการปนเปื้อนมาใช้ในการอุปโภคบริโภค ไม่ว่าจะเป็น การสัมผัสหรือการนำไปใช้เพื่อการประกอบอาหารอาจทำให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพและชีวิตได้ จากปัญหาดังกล่าว น้ำเสียทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อมเป็นวงกว้างจึงต้องมีการดูแลและควบคุมหรือการบำบัดก่อนจะปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ [1]

ฟีนอล (C_6H_6O) เป็นสารที่ได้จากน้ำมันถ่านหินเป็นของแข็งไม่มีสี ถ้าบริสุทธิ์จะมีสีขาวขุ่น สารประกอบฟีนอลมีสูตรโครงสร้างทางเคมีเป็นวงแหวนที่เป็นอนุพันธ์ของวงแหวนเบนซีนมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH group) อย่างน้อยหนึ่งหมู่ต่ออยู่ ฟีนอลถูกนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตพลาสติกบางชนิด สีย้อม ยาฆ่าเชื้อโรค กลุ่มสารเคลือบผิว และกลุ่มผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี หลังจากการผลิตจะมีการปนเปื้อนของฟีนอลมากับน้ำเสียด้วย ซึ่งฟีนอลนั้นเป็นสารที่อันตรายต่อสิ่งมีชีวิต ถ้าได้รับเข้าไปในร่างกายก็จะเกิดการระคายเคืองในระบบทางเดินอาหารและเมื่อสัมผัสจะทำให้เกิดการกัดผิวหนังและซึมเข้าสู่กระแสโลหิต แต่ถ้าได้รับฟีนอลในปริมาณมากก็อาจทำให้เสียชีวิตได้ [2] ดังนั้นการกำจัดฟีนอลจึงได้รับความสนใจเป็นอย่างมากจากนักวิจัยกระบวนการกำจัดฟีนอลที่ได้รับความนิยมในปัจจุบันคือกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันและกระบวนการโฟโตแคตาไลซิสกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชัน [3] เป็นกระบวนการที่สามารถบำบัดสารอินทรีย์ธรรมชาติได้มากกว่า 60 เปอร์เซ็นต์ โดยการใช้โอโซนในการบำบัดมาจากการใช้สนามไฟฟ้าแรงสูงหรือจากรังสีอัลตราไวโอเล็ตผ่านไปยังโมเลกุลออกซิเจน (O_2) ตัวอื่นที่ใกล้เคียงกันเป็นโอโซน (O_3) ซึ่งสามารถออกซิไดซ์โมเลกุลของสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายอย่างไม่ว่าเป็นการควบคุมอุณหภูมิ ความดัน ความเป็นกรดต่าง และมีความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้ารวมทั้งอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ ข้อเสียของกระบวนการนี้คือโอโซนที่ผลิตขึ้นสามารถทำปฏิกิริยากับสารบางชนิดและก่อให้เกิดเป็นสารก่อมะเร็ง [4]

กระบวนการโฟโตแคตาไลซิส [5] เป็นการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตที่มีความยาวคลื่นต่ำกว่า 390 นาโนเมตร ไปกระตุ้นอิเล็กตรอนที่แถบเวเลนซ์ของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เป็นสารประกอบกึ่งตัวนำซึ่งแขวนลอยอยู่ในน้ำที่มีสิ่งเจือปนหลุดออกจากตำแหน่ง ส่งผลให้คู่อิเล็กตรอนที่

หลุมออกและโฮล (hole) ซึ่งเป็นช่องว่างที่ไม่มีอิเล็กตรอน และมีประจุบวกสามารถสร้างพลังงานความร้อนกลับมารวมตัวกันหรือทำปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อมภายนอก โดยที่โฮลจะเกิดปฏิกิริยากับน้ำและหมู่ไฮดรอกซิล (OH) เพื่อทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล (hydroxyl radical) ซึ่งเป็นตัวออกซิไดส์ที่แรงสามารถไปทำให้โมเลกุลของสารอินทรีย์ที่ละลายแตกตัวออกกลายเป็นน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ และผลิตภัณฑ์อินทรีย์อื่นๆ ส่วนอิเล็กตรอนจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่ละลายอยู่ทำให้เกิดซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออน (O_2^-) ซึ่งสามารถทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัลได้ ในอีกทางหนึ่งอิเล็กตรอนสามารถลดปริมาณโลหะบางชนิดที่ละลายอยู่ได้ด้วย อย่างไรก็ตามความสามารถของอิเล็กตรอนและโฮลในการทำปฏิกิริยารีดอกซ์ (ออกซิเดชันรีดักชัน) อาจเปลี่ยนแปลงให้เหมาะสมได้โดยการเลือกใช้ค่าความเป็นกรด - ด่าง (pH)

กระบวนการที่กล่าวมาข้างต้นนั้นยังมีข้อจำกัดอยู่หลายอย่างเช่นจึงทำให้มีการพัฒนากระบวนการบำบัดน้ำเสียขึ้นมาเพื่อในการปฏิบัติงานได้ง่ายขึ้นโดยลดปัจจัยหรือข้อจำกัดต่างๆในการกำจัดน้ำเสีย กระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวเป็นกระบวนการที่ค้นพบโดย O.Takai และได้นำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านต่างๆ อาทิเช่น การสังเคราะห์อนุภาคนาโน การย่อยสลายสารอินทรีย์ กระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวเป็นกระบวนการที่สามารถผลิตหมู่ว่องไวที่มีความสามารถในการเข้าทำปฏิกิริยาได้ดี อาทิ หมู่ไฮดรอกซิล (OH) หมู่ไฮโดรเปอร์ออกซิล (HO_2) จากรายงานการวิจัยของ L. Wang และ X. Jiang [6] ซึ่งได้ศึกษาการย่อยสลายฟีนอลด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวพบว่าสารละลายฟีนอลที่ผ่านการทรีทด้วยพลาสมามีความเข้มข้นของฟีนอลต่ำลง เนื่องจากหมู่ว่องไวไฮดรอกซิลซึ่งผลิตขึ้นในระหว่างกระบวนการพลาสมาและมีความว่องไวในการเข้าทำปฏิกิริยา จึงทำให้ความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลต่ำลง อย่างไรก็ตามปัจจัยต่างๆในกระบวนการพลาสมาที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดฟีนอล อาทิ ชนิดของอิเล็กโทรดและพลังงานพลาสมายังไม่ได้รับการศึกษาดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจในการประยุกต์ใช้กระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวในการย่อยสลายฟีนอล โดยตัวแปรที่สนใจศึกษาคือ ชนิดของอิเล็กโทรด เวลาที่ใช้ในการทรีทพลาสมา และพลังงานพลาสมาโดยปรับความถี่ ซึ่งฟีนอลที่ผ่านการทรีทด้วยพลาสมาจะนำไปตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของฟีนอลด้วยเทคนิค High Performance Liquid Chromatography (HPLC) ซึ่งผลที่ได้จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของพลาสมาสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการย่อยสลายฟีนอลและให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายฟีนอลสูง

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อศึกษาสภาวะของกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวที่มีผลต่อการย่อยสลายของฟีนอล

1.2.2 เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์ของการสลายฟีนอลด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลว

1.3 ขอบเขตในการดำเนินโครงการ

1.3.1 ติดตั้งเครื่องกำเนิดพลาสมาวัฏภาคของเหลวและตรวจวัดคุณลักษณะของพลาสมาที่สภาวะต่างๆด้วยเทคนิค Optical Emission Spectrometer (OES)

1.3.2 เตรียมสารละลายฟีนอลความเข้มข้น 100 ppm ปริมาณ 120 มิลลิลิตร และนำไปทรีทด้วยพลาสมา โดยมีตัวแปรศึกษาดังนี้

1.3.2.1 เวลาที่ใช้ในการทรีทพลาสมาในช่วงเวลา 0 – 180 นาที

1.3.2.2 ชนิดของขั้วอิเล็กโทรด คือ ทั้งสแตน เหล็กและทองแดง

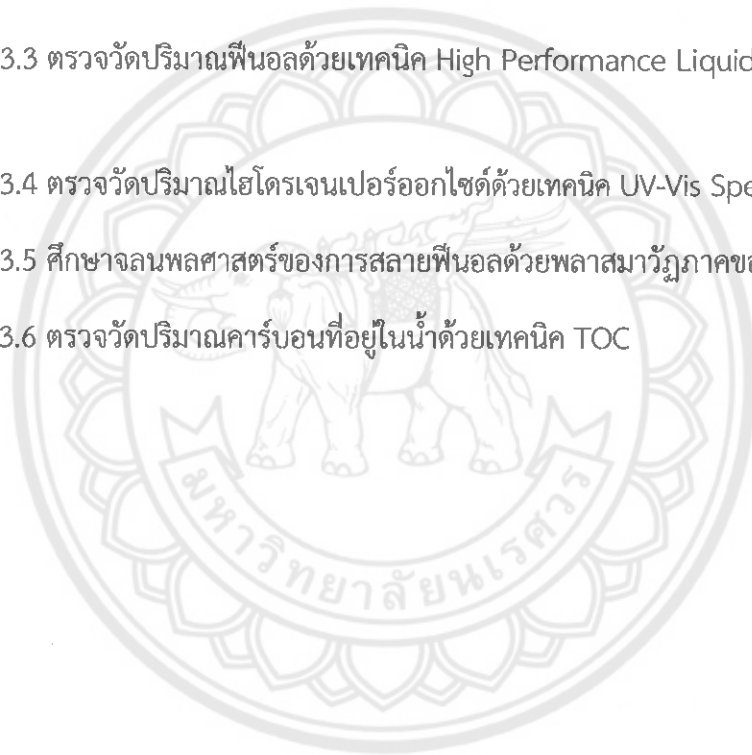
1.3.2.3 พลังงานของพลาสมาโดยการปรับค่าความถี่ในช่วง 15 – 30 กิโลเฮิร์ตซ์

1.3.3 ตรวจวัดปริมาณฟีนอลด้วยเทคนิค High Performance Liquid Chromatography (HPLC)

1.3.4 ตรวจวัดปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยเทคนิค UV-Vis Spectrophotometer

1.3.5 ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการสลายฟีนอลด้วยพลาสมาวัฏภาคของเหลว

1.3.6 ตรวจวัดปริมาณคาร์บอนที่อยู่ในน้ำด้วยเทคนิค TOC



บทที่ 2

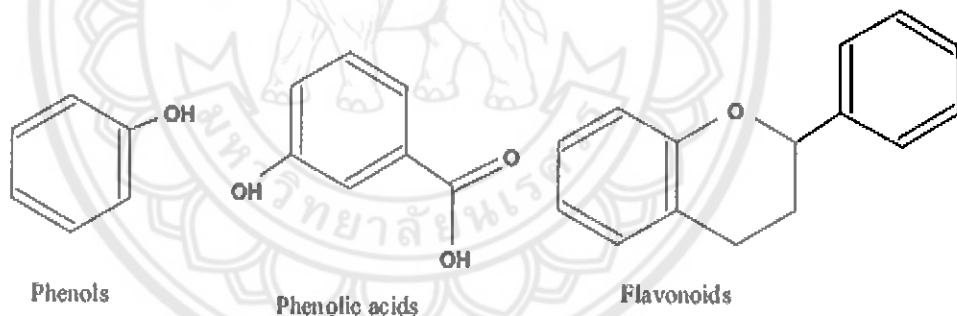
หลักการและทฤษฎี

2.1 ฟีนอล (Phenol)

ฟีนอล (C_6H_6O) อยู่ในกลุ่มของสารฟีนอลิก ซึ่งประกอบด้วยวงแหวนเบนซีน 1 วงและหมู่ไฮดรอกซิล 1 หมู่ มีมวลโมเลกุล 94.11 เป็นผลึกรูปเข็ม ไม่มีสี จุดหลอมเหลว 40.9 องศาเซลเซียส จุดเดือด 181.8 องศาเซลเซียส จุดวาบไฟ 78 องศาเซลเซียส ฟีนอล 8.2 ส่วนละลายได้ในน้ำ 100 ส่วนโดยน้ำหนักที่ 15 องศาเซลเซียส สารละลายของฟีนอลเป็นกรดอ่อน นอกจากนี้ฟีนอลยังละลายได้ในกลีเซอรอล คาร์บอนไดซัลไฟด์ และละลายได้ดีในแอลกอฮอล์ อีเทอร์ และคลอโรฟอร์ม [7]

โครงสร้างโมเลกุลของสารประกอบฟีนอล

สารประกอบฟีนอล มีสูตรโครงสร้างทางเคมีเป็นวงแหวน ที่เป็นอนุพันธ์ของวงแหวนเบนซีน มีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH group) อย่างน้อยหนึ่งหมู่ต่ออยู่ สารประกอบฟีนอลพื้นฐาน คือ สารฟีนอล (phenol) ในโมเลกุลประกอบด้วยวงแหวนเบนซีน 1 วง และหมู่ไฮดรอกซิล 1 หมู่



รูปที่ 2.1 โครงสร้างโมเลกุลของสารประกอบฟีนอล

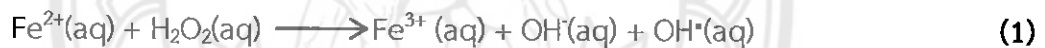
สารประกอบฟีนอลที่พบในธรรมชาติมีมากมายหลายชนิด และมีลักษณะสูตรโครงสร้างทางเคมีที่แตกต่างกัน ตั้งแต่กลุ่มที่มีโครงสร้างอย่างง่าย เช่น กรดฟีนอลิก (phenolic acids) ไปจนถึงกลุ่มที่มีโครงสร้างเป็นพอลิเมอร์ เช่น ลิกนิน (lignin) กลุ่มใหญ่ที่สุดที่พบคือ สารประกอบฟลาโวนอยด์ (flavonoid) สารประกอบฟีนอลที่พบในพืชมักจะรวมอยู่ในโมเลกุลของน้ำตาลในรูปของสารประกอบไกลโคไซด์ (glycoside) น้ำตาลชนิดที่พบมากที่สุดโมเลกุลของสารประกอบฟีนอล คือ น้ำตาลกลูโคส (glucose) และพบว่าอาจมีการรวมตัวกันระหว่างสารประกอบฟีนอลด้วยกันเอง หรือสารประกอบฟีนอลกับสารประกอบอื่นๆ เช่น กรดอินทรีย์ (organic acid) รวมอยู่ในโมเลกุลของโปรตีน แอลคาลอยด์ (alkaloid) และเทอร์พีนอยด์ (terpenoid) เป็นต้น [2]

2.2 ปฏิกริยาเฟนตัน

ปฏิกริยาเฟนตัน เป็นปฏิกริยาที่ถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1894 จนถึงปี 1930 ได้มีการศึกษากลไกของปฏิกริยานี้ได้อย่างสมบูรณ์ และนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งในน้ำเสียที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรมมีสารพิษประเภทสารประกอบอินทรีย์ปะปนอยู่ และสารเคมีต่างๆที่ได้มาจากยาฆ่าแมลง วัสดุสีย้อม ยาง และพลาสติก รวมทั้งกระบวนการนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับน้ำเสีย และตะกอน ได้ดังนี้ ทำลายสารอินทรีย์ที่เป็นมลพิษ (Organic pollutant destruction), ลดค่า BOD และ TOC (BOD and TOC removal), ลดกลิ่นและสี (Odor and Color removal)

2.2.1 กลไกของปฏิกริยาเฟนตัน

การใช้ปฏิกริยาเฟนตัน ซึ่งค้นพบโดย H.J.H Fenton พบว่าศักยภาพของปฏิกริยานี้มีมากในระดับที่สามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์ในน้ำเสียให้กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำได้ อย่างสมบูรณ์ [8] ปฏิกริยาเฟนตัน คือ ปฏิกริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วของสารประกอบอินทรีย์ในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) กับไอออนของเฟอร์รัสซึ่งจะก่อให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิล (Hydroxyl radicals) ดังสมการนี้



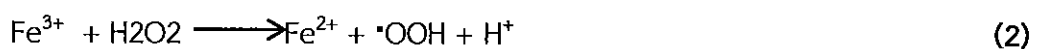
เมื่อปฏิกริยา (1) เกิดขึ้นในน้ำเสีย ซึ่งมีสารประกอบอินทรีย์หลายๆประเภท พลังงานของการถ่ายโอนอิเล็กตรอนเริ่มแรกที่อนุมูลไฮดรอกซิล สามารถที่จะเหนี่ยวนำให้มีการย่อยสลายของสารประกอบอินทรีย์ได้ ปฏิกริยาต่อมาก็คืออนุมูลไฮดรอกซิลจะทำปฏิกริยากับไอออนของเฟอร์รัส (Fe^{2+}) แล้วให้ไอออนของเฟอร์ริก (Fe^{3+}) ดังนี้

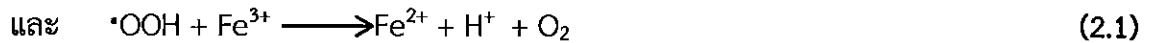


หรือในเวลาเดียวกันอนุมูลไฮดรอกซิลจะทำปฏิกริยาออกซิเดชันกับสารประกอบอินทรีย์ในสารละลายดังนี้



ต่อมาปฏิกริยาจะมีการทำซ้ำโดยไอออนเฟอร์ริก (Fe^{3+}) จะช่วยเร่งให้มีการแตกตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ไปเป็นก๊าซออกซิเจนและอนุมูลเปอร์ไฮดรอกซิล (Perhydroxyl radicals) โดยที่ความเข้มข้นของไอออนของเฟอร์รัส (Fe^{2+}) จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆในขณะที่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะลดลงเรื่อยๆดังนี้ [9]





อนุมูลเปอร์ไฮดรอกซิลเป็นตัวออกซิไดซ์ที่อ่อน แต่มีความสำคัญมากในกระบวนการเกิดไอออนของเฟอร์รัส (Fe^{2+}) โดยเมื่อทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จะทำให้อนุมูลไฮดรอกซิลเพิ่มมากขึ้น ซึ่งอนุมูลไฮดรอกซิลจะสามารถทำปฏิกิริยากับสารประกอบอินทรีย์เกือบทั้งหมดและให้ผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำในขั้นตอนสุดท้าย ปัญหาโดยตรงของปฏิกิริยานี้คือการควบคุมสารเคมี (Reagents) และพีเอช (pH) ซึ่งหากมีการควบคุมองค์ประกอบเหล่านี้ไม่ดีพอก็จะทำให้ผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาเป็นเพียงน้ำและออกซิเจนเท่านั้น [10]

ผลิตภัณฑ์จากการออกซิเดชัน (Oxidized product) ที่ต้องการอย่างยิ่งในการบำบัดน้ำเสียก็คือคาร์บอนไดออกไซด์เพราะหมายถึงสารประกอบอินทรีย์ได้ถูกเปลี่ยนรูปจนหมดสภาพการเป็นสารพิษ และในแง่ของการตรวจสอบสมบัติของน้ำเสียก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ ด้วยการตรวจสอบค่า COD หรือค่า TOC ถ้าผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่จากการเกิดปฏิกิริยา คือ คาร์บอนไดออกไซด์แล้วค่า COD หรือค่า TOC ที่ตรวจสอบหลังปฏิกิริยาจะย่อมมีค่าน้อยจนสามารถปล่อยลงสู่แหล่งน้ำได้

2.2.2 ความสามารถในการเข้าทำปฏิกิริยาของอนุมูลไฮดรอกซิล

อนุมูลไฮดรอกซิล (Hydroxyl radicals) เป็นอนุมูลที่รู้จักกันดีเนื่องจากเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงรองจากฟลูออกรีน โดยปฏิกิริยาทางเคมีของอนุมูลไฮดรอกซิลแบ่งออกเป็น 4 ชนิด ดังนี้

1. การรวมตัว (addition)



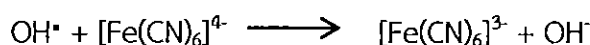
โดยอนุมูลไฮดรอกซิลจะทำปฏิกิริยากับสารประกอบไม่อิ่มตัว อะลิฟาติกหรืออะโรมาติก แล้วให้อนุมูลของผลิตภัณฑ์ (เช่น Cyclohexadienyl ดังตัวอย่างในสมการข้างต้น)

2. การสกัดไฮโดรเจน (Hydrogen abstraction)



อนุมูลไฮดรอกซิลจะทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ เกิดผลิตภัณฑ์เป็นน้ำและอนุมูลอิสระของสารอินทรีย์ (Organic free radical)

3. การถ่ายโอนอิเล็กตรอน (Electron transfer)



อิเล็กตรอนจะถูกถ่ายโอนให้กับอนุมูลไฮดรอกซิลเกิดผลิตภัณฑ์เป็นไอออนของไฮดรอกไซด์

4. การทำปฏิกิริยาซ้ำกันของอนุมูล (Radical interaction)



โดยอนุมูลไฮดรอกซิลจะทำปฏิกิริยากับอนุมูลไฮดรอกซิลอีกตัวหนึ่งเกิดผลิตภัณฑ์เป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ปฏิกิริยาเฟนตันสำหรับการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมจะมีสถานะของปฏิกิริยาที่ถูกปรับเปลี่ยนอยู่ 2 กระบวนการคือ การสกัดไฮโดรเจน (Hydrogen abstraction) และการรวมตัว (addition) ซึ่งมีผลมากกว่าปฏิกิริยาอื่นๆ

2.2.3 อิทธิพลของความเข้มข้นของไอออนเหล็ก

อนุมูลไฮดรอกซิลเกิดขึ้นได้น้อยมาก ถ้าหากในปฏิกิริยานั้นไม่มีไอออนของเหล็กเช่นการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ลงไปลงในน้ำเสียที่มีฟีนอลอยู่โดยที่ไม่มีการเติมไอออนของเหล็กลงไป แต่ถ้าหากมีการเติมไอออนของเหล็กลงไปก็จะเร่งให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิลมากขึ้น จนถึงที่ความเข้มข้นของเหล็กค่าหนึ่งปฏิกิริยาจะไม่เพิ่มขึ้นและปัจจัยที่มีผลต่อการทำให้เกิดปฏิกิริยาเฟนตันอาทิ ความเข้มข้นของไอออนเหล็กที่จุดเริ่มต้น 3-15 mg/l เป็นความเข้มข้นต่ำที่สุดที่จะกระตุ้นให้ปฏิกิริยาไปข้างหน้าภายในระยะเวลาที่เหมาะสมโดยไม่คำนึงถึงความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ สัดส่วนคงที่ของไอออนเหล็กต่อสารที่เข้าทำปฏิกิริยา (Substrate) เมื่ออยู่สูงกว่าความเข้มข้นต่ำสุดที่กระตุ้นการเกิดปฏิกิริยา คือ 1 ส่วนของไอออนเหล็กต่อ 10-50 ส่วนของสารที่เข้าทำปฏิกิริยาซึ่งจะให้ผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการและสารประกอบของเหล็กที่อึดตัวเป็นสมบัติของคีเลตซึ่งอยู่ในน้ำเสีย ดังนั้นจึงไม่ควรจะแยกไอออนเหล็กออกไป เพื่อใช้ไอออนเหล็กเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการสร้างอนุมูลไฮดรอกซิลทั้งนี้ สัดส่วนโดยน้ำหนักของไอออนเหล็กต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ควรอยู่ในช่วง 1 ต่อ 5 - 25(wt/wt)

