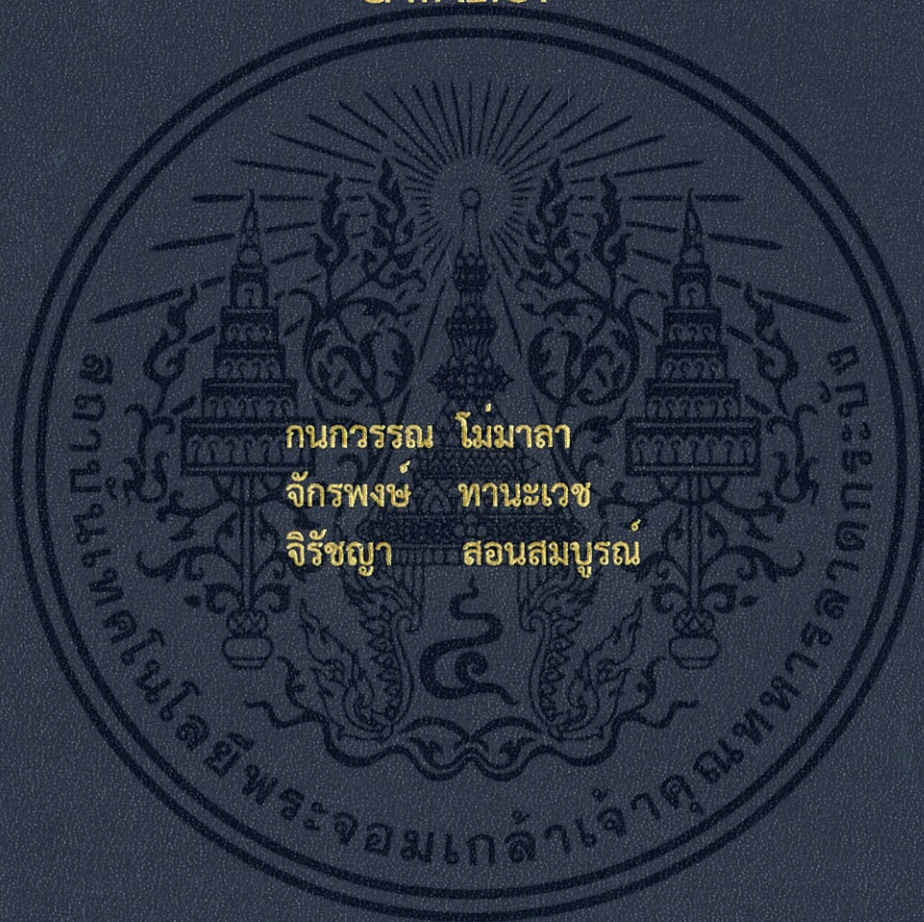


การกำจัดฟีนอลด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา
คอปเปอร์ออกไซด์บนอะลูมินา

REMOVAL OF PHENOL BY OXIDATION REACTION
USING COPPER OXIDE LODED ON ALUMINA AS
CATALYST



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

การกำจัดฟีนอลด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา
คอปเปอร์ออกไซด์บนอะลูมินา

REMOVAL OF PHENOL BY OXIDATION REACTION
USING COPPER OXIDE LODED ON ALUMINA AS
CATALYST



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

REMOVAL OF PHENOL BY OXIDATION REACTION
USING COPPER OXIDE LODED ON ALUMINA AS
CATALYST



Miss KANOKWAN MOMALA
Mr. JAKRAPHONG THANAWET
Miss JIRATCHAYA SONSOMBOON

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (INDUSTRIAL CHEMISTRY)
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การกำจัดฟีนอลด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา คอปเปอร์ออกไซด์บนอะลูมินา	
ชื่อนักศึกษา	นางสาวกนกรรณ โม่มาลา	รหัสนักศึกษา 56050434
	นายจักรพงษ์ ทานะเวช	รหัสนักศึกษา 56050452
	นางสาวจิรัชญา สอนสมบุรณ์	รหัสนักศึกษา 56050464
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)	
ภาควิชา	เคมี	
คณะ	วิทยาศาสตร์	
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)	
ปีการศึกษา	2559	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. อำนาจ เพิ่มทรัพย์สกุล	

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการกำจัดฟีนอลด้วยวิธีออกซิเดชัน โดยมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นตัวออกซิไดซ์ และมีคอปเปอร์ออกไซด์บนอะลูมินาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยทำการศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อ การกำจัดฟีนอล ได้แก่ อุณหภูมิในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณคอปเปอร์บนอะลูมินา ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลในน้ำทิ้งสังเคราะห์ เวลาและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกเตรียมด้วยวิธีทำให้เอบซุ่ม (Impregnation) โดยจะทำการเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ในเตรต และทำการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคต่าง ได้แก่ เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction) เทคนิคเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) และเทคนิค BET นอกจากนี้ยังใช้เทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรสโคปี (UV-Vis Spectroscopy) ในการตรวจวัดความเข้มข้นของฟีนอลที่เหลือหลังทำปฏิกิริยา จากการทดลอง พบว่า ที่ความเข้มข้นฟีนอลเริ่มต้น 500 ppm โดยทำการเปลี่ยนตัวแปรอื่นๆ พบว่า สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการเกิดปฏิกิริยา คือ ที่ตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์บนอะลูมินา 7% โดยน้ำหนัก ปริมาณ 2.0 g/L ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.3 M ที่เวลา 60 นาที และอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส โดยที่สภาวะดังกล่าวสามารถกำจัดฟีนอลได้ถึงร้อยละ 86.36

คำสำคัญ : ฟีนอล คอปเปอร์ออกไซด์ อะลูมินา ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

Title	Removal of Phenol by Oxidation Reaction Using Copper Oxide Loded on Alumina as Catalyst	
Students	Miss Kanokwan Momala	Student ID 56050434
	Mr. Jakraphong Thanawet	Student ID 56050452
	Miss Jiratchaya Sonsomboon	Student ID 56050464
Degree	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)	
Department	Chemistry	
Faculty	Science	
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)	
Academic Year	2016	
Advisor	Dr. Amnat Permsubscul	

Abstract

This research investigated the efficiency of catalysts used in phenol removal by oxidation with hydrogen peroxide as oxidizing agent and copper oxide on alumina as catalyst. By studying the variables affecting the reaction such as calcination temperature, copper content on alumina, concentration of hydrogen peroxide, catalyst content, initial concentration of phenol in synthetic wastewater, reaction time and temperature. The catalyst was prepared by incipient wetness impregnation method by varying the concentration of copper(II) nitrate ($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$) solution. X-ray diffraction (XRD), X-ray fluorescence (XRF), scanning electron microscope (SEM) and BET technique were used for characterization of catalysts. UV-Vis Spectroscopy is applied to measure the concentration of phenol after reaction. From the experiments, it was found that at the initial concentration of phenol 500 ppm and changing the other variables, the optimum condition of this reaction was using 7%wt of CuO supported on alumina, 2.0 g/L of catalyst, concentration of 0.3 M of hydrogen peroxide at 60 minutes and 80 °C which can achieve 86.36% of phenol removal.

Keywords : phenol, copper oxide, alumina, hydrogen peroxide

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดีด้วยความกรุณาจากบุคคลหลายๆฝ่ายที่ให้ความร่วมมือซึ่งคณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณทุกท่านไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ ดร.อำนาจ เพิ่มทรัพย์สกุล ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษที่กรุณาให้คำแนะนำ คำปรึกษา เอื้อเพื่อเอกสารต่างๆ ตลอดจนชี้แนะแนวทางและให้ความช่วยเหลือในการตรวจสอบแก้ไขปัญหาข้อบกพร่องของโครงการฉบับนี้ได้เป็นอย่างดีมาตลอด จึงขอกราบขอบพระคุณด้วยความเคารพเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.วิบูลย์ ประดิษฐ์เวียงคำ และ ผศ.ดร.ปานไพลิน สีหาราช คณะกรรมการที่กรุณาให้คำปรึกษาและคำแนะนำ ตลอดจนตรวจสอบและแก้ไขเพิ่มเติม ทำให้โครงการฉบับนี้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณท่านคณาจารย์ภาควิชาเคมีทุกท่านเป็นอย่างสูง ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา พร้อมทั้งให้คำแนะนำต่างๆ และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีรวมทั้งเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ที่อำนวยความสะดวกในด้านอุปกรณ์ สารเคมี และเครื่องมือต่างๆ ตลอดระยะเวลาในการทำปัญหาพิเศษครั้งนี้

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณ ครอบครัว สำหรับกำลังใจ และขอบคุณเพื่อนๆที่คอยให้ความช่วยเหลือจนโครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

กนกวรรณ โม้มมาลา
จักรพงษ์ ทานะเวช
จิรัชญา สอนสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ลักษณะทั่วไปของฟินอล	4
2.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของฟินอล	5
2.1.2 การผลิตฟินอล	5
2.1.3 ประโยชน์ของฟินอล	7
2.1.4 ผลกระทบของฟินอลที่มีต่อคนและสัตว์	7
2.2 ลักษณะทั่วไปของอะลูมิเนียมออกไซด์	8
2.3 ลักษณะทั่วไปของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	9
2.4 ตัวเร่งปฏิกิริยา	11
2.4.1 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	12
2.4.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา.....	13
2.4.3 การเปลี่ยนตัวเร่งปฏิกิริยาให้อยู่ในรูปที่ว่องไว.....	15
2.4.4 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแบบอื่นๆ	15
2.5 การบำบัดน้ำเสีย	16
2.5.1 กระบวนการทางชีววิทยา.....	16
2.5.2 กระบวนการทางกายภาพ	16
2.5.3 กระบวนการทางเคมี.....	17
2.5.3.1 ปฏิกริยาเฟนตัน	18
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	22
3.1 สารเคมี	22
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์	22
3.3 วิธีการทดลอง	23
3.3.1 การเตรียมกราฟมาตรฐานของสารละลายฟีนอล	23
3.3.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาและการวิเคราะห์คุณสมบัติตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ทำการสังเคราะห์	23
3.3.2.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์บนอะลูมินา	23
3.3.2.2 การวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์บนอะลูมินา	24
3.3.3 การทำปฏิกิริยาออกซิเดชันของฟีนอล	26
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	28
4.1 การวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์บนอะลูมินา	28
4.1.1 ลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด	28
4.1.2 โครงสร้างและความเป็นผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา ด้วยเทคนิคเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์	30
4.1.3 ปริมาณของคอปเปอร์บนอะลูมินา ด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์	32
4.1.4 พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาตรวจสอบ ด้วยวิธี BET	33
4.2 การเตรียมกราฟมาตรฐานสารละลายฟีนอล	33
4.3 ผลของตัวแปรที่มีต่อกระบวนการกำจัดฟีนอล	34
4.3.1 ผลของปริมาณคอปเปอร์บนตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการกำจัดฟีนอล	34
4.3.2 ผลของความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อการกำจัดฟีนอล	36
4.3.3 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการกำจัดฟีนอล	38
4.3.4 ผลของความเข้มข้นฟีนอลเริ่มต้นต่อการกำจัดฟีนอล	40
4.3.5 ผลของเวลาการทำปฏิกิริยาต่อการกำจัดฟีนอล	41
4.3.6 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่อการกำจัดฟีนอล	43
4.4 การเปรียบเทียบปฏิกิริยาออกซิเดชันของฟีนอลเมื่อใช้และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา	44
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	46
5.1 สรุปผลการทดลอง	46
5.2 ข้อเสนอแนะ	47
เอกสารอ้างอิง	48
ภาคผนวก	50
ภาคผนวก ก	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	แสดงสมบัติทางเคมีของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	10
3.1	สภาวะของตัวแปรที่ทำการศึกษสำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชันของฟินอล	27
4.1	องค์ประกอบของโลหะในตัวเร่งปฏิกิริยา CuO/Al ₂ O ₃ ด้วยวิธีวิเคราะห์ XRF	32
4.2	พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาตรวจสอบด้วยวิธี BET	33
4.3	ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของฟินอลที่เป็นสารละลายมาตรฐาน	33
4.4	ผลของความเข้มข้นสารละลายคอปเปอร์บนตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการกำจัดฟินอล	35
4.5	ผลของความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อการกำจัดฟินอล	36
4.6	ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการกำจัดฟินอล	38
4.7	ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อการกำจัดฟินอล	40
4.8	ผลของเวลาการทำปฏิกิริยาต่อการกำจัดฟินอล	42
4.9	ผลของอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาต่อการกำจัดฟินอล	43



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างทั่วไปของฟีนอล.....	4
2.2 กระบวนการซัลโฟเนชัน.....	5
2.3 กระบวนการคลอรีเนชัน.....	5
2.4 กระบวนการไฮโคลเฮกซะโนน.....	6
2.5 กระบวนการผลิตฟีนอลโดยใช้กรดเบนโซอิก.....	6
2.6 กระบวนการผลิตฟีนอลโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	6
2.7 กระบวนการผลิตฟีนอลโดยมีควิมีนเป็นสารตัวกลาง.....	7
2.8 ลักษณะโครงสร้างของแอลฟา – อะลูมินัมออกไซด์ (α - Al_2O_3).....	9
2.9 การแจกแจงพลังงานของอนุภาคเมื่อไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา.....	11
2.10 การแจกแจงพลังงานของอนุภาคเมื่อมีตัวเร่งปฏิกิริยา.....	11
2.11 กราฟแสดงการเปรียบเทียบพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยา.....	12
3.1 เครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์.....	24
3.2 เครื่องเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์.....	24
3.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	25
3.4 เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุน.....	25
3.5 ชุดปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชันของฟีนอล.....	26
4.1 ลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	28
4.2 ดิฟแฟรคโตรแกรมของ 10%CuO/ Al_2O_3 ที่เผาด้วยอุณหภูมิ 550°C, 600°C และ 700°C.....	30
4.3 ดิฟแฟรคโตรแกรมของคอปเปอร์ออกไซด์บนอะลูมินา.....	31
4.4 ดิฟแฟรคโตรแกรมของคอปเปอร์ออกไซด์(CuO).....	31
4.5 ดิฟแฟรคโตรแกรมของอะลูมิเนียมออกไซด์(Al_2O_3).....	31
4.6 กราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของฟีนอลและค่าการดูดกลืนแสง.....	34
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคอปเปอร์กับปริมาณฟีนอลคงเหลือ.....	35
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคอปเปอร์กับร้อยละการกำจัดฟีนอล.....	35
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับ ความเข้มข้นของฟีนอลคงเหลือ.....	37
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับ ร้อยละการกำจัดฟีนอล.....	37
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยากับความเข้มข้นของฟีนอลคงเหลือ.....	39
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยากับร้อยละการกำจัดฟีนอล.....	39
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นฟีนอลเริ่มต้นกับความเข้มข้นของฟีนอลคงเหลือ.....	40
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นฟีนอลเริ่มต้นกับร้อยละการกำจัดฟีนอล.....	41
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการทำปฏิกิริยากับความเข้มข้นฟีนอลคงเหลือ.....	42
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการทำปฏิกิริยากับร้อยละการกำจัดฟีนอล.....	42
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยากับความเข้มข้นฟีนอลคงเหลือ.....	43

เอกสารนี้เป็นของ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยากับร้อยละการกำจัดฟีนอล..... 44

4.19 เปรียบเทียบความเข้มข้นของฟีนอลคงเหลือที่ความเข้มข้น H₂O₂ ต่างๆ
 เมื่อมีการใช้และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 7% CuO/Al₂O₃ 45

4.20 เปรียบเทียบร้อยละการกำจัดฟีนอลคงเหลือที่ความเข้มข้น H₂O₂ ต่างๆ
 เมื่อมีการใช้และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 7% CuO/Al₂O₃ 45



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการเติบโตของภาคอุตสาหกรรมไม่เพียงส่งผลให้การผลิตขยายตัวเท่านั้นแต่ยังส่งเสริมให้เกิดการขยายตัวของบริการอีกด้วยเช่นกัน แม้การขยายตัวดังกล่าวจะมีส่วนช่วยให้มนุษย์มีความสะดวกสบายในการดำรงชีวิตมากขึ้นก็ตาม ปัญหาสำคัญที่มาพร้อมกับการขยายตัวคือเรื่องของน้ำเสียหรือน้ำทิ้งที่ทำให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อมนุษย์และสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในแหล่งน้ำ น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีได้มีการบำบัดก่อนปล่อยน้ำทิ้งลงสู่แหล่งน้ำจัดได้ว่ามีแนวโน้มที่รุนแรงกว่าน้ำเสียจากแหล่งอื่นๆ เนื่องจากน้ำเสียจากชุมชนส่วนใหญ่มักอยู่ในรูปสารอินทรีย์ ในขณะที่น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมอาจมีทั้งที่อยู่ในรูปสารอินทรีย์ สารอาหาร โลหะหนัก และสารพิษ ดังนั้นจึงได้มีการคิดค้นการกำจัดสิ่งปนเปื้อนที่มีอยู่ในน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม ได้แก่ การบำบัดทางกายภาพ (Physical treatment) เป็นการกำจัดของเสียหรือสิ่งปนเปื้อนออกจากน้ำเสียอย่างง่ายซึ่งจะแยกของแข็งที่ไม่ละลายน้ำออก เช่น การตกตะกอน การกรอง เป็นต้น การบำบัดทางชีวภาพ (Biological treatment) เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่อาศัยสิ่งมีชีวิตซึ่งอาจจะเป็นจุลินทรีย์หรือพืชในการบำบัดซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ แต่หลักการนี้ต้องเลือกสภาวะแวดล้อมให้เหมาะกับการทำงานของจุลินทรีย์ การบำบัดทางเคมี (Chemical treatment) เป็นการบำบัดน้ำเสียโดยการแยกสารต่างๆ หรือสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียที่บำบัด เช่น โลหะหนัก สารพิษ สภาพความเป็นกรด ต่างสูงๆ ที่ปนเปื้อนอยู่โดยการเติมสารต่างๆไปเพื่อให้เข้าไปทำปฏิกิริยา [1]

ฟีนอล เป็นสารประกอบอะโรมาติกที่ผลิตได้จากสารประกอบอะโรมาติกชนิดอื่นๆ เช่น เบนซีน โทลูอีน มีชื่อเรียกอื่นๆว่า carbolic acid, hydroxybenzene, phenyl alcohol และ phenylic acid สูตรทางเคมีคือ C_6H_6O ลักษณะทางกายภาพมีทั้งในรูปผลึก หรือของเหลวไม่มีสี หากสัมผัสอากาศจะกลายเป็นสีชมพู กลิ่นมีลักษณะเฉพาะเป็นกลิ่นเหมือนกรด ฟีนอลถูกนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตผลิตภัณฑ์เคมีหลายชนิด อาทิ สีย้อม สารเคมีกำจัดวัชพืช และศัตรูพืช ยาในทางการแพทย์ และฟีนอลถูกนำมาใช้เป็นเคมีภัณฑ์ขั้นกลาง (chemical intermediates) สำหรับการผลิตพลาสติกชนิด phenolic resins และ epoxy resin นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติเป็นสารทำความสะอาดหรือฆ่าเชื้อ [2,3]

ฟีนอลมีความเป็นพิษสูง มีฤทธิ์กัดกร่อน สามารถทำให้เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนัง เยื่อบุตา เยื่อบุระบบทางเดินหายใจ มีอาการวิงเวียนศีรษะ อาเจียน ท้องร่วง และการได้รับสารฟีนอลเข้าทางปาก จะทำให้เสียชีวิตได้ อีกทั้งเมื่อได้รับสารฟีนอลเป็นเวลานานจนเกิดการสะสมในร่างกายระยะยาวแล้วเริ่มปรากฏอาการ เช่น ท้องร่วง เบื่ออาหาร ตับวาย และอาจก่อให้เกิดโรคมะเร็งได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีการปนเปื้อนของสารประกอบฟีนอลก่อนปล่อยออกแหล่งน้ำ [4]