2.2.4 อิทธิพลของชนิดของเหล็กเฟอร์รัสหรือเฟอร์ริก

ในการนำมาประยุกต์ใช้เราไม่สามารถรู้ได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่แท้จริงเป็นไอออนของเฟอร์รัส (Fe^{2+}) หรือไอออนของเฟอร์ริก (Fe^{3+}) เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกนำกลับมาใช้ใหม่ทันทีถ้ามีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และสารอินทรีย์อยู่มากพอ

2.2.5 อิทธิพลของความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

การใช้อนุมูลไฮดรอกซิลในการออกซิไดซ์สารประกอบอินทรีย์เพื่อให้ได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีความสำคัญมาก การเปลี่ยนแปลงในแต่ละลำดับที่ต่อเนื่องกันจะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาของมันเองโดยขึ้นอยู่กับชนิดของสารอินทรีย์นั้นๆ ตัวอย่างเช่นในกรณีของสารประกอบฟีนอลจะมีสารที่ไม่เสถียร (intermediate) นั่นก็คือ ควิโนน (Quinones) ซึ่งเป็นสารที่ขัดขวางการเกิดปฏิกิริยา ดังนั้นจึงต้องเพิ่มปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยปริมาณที่พอเหมาะจึงจะทำปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้าได้มากขึ้นเพื่อให้เลยจุดที่เกิดเป็นสารที่ไม่เสถียร ซึ่งเราจะพบได้ในการบำบัดเบื้องต้นของสารประกอบอินทรีย์ที่มีความซับซ้อนเพื่อช่วยลดความเป็นพิษ ถ้ามีการเพิ่มปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะทำให้ค่า COD ลดลง ความเป็นพิษอาจจะลดลงได้น้อยหรือไม่มีการ

เปลี่ยนแปลงจนกระทั่งถึงจุดที่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ค่าหนึ่ง ซึ่งถ้าเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ลงไปอีกจะทำให้ความเป็นพิษลดลงอย่างรวดเร็ว

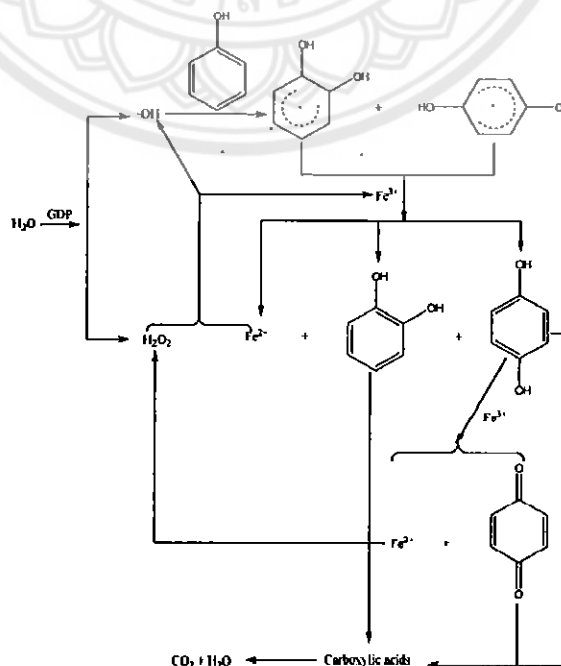
2.2.6 อิทธิพลของอุณหภูมิ

อัตราของการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาเฟนตันเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนเมื่ออุณหภูมิน้อยกว่า 20 °C แต่อย่างไรก็ตามอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นมากกว่า 40 - 50 °C ประสิทธิภาพของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะค่อยๆลดลง เนื่องจากจะมีการเร่งการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไปเป็นออกซิเจนและน้ำ ในการประยุกต์ใช้ปฏิกิริยาเฟนตันจึงมักจะใช้ที่อุณหภูมิ 20 - 40 °C

2.2.7 หน้าที่ของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการลดค่า BOD และ COD

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ถูกใช้ในการลดค่า BOD และ COD ในอุตสาหกรรมน้ำเสียมาหลายปีแล้ว เนื่องจากมีสมบัติที่สามารถช่วยย่อยสลายสารประกอบที่เป็นพิษในน้ำเสียเบื้องต้นก่อนที่จะไปสู่กระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ เช่น ยาฆ่าแมลง สารย้อมสี เรซิน สารทำความสะอาด ช่วยบำบัดน้ำเสียที่มีอัตราความเข้มข้นของน้ำเสียมากหรือน้อยในเบื้องต้น ซึ่งการบำบัดทางชีวภาพไม่สามารถทำได้ก่อนที่จะมีการปล่อยออกไป ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกสารอินทรีย์ ซึ่งใช้กระบวนการลอยหรือการตกจม ช่วยทำให้การละลายของออกซิเจนเพิ่มขึ้น เมื่อมีการใช้ระบบบำบัดทางชีวภาพในขณะที่ยุกรณ์ให้ออกซิเจนไม่เพียงพอ หรือเกิดภาวะที่ปริมาณของน้ำเสียที่เข้ามาในระบบมากเกินไป ความสามารถของระบบจะรับได้

2.2.8 กระบวนการการย่อยสลายฟีนอลโดยใช้ปฏิกิริยาเฟนตัน [6]



รูปที่ 2.2 เส้นทางการไกลของการย่อยสลายฟีนอลโดยใช้ปฏิกิริยาเฟนตัน

2.3 กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advance Oxidation Process)

กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advance Oxidation Process: AOPs) เป็นกระบวนการทางเคมีวิธีการหนึ่งโดยอาศัยสารออกซิไดซ์ (oxidizing agent) ที่มีค่าศักย์รีดอกซ์สูงเช่น O_3/UV , H_2O_2/UV , O_3/UV , H_2O_2/UV , H_2O_2/Fe^{2+} , TiO_2/UV , และ $TiO_2/H_2O_2/UV$ กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงนี้มีประสิทธิภาพสูงสามารถบำบัดได้ทั้งสารอินทรีย์สารอนินทรีย์สารพิษโลหะหนักและสารที่ย่อยสลายยากโดยกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงมีหลักการคือเมื่อสารออกไซด์สัมผัสกับสารมลพิษในน้ำเสียจะมีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนวงนอกสุด (valence electron) สารออกซิไดซ์ซึ่งมีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนสูงจะค่อยๆทำการแตกสลายพันธะ (break down) โดยสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อนจากพวกพันธะวงแหวนและพันธะคู่ลดความซับซ้อนของโมเลกุลลงกลายเป็นสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายง่ายขึ้นจึงส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์จนสุดท้ายได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกซิเจนและน้ำโดยความสามารถในการออกซิไดซ์ขึ้นอยู่กับค่ารีดอกซ์

ปัจจุบันกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงเป็นกระบวนการหนึ่งซึ่งได้รับความสนใจมากในขณะนี้อยู่ การกำจัดสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำ โดยประเภทของกระบวนการAOPs มีหลายประเภทอาทิเช่น กระบวนการเฟ้นต้น, Ozone/ H_2O_2 , Photocatalytic, sonication และ UV/ H_2O_2 เป็นต้นซึ่งแต่ละกระบวนการมุ่งสร้างสารอนุมูลอิสระคือไฮดรอกซิลเรดิคัล ($\cdot OH$) ซึ่งเป็นสารออกซิไดซ์ที่รุนแรงและเกิดในช่วงเวลาสั้นๆ ปฏิกิริยาโดยทั่วไปในช่วงแรกจะเกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ของสารไฮดรอกซิลเรดิคัล ($\cdot OH$) และความเข้มข้นของสารออกซิไดซ์โดยความสัมพันธ์ของสารไฮดรอกซิลเรดิคัลมีความเข้มข้นอยู่ระหว่าง 10 - 12 M ในขณะที่อัตราการเกิดแต่ละช่วงคือ 10^8 , $10^{11} M^{-1}s^{-1}$ หรือระหว่าง 1 และ $10^{-4}s^{-1}$ รูปแบบของ pseudo-first order ที่ค่าคงที่ $k = 20$ [11]

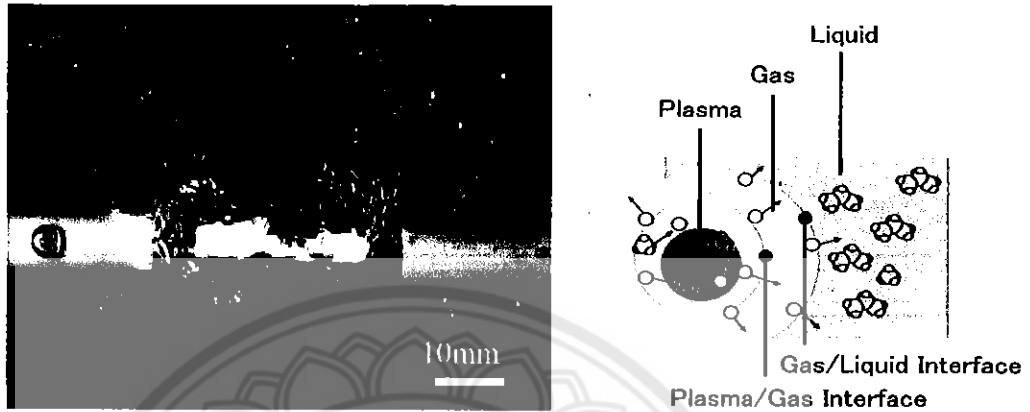
2.4 พลาสมาวิญญากาศของเหลว (liquid phase plasma)

2.4.1 หลักการของพลาสมาวิญญากาศของเหลว

พลาสมาวิญญากาศของเหลว คือกระบวนการผลิตพลาสมาที่ล้อมรอบด้วยกันภาคของเหลว โดยใช้ความต่างศักย์ของไฟฟ้ากระตุ้นให้เกิดหมู่ว่องไว (Free radical) ซึ่งหมู่ว่องไวที่เกิดขึ้นจะเข้าทำปฏิกิริยาได้เร็ว [12 - 14] ข้อดีของพลาสมาวิญญากาศของเหลว คือสามารถใช้งานได้อย่างหลากหลายเนื่องจากสามารถเลือกชนิดของตัวทำละลายและสารละลายที่ใช้ในการผลิตพลาสมาได้ ในปัจจุบันกระบวนการพลาสมาที่ได้รับความนิยมในการนำมาประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ อาทิ การสังเคราะห์อนุภาคนาโน การตัดแปลงพื้นผิวของโลหะและการบำบัดน้ำเสีย เป็นต้น [15]

รูปแบบการเกิดพลาสมาวิญญากาศของเหลวจะแสดงไว้ในรูปที่ 2.3 โดยพลาสมาจะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งตรงกลางระหว่างอิเล็กโทรดซึ่งถูกล้อมรอบด้วยก๊าซและขงเหลว ส่งผลให้เกิดผิวสัมผัสระหว่างสถานะ 2 บริเวณ คือพลาสมาทั้งกับก๊าซและกับของเหลว สถานะก๊าซเกิดขึ้นเมื่อของเหลวที่อยู่ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดถูกกระตุ้นด้วยแรงดันไฟฟ้าสูง เมื่อถึงจุดที่สารเกิดการแตกตัวเป็นอนุภาคหรือสถานะพลาสมาที่สามารถนำไฟฟ้าได้จะทำให้เกิดฟองก๊าซขึ้นรอบๆพลาสมาในขณะที่พลาสมาถูก

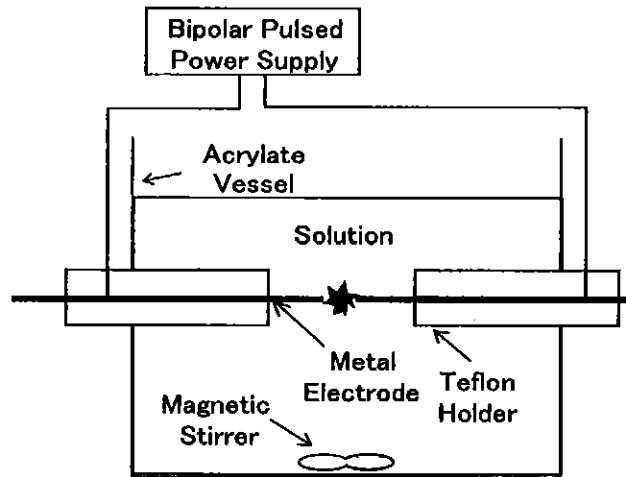
กระตุ้นด้วยแรงดันไฟฟ้าอย่างต่อเนื่องจะทำให้หมว่องไวระหว่างขั้วอิเล็กโทรดเพิ่มมากขึ้น เกิดการเคลื่อนตัวไปอยู่บริเวณของเหลวที่มีหมว่องไวน้อยกว่าโดยอาศัยหลักการถ่ายโอนมวล ดังนั้นสารที่อยู่ในวัฏภาคของเหลวจะแพร่เข้ามาแทนที่และถูกกระตุ้นให้แตกตัวกลายเป็นหมว่องไวต่อไป จากหลักการดังกล่าวส่งผลให้หมว่องไวภายในสารละลายเพิ่มขึ้นจึงเกิดปฏิกิริยาด้วย [15-17]



รูปที่ 2.3 ภาพถ่ายและแบบจำลองของพลาสมาวัฏภาคของเหลว

2.4.2 เครื่องกำเนิดพลาสมาวัฏภาคของเหลว

พลาสมาวัฏภาคของเหลวสามารถผลิตได้จากเครื่องกำเนิดพลาสมาดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยเครื่องกำเนิดพลาสมาจะประกอบด้วยองค์ประกอบสำคัญ 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นเพาเวอร์ซัพพลายแรงดันและความถี่สูงระบบกระแสตรง ซึ่งเพาเวอร์ซัพพลายจะทำหน้าที่จ่ายกระแสไฟฟ้าแบบพัลส์ให้กับระบบ โดยมีทิศทางกระแสไหลของกระแสไฟฟ้าแบบสลับขั้วบวกและลบ (Bipolar pulsed) เนื่องจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าโดยทั่วไปเป็นกระแสไฟฟ้าชนิดกระแสสลับ ดังนั้นจะต้องใช้อุปกรณ์ที่ติดตั้งไว้ในเพาเวอร์ซัพพลายที่มีหน้าที่ในการแปลงระบบไฟฟ้าจากกระแสสลับให้เป็นกระแสตรง ก่อนที่จะจ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังถึงปฏิกรณ์พลาสมาเพื่อผลิตพลาสมาต่อไป สำหรับองค์ประกอบส่วนที่ 2 ถึงปฏิกรณ์พลาสมา โดยทั่วไปแล้วนิยมทำจากแก้วรูปทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5-10 เซนติเมตร ซึ่งตำแหน่งด้านข้างทั้ง 2 ด้านของถังปฏิกรณ์จะติดตั้งอิเล็กโทรดที่ทำจากวัสดุทั้งสเตนเหล็กและทองแดง เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร และระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดประมาณ 0.2 มิลลิเมตร อิเล็กโทรดทั้งสองจะถูกหุ้มด้วยเซรามิก เพื่อป้องกันความร้อนและการลัดวงจรของกระแสไฟฟ้าที่อาจเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิตพลาสมาในการผลิตพลาสมาวัฏภาคของเหลวจะเชื่อมต่อเพาเวอร์ซัพพลายเข้ากับอิเล็กโทรดทั้ง 2 ด้าน โดยใช้แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่สูง โดยค่าแรงดันและความถี่ที่ใช้ในการผลิตพลาสมาจะขึ้นอยู่กับค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) ของสารละลายภายในเครื่องกำเนิดพลาสมา



รูปที่ 2.4 โดอะแกรมของเครื่องกำเนิดพลาสมาวัฏภาคของเหลว

พลาสมาสามารถสร้างหมว่องไวในการเข้าทำปฏิกิริยากับสารละลายภายในเครื่องปฏิกรณ์ โดยหมว่องไวเกิดขึ้นจากการให้แรงดันและความถี่ไฟฟ้าที่สูงแก่ขั้วอิเล็กโทรด ส่งผลให้สารละลายที่อยู่ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทำหน้าที่เป็นสารตัวนำไฟฟ้า เมื่อโมเลกุลได้รับพลังงานจากกระแสไฟฟ้าจะแตกตัวเป็นไอออนที่สามารถนำไฟฟ้าได้ ไอออนเหล่านี้เรียกว่า หมว่องไว หมว่องไวที่มักเกิดขึ้นระหว่างการทรีทสารละลายด้วยพลาสมา เช่น Hydroxyl radical (OH^{\bullet}), Hydroperoxyl radical ($\text{H}_2\text{O}_2^{\bullet}$) Free electron (e^-), Superoxide anion (O_2^-) และ Atomic oxygen radical anion (O^-) เป็นต้น [9] นอกจากนี้ชนิดของขั้วอิเล็กโทรดยังมีผลต่อความสามารถในการสร้างหมว่องไว สีของแสงพลาสมาที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วอิเล็กโทรดซึ่งอยู่ภายในสารละลายแสดงถึงชนิดของหมว่องไวซึ่งสามารถตรวจวิเคราะห์ได้ด้วย Optical Emission Spectrometer (OES) [15]

2.4.3 การประยุกต์ใช้พลาสมาวัฏภาคของเหลว

ในปัจจุบันพลาสมาวัฏภาคของเหลวได้รับความนิยมนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย อาทิ การสังเคราะห์อนุภาคนาโน การปรับปรุงพื้นผิวของวัตถุและการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากเป็นกระบวนการที่สามารถดำเนินการได้ในสภาวะความดันบรรยากาศและอุณหภูมิห้อง ซึ่งทำให้ต้นทุนที่ใช้ในกระบวนการพลาสมาวัฏภาคของเหลวต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับพลาสมาวัฏภาคแก๊ส [15]

การสังเคราะห์อนุภาคทองขนาดนาโนด้วยกระบวนการพลาสมาวัฏภาคของเหลว

ในการสังเคราะห์อนุภาคทองขนาดนาโนด้วยพลาสมาจะสังเคราะห์ภายใต้สารละลาย HAuCl_4 ซึ่งเป็นสารละลายที่มีตัวทำละลายเป็นน้ำ (Aqueous solution) และไม่ใช่น้ำ (Nonaqueous solution) ในระบบเปิด ในกระบวนการสังเคราะห์จะติดตั้งระบบพลาสมาแรงดัน 2.5 kV ความถี่ 60 Hz และ Pulse width 2 μs จากการศึกษาว่า อนุภาคนาโนที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยพลาสมาวัฏภาคของเหลวโดยใช้สารละลาย HAuCl_4 ความเข้มข้น 0.60 มิลลิโมลาร์ มีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยสูงสุด 10.5 ± 3.6 นาโนเมตร จากการศึกษาด้วยเทคนิค Energy dispersive x-ray analyzer (EDX) และ Infrared Spectroscopy (IR) พบว่าอนุภาคนาโนมีองค์ประกอบของทองและค่าการดูดกลืนคลื่นแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร โดยความเข้มข้นของพีคจะสูงขึ้นตามเวลาในการดิสชาร์จ (Discharge time) นอกจากนั้นพลาสมาวัฏภาคของเหลวยังสามารถสังเคราะห์อนุภาคนาโน

ที่เป็นทองให้มีรูปร่างแบบเรขาคณิตที่แตกต่างกันได้ อาทิ สามเหลี่ยม ห้าเหลี่ยมและหกเหลี่ยม โดยใช้สารละลายที่มีตัวทำละลายเป็นน้ำ ดังนั้นการสังเคราะห์อนุภาคนาโนด้วยวิธีพลาสมาวิภาคของเหลวจึงง่ายต่อการควบคุมรูปร่างของอนุภาคนาโนในรูปแบบต่างๆได้ [15]

การปรับปรุงพื้นผิวของโลหะด้วยกระบวนการพลาสมาวิภาคของเหลว

ในการปรับปรุงพื้นผิวของโลหะด้วยพลาสมาจะใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วแอโนดและขั้วแคโทดเป็น สแตนเลสสตีล สารละลายที่ใช้มีค่าความเป็นกรดต่างอยู่ระหว่าง 8 และ 12 จากการศึกษาผลของค่ากระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ที่มีต่อการปรับปรุงพื้นผิวโลหะพบว่าช่วงที่ให้ค่าความต่างศักย์ต่ำ 0 ถึง 150V ไม่พบการเปลี่ยนแปลงบนพื้นผิวของขั้วแอโนดและแคโทด จากการเพิ่มค่าความต่างศักย์มากขึ้น จะสังเกตเห็นฟองอากาศเกิดขึ้นบนพื้นผิว เมื่อให้ค่าความต่างศักย์มากกว่า 175 V พบว่าพื้นผิวของขั้วแอโนดเริ่มมีการเปลี่ยนแปลง นอกจากนั้นยังพบว่าค่าความต่างศักย์ที่ใช้ในกระบวนการพลาสมาจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นและชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ จากผลการศึกษาสัณฐานพื้นผิวด้วยเทคนิค SEM ของพื้นผิวโลหะ พบว่าพื้นที่ผิวชั้นนอกของอะลูมิเนียมมีรูพรุนสูง ส่งผลให้ความแข็งแรงต่ำ ในขณะที่พื้นที่ผิวชั้นในของอะลูมิเนียมจะมีความหนาแน่นของเนื้อโลหะสูงกว่าชั้นนอกและความแข็งแรงมากกว่า ทั้งนี้เนื่องจากพื้นผิวชั้นนอกของอะลูมิเนียมสัมผัสกับพลาสมาได้มากกว่าพื้นผิวชั้นใน ทำให้พื้นผิวมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่า [15]

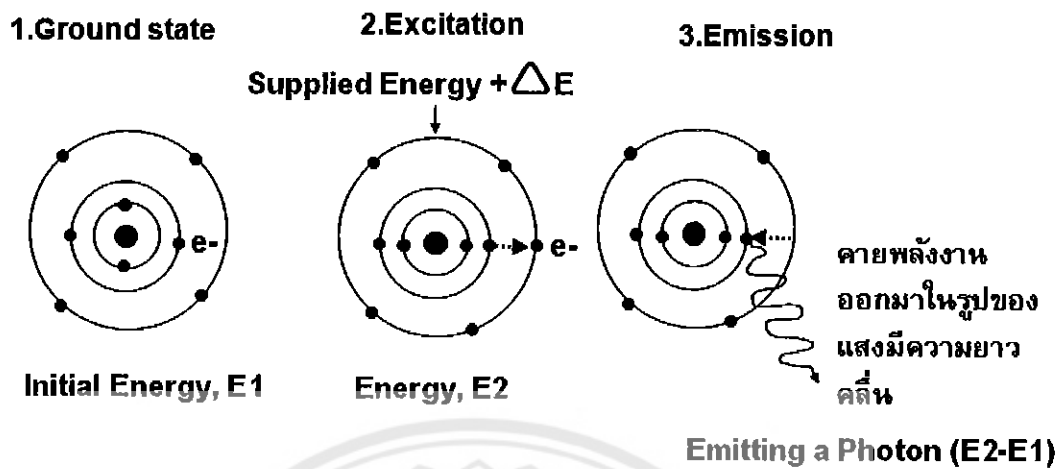
การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการพลาสมาวิภาคของเหลว

การบำบัดน้ำเสียด้วยพลาสมาจะใช้ค่าความต่างศักย์ 800 V เวลาที่ใช้ในการเปิดปิดพัล 40 วินาทีและสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียด้วยพลาสมา คือ สารละลาย Na_2SO_4 และ CH_3COONa จากการทดลองกับน้ำที่มีแบคทีเรีย E. coil uc 41Q0 (แบคทีเรียแกรมลบ)และ Staphylococcus aureus (แบคทีเรียแกรมบวก) พบว่าการบำบัดน้ำเสียด้วยพลาสมาที่เวลาสูงสุด 30 วินาที แบคทีเรียที่อยู่ในสารละลายตายทั้งหมด แสดงให้เห็นว่าพลาสมาสามารถทำลายแบคทีเรียได้ [15]