อนึ่งฟีนอลเป็นสารตกค้างในดินและในน้ำเป็นเวลานานจึงต้องระมัดระวังการทิ้งลงระบบ สุขาภิบาลหรือที่สาธารณะทั่วไป ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 2 (พ.ศ.2539) ออกตามความ ในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ.2535 เรื่อง กำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน สารประกอบฟีนอล (phenols compound) ไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร [5]

วิธีการกำจัดฟีนอลทำได้หลายวิธี เช่น ปฏิกริยาเฟนตันร่วมกับการตกตะกอนด้วยปูนขาว ใช้เปอร์ออกซิเดสที่สกัดได้จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรบำบัดแบบ Activated Sludge และ ปฏิกริยาออกซิเดชัน เป็นต้น ซึ่งวิธีออกซิเดชันเหมาะต่อการบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นมาก หรือ เป็นมลพิษ ซึ่งมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นตัวออกซิไดส์ โดยมีตัวเร่งปฏิกริยาส่วนใหญ่ที่นิยมนำมาใช้ ได้แก่ สารประกอบของโลหะทรานซิชัน [6]

งานวิจัยนี้จึงได้มีจุดมุ่งหมายที่จะศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกริยาที่ใช้ในการกำจัดฟีนอล ด้วยวิธีออกซิเดชัน โดยใช้คอปเปอร์บนอะลูมินาเป็นตัวเร่งปฏิกริยา และทำการศึกษากันถึงตัวแปรที่มี ผลกระทบต่อการกำจัดฟีนอลในน้ำทิ้งสังเคราะห์ ได้แก่ อุณหภูมิในการเผาตัวเร่งปฏิกริยา ปริมาณคอปเปอร์บนอะลูมินา ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ปริมาณตัวเร่งปฏิกริยา ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลในน้ำทิ้ง เวลาและอุณหภูมิในการทำปฏิกริยา ซึ่งผลที่ได้จากการศึกษา จะเป็น การช่วยลดวัสดุเหลือทิ้งจากการบริโภค ลดปัญหามลพิษทางน้ำ อีกทั้งสามารถประยุกต์ใช้และ ขยายขนาดไปสู่ภาคอุตสาหกรรมในอนาคตต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษากระบวนการกำจัดฟีนอลด้วยปฏิกริยาออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยมี คอปเปอร์ออกไซด์บนอะลูมินาเป็นตัวเร่งปฏิกริยา
2. เพื่อศึกษาตัวแปรต่างๆที่มีผลกระทบต่อการกำจัดฟีนอล ได้แก่ อุณหภูมิในการเผาตัวเร่ง ปฏิกริยา ปริมาณคอปเปอร์บนอะลูมินา ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ปริมาณตัวเร่งปฏิกริยา ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล เวลา และอุณหภูมิที่ใช้ในการทำ ปฏิกริยา

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรรวมถึงสภาวะที่เหมาะสมที่มีผลต่อการกำจัดฟีนอลโดยทำการศึกษา ตัวแปรดังนี้
 - อุณหภูมิในการเผาตัวเร่งปฏิกริยา 550, 600 และ 700 องศาเซลเซียส
 - ปริมาณของคอปเปอร์บนอะลูมินา 3, 5, 7, 10 และ 15% โดยน้ำหนัก
 - ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.1, 0.2 และ 0.3 โมลต่อลิตร
 - ปริมาณตัวเร่งปฏิกริยาคอปเปอร์ออกไซด์บนอะลูมินาที่ใช้ในปฏิกริยา 1, 2, 3 และ 5 กรัมต่อลิตร
 - ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล 250, 500 และ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร
 - เวลาในการเกิดปฏิกริยา 30, 60, 90 และ 120 นาที
 - อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกริยา 40, 60 และ 80 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ศึกษาลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์บนอะลูมินา ได้แก่
 - โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาและความเป็นผลึก ตรวจสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD)
 - ปริมาณของคอปเปอร์บนอะลูมินา ตรวจสอบด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray fluorescence, XRF)
 - ลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)
 - พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา ตรวจสอบด้วยวิธี BET
3. ตรวจสอบความเข้มข้นของฟีนอลด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโคปี (UV-Vis spectroscopy) ที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงตัวแปรที่มีผลต่อการกำจัดฟีนอลด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยใช้ไฮโดรเจน-เปอร์ออกไซด์และตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์บนอะลูมินา รวมถึงทราบสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการกำจัดฟีนอลได้อย่างมีประสิทธิภาพ
2. สามารถใช้เป็นแนวทางในการกำจัดฟีนอลที่ปนเปื้อนในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อให้ได้น้ำที่ปราศจากสารปนเปื้อนก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ

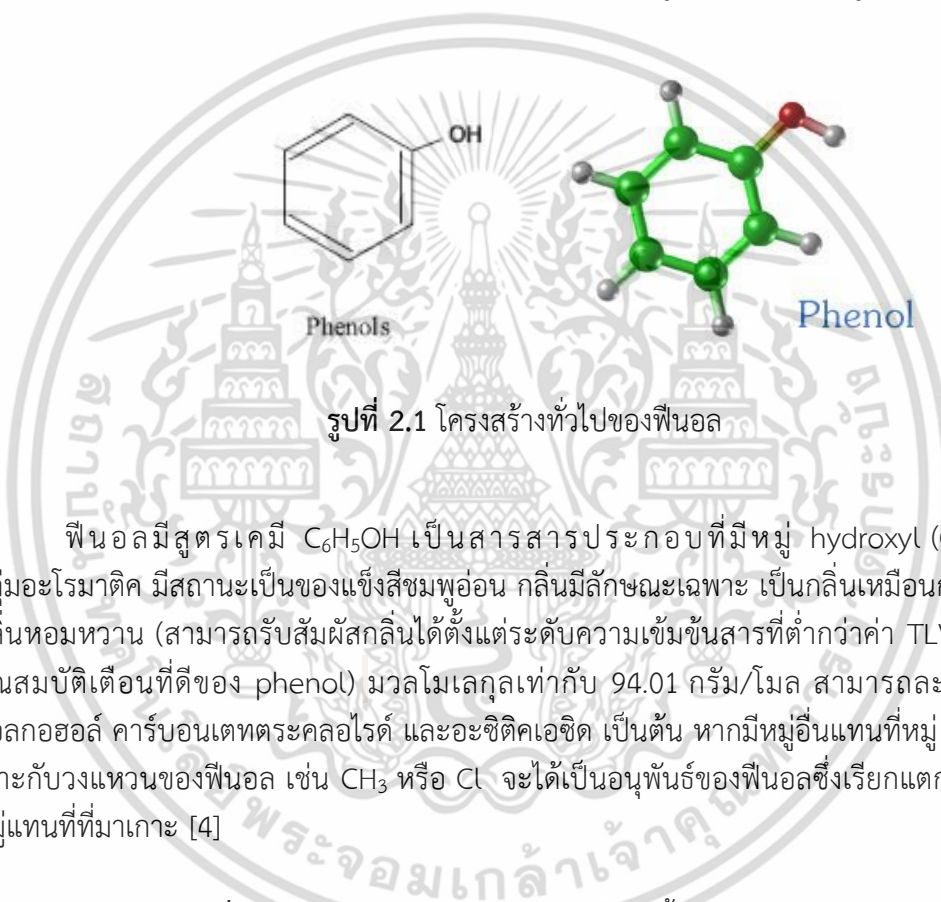
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ลักษณะทั่วไปของฟีนอล [2]

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



ฟีนอลมีสูตรเคมี C_6H_5OH เป็นสารประกอบที่มีหมู่ hydroxyl (OH) ต่อกับกลุ่มอะโรมาติก มีสถานะเป็นของแข็งสีชมพูอ่อน กลิ่นมีลักษณะเฉพาะ เป็นกลิ่นเหมือนกรดหรือเป็นกลิ่นหอมหวาน (สามารถรับสัมผัสกลิ่นได้ตั้งแต่ระดับความเข้มข้นสารที่ต่ำกว่าค่า TLV จึงนับเป็นคุณสมบัติเตือนที่ดีของ phenol) มวลโมเลกุลเท่ากับ 94.01 กรัม/โมล สามารถละลายได้ดีในแอลกอฮอล์ คาร์บอนเตตระคลอไรด์ และอะซิติกเอซิด เป็นต้น หากมีหมู่อื่นแทนที่หมู่ OH หรือมาเกาะกับวงแหวนของฟีนอล เช่น CH_3 หรือ Cl จะได้เป็นอนุพันธ์ของฟีนอลซึ่งเรียกแตกต่างกันตามหมู่แทนที่ที่มาเกาะ [4]

อุตสาหกรรมที่พบได้ โดยมากถูกนำมาใช้เป็นสารเคมีขั้นกลาง (intermediates chemical) สำหรับการผลิตพลาสติกชนิด phenolic resins และ epoxy resin และใช้ในการผลิตสารเคมีและยาต่างๆ นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติเป็นสารทำความสะอาดหรือสารฆ่าเชื้อ (disinfectants) สารประกอบในกลุ่ม phenol ตัวอื่นๆ ถูกนำมาใช้ในงานต่างๆ อีกหลายอย่าง เช่น cresol ใช้เป็นสารฆ่าเชื้อ catechol ใช้ในงานภาพถ่าย ย้อมขนสัตว์และฟอกหนัง resorcinol ใช้เป็นตัวกลางในการผลิตกาวย้อม และผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับยา hydroquinone ใช้ในงานภาพถ่าย ใช้เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant) และเป็นสารยับยั้งกระบวนการ polymerization [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพ และเคมีของฟีนอล [4]

สูตรโมเลกุล : C_6H_5OH

น้ำหนักโมเลกุล : 94.01 g/mol

สถานะ : ของแข็งสีชมพูอ่อน

ความหนาแน่น ที่ $20\text{ }^{\circ}\text{C}$: 1.0576 g/cm^3

จุดเดือด : $181.75\text{ }^{\circ}\text{C}$

จุดหลอมเหลว : $40.9\text{ }^{\circ}\text{C}$

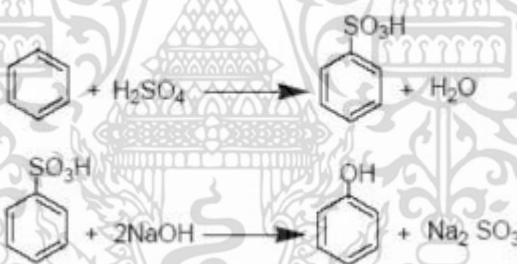
ความดันไอ ที่ $25\text{ }^{\circ}\text{C}$: 0.3513 torr

ความสามารถการละลาย : 86,000 ppm ในน้ำ ละลายได้ดีในแอลกอฮอล์, คาร์บอนเตตระคลอไรด์, อะซิติกเอซิด, ซัลเฟอร์ไดออกไซด์, คลอโรฟอร์ม, คาร์บอนไดซัลไฟด์ และเบนซีน

2.1.2 การผลิตฟีนอล [4]

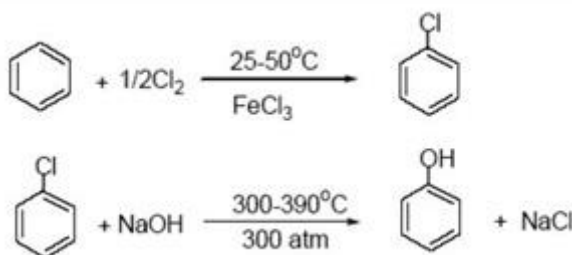
การผลิตฟีนอลมีอยู่หลายวิธีได้แก่

1. The Sulfonation Process เป็นวิธีการผลิตฟีนอลที่ใช้เบนซีน (Benzene) และกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) เป็นสารตั้งต้น ข้อเสียของวิธีการนี้ คือ เกิด Sodium sulfate ในปริมาณสูง ปฏิกริยาแสดงดังรูปที่ 2.2



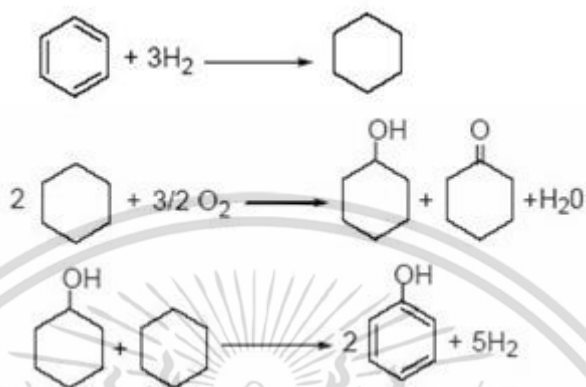
รูปที่ 2.2 กระบวนการซัลโฟเนชัน

2. Chlorination Process เป็นวิธีการผลิตฟีนอลที่ใช้เบนซีน (Benzene) และก๊าซคลอรีน (Cl_2) เป็นสารตั้งต้น เกิดผลิตภัณฑ์เป็นฟีนอล และโซเดียมคลอไรด์ ปฏิกริยาแสดงดังรูปที่ 2.3



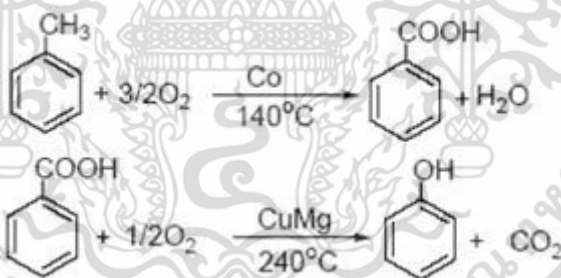
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการ **รูปที่ 2.3 กระบวนการคลอรีเนชัน** อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. Cyclohexanone Process เป็นวิธีการผลิตฟีนอลที่ใช้เบนซีน (Benzene) และก๊าซไฮโดรเจน (H_2) เป็นสารตั้งต้น ได้ cyclohexane และถูกออกซิไดซ์ต่อเป็น cyclohexanol และ cyclohexanone และทำปฏิกิริยาต่อจนได้ผลิตภัณฑ์เป็นฟีนอล ปฏิกิริยาแสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กระบวนการไซโคลเฮกซะโนน

4. Benzoic Acid Process เป็นวิธีการผลิตฟีนอลที่ใช้โทลูอินเป็นสารตั้งต้น ปฏิกิริยาแสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 กระบวนการผลิตฟีนอลโดยใช้กรดเบนโซอิก

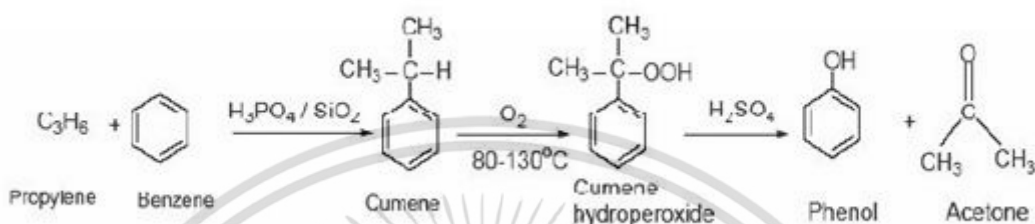
5. H_2O_2 Process เป็นวิธีการผลิตฟีนอลที่ใช้เบนซีน (Benzene) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) เป็นสารตั้งต้น ปฏิกิริยาแสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 กระบวนการผลิตฟีนอลโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. Cumene Process เป็นวิธีการผลิตฟีนอลที่ใช้เบนซีน (Benzene) และโพรพิลีน (Propylene) เป็นสารตั้งต้น และใช้ H_3PO_4/SiO_2 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ผลิตภัณฑ์จะได้ฟีนอล และ อะซีโตน มีข้อดีคือ สารตั้งต้นมีราคาถูก ข้อเสีย คือ ผลิตภัณฑ์ที่ได้เสี่ยงต่อการระเบิดได้ (Cumene Hydroperoxide) และสารตัวเร่งปฏิกิริยามีฤทธิ์กัดกร่อน ปฏิกิริยาแสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 กระบวนการผลิตฟีนอลโดยมีคิวมินเป็นสารตัวกลาง

สารฟีนอลที่เกิดการย่อยสลายจะให้ชนิดต่าง ๆ ที่เป็นอนุพันธ์ ซึ่งมีลักษณะคุณสมบัติทางเคมีที่แตกต่างกัน เช่น น้ำหนักโมเลกุล จุดหลอมเหลว และจุดเดือด เป็นต้น

2.1.3 ประโยชน์ของฟีนอล [3]

โดยมากถูกนำมาใช้เป็นสารเคมีขั้นกลาง (intermediates chemical) สำหรับการผลิพลาสติกชนิด phenolic resins และ epoxy resin และ ใช้ในการผลิตสารเคมีและยาต่าง ๆ นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติเป็นสารทำความสะอาดหรือสารฆ่าเชื้อ (disinfectants) สารประกอบในกลุ่ม phenol ตัวอื่นๆ ถูกนำมาใช้ในงานต่างๆ อีกหลายอย่าง เช่น cresol ใช้เป็นสารฆ่าเชื้อ catechol ใช้ในงานภาพถ่าย ย้อมขนสัตว์และฟอกหนัง resorcinol ใช้เป็นตัวกลางในการผลิตกาวย้อม และผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับยา hydroquinone ใช้ในงานภาพถ่าย ใช้เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant) และเป็นสารยับยั้งกระบวนการ polymerization

2.1.4 ผลกระทบของฟีนอลที่มีต่อคนและสัตว์ [4]

การปนเปื้อนของฟีนอลสู่สิ่งแวดล้อมมักมีแหล่งกำเนิดมาจากภาคอุตสาหกรรมที่อาจเกิดการแพร่ออกสู่สิ่งแวดล้อมในกระบวนการผลิต กระบวนการจัดเก็บ กระบวนการขนส่ง และ กำจัดของเสีย อุตสาหกรรมเหล่านั้น ได้แก่ การผลิตพลาสติก การผลิตยากำจัดศัตรูพืช การฟอกย้อม และสีย้อม อุตสาหกรรมพ่นสีรถยนต์ เป็นต้น หากมีการปนเปื้อนจะทำให้เกิดอันตรายต่อคน สัตว์ ระบบนิเวศ และสิ่งแวดล้อมได้สูง สำหรับความเป็นพิษของฟีนอลแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

1. การเป็นพิษเฉียบพลัน (acute toxic) อันเกิดจากการสัมผัส จะทำให้เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนัง เยื่อบุตา เยื่อบุระบบทางเดินหายใจ มีอาการวิงเวียนศีรษะ อาเจียน ท้องร่วง และการได้รับสารฟีนอลเข้าทางปากเพียง 4.8 มิลลิกรัม จะทำให้เสียชีวิตได้ภายใน 15 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. **ความเป็นพิษเรื้อรัง (chronic toxic)** อันเกิดจากการสัมผัส และได้รับสารฟีนอล เป็นเวลานานจนเกิดการสะสมในร่างกายระยะยาวแล้วเริ่มปรากฏอาการ เช่น ท้องร่วง เบื่ออาหาร ตัวยาว และอาจก่อให้เกิดโรคมะเร็งได้

ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งของสารฟีนอลจากโรงงานอุตสาหกรรม และนิคมอุตสาหกรรม พ.ศ. 2539 กำหนดให้มีค่าฟีนอลไม่เกิน 1 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งปริมาณฟีนอลในน้ำเสียจะแตกต่างกันตามประเภท และขนาดอุตสาหกรรมนั้นๆ เช่น อุตสาหกรรมผลิตกระดาษ มีความเข้มข้นของฟีนอลในน้ำเสียประมาณ 0 - 800 มิลลิกรัม/ลิตร อุตสาหกรรมกลั่นน้ำมันมีความเข้มข้นในน้ำเสีย 0-270 มิลลิกรัม/ลิตร เป็นต้น ส่วน U.S. EPA กำหนดมาตรฐานการปนเปื้อนฟีนอลในแหล่งน้ำผิวดิน ไม่เกิน 3.5 มิลลิกรัม/ลิตร

Baker (1978) ได้ศึกษากลุ่มตัวอย่างจำนวน 39 คน ที่ดื่มน้ำปนเปื้อนฟีนอลในปริมาณ 10-240 มิลลิกรัม/วัน พบว่า คนเหล่านั้นมีอาการท้องร่วง เป็นแผลที่ปาก และระบบทางเดินอาหาร