2.5 Optical Emission Spectrometer

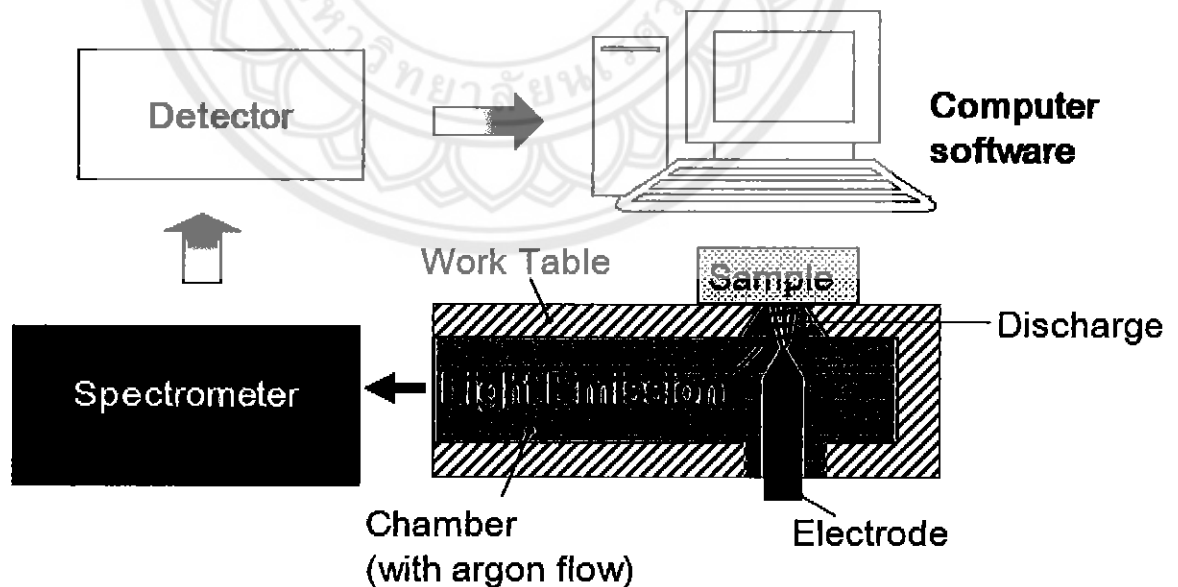
Optical Emission Spectrometer หรือ OES เป็นเทคนิคการหาชนิดและปริมาณของธาตุ โดยใช้หลักการของการกำเนิดรังสี X-ray โดยที่จะเป็นการวิเคราะห์พลังงานของ X-ray ที่ได้จากผิวของชิ้นงาน ซึ่งในการวิเคราะห์แต่ละครั้งสามารถวิเคราะห์ได้หลายธาตุภายในเวลา 1 - 2 นาที และวิเคราะห์โดยเมื่อขั้วไฟฟ้าได้รับพลังงานไฟฟ้าจะให้กำเนิดอิเล็กตรอนด้วยกำลังประมาณ 800 - 1,000V และตกกระทบผิวชิ้นงาน ผ่านบรรยากาศของแก๊สอาร์กอน ซึ่งอิเล็กตรอนในอะตอมของชิ้นงานที่มีระดับพลังงานต่ำสุด เรียกว่า ground state จะถูกกระตุ้นให้มีระดับพลังงานสูงขึ้น Excited state ซึ่งอะตอมที่อยู่ในสภาวะนี้จะไม่เสถียร จึงพยายามลดพลังงานลงมาโดยการปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของแสง (Light Emission) หรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่มีความยาวคลื่นเฉพาะตัว

Emission of atom



รูปที่ 2.5 รูปแสดงการเปลี่ยนแปลงพลังงานของอะตอม

แสงที่เกิดขึ้นจะถูกส่งผ่านไปยังระบบแยกความยาวคลื่นแสงซึ่งเรียกว่า Spectrometer ซึ่งมีลักษณะเป็นเลนส์นูน และปริซึมสามเหลี่ยม เพื่อให้เกิดการหักเหของแสงเป็น Spectrum จากนั้นแสงที่ถูกแยกความยาวคลื่นแล้วจะถูกส่งไปยัง Detector เพื่อเปลี่ยนความเข้มแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า และระบบวิเคราะห์สัญญาณไฟฟ้าให้เป็นความเข้มข้นของธาตุ โดยเปรียบเทียบกับสัญญาณของมาตรฐานที่เราทราบความเข้มข้นที่ได้จากการวิเคราะห์และบันทึกไว้

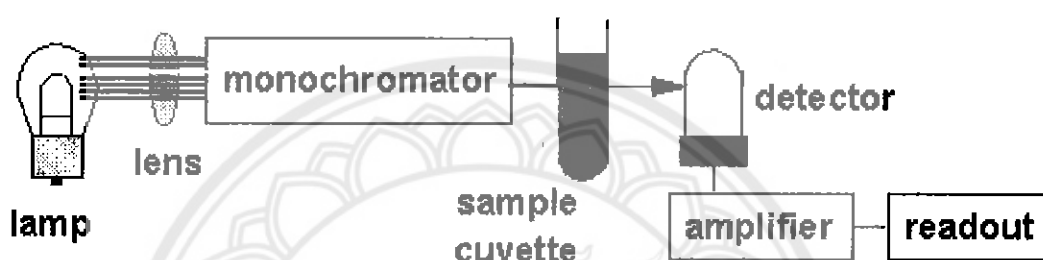


รูปที่ 2.6 แผนผังแสดงการทำงานของ Optical Emission Spectrometer

2.6 UV-VIS Spectrophotometer

2.6.1 หลักการของเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer

UV-VIS Spectrophotometer เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสงและค่า intensity ในช่วงรังสียูวีและช่วงแสงขาวที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืนโดยตัวอย่างที่วางอยู่ในเครื่องมือ โดยที่ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารที่อยู่ในตัวอย่าง ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อนและสารอนินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้ได้



รูปที่ 2.7 รูปแสดงหลักการการทำงานของเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer

คุณสมบัติในการดูดกลืนแสงของสารเมื่อโมเลกุลของตัวอย่างถูกฉายด้วยแสงที่มีพลังงานเหมาะสมจะทำให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดการดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่าเมื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ผ่านหรือสะท้อนมาจากตัวอย่างเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆตามกฎของ Beer-Lambert ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสง ดังนั้นจึงสามารถใช้เทคนิคนี้ในระบบชนิดและปริมาณของสารต่างๆที่มีอยู่ในตัวอย่างได้

2.6.2 ส่วนประกอบของเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer

2.6.2.1 แหล่งกำเนิดแสง

แหล่งกำเนิดแสงในเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์จะต้องให้รังสีในช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการอย่างต่อเนื่องและคงที่ตลอดเวลา รวมทั้งมีความเข้มแสงที่มากพอด้วย หลอดกำเนิดแสงมีหลายชนิดตามความยาวคลื่นแสงที่เปล่งออกมา ซึ่งต้องเลือกใช้ให้ถูกต้องเหมาะสมกับของเหลวที่นำมาวัดค่าดูดกลืนแสง

ตัวอย่างแหล่งกำเนิดแสงช่วง UV ใช้หลอด H₂ และ D₂ lamp ให้ความยาวคลื่นอยู่ในย่าน 160-380 นาโนเมตร ชนิดของสเปกโทรสโกปี UV molecular absorption และช่วง visible ใช้หลอด Tungsten/halogen ให้ความยาวคลื่นในช่วง 240-2,500 นาโนเมตร ชนิดของสเปกโทรสโกปีเป็นแบบ UV/visible/near-IR molecular absorption

2.6.2.2 Monochromator

ส่วนประกอบนี้เป็นส่วนที่ใช้ควบคุมแสงโดยจะทำให้แสงที่ออกมาจากต้นกำเนิดแสง ซึ่งเป็นพอลิโครเมติก ให้เป็นแสงโมโนโครเมติก ซึ่งเป็นแถบแสงแคบๆ หรือมีความยาวคลื่นเดียวใช้ฟิลเตอร์ (กระจกสี) ปริซึม (prism) หรือ เกรตติง (grating)

2.6.2.3 เซลล์ที่ใช้บรรจุสารละลายตัวอย่าง

เซลล์ที่ใส่สารตัวอย่าง (cell sample) บางครั้งอาจเรียกว่า คิวเวทท์ (cuvette) รูปแบบที่ใช้กันทั่วไปได้แก่เซลล์ที่ทำด้วยแก้วธรรมดา จะใช้ได้เฉพาะช่วงวิสิเบิล เพราะเนื้อแก้วธรรมดาถูกดูดกลืนแสงในช่วงยูวีได้ และเซลล์ที่ทำด้วยซิลิกา และควอร์ตซ์ (quartz) ใช้ได้ทั้งช่วงยูวีและวิสิเบิล

2.6.2.4 Detector

ทำหน้าที่ในการวัดความเข้มของรังสีที่ถูกดูดกลืนโดยการแปลงพลังงานคลื่นรังสีเป็นพลังงานไฟฟ้าเครื่องตรวจจับสัญญาณที่ดีต้องมีสภาพไวสูง คือแม้ปริมาณแสงจะเปลี่ยนไปเล็กน้อย ก็สามารถตรวจจับสัญญาณความแตกต่างได้ เครื่องวัดแสงที่ยังนิยมกันอยู่ในปัจจุบัน คือ หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ (photomultiplier tube, PMT) และเครื่องวัดแสงชนิดซิลิกอนไดโอด (silicon diode detector)

2.7 High Performance Liquid Chromatography (HPLC)

HPLC เป็นเทคนิคแยกสารผสมแบบใช้เครื่องสูบล้างแรงดันสูง (High Pressure Pump) สูบล้างทำละลายซึ่งทำหน้าที่เป็นเฟสเคลื่อนที่ (Mobile Phase) พาสารตัวอย่างที่ถูกฉีดเข้าทางช่องฉีดสาร (Injector) ผ่านอนุภาคที่เป็นเฟสอยู่กับที่ซึ่งบรรจุอยู่ในคอลัมน์ สารผสมตัวอย่างจะเคลื่อนที่ผ่านคอลัมน์และถูกแยกออกมา ผ่านเข้าสู่เครื่องตรวจจับ (Detector) ในเวลาที่ต่างกัน สัญญาณที่วัดได้จะอยู่ในรูปสัญญาณไฟฟ้าตามเวลาและปริมาณของสารแต่ละตัวที่ตรวจวัดได้ จากนั้นสัญญาณจะถูกส่งไปยังเครื่องบันทึกสัญญาณเพื่อแสดงผลออกมาเป็นโครมาโทแกรม (Chromatogram) [18]

2.7.1 หลักการทำงานของเครื่อง HPLC

HPLC เป็นเทคนิคการแยกสารประกอบโดยอาศัยหลักการความแตกต่างของอัตราการเคลื่อนที่ของสารประกอบใน Stationary Phase ของคอลัมน์มี Mobile Phase เป็นตัวพาไป เมื่อต่อเข้ากับ Detector จะสามารถตรวจวัดสารที่ออกมาจากคอลัมน์ได้อย่างต่อเนื่อง สามารถวัดทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ ส่วนใหญ่นิยมใช้วิเคราะห์สารประกอบที่ระเหยยาก หรือมีน้ำหนักโมเลกุลสูง

2.7.2 ลักษณะตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์

HPLC สามารถวิเคราะห์สารได้หลายชนิด เช่น สารอินทรีย์ สารประกอบทางชีวภาพ โพลีเมอร์ คูอออนโทโอเมอร์ สารประกอบที่เสถียรภาพได้ง่าย ไอออนขนาดเล็ก สารประกอบที่ระเหยยาก ไมโครโมเลกุล ตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ต้องเป็นของแข็งหรือของเหลว ต้องละลายได้ 100% การแยกสารจะประสบความสำเร็จได้ก็ต่อเมื่อสารมีอัตราการเคลื่อนที่ที่แตกต่างกันภายในคอลัมน์ สารประกอบที่ถูกแยกนั้นจะเคลื่อนที่ไปตามความยาวทั้งหมดของคอลัมน์โดยมี Mobile Phase เป็นตัวพาไป

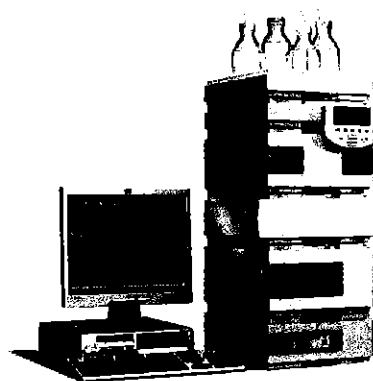
2.7.3 การใช้ HPLC ในการวิเคราะห์เชิงคุณภาพและปริมาณ

การวิเคราะห์เชิงคุณภาพ (Qualitative analysis) ตรวจสอบเอกลักษณ์ของสารที่แยกออกมาได้ ทำโดยการเปรียบเทียบค่า Retention time (RT) กับสารมาตรฐาน โดยสารตัวอย่างและสารมาตรฐานจะต้องทำการวิเคราะห์ในสภาวะเดียวกัน เช่น อุณหภูมิ ชนิดของคอลัมน์ ชนิดและอัตราการไหลของเฟสเคลื่อนที่ ถ้าสารตัวอย่างและสารมาตรฐานมีค่า RT เท่ากัน เป็นสารเดียวกัน วิเคราะห์เพิ่มเติมโดยเปลี่ยนชนิดของคอลัมน์หรือชนิดของเฟสเคลื่อนที่

การวิเคราะห์เชิงปริมาณ (Quantitative analysis) หลังจาก HPLC แยกสารออกมาเป็นพีคต่างๆสามารถวัดปริมาณของสารในแต่ละพีค ได้โดย

1. วัดความสูงของพีค (Peak height) เทียบกับความสูงของพีคของสารมาตรฐานที่ทราบปริมาณ
2. วัดพื้นที่พีค (Peak area) เทียบกับพื้นที่ของสารมาตรฐานที่ทราบปริมาณที่ฉีดเข้าไป

2.7.4 องค์ประกอบของเครื่อง HPLC



รูปที่ 2.8 องค์ประกอบของเครื่อง HPLC [19]

2.7.4.1 ภาชนะบรรจุเฟสเคลื่อนที่ (Mobile Phase Reservoir)

Solvent เป็นตัวแปรที่มีความสำคัญมากในการแยกสารตัวอย่างออกเป็นองค์ประกอบย่อย Solvent ที่ใช้เป็น Mobile Phase ได้แก่ Organic Solvent รวมทั้ง Aqueous Solution ของเกลือชนิดต่างๆ คุณสมบัติที่สำคัญบางประการของ Mobile Phase ที่ใช้ใน HPLC ได้แก่

1. ไม่ทำปฏิกิริยากับ Column หรือ Packing Material ซึ่งจะทำให้คุณสมบัติในการแยกสารผิด
2. สามารถละลายสารตัวอย่างได้
3. ปราศจาก Particulate (ทำให้เกิดการอุดตันใน Column เป็นการเพิ่มความดันในระบบ) และ Dissolved Gas Solvent และสารละลายตัวอย่างทุกชนิดก่อนการวิเคราะห์โดยใช้ HPLC ควรกรองผ่านกระดาษกรองที่มีรูพรุนขนาด 0.45 – 0.5 ไมครอน, Centrifuge เพื่อกำจัดก๊าซซึ่งละลายในสารละลายทั้งหมดซึ่งอาจทำได้โดยใช้ Ultrasonic Bath
4. บริสุทธิ์ปราศจากสิ่งเจือปนซึ่งรวมถึงพวก Preservative และ Stabilizer ต่างๆ สำหรับน้ำกลั่นจะต้องปราศจากสารอินทรีย์และแบคทีเรียต่างๆ
5. เหมาะสมกับชนิดของ Detector ที่ใช้

2.7.4.2 Degassed Unit Online

ทำหน้าที่กำจัดฟองอากาศ อากาศที่มีอยู่ใน Mobile Phase เพื่อไม่ให้ฟองอากาศเข้าสู่ Column และ Detector

2.7.4.3 Pump

ทำหน้าที่สูบ Mobile Phase เพื่อส่งเข้าสู่ Column ในอัตราเร็วที่เราเลือก ความดันของระบบจะขึ้นอยู่กับอัตราการเคลื่อนที่ของ Mobile Phase (ถ้าความเร็วสูงจะทำให้เกิดความดันสูง) นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับ Viscosity ของ Mobile Phase ขนาดของ Packing Material และความยาวของ Column อีกด้วย โดยปกติความดันที่เข็มไม่ควรเกิน 4000 psi

2.7.4.4 Auto Injector (เครื่องฉีดตัวอย่างอัตโนมัติ)

ทำหน้าที่ฉีดสารตัวอย่างเข้าสู่ Column

2.7.4.5 Detector

เป็นเครื่องตรวจวัดสัญญาณสำหรับ HPLC เครื่องตรวจวัดที่นิยมใช้ ได้แก่

1. UV-Detector สารที่จะวิเคราะห์ต้องสามารถดูดกลืนแสง UV ได้ เมื่อต้องการใช้ UV-Detector อาจเตรียม derivative ของสารประกอบที่วิเคราะห์เพื่อให้ได้สารซึ่งดูดกลืนคลื่นแสง UV
2. RI Detector จะใช้เมื่อต้องการเปรียบเทียบความแตกต่างของ Refractive Index ของสารตัวอย่างและสาร Reference
3. Fluorescence Detector ใช้ได้กับสารที่เมื่อดูดกลืนคลื่นแสง UV จากแหล่งแสงใน Detector แล้วสามารถเปล่ง Fluorescence ได้

2.7.4.6 Colume Oven

1. เป็นเครื่องที่สามารถควบคุมการทำงานด้วยระบบคอมพิวเตอร์
2. ตัวเครื่องควบคุมการทำงานด้วยระบบ Microprocessor โดยมีแป้นป้อนข้อมูลอยู่บริเวณหน้าเครื่องและมีจอแสดงผลเพื่อแสดงสถานะการทำงานของเครื่อง
3. สามารถติดตั้ง Injector ได้ไม่น้อยกว่า 2 ชุด
4. สามารถติดตั้ง Detectors ได้ไม่น้อยกว่า 2 ชุด
5. สามารถตั้งอุณหภูมิของ Column Oven ได้ตั้งแต่ 4 องศาเซลเซียส เหนืออุณหภูมิห้อง หรือน้อยกว่าจนถึง 450 องศาเซลเซียส หรือมากกว่า
6. สามารถเพิ่มอุณหภูมิได้ไม่น้อยกว่า 100 องศาเซลเซียส/นาที
7. สามารถตั้งโปรแกรมการปรับอุณหภูมิได้ไม่น้อยกว่า 6 ระดับ

2.7.4.7 Data Processing

โปรแกรมควบคุมการทำงาน สามารถควบคุมการทำงานของเครื่อง GC และ Column Oven ส่วนฉีดสาร ส่วนตรวจวัด เครื่องฉีดสารตัวอย่างอัตโนมัติ รวมทั้งรับข้อมูล ประมวลผลและบันทึกผล พิมพ์รายงานผลการวิเคราะห์จากเครื่องได้

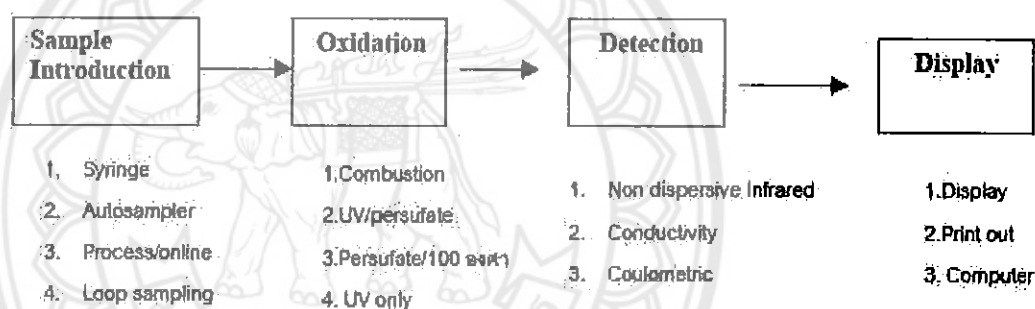
2.8 การวิเคราะห์ Total Organic Carbon (TOC)

TOC (Total Organic Carbon) หมายถึง ปริมาณคาร์บอนทั้งหมดที่ประกอบอยู่ในสารอินทรีย์ สามารถหาปริมาณคาร์บอนประเภทนี้ในรูปของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

TIC (Total Inorganic Carbon) หมายถึง ปริมาณคาร์บอนทั้งหมดที่ประกอบอยู่ในสาร อินทรีย์ สามารถหาปริมาณคาร์บอนประเภทนี้ในรูปของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้เช่นกันคาร์บอนในธรรมชาติจะมีอยู่ด้วยกัน 2 สถานะ คือ อยู่ในรูปสารประกอบอินทรีย์ และ สารอนินทรีย์ โดยทั่วไปคาร์บอนรูปสารประกอบอินทรีย์ จะเป็นคาร์บอนที่พบในผลิตภัณฑ์ธรรมชาติ หรือได้จากการย่อย

สลายของสารอินทรีย์ หรือได้จากการสังเคราะห์ของมนุษย์ ส่วนคาร์บอนในรูปของสารอินทรีย์ ที่พบอยู่ในน้ำจะอยู่ในรูปของ $\text{CO}_3^{2-}/\text{HCO}_3^-$ และเมื่อ CO_2 อยู่ในสภาวะกรด CO_2 จะสามารถละลายได้ เครื่องมือ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ หาปริมาณคาร์บอนในสารอินทรีย์ในตัวอย่างน้ำหรือที่อยู่ในรูปของแข็ง มีองค์ประกอบหลักด้วยกันดังต่อไปนี้

1. Sampling introduction คือ ส่วนนำสารตัวอย่างเข้าไปในระบบการวิเคราะห์ ได้แก่ Loop sampling, Syringe, Autosampler เป็นต้น
2. Reaction คือ ส่วนของการทำปฏิกิริยาเคมีเพื่อให้เกิดก๊าซ CO_2 หลังจากนั้นทำการวัด CO_2 ที่เกิดขึ้นปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นแบ่งได้ 2 แบบคือ ปฏิกิริยา Wet Oxidation และปฏิกิริยา Combustion
3. Detection หรือ Detector คือ ส่วนที่วัดค่า CO_2 ที่เกิดขึ้นหลังจากการทำ ปฏิกิริยา หรือ อ่านค่าของความเป็นกรดที่เกิดขึ้นซึ่งมี Detector ให้เลือกหลายแบบ เช่น Detector แบบ NDIR (Non dispersive Infrared) ใช้วัด CO_2 หรือ Columetric ใช้วัดค่าความเป็นกรด เป็นต้น
4. Display คือ ส่วนรายงานผลของข้อมูลการวิเคราะห์ที่สามารถรายงานอยู่ในรูปของรายงานต่างๆ เช่น เป็นข้อมูลต่างๆ เป็นกราฟได้ เป็นต้นหรือบันทึกข้อมูลต่างๆ