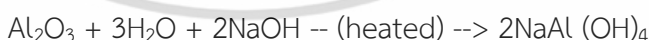
Deich man (1994) ได้ศึกษาผลของฟีนอลต่อหนู หนู และกระต่าย ที่ได้รับฟีนอลในปริมาณ 26-52 มิลลิกรัม/ลิตร เป็นเวลา 7 ชั่วโมง/วัน พบว่า หลังจากวันที่ 28 ของการให้สารฟีนอล หนู 5 ตัวใน 12 ตัว เกิดการเสียชีวิต

2.2 ลักษณะทั่วไปของอะลูมิเนียมออกไซด์ [7,8]

อะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminum oxide) เป็นสารประกอบเคมีของอะลูมิเนียม และ ออกซิเจนมีสูตรเคมีดังนี้ Al_2O_3 ในทางเซรามิกวัสดุศาสตร์และเหมืองเรียกว่า **อะลูมินา (Alumina)**

อะลูมิเนียมออกไซด์ เป็นส่วนประกอบหลักของแร่บอกไซต์ (bauxite) หรือแร่อะลูมิเนียม ในอุตสาหกรรมบอกไซต์ถูกทำให้บริสุทธิ์เป็นอะลูมิเนียมออกไซด์ โดย กระบวนการไบเออร์ (Bayer process) และเปลี่ยนเป็นโลหะอะลูมิเนียมโดย กระบวนการฮอลล์-ฮีรูลต์ (Hall-Heroult process)

บอกไซต์ที่ไม่บริสุทธิ์จะประกอบด้วย $Al_2O_3 + Fe_2O_3 + SiO_2$. โดยกระบวนการไบเออร์ ดังสมการ

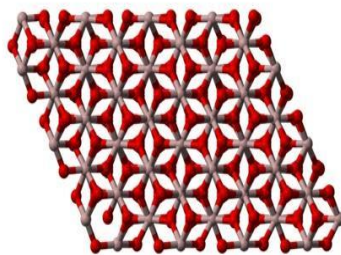


Fe_2O_3 ไม่ละลายในด่าง ส่วน SiO_2 ละลายเป็นซิลิเกต (silicate) $Si(OH)_6^{-6}$ โดยการกรอง Fe_2O_3 จะถูกกำจัดออก เมื่อเติมกรดลงไป $Al(OH)_3$ จะตกตะกอน ซิลิเกต (silicate) จะเหลืออยู่ในสารละลาย ดังสมการ



Al_2O_3 คือ อะลูมินา (Alumina)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 ลักษณะโครงสร้างของแอลฟา - อะลูมินั่มออกไซด์ (α - Al_2O_3)

อะลูมิเนียมออกไซด์ พบในธรรมชาติในรูปของแร่คอร์ันดัม (corundum) โดยปกติจะมีสีขาวหรือไม่มีสี แต่หากมีสิ่งเจือปนในโครงสร้างของอะลูมินาเล็กน้อย จะทำให้เกิดสีต่างๆทำให้มีความสวยงามมากขึ้น กลายเป็นแร่ที่มีค่า เช่น สีแดงของทับทิมเกิดจากมีธาตุโครเมียมอยู่ในเนื้ออะลูมินา เป็นต้น โครงสร้างของอะลูมินาประกอบด้วยพันธะระหว่างอะลูมิเนียมกับออกซิเจนที่มีความแข็งแรงมาก การทำลายพันธะดังกล่าว ต้องใช้พลังงานสูง ทำให้อะลูมินามีความแข็งแรง โดยวัสดุที่แข็งแรงมากกว่าอะลูมินา มีเพียงเพชรเท่านั้น นอกจากนั้นแล้ว อะลูมินายังทนความร้อนและการกัดกร่อนจากสารเคมีชนิดต่าง ๆ ได้ดียิ่ง และมีความเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีอีกด้วย

ประโยชน์ของอะลูมินามีมากมาย นอกจากจะใช้เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์เซรามิก เพื่อให้เกิดความแข็งแรง มากขึ้นแล้ว ยังสามารถนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีประโยชน์หลายชนิด เช่น ใช้ทำวัสดุทนไฟในเตาเผาและเตาหลอม วัสดุขัดถู ลูกบิดและผนังกรูหม้ออบสำหรับอุตสาหกรรมเซรามิก ถ้วยเผาสาร (crucible) สำหรับอุตสาหกรรมอัญมณี หัวฟันทรายสำหรับงานตกแต่งผิวโลหะ แผ่นรองวงจรไฟฟ้ารวม (IC) สำหรับอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ หัวเทียนสำหรับอุตสาหกรรมยานยนต์ ใช้ทำฝาครอบหลอดไฟโซเดียมที่ให้ความสว่างสูง และยังใช้เป็นชิ้นส่วนของ อวัยวะทดแทน เช่น ข้อต่อกระดูกเทียม เป็นต้น [6]

2.3 ลักษณะทั่วไปของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ [9]

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ สูตรโมเลกุลคือ H_2O_2 เป็นสารประกอบเปอร์ออกไซด์ (สารที่ประกอบด้วยออกซิเจนสองตัวและ เชื่อมกันด้วยพันธะเดี่ยว) รูปแบบที่ง่ายที่สุด จึงมีสภาพเป็นของเหลวใส และมีลักษณะหนืดกว่าน้ำเล็กน้อย มีรสขม ไม่อยู่ตัว ซึ่งสามารถสลายตัวเป็นออกซิเจนกับ น้ำ เมื่อเจือจางจะเป็นสารละลายไม่มีสี เนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ สามารถสลายตัวเป็นน้ำได้เมื่อถูกแสงและความร้อน จึงควรเก็บรักษาสารชนิดนี้ไว้ในภาชนะทึบแสง

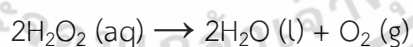
คุณสมบัติทางเคมี

ตารางที่ 2.1 : แสดงสมบัติทางเคมีของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

คุณสมบัติของสาร	
ชื่อทั่วไปของสารเคมี	Hydrogen peroxide
ชื่อตามระบบ IUPAC	Dihydrogen dioxide
สูตรโมเลกุล	H ₂ O ₂
น้ำหนักโมเลกุล	34.0147 g/mol
จุดเดือด (bp)	152 องศาเซลเซียส
จุดหลอมเหลว (mp)	-0.43 องศาเซลเซียส
คุณสมบัติ	เป็นของเหลวที่ไม่คงตัว ไม่มีสี มีรสขม ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปสารละลายในน้ำ ความเข้มข้น 3-90% หากอุณหภูมิต่ำ ($\leq 120\text{ }^{\circ}\text{C}$) จะเป็นเกล็ดแข็งสีขาว

นอกจากนี้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ยังเป็นสารฆ่าเชื้อ (sanitizer) ที่มีฤทธิ์ในการยับยั้งการเจริญเติบโตของ เชื้อจุลินทรีย์และแบคทีเรีย โดยปกติไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะสลายตัวไปเองอย่างช้าๆ ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำ และแก๊สออกซิเจน โดยมีแสงสว่างและความร้อนจะช่วยเร่งให้เกิดการสลายตัวเร็วขึ้น

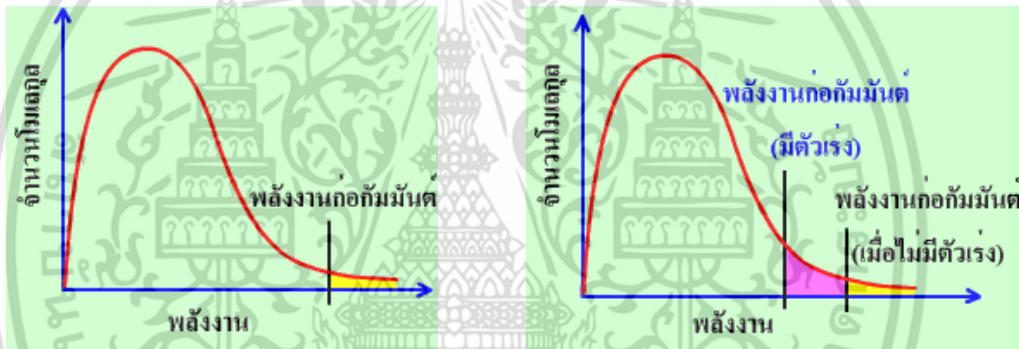
ปฏิกิริยาการสลายตัว :



2.4 ตัวเร่งปฏิกิริยา [10]

ตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) ในบางกรณี การเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาโดยเพิ่มอุณหภูมิหรือความเข้มข้นของสารตั้งต้นอาจไม่เหมาะสมในเชิงปฏิบัติ วิธีที่เหมาะสมที่สุดคือ การเติมตัวเร่งปฏิกิริยาลงไป เช่น การเตรียมแก๊สออกซิเจน (O_2) จากการเผาโพแทสเซียมคลอเรต ($KClO_3$) จะได้ O_2 ค่อนข้างช้า ถ้าเราเติมแมงกานีสไดออกไซด์ (MnO_2) ลงไปด้วย MnO_2 จะช่วยเร่งให้เกิด O_2 ได้เร็วขึ้น แต่สุดท้ายแล้วมันเองจะไม่มีเปลี่ยนแปลง มีเพียง $KClO_3$ เท่านั้นที่เปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ คือ KCl และ O_2 จึงให้ความหมายของตัวเร่งปฏิกิริยาว่าเป็นสารที่ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้นโดยที่สารตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถกลับคืนสู่รูปเดิมได้ ตัวเร่งปฏิกิริยาอาจจะเข้าทำปฏิกิริยาแล้วเกิดเป็นสารมัธยันตร์ (intermediate) แต่ก็จะกลับคืนรูปเดิมได้ในปฏิกิริยาย่อยขั้นต่อไป

การอธิบายว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา ก็ยังคงต้องใช้ทฤษฎีการชน และกราฟการกระจายอนุภาคของแมกซ์เวลล์-โบลซ์มันน์เช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ดังนี้



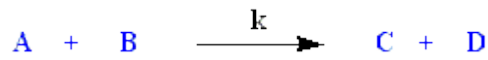
รูปที่ 2.9 การแจกแจงพลังงานของอนุภาคเมื่อไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา รูปที่ 2.10 การแจกแจงพลังงานของอนุภาคเมื่อมีตัวเร่งปฏิกิริยา

รูปที่ 2.9 และ 2.10 เป็นกราฟการแจกแจงพลังงานของอนุภาคเมื่อไม่มีและมีตัวเร่งปฏิกิริยาตามลำดับ จะสังเกตเห็นว่ามีบางอย่างเปลี่ยนไป สิ่งที่เปลี่ยนไปก็คือ ตำแหน่งของพลังงานก่อกัมมันต์เลื่อนมาทางซ้ายมากขึ้น จำนวนอนุภาคทางขวาของพลังงานก่อกัมมันต์มีมากขึ้น จึงเพิ่มโอกาสให้อนุภาคเกิดปฏิกิริยามากขึ้น ดังนั้นการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจึงทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้นนั่นเอง

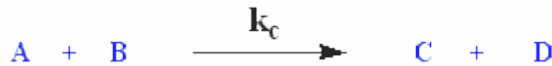
ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ได้เป็นตัวลดหรือทำให้พลังงานก่อกัมมันต์ลดลง แต่เป็นวิถี (pathway) หรือเส้นทางเลือกซึ่งมีพลังงานก่อกัมมันต์ต่ำกว่าพลังงานก่อกัมมันต์เดิม ที่กล่าวเช่นนี้ได้ก็เพราะอนุภาคที่มีพลังงานสูง(อยู่แล้ว)ก็ยังสามารถชนกันแล้วเกิดปฏิกิริยาที่สภาวะเดิมที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาได้

ถ้าพิจารณากราฟการเปลี่ยนแปลงพลังงานเมื่อปฏิกิริยาดำเนินไป จะเป็นดังตัวอย่างต่อไปนี้

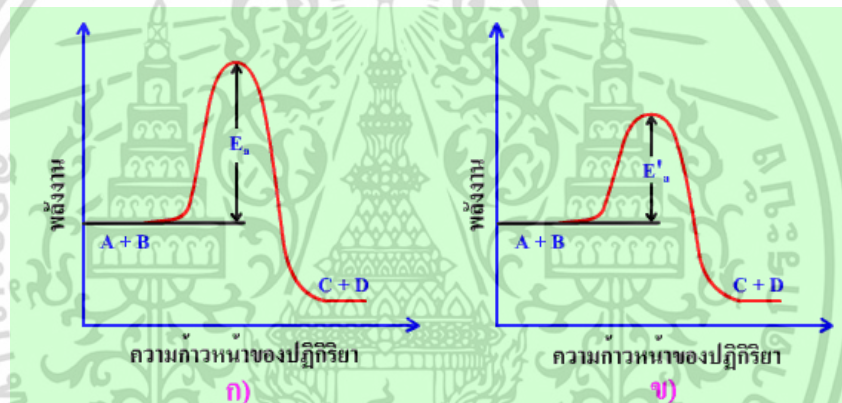
สมมติว่าปฏิกิริยามีค่าคงที่อัตราเป็น k และมีพลังงานก่อกัมมันต์เป็น E_a ดังสมการ



ถ้าใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาลงไปด้วย จะได้ค่าคงที่อัตราเป็น k_c ซึ่งเรียกว่า ค่าคงที่อัตราเมื่อถูกเร่ง (catalytic rate constant)



อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ถูกเร่งจะสูงกว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่มีตัวเร่ง เพราะตัวเร่งปฏิกิริยาจะช่วยเพิ่มเส้นทางที่มีพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาลดลง ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น แต่พลังงานรวมของสารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์จะไม่เปลี่ยนแปลง ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.11 กราฟแสดงการเปรียบเทียบพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยา
ก) เมื่อไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา ข) เมื่อมีตัวเร่งปฏิกิริยา

จากรูปที่ 2.11 จะเห็นได้ว่า พลังงานก่อกัมมันต์ E_a ลดลงเป็น E'_a และพลังงานก่อกัมมันต์ลดลงทั้งปฏิกิริยาที่เกิดไปข้างหน้าและย้อนกลับ ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจึงเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาทั้งปฏิกิริยาที่เกิดไปข้างหน้าและปฏิกิริยาที่เกิดย้อนกลับ

2.4.1 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา [11]

ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์

ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์เป็นตัวเร่งที่มีสถานะเดียวกันกับตัวทำปฏิกิริยา แต่กลไกในการเร่งแตกต่างกันกับตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ (Homogeneous catalyst) โดยปกติตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีเนื้อเดียวกัน จะเกิดการละลายในตัวทำละลายที่เหมาะสม ตัวอย่างหนึ่งของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีเนื้อสารเดียวกันกับตัวทำละลายคือ ไอออนไฮโดรเจน (H^+) ในเอสเทอร์ของกรดคาร์บอกซิลิก เช่น การทำปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดเมทิลอะซีเตต จากกรดอะซีติก และ

เมทานอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์

การเร่งปฏิกิริยาที่สารตั้งต้นและตัวเร่งมีวิวัฒนาการต่างกัน เรียกว่า การเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ (heterogeneous catalysis) ปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ส่วนใหญ่นิยมใช้ตัวเร่งที่เป็นของแข็งในการเร่งปฏิกิริยาที่มีสารตั้งต้นที่อยู่ในวิวัฒนาการแก๊สหรือของเหลว ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยากันที่ผิวของตัวปฏิกิริยาที่สำคัญ ๆ ในอุตสาหกรรมผลิตสารเคมีจะใช้การเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ เช่น การสังเคราะห์แอมโมเนีย การผลิตกรดไนตริก และการผลิตตัวเร่งกำจัดไอเสีย เป็นต้น

ตัวเร่งปฏิกิริยาเอนไซม์

ในการเกิดปฏิกิริยาใด ๆ ก็ตาม ต้องอาศัยพลังงานจำนวนหนึ่งเพื่อกระตุ้นให้สารเข้าสู่สภาพเปลี่ยน (Transition state) พลังงานที่เพิ่มเข้าไปนี้ เรียกว่า พลังงานกระตุ้น (Activation energy) ซึ่งปฏิกิริยาเคมีทุกชนิดจะต้องผ่านสภาพเปลี่ยนนี้ก่อนที่จะเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยา การที่เอนไซม์สามารถเร่งปฏิกิริยาให้เกิดได้เร็วขึ้นเนื่องจาก เอนไซม์จะไปลดระดับพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นให้สารอยู่ในสภาพเปลี่ยน ทำให้สารที่ทำปฏิกิริยาขึ้นไปอยู่ในสภาพเปลี่ยนได้ง่ายขึ้น โอกาสที่จะได้ผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาจึงมีมากกว่าปฏิกิริยาที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา แต่พลังงานของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะไม่เปลี่ยนแปลง

2.4.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาขึ้นกับกรรมวิธีที่ใช้ในการเตรียมสาร การเตรียมแต่ละครั้งต้องคำนึงถึงสมบัติทางกายภาพที่สำคัญของตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ พื้นที่ผิว เสถียรภาพและความทนทาน การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่

- กลุ่มที่ 1 คือ การเตรียมตัวเร่งกลุ่มออกไซด์ (Active oxide component)
- กลุ่มที่ 2 คือ การนำองค์ประกอบที่ไวต่อปฏิกิริยาว่างบนตัวรองรับ (Deposition produced activity component)
- กลุ่มที่ 3 คือ กลุ่มที่มีการเตรียมพิเศษเฉพาะตัวอย่าง

1. การเตรียมตัวเร่งกลุ่มออกไซด์

ตัวเร่งกลุ่มออกไซด์ในที่มีมีความหมายรวมทั้งองค์ประกอบกัมมันต์และตัวรองรับ ซึ่งจะถูกเตรียมให้มีพื้นที่ผิวและความพรุนสูง เช่น ไฮดรอกไซด์ซึ่งอาจเป็นทั้งองค์ประกอบกัมมันต์และตัวรองรับ

2. การเตรียมออกไซด์ผสม

ออกไซด์ผสม (Dual oxides) คือ การรวมตัวของออกไซด์สองชนิด เพื่อเพิ่มคุณสมบัติของการเร่งปฏิกิริยา วิธีที่ดีที่สุด คือ การตกตะกอนร่วม (Co-precipitation) และการเตรียมเจลสองชนิดเพื่อให้ได้การกระจายตัวที่ดีและมีอัตราปฏิกิริยาต่อกันสูง ตัวอย่างเช่น $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$, $\text{NiO - Al}_2\text{O}_3$ และ ซีโอไลต์

3. การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการวางองค์ประกอบกัมมันต์บนตัวรองรับ

การทำให้ออกไซด์กระจายตัวบนตัวรองรับเป็นวิธีการที่นิยมมาก สามารถทำได้ 4 วิธี คือ การตกตะกอน การดูดซับ การแลกเปลี่ยนไอออนและการทำให้เอิบซุ่ม (Impregnation) แต่ละเทคนิคมีทั้งข้อดีและข้อเสีย ซึ่งต้องพิจารณาจากการใช้ ตัวรองรับที่ใช้ อาจจะเป็นผง หรือเป็นก้อนเล็กๆ ในการเติมองค์ประกอบกัมมันต์ลงไป ผิวหน้าด้านในตัวรองรับอาจมีข้อจำกัดเรื่องการแพร่เข้ารูพรุน

การตกตะกอน คือ การทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างผองอนุภาคของตัวรองรับกับเกลือของสารละลาย ซึ่งอาจจะเป็นออกซาลेट ไนเตรต ซัลเฟตหรือคลอไรด์ ในตัวกลางที่เป็นเบส เช่น NaOH, KOH, NH₄OH, Na₂CO₃, NaHCO₃ ทำให้ได้ไฮดรอกไซด์หรือคาร์บอเนตของโลหะที่ไม่ละลายน้ำ สารเหล่านี้สามารถเปลี่ยนเป็นออกไซด์โดยการให้ความร้อน

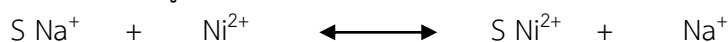
การตกตะกอนเหมาะสำหรับการเตรียมเพื่อให้มีปริมาณโลหะ (Loading) ขององค์ประกอบกัมมันต์ประมาณ 10-20% ถ้าต้องการปริมาณที่ต่ำกว่านี้ควรพิจารณาใช้วิธีอื่น