รูปที่ 2.9 รูปแบบเครื่องมือของเครื่องวิเคราะห์ TOC

2.9 การสำรวจเอกสารงานวิจัย

ในปี ค.ศ. 2009 L. Wang และ X. Jiang [6] ได้ศึกษาผลของเกลือของเหล็กในการย่อยสลายฟีนอลด้วยเทคนิค glow discharge plasma จากการศึกษาพบว่า Fe^{3+} ให้ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีกว่า Fe^{2+} เนื่องจากในการย่อยสลายฟีนอลด้วยเทคนิค Glow Discharge Plasma จะสร้างหมู่ไอโอดีนไฮดรอกซิลและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์พร้อมกัน จากนั้นหมู่ไอโอดีนไฮดรอกซิลที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับฟีนอล เกิดเป็นหมู่ไอโอดีน dihydroxycyclohexadienyl ซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยากับ Fe^{3+} จะเกิดเป็น Fe^{2+} และ Fe^{2+} จะสามารถทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เกิดเป็นอนุมูลไฮดรอกซิลซึ่งหมู่ไอโอดีน dihydroxycyclohexadienyl จะทำปฏิกิริยากับ Fe^{2+} และเกิดเป็นอนุมูลไฮดรอกซิลโดยตรง ซึ่งเห็นได้ว่า Fe^{3+} นั้นเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีกว่า Fe^{2+} ในการย่อยสลายฟีนอลและปริมาณของเกลือของเหล็กส่งผลต่อการย่อยสลายฟีนอล ซึ่งปริมาณเกลือของเหล็กที่น้อยกว่าจะส่งผลให้อัตรา

การย่อยสลายพีนอลได้สูง เนื่องจากปริมาณของเกลือของเหล็กที่มากเกินไปรวมตัวกับ OH^{\cdot} ทำให้โอกาสการจับตัวของหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลกับพีนอลน้อยลง

ในปี ค.ศ. 1997 C. Jian และคณะ [20] ได้ศึกษาการกำจัดพีนอล และลดค่า COD ในน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมด้วยโฟโตเคมี (Photochemical) ซึ่งเป็นการใช้ร่วมกับแสงอุลตราไวโอเลตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และสารประกอบเฟอร์ริก จากการศึกษาพบว่า สามารถลดค่า COD ของน้ำเสียได้ประมาณ 60 – 70 % ในเวลา 1 – 4 ชั่วโมง แต่จะขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำเสียด้วย โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต่างกัน เช่น แสงอุลตราไวโอเลต เหล็กออกไซด์ อลูมิเนียมออกไซด์ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เพื่อใช้ในการสลายพีนอลในสารละลาย นอกจากนี้ยังพบว่าแคลเซียมออกไซด์ สามารถช่วยในการกำจัดพีนอล โดยที่แคลเซียมออกไซด์จะช่วยขัดขวางการลดลงของค่า pH เนื่องจากแคลเซียมออกไซด์จะละลายอย่างต่อเนื่องในระหว่างทำปฏิกิริยา

ในปี ค.ศ. 2000 K.Y. Whan และ H. Kyung-Yub [21] ได้ศึกษาถึงประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของแหล่งน้ำใต้ดินจากแหล่งทิ้งขยะของเมืองคิมโป ประเทศเกาหลี จากการวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัดโดยการออกซิเดชัน และการตกตะกอนโดยสารเคมีเฟนต์ัน (Fenton's reagent) พบว่า การลดลงของค่า COD โดยการตกตะกอนจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเพอร์สซัลเฟต อย่างไรก็ตามค่า COD จะไม่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่อปริมาณเพอร์สซัลเฟตมีค่าสูงกว่า 500 mg/L นอกจากนี้ยังพบว่า H_2O_2 จะเสถียรในช่วง pH 3-4 แต่อัตราการแตกตัวจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อ pH มากกว่า 5 ดังนั้นช่วงของ pH ที่เหมาะสมสำหรับการลดค่า COD โดยใช้วิธีการทำให้เกิดการรวมตัวกันจะอยู่ในช่วง pH 3-6 และพบว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถออกซิไดซ์ไอออนไนไตรต์เป็นไอออนไนเตรทได้อย่างสมบูรณ์เมื่อเปรียบเทียบกับออกซิเจน เนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีความสามารถในการออกซิไดซ์ได้มากกว่าออกซิเจน

ในปี ค.ศ. 2001 M.Y. Ghaly และคณะ [22] ได้ศึกษาการใช้กระบวนการโฟโตออกซิเดชันขั้นสูง (Photochemical Advanced Oxidation Processes, AOPs) และ PhotoFenton reaction เพื่อย่อยสลาย *p*-Chlorophenol พบว่า Photo-Fenton reaction ซึ่งใช้ Fe^{2+} และ Fe^{3+} เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อทำปฏิกิริยากับ H_2O_2 พบว่ากระบวนการดังกล่าวเป็นการบำบัดที่มีประสิทธิภาพสามารถช่วยลดอัตราการก่อตัวของ *p*-Chlorophenol และยังพบว่า Photo-Fenton reaction เป็นปฏิกิริยาที่ขึ้นอยู่กับค่า pH ความเข้มข้นของ H_2O_2 เริ่มต้น ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาและชนิดของเกลือของเหล็ก นอกจากนี้ยังพบว่าที่ความเข้มข้นของ H_2O_2 มากกว่า 0.02 mol/L และ pH มากกว่า 4 จะทำให้อัตราการย่อยสลาย *p*-Chlorophenol ลดลง เนื่องจากที่ค่า pH สูงจะส่งผลให้เกิดการตกตะกอนของเหล็ก นอกจากนี้ถ้ามีปริมาณเกลือของเหล็กมากเกินไป จะส่งผลให้น้ำมีสีน้ำตาลขุ่นและยังส่งผลให้เกิดการรวมตัวกันของอนุมูลไฮดรอกซิลแทนการจับตัวกับสารประกอบอินทรีย์ต่างๆในน้ำ ดังนั้นควรใช้เกลือของไอออนเหล็กในปริมาณที่เหมาะสม เพื่อหลีกเลี่ยงการรวมกันกับอนุมูลไฮดรอกซิลและช่วยลดการเกิดตะกอน

ในปี ค.ศ. 2004 Y.S. Chen และคณะ [23] ได้ศึกษาพลาสมาแรงดันไฟฟ้าชนิดพัลส์สำหรับการย่อยสลายของสารละลายฟีนอล โดยทำการทดลองใน batch reactor แบบอนุกรมที่มีพบว่า การกำจัดฟีนอลมีผลของพารามิเตอร์ต่างๆที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดฟีนอล จากการศึกษาผลของแรงดันไฟฟ้า พบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดสามารถเพิ่มความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าของสารละลายทำให้ อิเล็กตรอนมีพลังงานสูงทำให้โมเลกุลของน้ำแตกตัวเป็น OH^{\cdot} H_2O_2 และ O_3 ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ ฟีนอลทำให้ฟีนอลมีการสลายตัวและอัตราการเกิดของพัลส์เป็นสัดส่วนโดยตรงกับพลังงาน สนามไฟฟ้าของสารละลาย แสดงให้เห็นว่าอัตราการเกิดซ้ำของพัลส์สามารถเพิ่มปริมาณและพลังงาน ของอิเล็กตรอนให้สูงขึ้นได้และจะทำให้โมเลกุลของน้ำแตกตัวเป็นพวก OH^{\cdot} H_2O_2 และ O_3 จำนวน มาก ผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอิเล็กโทรดและระยะห่างระหว่างเข็มและแผ่น plate โดยที่ ขนาดของขั้วอิเล็กโทรดและระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดมีผลต่อการกำจัดฟีนอล เนื่องจาก ระยะห่างน้อยจะง่ายในการสร้างพลาสมาและมีพลังงานสูง ทำให้การกำจัดฟีนอลได้ดีกว่าระยะห่าง มากจากการศึกษาผลของค่า pH และการนำไฟฟ้าของสารละลายในการกำจัดฟีนอล พบว่าที่ค่า pH สูงจะมีอัตราการย่อยสลายที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับค่า pH ต่ำ เนื่องจากที่ค่า pH สูงจะมีการสลาย โอโซนได้ดีกว่าค่า pH ต่ำ โดยที่โอโซนจะไปทำปฏิกิริยากับน้ำทำให้เกิดเป็น OH^{\cdot} ส่งผลให้เกิดการ ย่อยสลายฟีนอลได้ดีกว่าค่า pH ต่ำ

ในปี ค.ศ. 2006 M. Sahni และ B.R. Locke [24] ได้ศึกษาถึงแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่ถูกปล่อย ในของเหลวและในแก๊สเฟส ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการบำบัดน้ำได้ ซึ่งหมว่องไวที่เกิดขึ้นใน การบำบัดโดยวิธีนี้คือ OH^{\cdot} และ H^{\cdot} และยังเกิดโมเลกุล H_2O_2 , H_2 , O_2 และ O_3 ในการตรวจวัดนั้น สามารถทำได้โดยเทคนิคอย่างง่าย 2 เทคนิค คือ เทคนิค fluorescence และ เทคนิค UV spectroscopy โดยที่เทคนิคแรกใช้ dimethyl sulfoxide (DMSO) และเทคนิคที่สองใช้ disodium salt of terephthalic acid (NaTA) จากการทดลองพบว่า เมื่อทำการทดลองที่เวลาผ่านไปจะทำให้ ปริมาณความเข้มข้นของ OH^{\cdot} เพิ่มขึ้น การป้อนแรงดันไฟฟ้าสูงจะสามารถสร้าง OH^{\cdot} ได้มากกว่า เมื่อ เปรียบเทียบกับที่แรงดันไฟฟ้าต่ำ เมื่อเปรียบเทียบในการตรวจวัดทั้ง 2 วิธี ในระบบที่ใช้ DMSO จะ พบอัตราการเกิด OH^{\cdot} ที่สูงกว่าการใช้ NaTA และส่งผลทำให้การกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำสูงกว่าด้วย

ในปี ค.ศ. 2007 K. Gai [25] ได้ทำการศึกษา การย่อยสลายของสารละลายไคเฟนิลเอมีนด้วย พลาสมา พบว่าในการย่อยสลายไคเฟนิลเอมีนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการย่อยสลายสูงขึ้น อัตราการ ย่อยสลายเพิ่มขึ้นเมื่อค่า pH อยู่ในช่วงระหว่าง 4.0 – 6.0 อย่างไรก็ตามอัตราการย่อยสลายจะลดลง เมื่อค่า pH เปลี่ยนแปลงเป็น 6.0 – 9.0 ค่า pH ที่มีอัตราการย่อยสลายไคเฟนิลเอมีนสูงสุดคือ pH 6.0 ผลของการเติม Fe^{2+} พบว่าอัตราการย่อยสลายของไคเฟนิลเอมีนเพิ่มขึ้น ซึ่งชี้ให้เห็นว่า Fe^{2+} เป็น ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดี ในขณะที่เดียวกันผลของการเกิดขึ้นของ H_2O_2 มีผลต่อการกำจัดไคเฟนิลเอมีน โดย พบว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณ H_2O_2 สามารถเพิ่มอัตราการย่อยสลายของไคเฟนิลเอมีนได้มากขึ้นที่ ปริมาณของ H_2O_2 10 mg/L แสดงให้เห็นว่าปริมาณ H_2O_2 มีผลทำให้ความเข้มข้นของไคเฟนิลเอมีน

ลดลง การเกิดขึ้นของ n-butanol จะประพุดิตัวเป็นสารยับยั้งการย่อยสลายของโดเฟนิลเอมีน เนื่องจาก n-butanol มีการใช้ อนุมูลไฮดรอกซิลร่วมกันกับโดเฟนิลเอมีน จึงทำให้อัตราการย่อยสลายโดเฟนิลเอมีนลดลง

ในปี ค.ศ. 2008 L. Wang และคณะ [26] ได้ศึกษาการย่อยสลาย bisphenol A และศึกษาการเพิ่มขึ้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ด้วยเทคนิค Glow Discharge Plasma bisphenol A เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิด polycarbonate และ epoxyresins ซึ่งส่งผลทำให้น้ำเสียและเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต กระบวนการพลาสมาได้ถูกนำมาพัฒนาเพื่อกำจัดสารพิษที่เป็นอันตรายที่อยู่ในน้ำ ด้วยการใช้เทคนิค Glow Discharge Plasma โดยการให้ไฟฟ้ากระแสตรงผ่านขั้ว electrode โดยค่า Voltage จะใช้ตั้งแต่ 400 V ขึ้นไป จากการศึกษาพบว่า การย่อยสลายของ bisphenol A จะเกิดได้ดีที่ electrolytic solution เป็น NaCl และมีการก่อดังของ H_2O_2 ดีกว่า Na_2SO_4 และ Na_2HPO_4 และยังพบว่าในน้ำเสียโดยทั่วไปจะมีสารอินทรีย์ที่ใช้หมู่วองไว ทำให้อัตราการย่อยสลายของ bisphenol A ลดลง เมื่อเทียบกับน้ำเสียที่ bisphenol A เพียงอย่างเดียว เกลือของเหล็กมีผลต่อการย่อยสลาย bisphenol A โดยที่ Fe^{3+} ให้ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีกว่า Fe^{2+} และทำให้ปริมาณของเกลือของเหล็กมีผลต่อการย่อยสลายด้วยเช่นกัน ปริมาณของเกลือของเหล็กที่มากเกินไปจะส่งผลทำให้การย่อยสลายฟีนอลเกิดขึ้นได้น้อย

ในปี ค.ศ. 2013 G. Qu และคณะ [27] ได้ศึกษาการกำจัดไอออนแคดเมียมและฟีนอลในน้ำ ด้วยเทคนิค pulsed corona discharge plasma (PCDP) ร่วมกับถ่านกัมมันต์ จากการศึกษาพบว่า การประยุกต์พลาสมาพร้อมกับถ่านกัมมันต์สามารถกำจัด Cd^{2+} และฟีนอลได้พร้อมกันหลังจากผ่านการบำบัดเป็นเวลา 60 นาที โดยที่ลดปริมาณ Cd^{2+} และฟีนอลได้ 69.0 % และ 87.3 % ตามลำดับ และพบว่าการกำจัด Cd^{2+} และฟีนอลภายใต้แรงดันพัลส์ที่แตกต่างกันส่งผลต่อการกำจัด Cd^{2+} และฟีนอลที่แรงดันพัลส์สูงจะให้อัตราการกำจัด Cd^{2+} และฟีนอลได้ดีกว่าแรงดันพัลส์ต่ำ และถ่านกัมมันต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถย่อยสลาย H_2O_2 และ O_3 ให้ผลิตภัณฑ์เป็นหมู่วองไว ซึ่งส่งผลทำให้มีประสิทธิภาพการกำจัดสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าความเข้มข้นเริ่มต้นที่แตกต่างกันมีผลต่อการกำจัด Cd^{2+} และฟีนอล โดยที่ความเข้มข้นเริ่มต้นสูง จะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดฟีนอลลดลง เมื่อเทียบกับความเข้มข้นเริ่มต้นที่ต่ำ เนื่องจากพลังงานที่ป้อนเข้าไปมีปริมาณเท่าเดิมแต่จำนวนโมเลกุลของฟีนอลเพิ่มขึ้นทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัด Cd^{2+} และฟีนอลลดลง

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

3.1 สารเคมีและอุปกรณ์

3.1.1 ฟีนอล

3.1.2 โซเดียมไฮดรอกไซด์

3.1.3 น้ำกลั่น

3.1.4 เครื่องกำเนิดพลาสมาวิทยุภาคของเหลว

3.1.5 ขั้วอิเล็กโทรด 3 ชนิด คือ เหล็ก ทองแดง และทังสเตน

3.1.6 เครื่องปั่นกวนสาร (Magnetic stirrer)

3.1.7 High Performance Liquid Chromatography (HPLC)

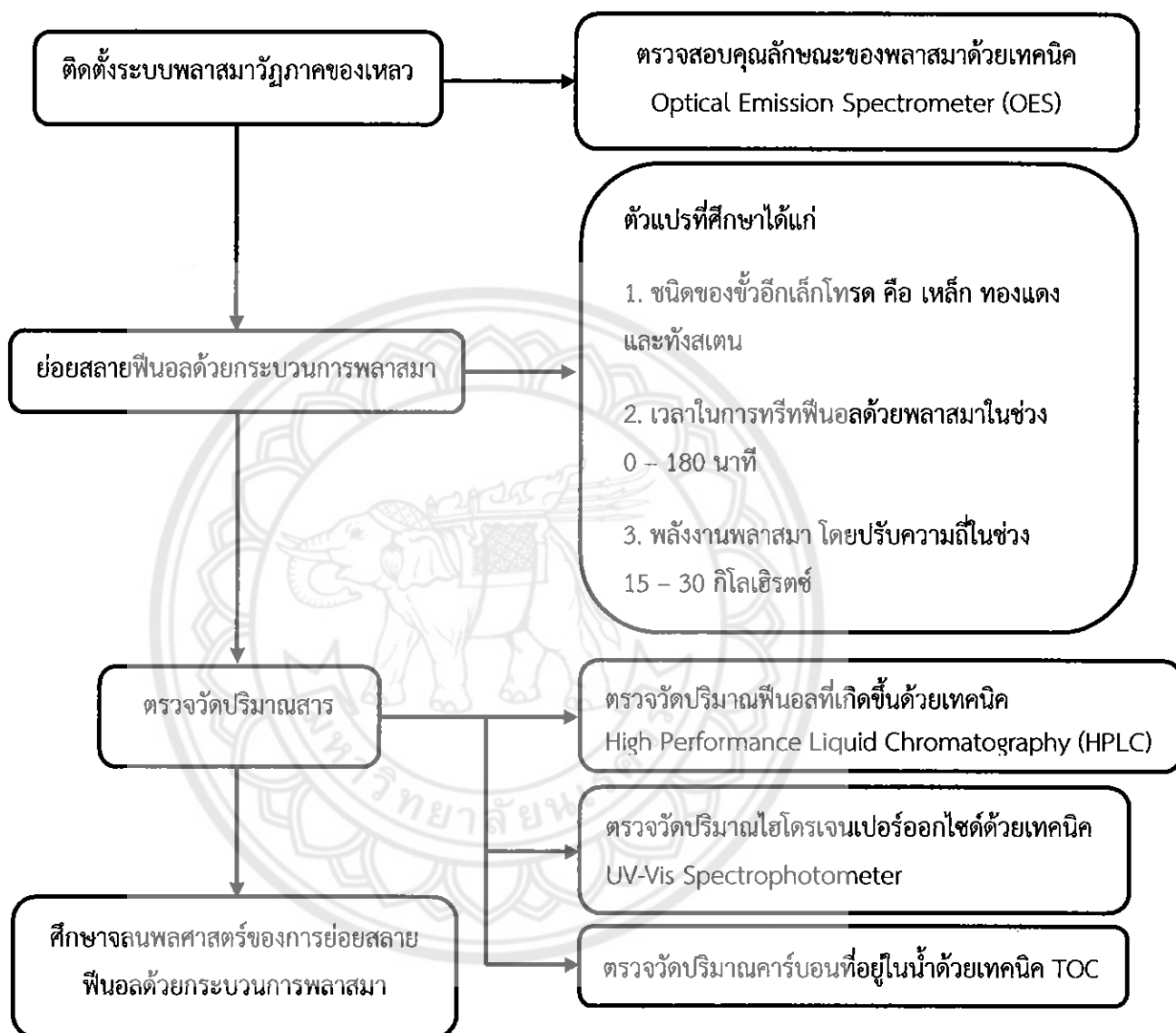
3.1.8 Optical Emission Spectrometer (OES)

3.1.9 UV-Vis spectrophotometer



3.2 วิธีการทดลอง

ในการศึกษาการย่อยสลายสารละลายพินอลที่ผสมอยู่ในน้ำมีขั้นตอนในการย่อยสลาย ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.1 โดยมีรายละเอียดขั้นตอนการย่อยสลายดังนี้



รูปที่ 3.1 แผนผังกระบวนการย่อยสลายพินอล

3.2.1 การติดตั้งระบบพลาสมาวัฏภาคของเหลวและการตรวจวัดคุณสมบัติของพลาสมา

การติดตั้งระบบเครื่องกำเนิดพลาสมาวัฏภาคของเหลวแสดงในรูปที่ 3.2 พลาสมาจะถูกผลิตขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมาที่ทำจากแก้ว โดยเกิดขึ้นระหว่างขั้วอิเล็กโทรดแบบเข็ม (Needle electrodes) ซึ่งทำจากวัสดุชนิดต่างๆ อาทิ ทองแดง ทองแดงและเหล็ก ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดประมาณ 0.2 มิลลิเมตร ในการผลิตพลาสมาจะเชื่อมต่ออิเล็กโทรดทั้งสองเข้ากับพาวเวอร์ซัพพลายระบบไฟฟ้ากระแสตรงแบบพัลส์ ในการตรวจวัดคุณสมบัติ

ของพลาสมาจะใช้เทคนิค Optical Emission Spectrometer (OES) โดยนำหัววัดมาจ่อตรงแสงพลาสมา ขณะทำการทรีทสารละลายพินอลด้วยพลาสมา เพื่อวัดระดับการเปล่งแสง ผลที่ได้จากการวัดจะแสดงในรูปของกราฟแสดงพีคในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ ซึ่งสามารถนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลอ้างอิงเพื่อระบุชนิดของหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการพลาสมา [16]



รูปที่ 3.2 อุปกรณ์กำเนิดพลาสมาวัฏภาคของเหลว

3.3.2 การย่อยสลายพินอลด้วยพลาสมาวัฏภาคของเหลว

เตรียมสารละลายพินอลที่มีความเข้มข้น 100 ppm จากนั้นนำสารละลายพินอลที่เตรียมได้ปริมาณ 120 มิลลิลิตร มาทรีทด้วยพลาสมา ในการทรีทด้วยพลาสมาจะใช้ขั้วอิเล็กโทรดต่างกัน 3 ชนิด คือ เหล็ก ทองแดง และทังสเตน ระยะเวลาในการทรีทในช่วง 0 ถึง 180 นาที ความต่างศักย์ในการผลิตพลาสมา 3 กิโลโวลต์ ความถี่ของเครื่องกำเนิดพลาสมาในช่วง 15 ถึง 30 กิโลเฮิร์ตซ์ และ Pulse width 3 ไมโครเซคคัน ในระหว่างการย่อยสลายพินอลด้วยพลาสมาจะทำการปั่นกวนสารด้วยอุปกรณ์กวนผสมสาร (Magnetic Stirrier) เพื่อเพิ่มการสัมผัสกันระหว่างพินอลกับพลาสมา สารละลายพินอลที่ผ่านการทรีทด้วยพลาสมาแล้วจะถูกนำไปตรวจวัดปริมาณพินอลต่อไป

3.3 การวิเคราะห์ปริมาณสาร

3.3.1 การวัดปริมาณพินอลด้วยเทคนิค HPLC

นำสารละลายพินอลที่ได้จากการย่อยสลายพินอลมาทำการวัดปริมาณพินอลด้วยเครื่อง HPLC โดยใช้คอลัมน์ชนิด reverse phase C_{18} โดยมีสารละลายอะซิโตนในไตรล์ต่อน้ำปริมาณ 40 ต่อ 60 (ปริมาตร/ปริมาตร) เป็นเฟสเคลื่อนที่ โดยมีอัตราการไหลของสาร 0.8 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณพินอลที่อยู่ในสารละลายตัวอย่างจะถูกตรวจวัดด้วยเครื่องตรวจจับสัญญาณ Refractive index จากนั้นนำข้อมูลของพินอลที่ตรวจวัดได้มาคำนวณเชิงปริมาณโดยเทียบกับกราฟมาตรฐานที่เตรียมได้จากสารละลายพินอล [18] จากนั้นนำข้อมูลมาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายพินอลจากสมการ

$$\text{เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายฟีนอล} = \frac{\text{ฟีนอลเริ่มต้น} - \text{ฟีนอลที่เหลืออยู่}}{\text{ฟีนอลเริ่มต้น}} \times 100$$

3.3.2 การวัดปริมาณการเกิดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

นำสารละลายที่ผ่านการทรีทด้วยพลาสมาวิฤภาคของเหลวมาวัดปริมาณการเกิดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ [6] ด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer โดยนำสารละลายที่ผ่านการทรีท ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ผสมเข้ากับไทเทเนียมซัลเฟตปริมาตร 2 มิลลิลิตร และเติมน้ำจนได้ปริมาตร 10 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปตรวจสอบค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายที่ได้จากการตรวจสอบด้วยเครื่อง UV-Vis จะนำไปใช้เปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานจากสารละลายมาตรฐาน เพื่อหาปริมาณการเกิดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นในสารละลายหลังจากผ่านการทรีทด้วยพลาสมาวิฤภาคของเหลว

3.3.3 การศึกษาจลนพลศาสตร์และอัตราการย่อยสลายฟีนอล

โดยทั่วไปแล้วอัตราการย่อยสลายฟีนอลด้วยพลาสมาการเกิดปฏิกิริยาเป็นอันดับหนึ่ง (1st Order reaction) [19] โดยมีสมการดังต่อไปนี้

$$C = C_0 e^{-kt}$$

เมื่อ

C = ปริมาณสารละลายฟีนอลที่ผ่านการทรีทที่เวลาใดๆ

C_0 = ปริมาณสารละลายฟีนอลตั้งต้น

k = ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (min^{-1})

t = เวลาที่ใช้ในการทรีทด้วยพลาสมา (min)

เมื่อทำการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเกิดปฏิกิริยากับค่าความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลที่ผ่านการทรีทที่เวลาใดๆต่อค่าความเข้มข้นของละลายฟีนอลตั้งต้น ความชันที่ได้จะบอกถึงค่าคงที่อัตราการย่อยสลายฟีนอล (Rate constant) [23]

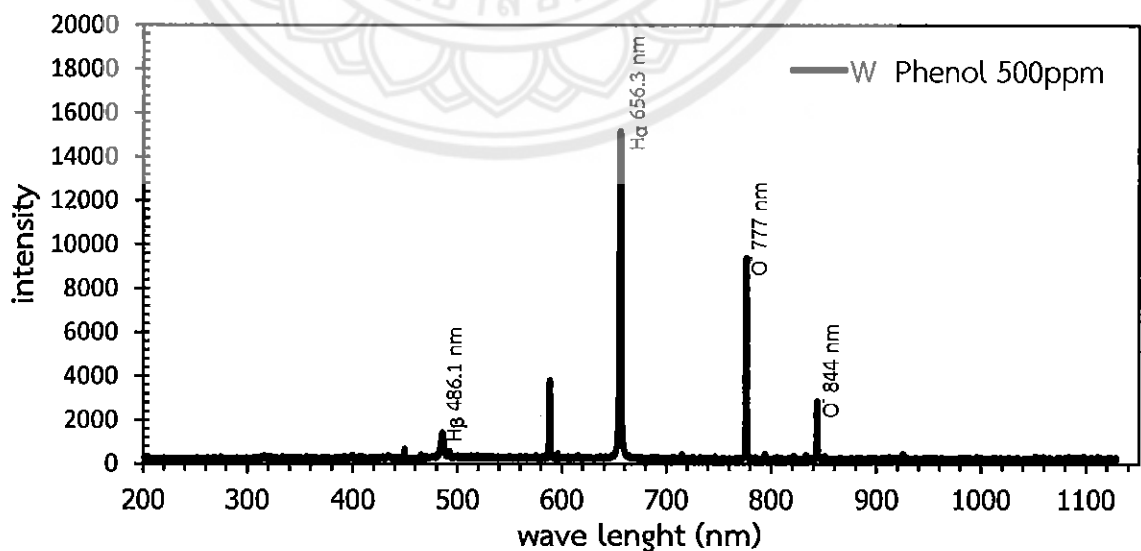
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

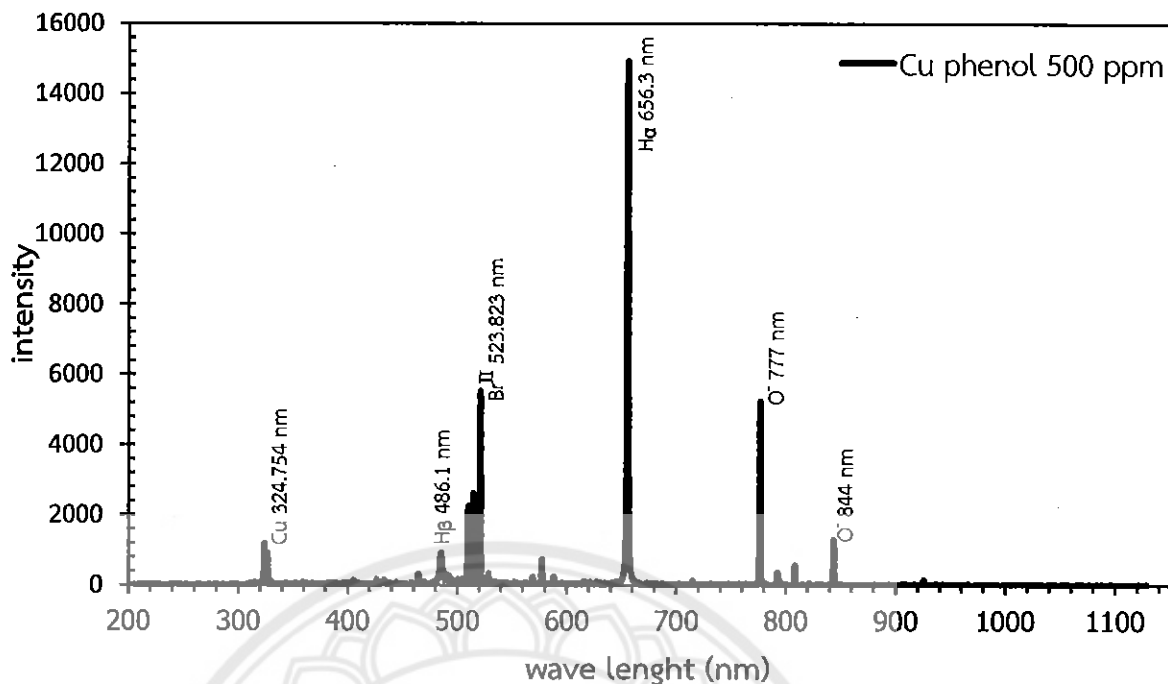
จากการศึกษาผลของสภาวะพลาสมาวัฏภาคของเหลวที่มีต่อเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายพีนอล ใน การศึกษานี้ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายพีนอล คือชนิดของขั้วอิเล็กโทรด 3 ชนิด ได้แก่ ทั้งสแตน เหล็ก และทองแดง เวลาที่ใช้ในการย่อยสลาย 0 - 180 นาที และการปรับ ความถี่ของเครื่องกำเนิดพลาสมาที่ 15 22.5 และ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยภายหลังจากการทำทดลอง แล้วได้นำผลที่ได้ไปทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ซึ่งผลที่ได้เป็นดังต่อไปนี้

4.1 คุณสมบัติของพลาสมาที่เกิดของจากขั้วอิเล็กโทรดแต่ละชนิด

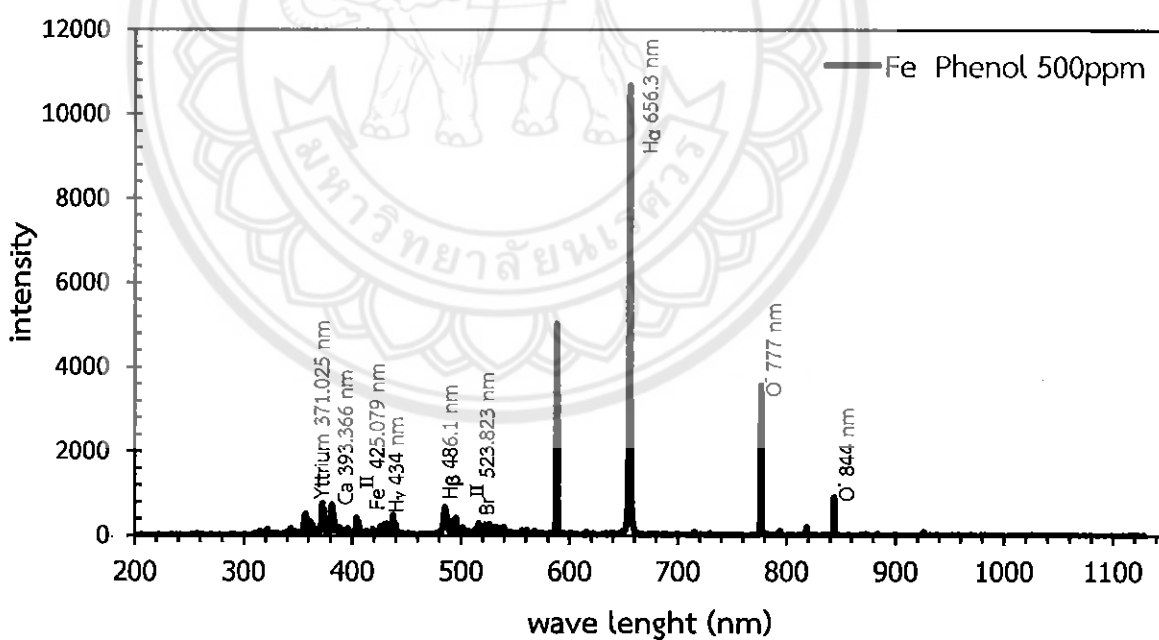
จากหลักการเกิดพลาสมาวัฏภาคของเหลวโดยอาศัยหลักความต่างศักย์ทางไฟฟ้าโดยมีการ ป้อนกระแสให้กับระบบโดยเครื่องพาวเวอร์ซัพพลายที่เชื่อมต่อกับขั้วอิเล็กโทรดที่ติดตั้งอยู่ในเครื่อง ปฏิกรณ์พลาสมาเมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขั้วอิเล็กโทรดโดยความถี่ของกระแสสูงส่งผลทำให้อะตอม ของธาตุหลุดออกจากขั้วอิเล็กโทรด ทั้งนี้ในระบบอาจจะตรวจพบอะตอมของธาตุชนิดอื่นๆ ที่เจือปน อยู่ในสารละลายพีนอล รวมถึงธาตุต่างๆ ที่ถูกปลดปล่อยเนื่องจากพลังงานของพลาสมาที่เกิดขึ้นใน สารละลายพีนอล เช่น อะตอมธาตุของไฮโดรเจน และอะตอมของออกซิเจน โดยสามารถตรวจสอบ อะตอมของธาตุต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมาได้ด้วยเทคนิค OES โดยจะแสดงให้เห็น ถึงลักษณะของอะตอมธาตุที่เกิดขึ้นในรูปแบบของพีคในตำแหน่งของความยาวคลื่นที่ตำแหน่งต่างๆ ดังรูปที่ 4.1 4.2 และ 4.3



รูปที่ 4.1 แสดงคุณสมบัติของพลาสมาที่เกิดจากขั้วอิเล็กโทรดทั้งสแตนที่ความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์ ด้วยเทคนิค OES



รูปที่ 4.2 แสดงคุณลักษณะของพลาสมาที่เกิดจากข้อผิดพลาดของแสงที่มีความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์ ด้วยเทคนิค OES



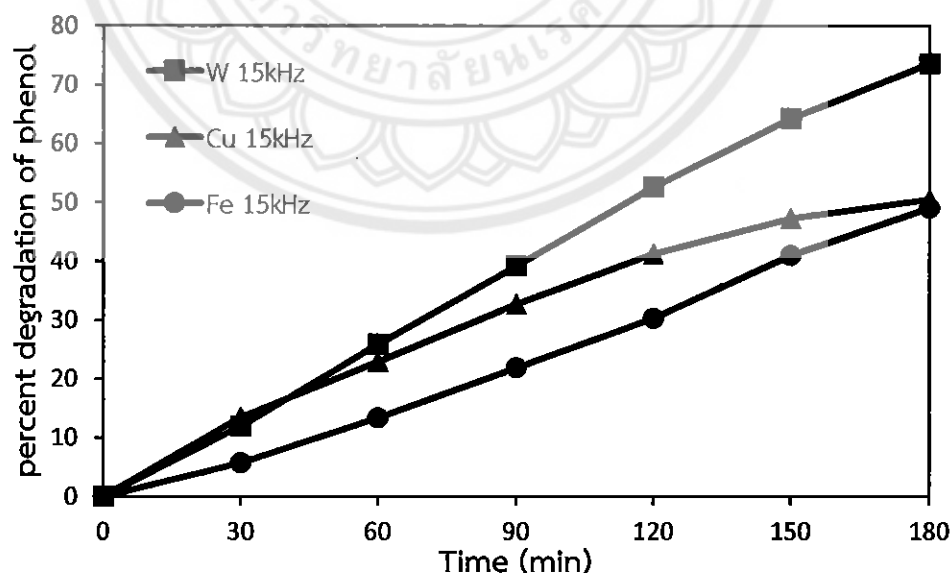
รูปที่ 4.3 แสดงคุณลักษณะของพลาสมาที่เกิดจากข้อผิดพลาดที่ความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์ ด้วยเทคนิค OES

จากรูปที่ 4.1 4.2 และ 4.3 แสดงให้เห็นถึงพีคของอะตอมธาตุที่เกิดขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมาที่ตำแหน่งความยาวคลื่นแสงต่างๆของข้อผิดพลาด ทั้งสแตน ทองแดง และเหล็ก ตามลำดับ โดยอะตอมธาตุที่เกิดจากการดิซซาร์จของพลาสมาวิฤภาคของเหลวคือ Hα ที่มีการปลดปล่อยแสงที่ความยาวคลื่นแสงที่ 656.3 นาโนเมตร Hβ ที่ตำแหน่งความยาวคลื่นแสงที่ 486.1 นาโนเมตร และ O

ที่ตำแหน่งความยาวคลื่นแสงที่ 777 และ 844 นาโนเมตร จะเห็นได้ว่าทั้ง 3 ขั้วอิเล็กโทรดจะเกิดอะตอมธาตุของ H α H β และ O เหมือนกันเนื่องจากในสารละลายฟีนอลมีส่วนประกอบของน้ำเมื่อเกิดการดีซาร์จด้วยพลาสมาเกิดขึ้นส่งผลทำให้โมเลกุลของน้ำเกิดการแตกตัวออกเป็นอะตอมของไฮโดรเจน และอะตอมของออกซิเจน สามารถตรวจสอบได้โดยการวัดค่าการปลดปล่อยแสงด้วยเทคนิค OES ในสารละลายฟีนอลที่มีการทรีตด้วยขั้วอิเล็กโทรดทองแดง จากการตรวจสอบพบว่าในสารละลายฟีนอลมี Cu อยู่โดยมีค่าการปล่อยแสงที่ 324.754 นาโนเมตร และพบอะตอมของสิ่งเจือปนคือ Br^{II} 253.823 นาโนเมตร และเมื่อทำการทรีตสารละลายฟีนอลด้วยขั้วอิเล็กโทรดเหล็กพบว่าในสารละลายฟีนอลมีอะตอมของ Fe^{II} อยู่ โดยมีค่าการปล่อยแสงที่ 425.079 นาโนเมตร ทั้งนี้ยังพบอะตอมอื่น ๆ ที่เป็นสิ่งเจือปนมาในสารละลายนี้คือ Yttrium 371.025 นาโนเมตร Ca 393.366 นาโนเมตร H γ 434 นาโนเมตร และ Br^{II} 523.823 นาโนเมตร ดังนั้นจากผลการตรวจสอบคุณลักษณะของพลาสมาด้วยเทคนิค OES สำหรับกระบวนการพลาสมาวิฤภาคของเหลว สามารถสรุปได้ว่า พลาสมามีคุณสมบัติที่สามารถทำให้เกิดอะตอมเหล่านี้ได้ ซึ่งอะตอมบางตัวนั้นมีคุณสมบัติที่สามารถย่อยสลาย ฟีนอลได้ซึ่งจะสอดคล้องกับผลการทดลองอื่นๆที่ได้จากการทดลองในการย่อยสลายฟีนอลต่อไป

4.2 ผลของชนิดอิเล็กโทรดที่มีผลต่อการย่อยสลายฟีนอล

จากการศึกษาเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายฟีนอลด้วยกระบวนการพลาสมาวิฤภาคของเหลวของขั้วอิเล็กโทรดทั้งสามชนิดคือ ทั้งสแตน เหล็ก และทองแดง ที่ค่าความถี่พลาสมา 15 กิโลเฮิร์ตซ์ หลังผ่านการทรีต 180 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.4

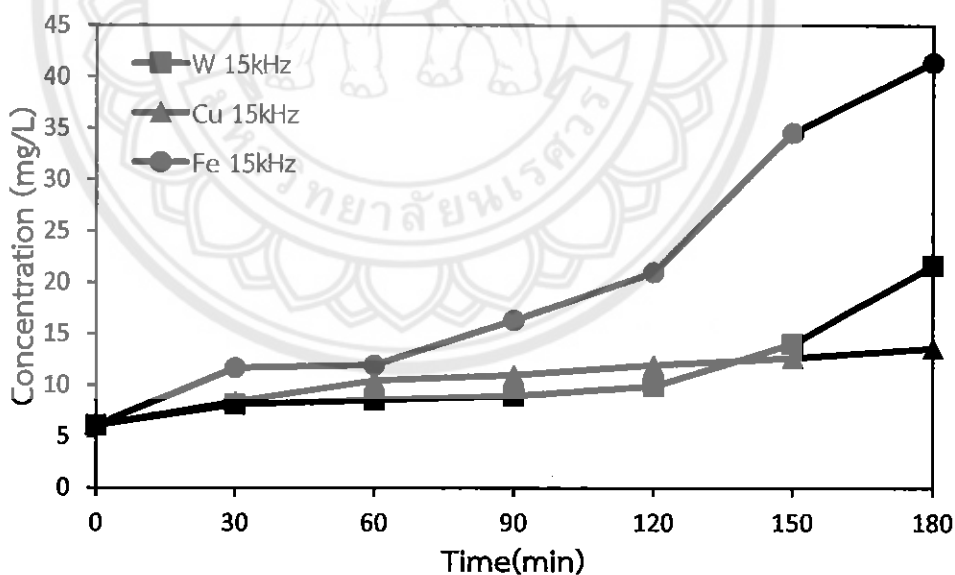


รูปที่ 4.4 เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายฟีนอลของขั้วอิเล็กโทรดแต่ละชนิดที่ความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์

จากการศึกษาเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายฟีนอลของขั้วอิเล็กโทรดทั้งสามชนิดคือ เหล็ก ทองแดง และสแตน ที่ความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.4 พบว่าเปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย

ฟีนอลด้วยกระบวนการพลาสมาวัฏภาคของเหลวที่ใช้ขั้วอิเล็กโทรดที่เป็นทั้งสแตนมีเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับ ทองแดง และเหล็ก เนื่องจากทั้งสแตนมีความเหมาะสมกับสภาพระบบที่เป็นฟีนอลจึงทำให้สามารถย่อยสลายฟีนอลได้ดีเนื่องจากทั้งสแตนสามารถเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ให้เป็นไฮดรอกซิลเรดิคัลได้ดีเมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กและทองแดง เพราะไฮดรอกซิลเรดิคัลนั้นเป็นตัวสำคัญที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับฟีนอลเพื่อลดปริมาณความเข้มข้นของฟีนอลลง ในส่วนของขั้วอิเล็กโทรดที่เป็นเหล็กพบว่าเฟอร์รัสไอออนที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่สำคัญในการย่อยสลายฟีนอล [8] ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ดีเนื่องจากสภาวะระบบมีค่า pH สูงจึงทำให้ไม่เหมาะสมกับการเกิดเฟอร์รัสไอออน [28] ส่งผลทำให้เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายฟีนอลที่ได้มีค่าเปอร์เซ็นต์ที่ต่ำ และในส่วนของขั้วอิเล็กโทรดที่เป็นทองแดงก็มีผลลักษณะเช่นเดียวกับขั้วอิเล็กโทรดที่เป็นเหล็กจึงส่งผลทำให้เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายฟีนอลมีค่าที่ต่ำ และผลของอุณหภูมิมีผลต่อการย่อยสลายฟีนอลน้อยมากเนื่องจากอุณหภูมิในระบบพลาสมาวัฏภาคของเหลวในการย่อยสลายฟีนอลมีอุณหภูมิประมาณ 70 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิของการสลายตัวของฟีนอลอยู่ที่ 210 – 310 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิในระบบไม่ส่งผลทำให้ฟีนอลเกิดการสลายตัว [29]

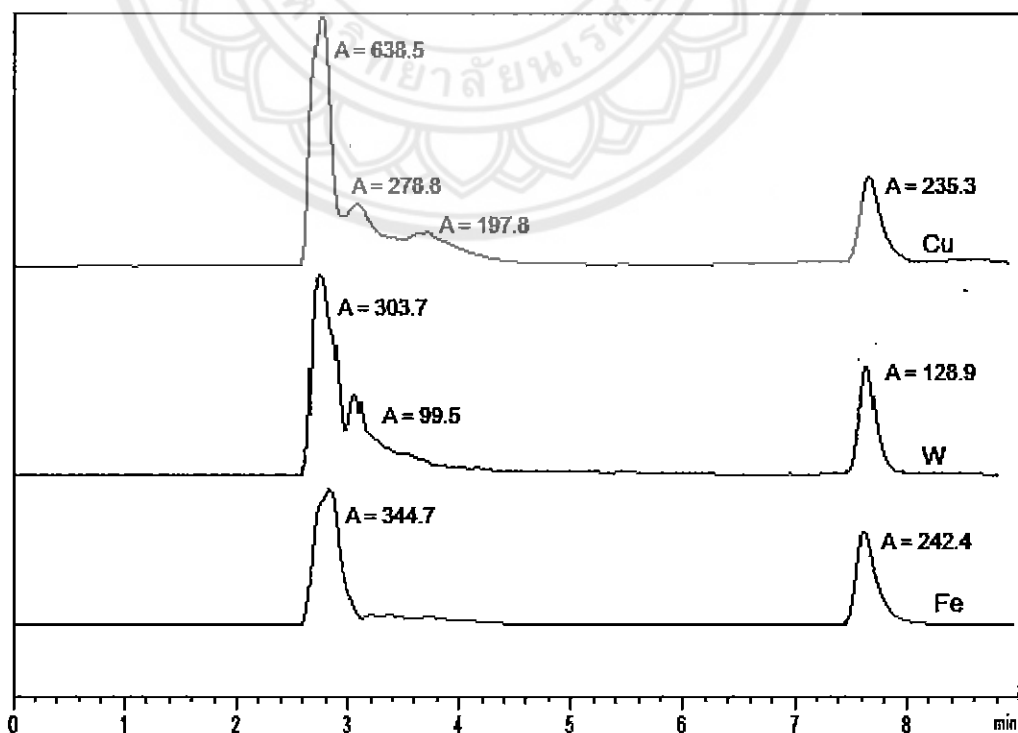
การเกิดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ของขั้วอิเล็กโทรดทั้ง 3 ชนิด ที่ความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์ แสดงได้ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ขั้วอิเล็กโทรดชนิดต่างๆ ที่ความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์

จากการศึกษาความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นในระหว่างการย่อยสลายฟีนอลของขั้วอิเล็กโทรดทั้ง 3 ชนิดคือ ทั้งสแตน ทองแดง และเหล็ก โดยความถี่ที่ใช้คือ 15 กิโลเฮิร์ตซ์ ดังรูปที่ 4.5 พบว่าที่ขั้วอิเล็กโทรดทั้งสแตนมีความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับทองแดงและเหล็ก เนื่องจากขั้วอิเล็กโทรดทั้งสแตนขณะที่เกิดพลาสมาสามารถไป

เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เกิดการแตกตัวเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัลได้ดีและไฮดรอกซิลเรดิคัลเป็นตัวสำคัญที่เข้าไปทำปฏิกิริยาในการย่อยสลายพินอลทำให้ปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ตรวจพบมีค่าที่ต่ำแต่จะเห็นได้ว่าในช่วง 150 นาที ปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ของซั้วอิเล็กโทรดทั้งสแตนมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากไฮดรอกซิลเรดิคัลที่เกิดขึ้นนั้นไม่ได้ไปทำปฏิกิริยากับพินอลเนื่องจากปริมาณพินอลในสารละลายมีปริมาณที่น้อยลงจึงทำให้ไฮดรอกซิลเรดิคัลบางส่วนที่ไม่ทำปฏิกิริยาจึงเกิดการรวมตัวกันเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อีกครั้ง ส่วนที่ซั้วอิเล็กโทรดที่เป็นทองแดงก็มีปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่สูงจากซั้วอิเล็กโทรดที่เป็นทั้งสแตนซึ่งสอดคล้องกับผลของเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายพินอลเนื่องจากทองแดงมีเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายพินอลเป็นอันดับสองรองจากอิเล็กโทรดทั้งสแตน จะเห็นได้จากปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ต่ำ และซั้วอิเล็กโทรดที่เป็นเหล็กมีปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สูงที่สุดเนื่องจากเหล็กไม่สามารถไปกระตุ้นทำให้เกิดการแตกตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไปเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัลได้ดีเท่ากับทั้งสแตน และทองแดง เนื่องจากซั้วอิเล็กโทรดที่เป็นเหล็กเมื่ออยู่ในสภาวะระบบที่เป็นสารละลายพินอลในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมาพบว่าอะตอมเหล็กที่หลุดออกจากซั้วอิเล็กโทรดนั้นบางส่วนไม่สามารถเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้เนื่องจากระบบมีค่า pH สูงจึงส่งผลทำให้ออกซิเจนที่ออกมาจากซั้วอิเล็กโทรดนั้นมีความเป็นเฟอร์ริกมากกว่าเฟอร์รัสทำให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แตกตัวเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัลไม่ได้จึงส่งผลทำให้การตรวจความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่พบมีค่าสูง และจากการตรวจวัดปริมาณสารจากเครื่อง HPLC พบว่ามีผลิตภัณฑ์ที่เป็นอันตรายเกิดขึ้น ซึ่งแสดงได้จากรูปที่ 4.6

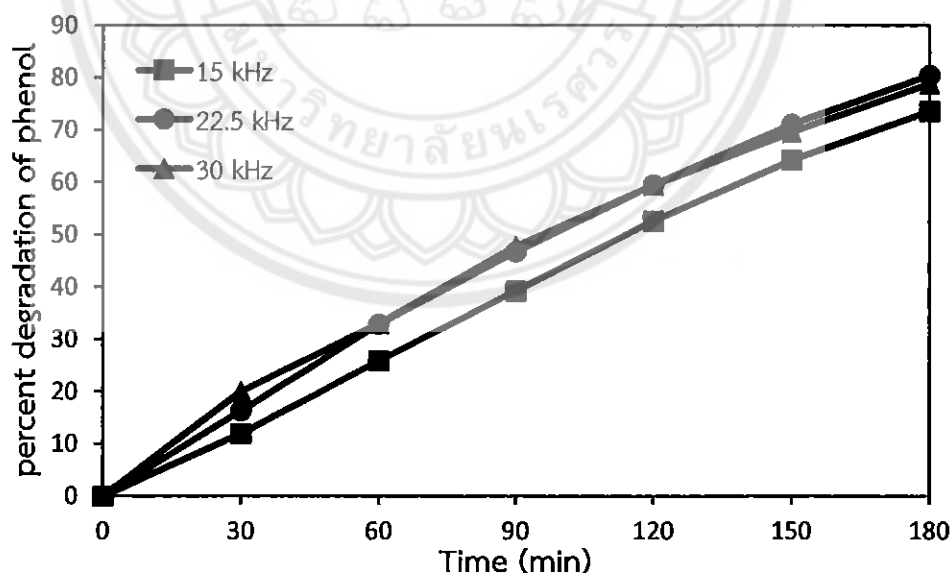


รูปที่ 4.6 แสดงข้อมูลจากเครื่อง HPLC ที่ความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์ ที่เวลา 180 นาที

จากรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการย่อยสลายฟีนอลด้วยขั้วอิเล็กโทรดทั้ง 3 ชนิด จะมีผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมาที่ตำแหน่งเวลา 2.8 3.1 และ 3.7 นาที คือ ไฮโดรควิโนน เบนโซควิโนน และแคทีคอล ตามลำดับและที่ตำแหน่งเวลา 7.6 นาที คือฟีนอล [30] เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้ง 3 ชนิด พบว่าขั้วอิเล็กโทรดที่เป็นเหล็กมีผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นเป็นไฮโดรควิโนน ขั้วอิเล็กโทรดทั้งสแตนมีผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นเป็นไฮโดรควิโนนและเบนโซควิโนน และขั้วอิเล็กโทรดทองแดงมีผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นเป็นไฮโดรควิโนน เบนโซควิโนนและแคทีคอล ซึ่งสารทั้ง 3 ชนิดนี้เป็นสารที่เป็นอันตรายเมื่อมีในปริมาณมากๆ ซึ่งจากทั้ง 3 ขั้วอิเล็กโทรดพบว่าขั้วอิเล็กโทรดทองแดงนั้นมีปริมาณไฮโดรควิโนนมากกว่าขั้วอิเล็กโทรดเหล็กและทั้งสแตน และยังพบอีกว่าในขั้วอิเล็กโทรดที่เป็นทองแดงมีปริมาณเบนโซควิโนนมากกว่าทั้งสแตนแต่ไม่พบเบนโซควิโนนในขั้วอิเล็กโทรดที่เป็นเหล็ก และยังพบแคทีคอลซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่พบได้เฉพาะในขั้วอิเล็กโทรดทองแดง จากการศึกษาผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นสามารถสรุปได้ว่าขั้วอิเล็กโทรดที่เป็นทั้งสแตน นอกจากจะให้เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายที่สูงกว่าและผลิตภัณฑ์ที่เป็นอันตรายที่เกิดขึ้นระหว่างการย่อยสลายฟีนอลมีปริมาณที่น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับขั้วอิเล็กโทรดเหล็กและทองแดง

4.3 ผลของการปรับความถี่ที่มีผลต่อการย่อยสลายฟีนอล

จากการศึกษาชนิดของขั้วอิเล็กโทรดทั้ง 3 ชนิด พบว่าขั้วอิเล็กโทรดที่เป็นทั้งสแตนให้เปอร์เซ็นต์ในการย่อยสลายฟีนอลได้ดีที่สุด ดังนั้นจึงนำขั้วอิเล็กโทรดที่เป็นทั้งสแตนมาศึกษาผลของความถี่แสดงได้ดังรูปที่ 4.7



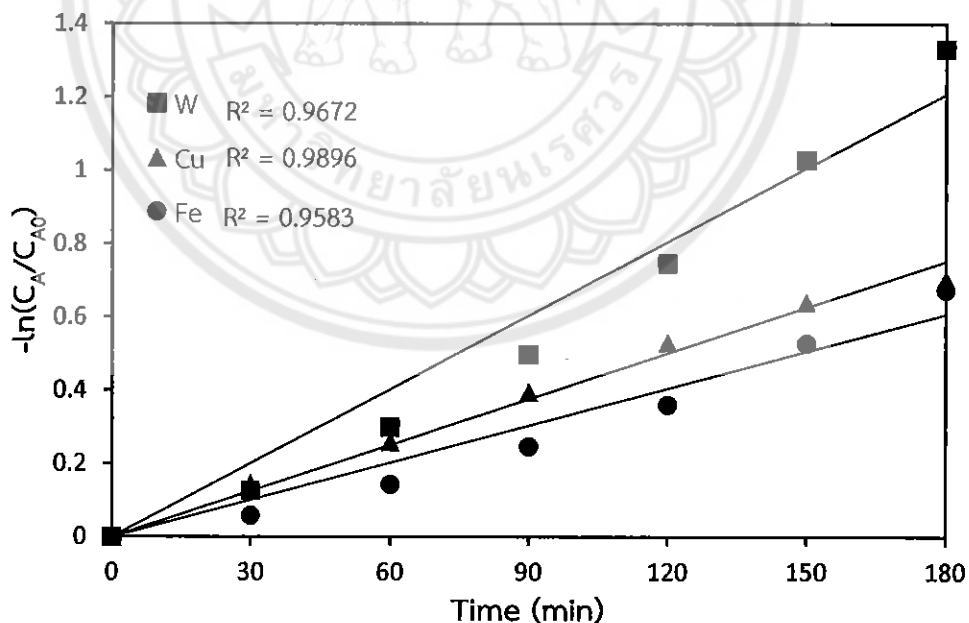
รูปที่ 4.7 เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายฟีนอลของขั้วอิเล็กโทรดทั้งสแตนที่ความถี่ 15 22.5 และ 30 กิโลเฮิร์ตซ์

จากรูปที่ 4.7 ทำการศึกษาค่าความถี่ที่ต่างกันคือ 15 22.5 และ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยผลการทดลองพบว่าเมื่อทำการปรับค่าความถี่เป็น 22.5 และ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ ที่เวลา 180 นาที จะให้ค่า

เปอร์เซ็นต์ในการย่อยสลายพินอลได้มากถึง 80.49 และ 78.89 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเปอร์เซ็นต์ในการย่อยสลายพินอลมากกว่าที่ความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์ ทั้งนี้เป็นเพราะว่าเมื่อทำการเพิ่มความถี่สูงขึ้น ทำให้มีพลังงานมากพอที่จะทำให้เกิดการแตกตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไปเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัลได้มากขึ้น ซึ่งสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาที่ทำการย่อยสลายพินอลได้สูงขึ้น แต่เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างที่ความถี่ 22.5 และ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ พบว่าเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายพินอลนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องมาจากการแตกตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไปเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัลเข้าสู่ภาวะสมดุลส่งผลคือเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายพินอลมีค่าเปลี่ยนแปลงไปน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกันทำให้สรุปได้ว่าความถี่ที่ 22.5 กิโลเฮิร์ตซ์ มีความเหมาะสมที่สุดให้การดำเนินการเนื่องมาจากใช้พลังงานน้อยกว่าที่ความถี่ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ และให้ผลการย่อยสลายพินอลที่สูงใกล้เคียงกับที่ความถี่ที่ 30 กิโลเฮิร์ตซ์

4.4 จลนพลศาสตร์ของการย่อยสลายพินอล

จากการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการย่อยสลายพินอลด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลว พบว่าอันดับการเกิดปฏิกิริยาในการย่อยสลายพินอลนั้นเป็นปฏิกิริยาอันดับ 1 ซึ่งสามารถแสดงค่า R^2 ได้จากรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 แสดงค่า R^2 ของการย่อยสลายพินอลของขั้วอิเล็กโทรดทั้ง 3 ชนิด ที่ความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์

จากรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ว่าค่า R^2 ของข้อมูลทั้ง 3 ชนิดนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอันดับการเกิดปฏิกิริยาในการย่อยสลายพินอลนั้นเป็นปฏิกิริยาอันดับ 1 โดยค่า k แสดงได้ดังตารางที่ 4.1

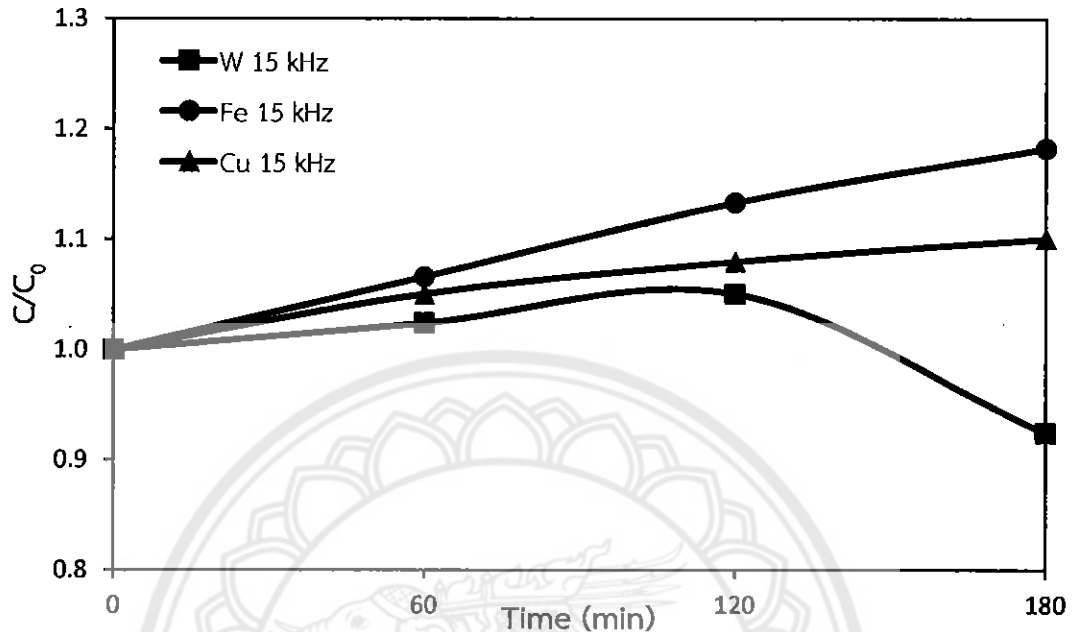
ตารางที่ 4.1 แสดงค่า k ของการทดลองที่ใช้อิเล็กโทรดและความถี่ที่แตกต่างกัน

ชนิดขั้วอิเล็กโทรด	ความถี่ (kHz)	R^2	k (min^{-1})
เหล็ก	15	0.9436	0.0032
	22.5	0.9820	0.0038
	30	0.9623	0.0040
ทองแดง	15	0.9821	0.0028
	22.5	0.9915	0.0045
	30	0.9620	0.0040
ทังสเตน	15	0.9672	0.0074
	22.5	0.9846	0.0085
	30	0.9726	0.0090

จากตารางที่ 4.1 แสดงค่า k ของการทดลองของขั้วอิเล็กโทรดและความถี่ที่แตกต่างกัน เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้ง 3 ชนิด ที่ความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์ พบว่าขั้วอิเล็กโทรดที่เป็นทังสเตนให้ค่า k เท่ากับ 0.0074 นาที่^{-1} มากกว่าขั้วอิเล็กโทรดเหล็กและทองแดงซึ่งให้ค่า k เท่ากับ 0.0032 และ 0.0028 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายพินอล โดยขั้วอิเล็กโทรดที่เป็นทังสเตนจะให้เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายพินอลได้สูงที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่เป็นทังสเตนโดยใช้ความถี่ที่แตกต่างกัน พบว่าที่ความถี่ 22.5 และ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ จะให้ค่า k เท่ากับ 0.0085 และ 0.009 ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าที่ความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งในการย่อยสลายพินอลนั้นที่ความถี่ 22.5 และ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ สามารถย่อยสลายพินอลได้มากกว่าที่ความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์ ดังนั้นสามารถบอกได้ว่าค่า k นั้นแสดงถึงอัตราการย่อยสลายพินอลของปฏิกิริยานี้

4.5 การดิซซาร์จด้วยพลาสมาที่มีผลต่อค่า TOC

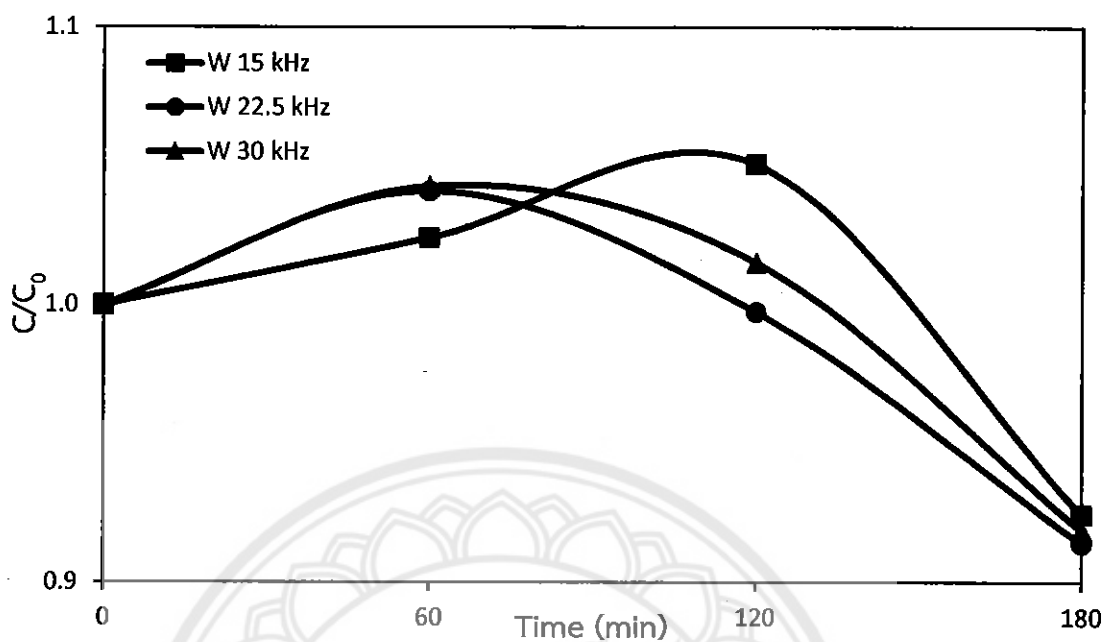
4.5.1 การดิซซาร์จโดยขั้วอิเล็กโทรด 3 ชนิดที่ความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์ที่มีผลต่อค่า TOC



รูปที่ 4.9 ค่า TOC ที่ขั้วอิเล็กโทรดชนิดต่างๆ ที่ความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์

จากผลการทดลองในการตรวจวัดค่า TOC ที่เกิดขึ้นในระหว่างการดิซซาร์จด้วยพลาสมาของขั้วอิเล็กโทรด 3 ชนิด คือ ทั้งสแตน ทองแดง และเหล็ก ที่ความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์ พบว่าขั้วอิเล็กโทรดที่เป็น เหล็ก และทองแดง มีแนวโน้มของค่า TOC ที่เพิ่มขึ้นเนื่องมาจากในการทรีทด้วยขั้วอิเล็กโทรดทั้ง 2 ชนิดนี้ทำให้เกิดปริมาณคาร์บอนทั้งหมดในน้ำมากขึ้นและเมื่อเวลาผ่านไปก็ยิ่งทำให้ปริมาณคาร์บอนในน้ำเกิดเพิ่มมากยิ่งขึ้นไปอีก ในทางกลับกันขั้วอิเล็กโทรดที่เป็นทั้งสแตนมีแนวเพิ่มขึ้นในช่วง 0 - 120 นาที และลดลงในช่วงหลัง 120 นาที เนื่องจากในช่วงหลังเวลา 120 นาทีนั้นปริมาณสะสมของคาร์บอนที่เกิดขึ้นอาจจะเกิดการสลายตัวจากการทำปฏิกิริยาจึงเป็นเหตุให้ในสารละลายฟีนอลมีปริมาณคาร์บอนปริมาณที่ลดลง

4.5.2 การดีซาร์จโดยขั้วอิเล็กโทรดทั้งสแตนที่ความถี่ 3 ความถี่ ที่มีผลต่อค่า TOC



รูปที่ 4.10 ค่า TOC ที่ขั้วอิเล็กโทรดทั้งสแตนที่ความถี่ต่างกัน

จากผลการทดลองในการตรวจวัดค่า TOC ที่เกิดขึ้นในระหว่างการดีซาร์จด้วยพลาสมาที่ใช้ขั้วอิเล็กโทรดเป็นทั้งสแตนที่ความถี่ต่างๆกันคือ 15 22.5 และ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ พบว่าที่ความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์ ที่เวลา 120 นาที ค่า TOC จะมีค่าลดลง และที่ความถี่ 22.5 และ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ ที่เวลา 60 นาที ค่า TOC จะมีค่าลดลง ทั้งนี้ที่ลดลงเร็วกว่าความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์ อาจเป็นเพราะว่า มีการให้พลังงานที่มากเกินไปที่จะทำให้คาร์บอนเกิดการสลายตัวจึงทำให้ปริมาณคาร์บอนนั้นเริ่มลดลงที่เวลา 60 นาที

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุป

จากการศึกษาการย่อยสลายฟีนอลด้วยการประยุกต์ใช้กระบวนการพลาสมาวัฏภาคของเหลวของซีวีเอเล็กโทรดทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ ทั้งสแตน เหล็กและทองแดง พบว่าซีวีเอเล็กโทรดทั้งสแตนชนิดสามารถให้เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายฟีนอลได้ดีที่สุด และจากผลการปรับความถี่พบว่าความถี่ของพลาสมามีผลต่อเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายฟีนอล โดยที่ความถี่ที่ 22.5 กิโลเฮิร์ตซ์ และใช้ซีวีเอเล็กโทรดชนิดทั้งสแตนให้เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายมากที่สุดคือ 80.49 เปอร์เซ็นต์ และจากผลการวัดค่าความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์พบว่าซีวีเอเล็กโทรดชนิดทั้งสแตนมีค่าความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่ำที่สุดซึ่งเป็นเหตุผลทำให้ซีวีเอเล็กโทรดทั้งสแตนนั้นสามารถย่อยสลายฟีนอลได้มากที่สุด และเมื่อศึกษาจลนพลศาสตร์ของการย่อยสลายฟีนอลพบว่า การย่อยสลายฟีนอลเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งและยังพบว่าซีวีเอเล็กโทรดชนิดทั้งสแตนมีค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาสูงที่สุดคือ 0.009 นาที^{-1} และจากการตรวจวัดค่า TOC ในสารละลายฟีนอลที่ผ่านการทรีตด้วยพลาสมาโดยใช้ซีวีเอเล็กโทรดชนิดทั้งสแตนพบว่ามีค่า TOC ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับสารละลายฟีนอลที่ไม่ผ่านการทรีต

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยที่ได้ทำการทดลองพบว่าโดยลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์พลาสมานั้นมีการเกิดโซนพลาสมาที่มีขนาดเล็กมาก และในการย่อยสลายฟีนอลอาศัยการเกิดของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และไฮดรอกซิลเรดิคัลที่เกิดขึ้นภายในโซนพลาสมา ดังนั้นจึงควรเพิ่มโซนพลาสมาให้มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งจะส่งผลทำให้การย่อยสลายฟีนอลได้ดีมากขึ้นเนื่องจากการเพิ่มโซนพลาสมาสามารถทำได้โดยการเพิ่มสัมผัสกันระหว่างสารละลายฟีนอลและพลาสมา โดยออกแบบเครื่องปฏิกรณ์พลาสมาใหม่ให้มีช่องสำหรับใส่ซีวีเอเล็กโทรดมากขึ้น และเพื่อความสมบูรณ์ในงานวิจัยนี้มากขึ้นควรมีการศึกษาโครงสร้างความเป็นผลึกของอนุภาคที่หลุดออกมาจากซีวีเอเล็กโทรดแต่ละชนิดเนื่องมาจากความเป็นผลึกส่งผลต่อการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการย่อยสลายฟีนอลโดยการตรวจความเป็นผลึกจะใช้วิธีการ X-Ray Diffraction (XRD) ในการตรวจสอบ