การเตรียมทำได้โดยการคละเคล้ากันของผองตัวรองรับกับสารละลายเกลือตามปริมาณที่เหมาะสมกับความต้องการก่อนทำปฏิกิริยา แต่ในบางกรณีตัวรองรับอาจจะต้องดูแลอากาศในตัวรองรับเพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีอากาศในรูพรุน หลังจากนั้นจึงเติมสารละลายเบสเพื่อทำให้เกิดการตกตะกอน ขั้นตอนต่อมาคือการกรองหรือการแยก แล้วล้างกำจัดสารต่างๆ ได้แก่ สารละลายเบส ซึ่งเป็นไอออนของสารตั้งต้น และสารที่จับอยู่บนผิวหน้าที่มากเกินไป

การดูดซับ คือ การนำเอาวัสดุที่เป็นตัวรองรับมาแช่ในสารละลายเกลือที่มีความเข้มข้นที่เหมาะสมกับการดูดซับและการดูดซับจะให้ไอโซเทอมออกมา การดูดซับเป็นวิธีการที่เหมาะสมเมื่อต้องการปริมาณองค์ประกอบกัมมันต์ต่ำ ผงหรืออนุภาคจะถูกนำมากำจัดน้ำ และทำให้ชุ่มในสารละลายที่เหมาะสมในเวลาที่เหมาะสม การจับแบบนี้จะสม่ำเสมอและองค์ประกอบกัมมันต์จะเข้าไปจับในรูพรุนอย่างทั่วถึงระหว่างการทำให้ชุ่มขึ้น

การดูดซับจากสารละลายอาจเป็นทั้งการดูดซับไอออนบวกหรือไอออนลบ ขึ้นกับสมบัติของผิวหน้าตัวอย่าง เช่น ซีโอไลต์เป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออนบวกที่ดี แต่ซิลิกาเป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออนได้ไม่ดี ส่วนอะลูมินาเป็นตัวดูดซับที่ไม่ดีทั้งสำหรับไอออนบวกและไอออนลบ แมกนีเซียมเป็นตัวดูดซับไอออนที่ดีและคาร์บอนมักจะเกิดเป็นสารเชิงซ้อนที่มีการถ่ายโอนประจุ (Charge transfer Complex) กับการให้อิเล็กตรอนแต่ก็ดูดซับไอออนบวกได้บ้างเช่นกัน ถ้าไม่นับซีโอไลต์ซึ่งมีกลไกการดูดซับที่ต่างออกไปแล้ว

การแลกเปลี่ยนไอออน การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนจะเหมือนกับการดูดซับไอออนต่างกันเพียงแต่มีการแลกเปลี่ยนไอออนเกิดขึ้นนอกเหนือจากโปรตอน ไอออนที่มีประจุต่ำ เช่น Na⁺ จะแลกเปลี่ยนกับไอออนที่มีประจุสูงกว่า เช่น Ni²⁺ และมีสมมูลเกิดขึ้นดังนี้ (S คือหมู่ฟังก์ชันใดๆ)



การแลกเปลี่ยนไอออนจะเกิดขึ้นได้ดี เมื่อไอออนตัวใหม่ที่เข้ามาแทนที่สามารจับกับตัวรองรับได้แข็งแรงกว่าไอออนเดิม ส่วนใหญ่เมื่อพูดถึงการแลกเปลี่ยนไอออน เรามักจะนึกถึงการแช่ตัวรองรับลงในสารละลายเกลือของโลหะที่ต้องการแลกเปลี่ยนแล้วรอจนได้ปริมาณการเปลี่ยนที่ต้องการ ข้อดีของการแลกเปลี่ยนไอออนคือ จะได้รับการกระจายตัวของไอออนโลหะที่เป็นเนื้อเดียว แต่การแลกเปลี่ยนมีข้อจำกัด เนื่องจากต้องการใช้เวลานาน และเมื่อการแลกเปลี่ยนอิ่มตัวแล้วจะไม่สามารถเพิ่มปริมาณไอออนได้อีก

การทำให้เปียกชุ่ม (Impregnation) เทคนิคการทำให้เปียกชุ่ม เป็นเทคนิคที่ง่ายและสะดวกที่สุด เพราะเป็นการจับตัวรองรับโดยตรง จุดประสงค์คือ ต้องการเติมรูพรุนด้วยสารละลายของเกลือโลหะที่มีความเข้มข้นเพียงพอสำหรับค่าปริมาณโลหะที่ต้องการ สารละลายที่ใช้ต้องมีปริมาณที่จะเติมรูพรุนได้พอดี เรียกว่าค่า Incipient wetness ขั้นตอนการเตรียมคร่าวๆ เริ่มจากการให้ความร้อนแก่ตัวรองรับหรือนำไปดูดอากาศออกด้วยสุญญากาศ เพื่อกำจัดความชื้นในรูพรุนและทำให้ผิวหน้าภายนอกของตัวรองรับเปียกพอดีลงไปบนตัวรองรับ ซึ่งปริมาณดังกล่าวสามารถคำนวณได้ก่อนการเตรียมจากปริมาตรของรูพรุนหรือทำการทดสอบก่อนโดยใช้ตัวทำละลายหยดลงบนตัวรองรับที่ทราบปริมาณแน่นอน และทำการวัดปริมาตรที่ทำให้ตัวรองรับเปียกพอดี แล้วจึงนำปริมาตรตัวทำละลายที่ได้มาใช้ในการคำนวณความเข้มข้นของสารละลายเพื่อให้ได้ปริมาณโลหะตามที่ต้องการ

การทำให้แห้งจะทำให้เกิดการตกผลึกของเกลือบนผิวหน้าของรูพรุน ขั้นตอนนี้ถ้าไม่ระวังอาจจะทำให้เกิดการกระจายตัวของสารในรูพรุนไม่สม่ำเสมอถ้าการทำให้แห้งช้าเกินไปจะทำให้สารละลายเคลื่อนลงไปอยู่ด้านล่างของรูพรุนเกิดการตกตะกอน ทำให้ผลึกที่ได้อยู่แต่ตอนล่างของรูพรุน การทำให้แห้งในอัตราเร็วที่เหมาะสมจะทำให้ได้ผลึกที่เท่าๆกัน

การแคลไซน์เป็นขั้นตอนที่สำคัญ เพราะถ้าตัวเร่งปฏิกิริยาเจอกับความชื้นในอากาศผลึกในรูพรุนอาจจะละลายในน้ำที่เกิดควบแน่นได้ การแคลไซน์เป็นการเปลี่ยนเกลือโลหะให้อยู่ในรูปของโลหะหรือออกไซด์และจะหยุดการกระจายของสารละลายได้

2.4.3 การเปลี่ยนตัวเร่งปฏิกิริยาให้อยู่ในรูปที่ว่องไว

ขั้นตอนสุดท้ายของการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา คือการเปลี่ยนวัสดุที่เตรียมไม่ได้ให้เป็นองค์ประกอบกัมมันต์ วัสดุที่เตรียมได้มักอยู่ในรูปออกไซด์ ดังนั้นถ้าสารที่ต้องการคือรูปที่เป็นออกไซด์อาจจะไม่ต้องทำการกระตุ้น แต่ถ้าต้องการในรูปโลหะจะต้องใช้ปฏิกิริยารีดักชันและถ้าเป็นรูปซัลไฟด์ต้องใช้ปฏิกิริยาการเติมซัลไฟด์

2.4.4 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแบบอื่นๆ

1. Raney metal

ตัวเร่งปฏิกิริยาอีกแบบหนึ่งคือ โลหะที่มีความว่องไวและมีรูพรุน (Active porous metal) ซึ่งเรียกว่า Raney metal โลหะที่เตรียมโดยวิธีนี้ นิกเกิล เหล็กโคบอลต์และทองแดง โลหะเหล่านี้สามารถเกิดเป็นอัลลอยด์กับอะลูมิเนียมได้ และส่วนที่เป็นอะลูมิเนียมสามารถ

ล้างออกได้โดยสารละลายที่มีความสามารถในการกัดกร่อน (Caustic) ทำให้เหลือแต่ส่วนที่เป็นโลหะที่มีความพรุนและมีพื้นที่ผิวสูง

2. Reduced fused oxides

ตัวอย่างของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบนี้คือ $\text{Fe-Al}_2\text{O}_3\text{K}_2\text{O}$ ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการสังเคราะห์แอมโมเนียซึ่งสามารถเตรียมได้โดยการหลอม Fe_2O_3 กับ Al_2O_3 และ K_2O ในปริมาณที่พอเหมาะที่อุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียส เมื่อผสมกันดีแล้วทำให้เย็นลง ก่อนที่จะนำมาบดและร่อนเพื่อใช้งาน โดยจะมีขนาดประมาณ 1-2 เซนติเมตร ขั้นตอนสุดท้าย คือ การรีดิวซ์ด้วยไฮโดรเจนเพื่อกำจัดออกซิเจนในโครงผลึก Fe_3O_4 ทำให้ได้ตัวเร่งปฏิกิริยาหลักที่มีความพรุนสูง การยุบตัวของโครงสร้างรูพรุนซึ่งมักเกิดขึ้นที่ 400-500 องศาเซลเซียส จะไม่เกิดขึ้นเพราะมีอะลูมินาซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวกั้นช่องอยู่ ส่วน K_2O ทำหน้าที่เป็นตัวโปรโมเตอร์ โดยเชื่อกันว่ามันจะเข้าไปจับบนตำแหน่งที่เป็นกรด ซึ่งป้องกันการหลุดออกไปของแอมโมเนีย ซึ่งทำให้เกิดตำแหน่ง [111] ซึ่งไวต่อปฏิกิริยาและเป็นตัวให้อิเล็กตรอนแก่เหล็กทำให้ไฮโดรเจนถูกดูดซับง่าย

2.5 การบำบัดน้ำเสีย (Wastewater Treatment) [1]

2.5.1 กระบวนการทางชีววิทยา (Biological Process)