เอกสารอ้างอิง

- [1] วิทยา เพียรวิจิตร. เทคโนโลยีการกำจัดน้ำเสีย. กรุงเทพมหานคร. โอเดียนสโตร์ 2525
- [2] “ฟีนอล” [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: www.foodnetworksolution.com 2014
- [3] W. Chooaksorn. Color Removal Technology in Industrial Wastewater. Environmental Science Department. Burapha Sci 2012;1:181-191
- [4] “advanced oxidation process” [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก www.archive.lib.cmu.ac.th 2014
- [5] “Photocatalytic” [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: www.teenet.cmu.ac.th 2014
- [6] L.Wang and X. Jiang. Unusual catalytic effects of iron salts on phenol degradation by glow discharge plasma in aqueous solution. Journal of Hazardous Materials 2009;161:926-932
- [7] กฤษณล กীরติวิทยายุต. การหาปริมาณของฟีนอลในแหล่งน้ำโดยใช้เทคนิคสเปกโตรโฟโตมิตรี. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีศึกษา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 2528
- [8] R.J. Bigda. Consider Fenton’s chemistry for wastewater treatment. Chem. Eng. Prog 1995 12:62-66
- [9] C. Walling. Fenton’s reagent revisited. Acc. Chem. Res 1975;8:125-131
- [10] Y.G. Montaser, H. Georg, M. Roland and H. Roland. Photochemical oxidation of p-chlorophenol by UV/H₂O₂ and photo-Fenton process A comparative study. Waste Management 2001; 21: 41-47
- [11] W.H. Glaze. Drinking water treatment with ozone. Environmental Science and Technology 1987; 21:224-230
- [12] J. Zhang, B. Zhang and J. Zhang. Effect of phosphoric acid pretreatment on enzymatic hydrolysis of microcrystalline cellulose. Biotechnology Advances 2010;28:613-619
- [13] G.L. Miller. Use of Dinitrosalicylic Acid Reagent for Determination of Reducing Sugar. Analytical Chemistry 1959

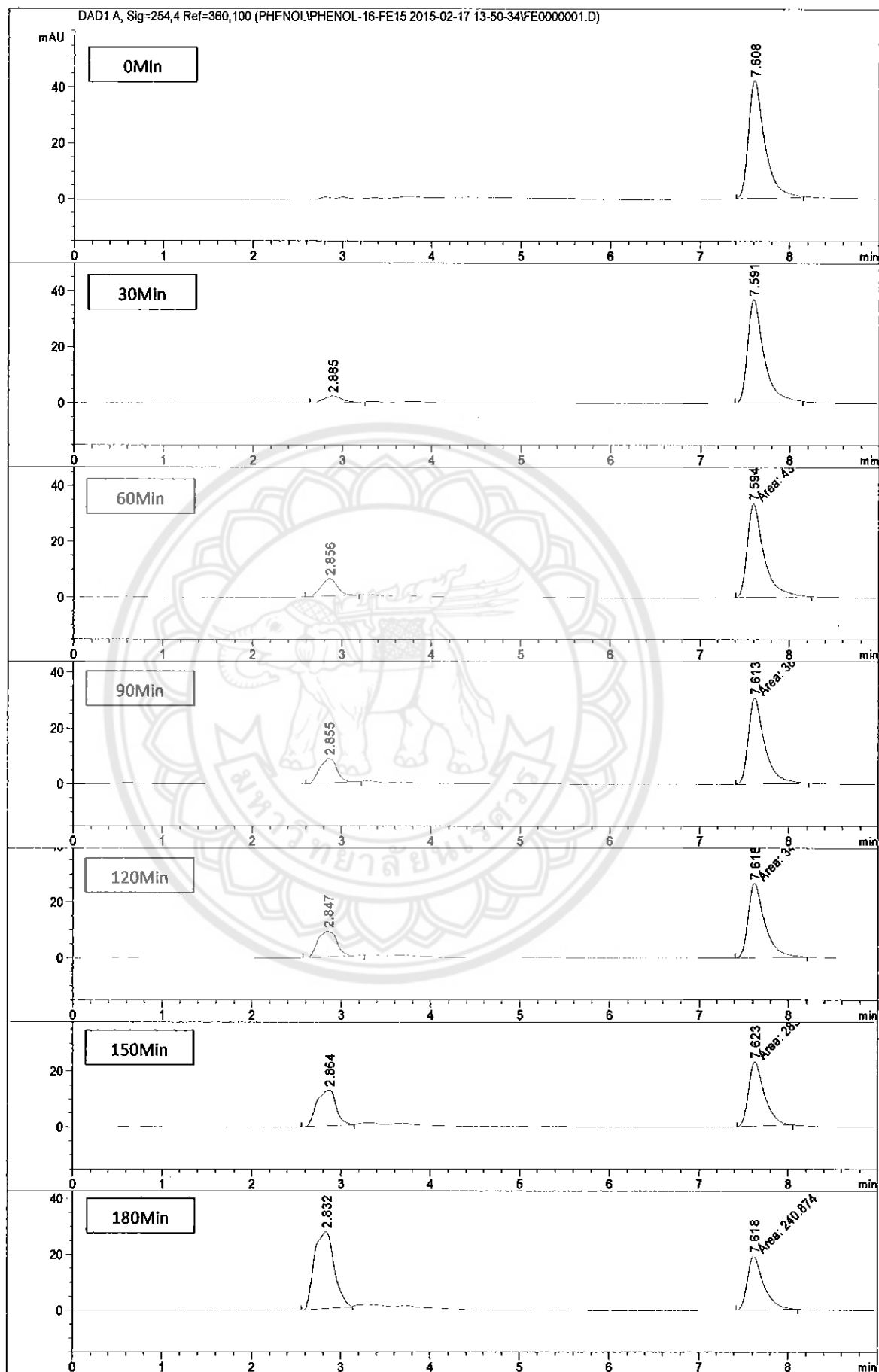
เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [14] C.Yang, Z. Shen and G.Yu. Effect and aftereffect of radiation pretreatment on enzymatic hydrolysis of wheat straw. *Bioresource Technology* 2998;99;6240-6245
- [15] O. Takai. Solution plasma processing (SPP)*. *Pure. Appl. Che* 2008;80:2003-2011
- [16] I. Prasertsung, S. Damrongsakkul and N. Saito. Degradation of β – chitosan by solution plasma process (SSP). *Polymer Degradation and Stability* 2013;98:2089-2093
- [17] O. Pornsunthorntawe. Depolymerization of chitosan-metal complexes via a solution plasmatechnique. *carbohydrate Polymers* 2014;102:504 – 512
- [18] “HPLC” [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: www.dusithost.dusit.ac.th 2014
- [19] “HPLC” [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: www.env.eng.chula.ac.th 2014
- [20] J. Chen, W.H. Rulkens and H. Bruning. Photochemical elimination of phenols and COD in industrial wastewaters. *Wat.Sci.Tech* 1997;35:231-238
- [21] Y.W. Kang and K.Y. Hwang. Effects of reaction condition on the oxidation efficiency in the fenton process. *Wat.Res* 2000;34:2786-2790
- [22] M.Y. Ghaly, H. Georg, M. Roland and H. Roland. Photochemical oxidation of *P*-chlorophenol by UV/H₂O₂ and photo-Fenton process. A comparative study. *Waste Management* 2001;21:41-47
- [23] Y.S. Chen, X.S. Zhang, Y.C. Dai and W.K. Yuan. Pulsed high-voltage discharge plasma for degradation of phenol in aqueous solution. *Separation and Purification Technology* 2004;34:5-12
- [24] M. Sahni and B.R. Locke. The Effects of Reaction Conditions on Liquid-Phase Hydroxyl Radical Production in Gas-Liquid Pulsed-Electrical-Discharge Reactors. Department of Chemical and Biomedical Engineering 2006
- [25] K. Gai. Plasma-induced degradation of diphenylamine in aqueous solution. *Journal of Hazardous Materials* 2007;146:249-254

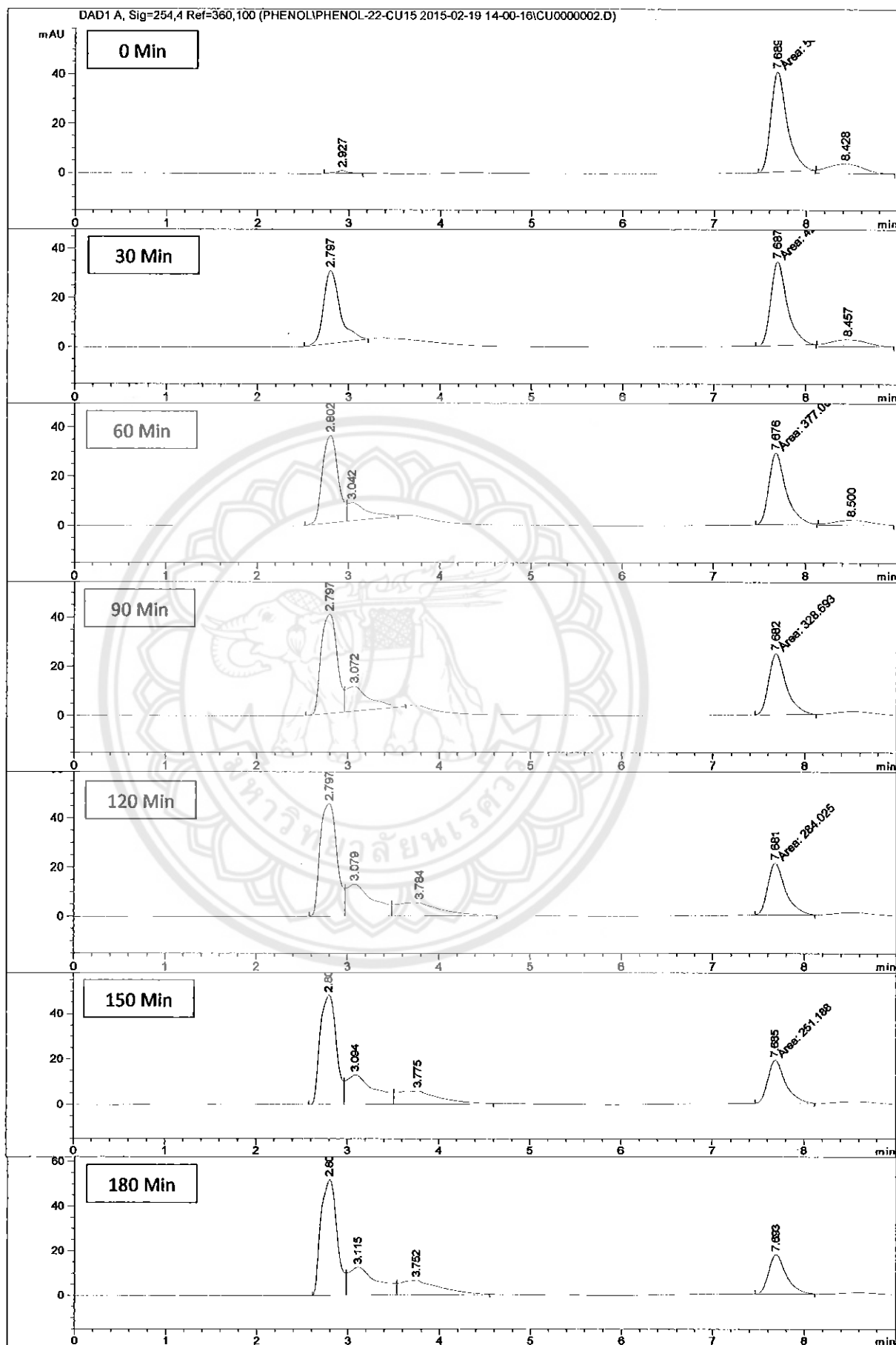
เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [26] L.wang, X. Jiang and Y. Liu. Degradation of bisphenol A and formation of hydrogen peroxide induced by glow discharge plasma in aqueous solution. *Journal of Hazardous Materials* 2008;154:1106-1114
- [27] G. Qu, D. Liang, D. Qu, Y. Huang, T. Liu, H. Mao, P. Ji and D. Huang. Simultaneous removal of cadmium ion and phenol from water solution by pulsed corona discharge plasma combined with activated carbon. *Chemical Engineering Journal* 2013;228:28-35
- [28] K. Ntampegiotis, A. Riga, V. Karayannis, V. Bontozoglou and G. Papapolymerou. Decolorization kinetics of Procion H-exl dyes from textile dyeing using Fenton-like reactions. *Journal of Hazardous Materials* 2006;136:75-84
- [29] เกียรติศักดิ์ อุดมสินโรจน์. ของเสียอันตราย (Hazardous wastes). ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยรังสิต 2546
- [30] J.Elizabete and S.Cristina. Evaluation of TiO_2 , ZnO , CuO and Ga_2O_3 on the Photocatalytic Degradation of Phenol Using an Annular-Flow Photocatalytic Reactor. *Journal of Physical Chemistry* 2012;2;135-140

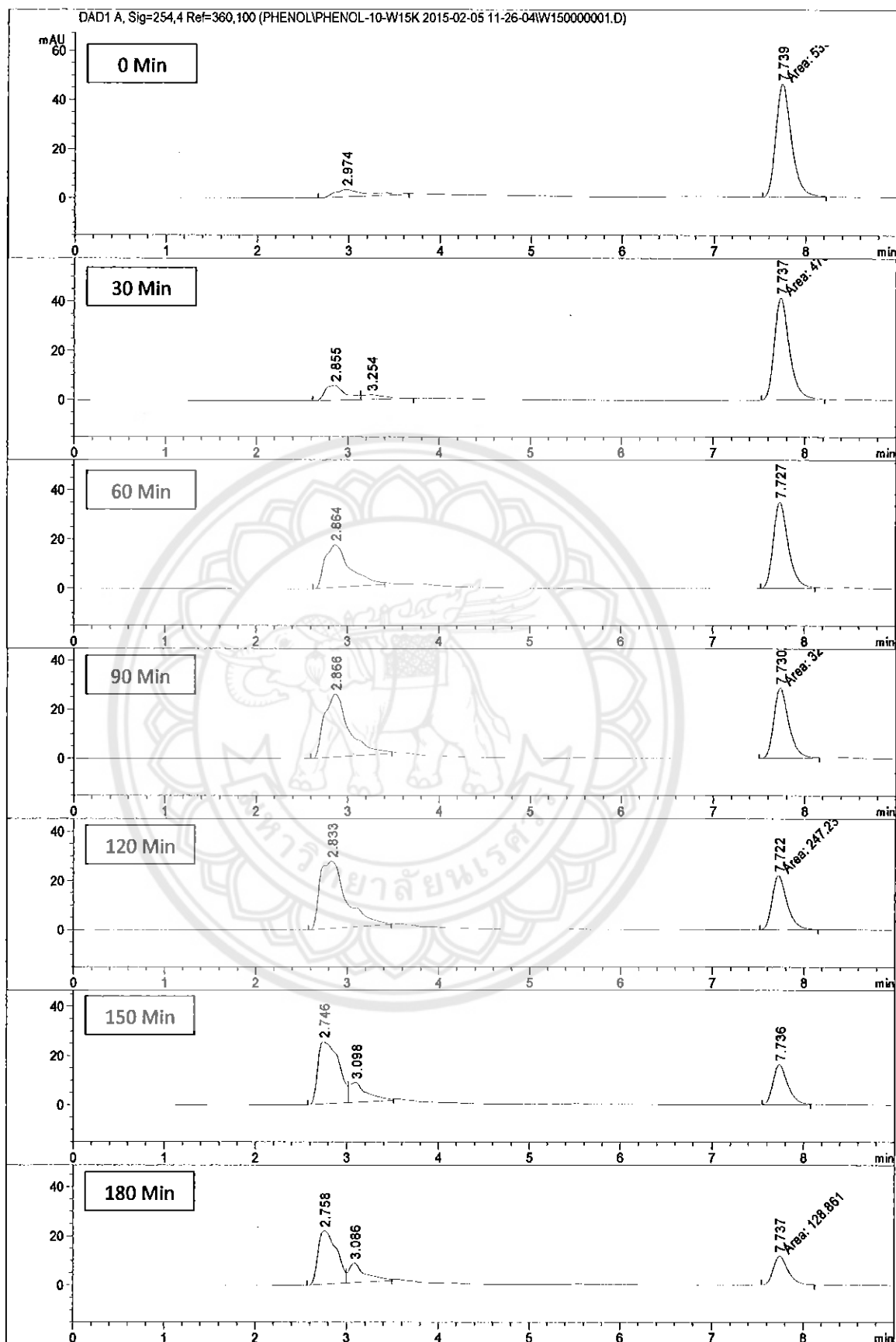




รูปที่ ก.1 แสดงกราฟข้อมูลจากเครื่อง HPLC ของข้าวอิเล็กทรอนิกส์ที่ความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์



รูปที่ ก.2 แสดงกราฟข้อมูลจากเครื่อง HPLC ของซั้วอีเล็กโทรดทองแดงที่ความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์



รูปที่ ก.3 แสดงกราฟข้อมูลจากเครื่อง HPLC ของซั้วอีเล็กโทรดทั้งสแตนที่ความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์

ตารางที่ ก.1 แสดงข้อมูลที่ได้จากเครื่อง HPLC และการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายพินอล
ของซัวอิลีกโทรดเหล็ก ที่ความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์

time (min)	area			Concentration (ppm)	Percentage of degradation
	n ₁	n ₂	avg		
0				100	
30	470.3	475.6	472.95	92.44	5.71
60	434.09	430.25	432.17	84.94	13.35
90	388.2	384.9	386.55	76.56	21.91
120	341.38	342.5	341.94	68.36	30.27
150	283.5	285.8	284.65	57.83	41.01
180	240.9	242.4	241.65	49.92	49.08

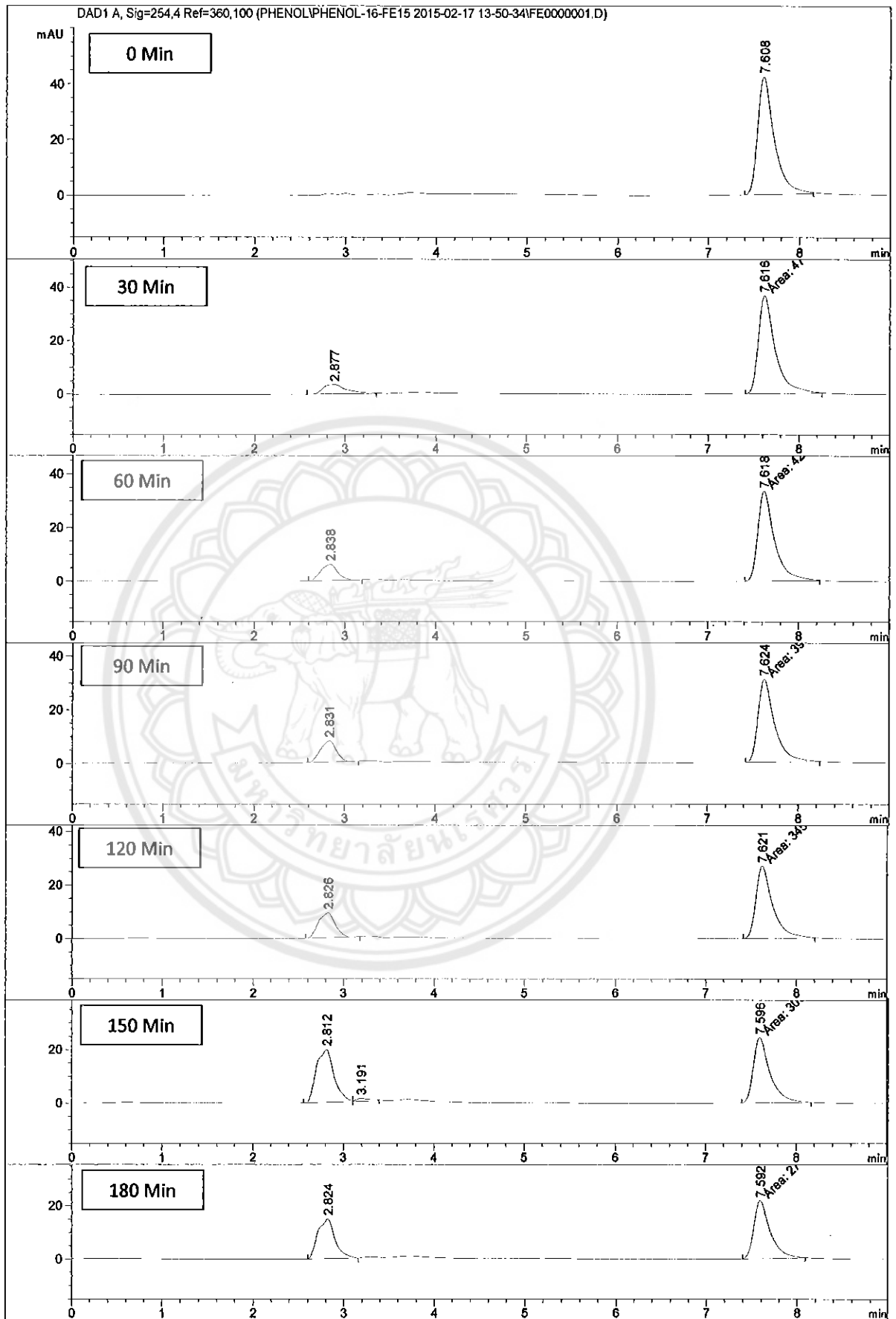
ตารางที่ ก.2 แสดงข้อมูลที่ได้จากเครื่อง HPLC และการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายพินอล
ของซัวอิลีกโทรดทองแดง ที่ความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์

time (min)	area			conc. (ppm)	Percentage of degradation
	n ₁	n ₂	avg		
0				100	
30	426.5	428.8	427.7	94.4	13.47
60	377	380.5	378.8	84.2	22.90
90	328.7	327.5	328.1	73.5	32.67
120	284	283.3	283.7	64.1	41.24
150	251.2	253.4	252.3	57.5	47.28
180	235.3	235.5	235.4	54.0	50.54

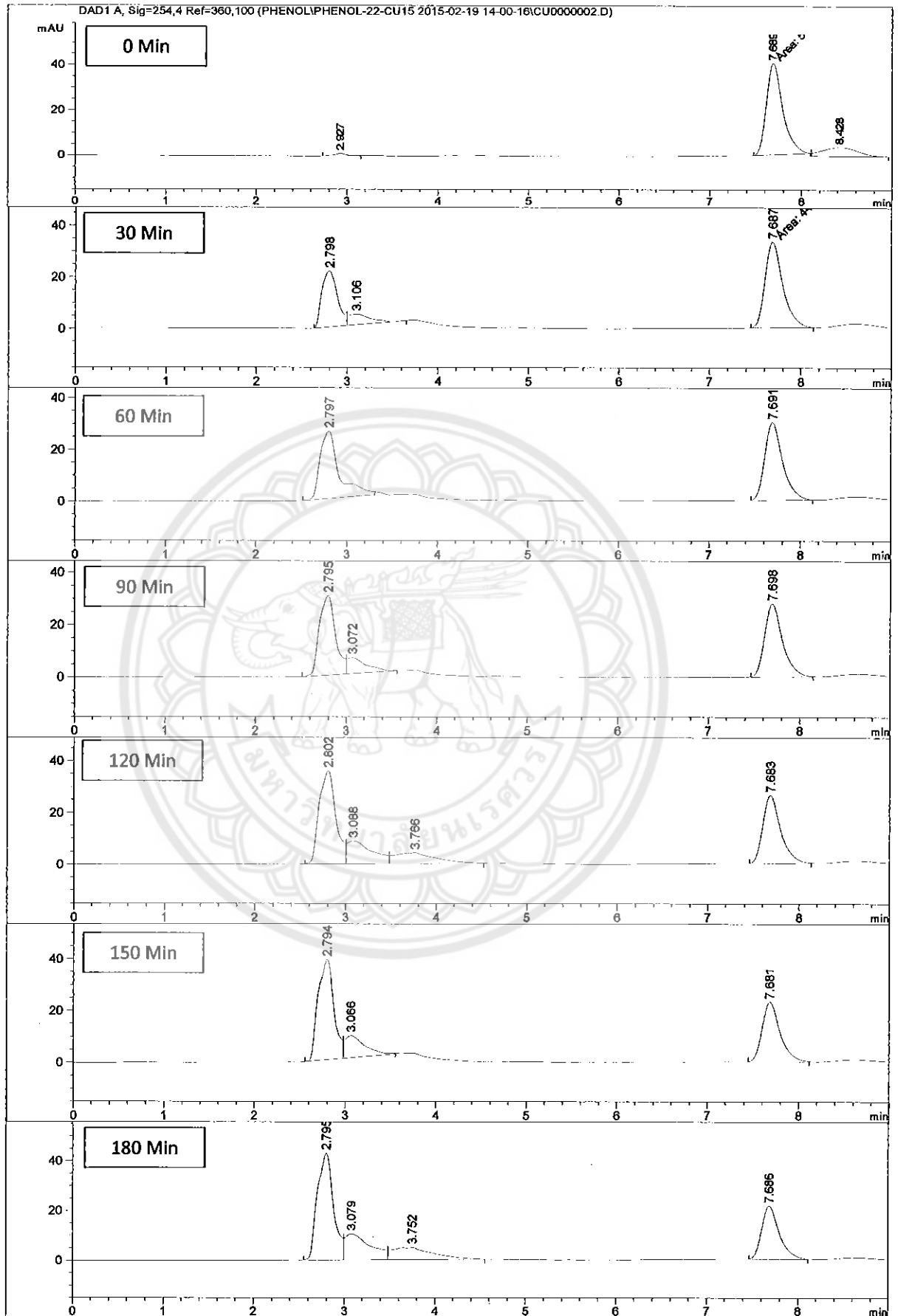
ตารางที่ ก.3 แสดงข้อมูลที่ได้จากเครื่อง HPLC และการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การย่อย
สลายพินอลของซั้วอเล็กโทรดทั้งสเดน ที่ความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์

time (min)	area			conc. (ppm)	Percentage of degradation
	n ₁	n ₂	avg		
0				100	
30	470.2	472.6	471.4	77.40	11.95
60	395.3	393	394.15	65.16	25.86
90	321.2	318.9	320.05	53.43	39.22
120	247.2	244.3	245.75	41.66	52.60
150	181.6	180.5	181.05	31.41	64.26
180	128.9	129.6	129.25	23.21	73.59

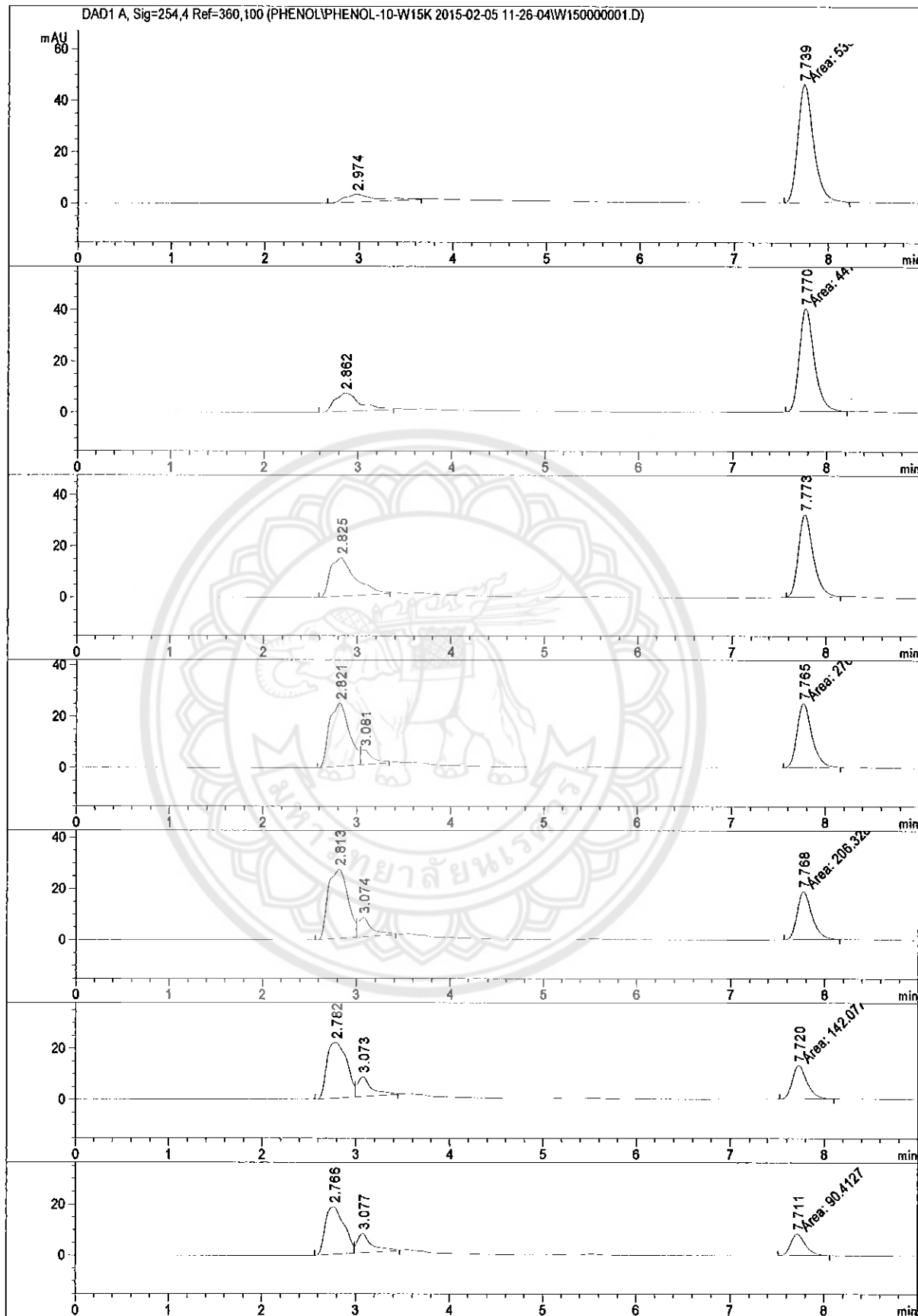




รูปที่ ก.4 แสดงกราฟข้อมูลจากเครื่อง HPLC ของข้อวิเคราะห์ที่ความถี่ 22.5 กิโลเฮิรตซ์



รูปที่ ก.5 แสดงกราฟข้อมูลจากเครื่อง HPLC ของข้าวอีเล็กโทรดทองแดงที่ความถี่ 22.5 กิโลเฮิรตซ์



รูปที่ ก.6 แสดงกราฟข้อมูลจากเครื่อง HPLC ของซั้วอเล็กโทรดทั้งสแตนที่ความถี่ 22.5 กิโลเฮิร์ตซ์

ตารางที่ ก.4 แสดงข้อมูลที่ได้จากเครื่อง HPLC และการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การย่อย
สลายพืชนอลของข้าวเปลือกไรต์ดเหล็ก ที่ความถี่ 22.5 กิโลเฮิร์ตซ์

time (min)	area			conc. (ppm)	Percentage of degradation
	n ₁	n ₂	avg		
0				100	
30	473.8	470.9	472.35	92.33	5.82
60	426.2	425.9	426.05	83.82	14.50
90	390.9	388.2	389.55	77.11	21.35
120	346	348.3	347.15	69.31	29.30
150	309.6	307.2	308.4	62.19	36.56
180	273.5	272.2	272.85	55.66	43.23

ตารางที่ ก.5 แสดงข้อมูลที่ได้จากเครื่อง HPLC และการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การย่อย
สลายพืชนอลของข้าวเปลือกไรต์ดทองแดง ที่ความถี่ 22.5 กิโลเฮิร์ตซ์

time (min)	area			conc. (ppm)	Percentage of degradation
	n ₁	n ₂	avg		
0				100	
30	445.5	450.5	448.0	98.7	9.55
60	405.3	406.8	406.1	89.9	17.63
90	377.9	378.3	378.1	84.0	23.02
120	351.6	353.6	352.6	78.7	27.94
150	311.6	313.2	312.4	70.2	35.69
180	284.8	286.8	285.8	64.6	40.82

ตารางที่ ก.6 แสดงข้อมูลที่ได้จากเครื่อง HPLC และการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายฟีนอลของซั้วอิเล็กโทรดทั้งสแตน ที่ความถี่ 22.5 กิโลเฮิร์ตซ์

time (min)	area			conc. (ppm)	Percentage of degradation
	n ₁	n ₂	avg		
0				100	
30	447.9	446.5	447.2	73.57	16.31
60	356.2	354.4	355.3	59.01	32.86
90	278.5	278.7	278.6	46.86	46.68
120	208.4	206.3	207.35	35.58	59.52
150	142.1	143.8	142.95	25.38	71.13
180	90.4	91.6	91	17.15	80.49

ตารางที่ ก.7 แสดงข้อมูลที่ได้จากเครื่อง UV-vis ในการวัดค่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ของซั้วอิเล็กโทรดเหล็กที่ความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์

time (min)	ABS	concentration (ppm)
0	-0.004	6.07
30	0.037	11.68
60	0.039	11.96
90	0.071	16.34
120	0.105	21.00
150	0.204	34.56
180	0.254	41.41

ตารางที่ ก.8 แสดงข้อมูลที่ได้จากเครื่อง UV-vis ในการวัดค่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ของข้าว
อิเล็กทรอนิกส์แดงที่ความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์

time (min)	ABS	concentration (ppm)
0	-0.004	6.07
30	0.013	8.40
60	0.028	10.45
90	0.032	11.00
120	0.039	11.96
150	0.044	12.64
180	0.051	13.60

ตารางที่ ก.9 แสดงข้อมูลที่ได้จากเครื่อง UV-vis ในการวัดค่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ของข้าว
อิเล็กทรอนิกส์แดงที่ความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์

time (min)	ABS	concentration (ppm)
0	-0.004	6.07
30	0.011	8.12
60	0.014	8.53
90	0.017	8.95
120	0.024	9.90
150	0.054	14.01
180	0.11	21.68

ตารางที่ ก.10 แสดงข้อมูลที่ได้จากเครื่อง UV-vis ในการวัดค่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ของ
 ไข่ไก่ที่เคลือบเคลือบที่ความถี่ 22.5 กิโลเฮิร์ตซ์

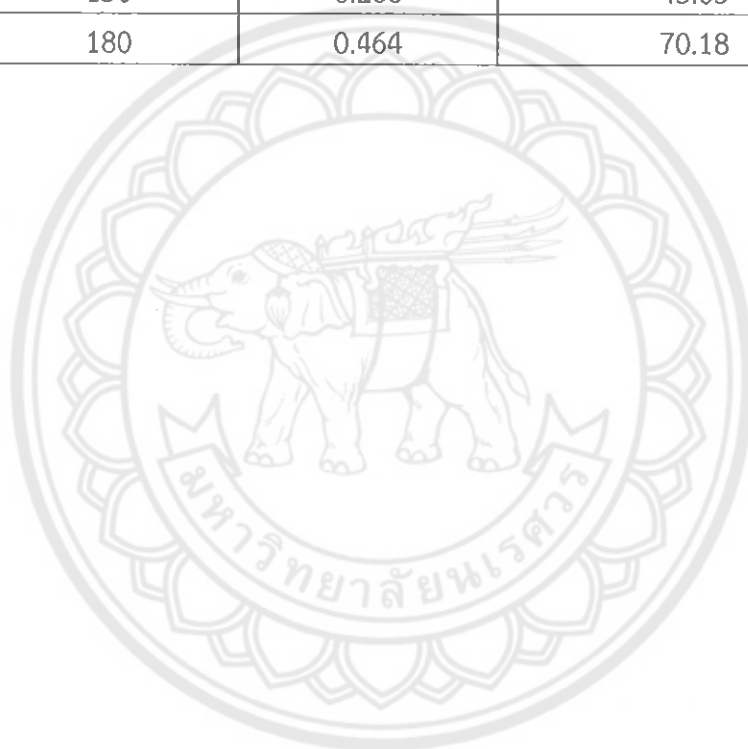
time (min)	ABS	concentration (ppm)
0	0.014	8.53
30	0.051	13.60
60	0.074	16.75
90	0.094	19.49
120	0.136	25.25
150	0.251	41.00
180	0.324	51.00

ตารางที่ ก.11 แสดงข้อมูลที่ได้จากเครื่อง UV-vis ในการวัดค่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ของ
 ไข่ไก่ที่เคลือบเคลือบที่ความถี่ 22.5 กิโลเฮิร์ตซ์

time (min)	ABS	concentration (ppm)
0	0.014	8.53
30	0.016	8.81
60	0.019	9.22
90	0.025	10.04
120	0.033	11.14
150	0.037	11.68
180	0.039	11.96

ตารางที่ ก.12 แสดงข้อมูลที่ได้จากเครื่อง UV-vis ในการวัดค่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ของ
ข้าวโอ๊ตที่สกัดทั้งสแตนท์ที่ความถี่ 22.5 กิโลเฮิร์ตซ์

time (min)	ABS	concentration (ppm)
0	0.014	8.53
30	0.017	8.95
60	0.025	10.04
90	0.035	11.41
120	0.11	21.68
150	0.266	43.05
180	0.464	70.18

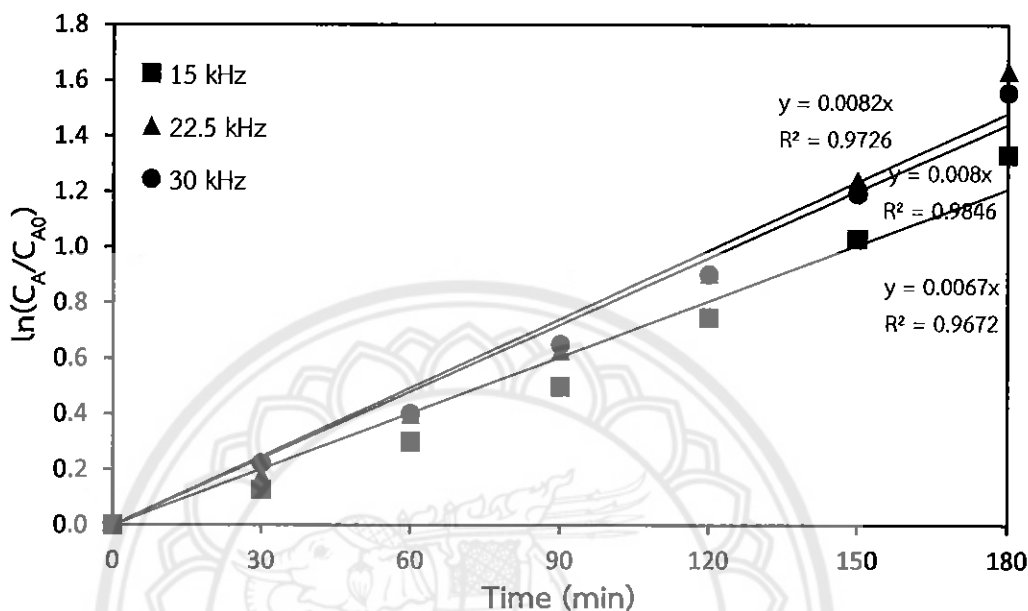




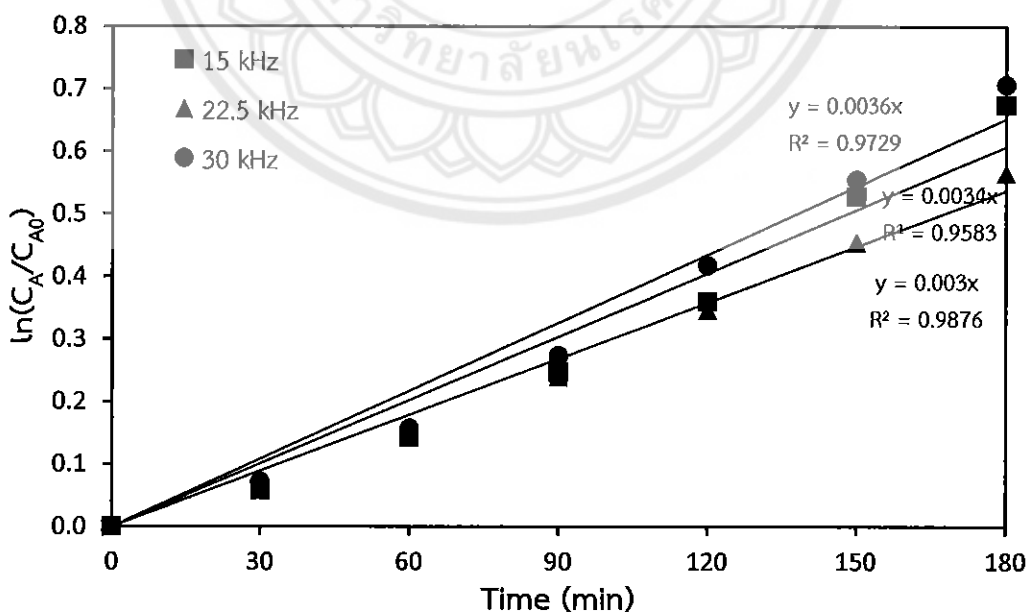
จากการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการย่อยสลายพินอลพบว่าอันดับการเกิดปฏิกิริยาเป็นอันดับหนึ่ง

ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

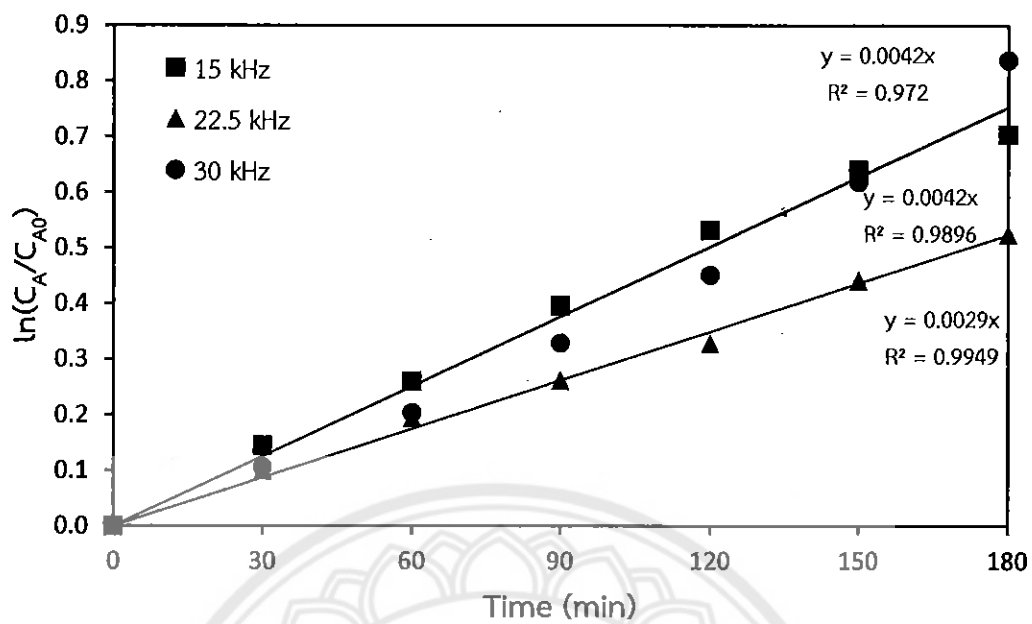
$$\text{ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง : } \ln(C_A/C_{A0}) = -kt$$



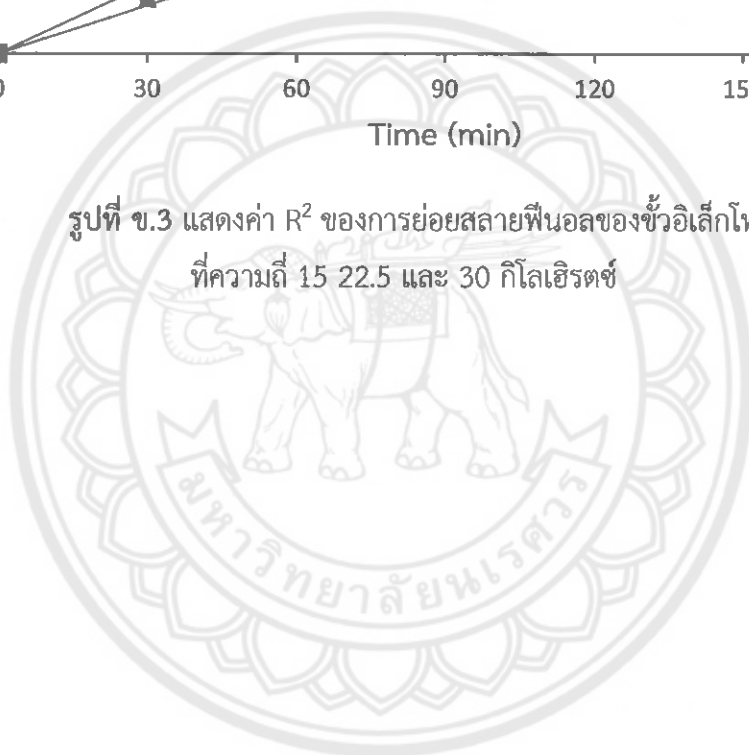
รูปที่ ข.1 แสดงค่า R² ของการย่อยสลายพินอลของขั้วอิเล็กโทรดทั้งสแตน ที่ความถี่ 15 22.5 และ 30 กิโลเฮิร์ตซ์



รูปที่ ข.2 แสดงค่า R² ของการย่อยสลายพินอลของขั้วอิเล็กโทรดเหล็ก ที่ความถี่ 15 22.5 และ 30 กิโลเฮิร์ตซ์



รูปที่ ข.3 แสดงค่า R^2 ของการย่อยสลายพินอลของซั้วอิลีกโทรดทองแดง ที่ความถี่ 15 22.5 และ 30 กิโลเฮิร์ตซ์



ประวัติผู้ดำเนินโครงการ



ชื่อ นายพิสิฐ อ่อนพุ่ม

ภูมิลำเนา 1/41022 หมู่ 1 ต.บ้านคลอง อ.เมือง
จ.พิษณุโลก

ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนพิษณุโลกพิทยาคม จ.พิษณุโลก
- ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขา วิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail : pisit_ooo@hotmail.com



ชื่อ นายสิทธิพล อนันตระกูลศิลป์

ภูมิลำเนา 193 หมู่ 27 ต.คลองน้ำไหล อ.คลองลาน
จ.กำแพงเพชร

ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนคลองลานวิทยา จ.กำแพงเพชร
- ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail : sittipon_chem@hotmail.com