กระบวนการทางชีววิทยา (biological process) เป็นการอาศัยหลักการใช้จุลินทรีย์ต่าง ๆ มาทำการย่อยสลายเปลี่ยนอินทรีย์สารไปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และแอมโมเนีย เป็นการบำบัดน้ำเสียที่ดีที่สุดในแง่ของการลดปริมาณสารอินทรีย์ในแหล่งน้ำ แต่หลักการนี้เลือกสภาวะแวดล้อมให้เหมาะกับการทำงานของจุลินทรีย์ โดยสัมพันธ์กับปริมาณของจุลินทรีย์ และเวลาที่ใช้ในการย่อยสลาย แบคทีเรียที่เลือกใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์แยกออกได้เป็น 2 ประเภท คือ แบคทีเรียที่ต้องใช้ออกซิเจน (aerobic bacteria) ส่วนกลุ่มที่ 2 เป็นพวกไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic bacteria)

2.5.2 กระบวนการทางกายภาพ (physical process)

กระบวนการทางกายภาพ (physical process) เป็นการบำบัดน้ำเสียอย่างง่ายซึ่งจะแยกของแข็งที่ไม่ละลายน้ำออก วิธีนี้จะแยกตะกอนได้ประมาณ 50-65% ส่วนเรื่องการแยกความสกปรกในรูปของสารอินทรีย์ (BOD5) ประมาณ 20-30% เท่านั้น วิธีการต่าง ๆ ในกระบวนการนี้มีหลายวิธี เช่น การดักด้วยตะแกรง (screening) เป็นการแยกเศษขยะต่าง ๆ ที่มากับน้ำเสีย เช่น เศษไม้ ถุงพลาสติก กระดาษ ตะแกรงมีหลายขนาด การดักด้วยตะแกรงจึงเป็นการแยกขั้นตอนแรกในการบำบัดน้ำเสีย การตัดย่อย (combination) คือ การใช้เครื่องตัดทำลายเศษขยะขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลง การกวาด (skimming) เป็นการกำจัดน้ำมันและไขมันโดยทำการดักหรือกวาดออกจากน้ำเสีย การทำให้ลอย (floating) จะใช้กับตะกอนที่มีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าน้ำ การตกตะกอน (sedimentation) เป็นการแยก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตะกอนออกจากน้ำเสียโดยอาศัยหลักการเรื่องแรงโน้มถ่วง ซึ่งจะใช้กับตะกอนที่มีความถ่วงจำเพาะมากกว่าน้ำ

2.5.3 กระบวนการทางเคมี (chemical process)

เป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียโดยการแยกสารต่างๆ หรือสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียที่บำบัด เช่น โลหะหนัก สารพิษ สภาพความเป็นกรด ต่างสูงๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ด้วยการเติมสารเคมีต่าง ๆ ลงไปเพื่อให้ เข้าไปทำปฏิกิริยาซึ่งจะมีประโยชน์ในการแยกสาร แต่วิธีนี้มีข้อเสียคือ เมื่อเติมสารเคมีลงในน้ำเสียแล้ว ทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและวิธีนี้จะมีค่าใช้จ่ายสำหรับสารเคมีค่อนข้างสูง ดังนั้นกระบวนการทางเคมีจะเลือกใช้ก็ต่อเมื่อน้ำเสียไม่สามารถบำบัดได้ด้วยกระบวนการทางกายภาพหรือชีวภาพ

การทำให้เกิดตะกอน (precipitation) อาศัยหลักการเติมสารเคมีลงไปทำปฏิกิริยาทำให้เกิดกลุ่มตะกอนตกลงมา โดยทั่วไปสารแขวนจะมีประจุลบ ดังนั้นสารเคมีที่เติมลงไปจึงเป็นประจุบวกเพื่อทำให้เป็นกลาง การแยกด้วยวิธีนี้มีค่าใช้จ่ายสูงแต่ก็มีประสิทธิภาพสูงเช่นกัน ดังนั้นวิธีนี้จะเลือกใช้ก็ต่อเมื่อไม่สามารถ แยกได้โดยกระบวนการทางชีวภาพหรือกายภาพ

โดยส่วนมากสารเคมีที่ทำให้เกิดตะกอนจะละลายน้ำ เช่น เกลือของสารประกอบต่างๆ เช่น เกลืออะลูมิเนียมซัลเฟต หรือสารส้ม ($Al_2(SO_4)_3$) เกลือเหล็ก ($FeCl_3$, $FeSO_4$) และเกลือของแคลเซียม ($Ca(OH)_2$) ส่วนเกลือที่นำมาช่วยในการเกิดตะกอนได้ดียิ่งขึ้นนี้เป็นสารประกอบของ กลุ่ม Activated ของ Silica และ Polyelectrolytes โดยกระบวนการทางเคมีมีหลายวิธี

การเกิดรีดักชันทางเคมี (chemical reduction)

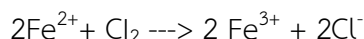
เป็นปฏิกิริยาที่มีการรับอิเล็กตรอน วิธีการนี้เป็นการเปลี่ยนสภาพของสารพิษไปเป็นสารที่มีอันตรายน้อยลง อะตอมหรือไอออน ของสารพิษจะรับอิเล็กตรอนจากสารเคมีที่เติมลงไปซึ่งมีสมบัติเป็นตัวรีดิวซ์ (reducing agent) เช่น การเปลี่ยน Cr^{6+} ซึ่งมีพิษมากไปเป็น Cr^{3+} ด้วย เฟอร์รัสซัลเฟต ($FeSO_4$) ในสภาพที่เป็นกรด ดังแสดงในสมการต่อไปนี้



การสะเทิน (neutralization) เป็นการเปลี่ยนค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำเสียให้ มีฤทธิ์เป็นกลาง (pH = 7) ถ้าต้องการปรับค่าน้ำเสียที่มีฤทธิ์เป็นกรด (pH < 7) ในน้ำเสียให้สูงขึ้น ต้องเติมสารที่มีฤทธิ์เป็นด่าง เช่น แคลเซียมคาร์บอเนตหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ ส่วนกรณีถ้าต้องการปรับน้ำเสียมฤทธิ์เป็นด่าง (pH > 7) ให้มีค่า pH ต่ำลงจะต้องเติมกรด เช่น กรดซัลฟิวริก กรดไนตริก กรดเกลือและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเกิดออกซิเดชันทางเคมี (chemical oxidation) อาศัยหลักการเสียอิเล็กตรอนของอะตอม ให้แก่สารเคมีที่เติมลงไป在水里เสียโดยสารเคมีนี้จะทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดซ์ (oxidizing agent) ส่วนมากวิธีนี้จะนิยมใช้เปลี่ยนโมเลกุลของโลหะที่เป็นพิษ เช่น การเปลี่ยน Fe^{2+} ซึ่งมีพิษมาก ไปเป็นสาร Fe^{3+} ซึ่งมีพิษน้อย ด้วยคลอรีน ดังแสดงในสมการต่อไปนี้



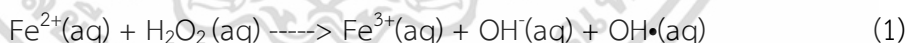
2.5.3.1 ปฏิกริยาเฟนตัน (Fenton)

ปฏิกริยาเฟนตัน เป็นปฏิกริยาที่ถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1894 จนกระทั่งถึงปี 1930 ได้มีการศึกษากลไกของปฏิกริยานี้อย่างสมบูรณ์ และได้นำมาใช้ในอุตสาหกรรมบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งสารพิษประเภทสารประกอบอินทรีย์ปะปนอยู่ เช่น ฟีนอล ฟอรัลดีไฮด์ สารประกอบอะโรมาติก และสารเคมีต่างๆที่ได้มาจากวัสดุที่ย่อยยาฆ่าแมลง สารกันบูด พลาสติก และยาง รวมทั้งกระบวนการนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับพวกน้ำเสีย ตะกอนหรือดินที่มีสิ่งปนเปื้อนโดยมีผลดังนี้

- ทำลายสารอินทรีย์ที่เป็นมลพิษ (Organic pollutant destruction)
- ช่วยกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradability improvement)
- ลดค่า BOD และ COD (BOD and COD removal)
- ลดกลิ่นและสี (Odor and Color removal)

กลไกของปฏิกริยาเฟนตัน

ปฏิกริยาเฟนตัน คือ ปฏิกริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วของสารประกอบอินทรีย์ในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) กับไอออนของเฟอร์รัสซึ่งก่อให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิล (Hydroxyl radicals) ดังนี้



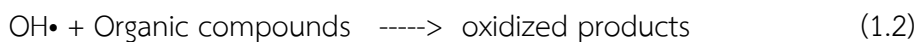
เมื่อปฏิกริยา (1) เกิดขึ้นในน้ำเสีย ซึ่งมีสารประกอบอินทรีย์หลายประเภท พลังงานของการถ่ายโอนอิเล็กตรอนเริ่มแรกที่อนุมูลไฮดรอกซิล สามารถที่จะเหนี่ยวนำให้มีการย่อยสลายของสารประกอบอินทรีย์ได้ อนึ่งปฏิกริยาการเกิดอนุมูลไฮดรอกซิลของสารละลายในปฏิกริยา (1) สามารถกระตุ้นให้เกิดได้มากขึ้น เมื่อมีแสงเหนือม่วง (Ultraviolet) หรือก๊าซโอโซน (O_3) เป็นตัวเร่งปฏิกริยา

ปฏิกริยาต่อมาก็คืออนุมูลไฮดรอกซิลจะทำปฏิกริยากับไอออนของเฟอร์รัส (Fe^{2+}) แล้วให้ไอออนของเฟอร์ริก (Fe^{3+}) ดังนี้

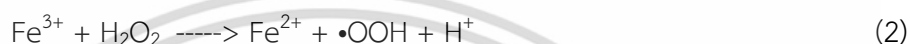


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

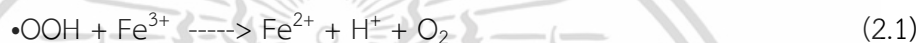
หรือในเวลาเดียวกันอนุมูลไฮดรอกซิลจะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารประกอบอินทรีย์ในสารละลายดังนี้



ต่อมาปฏิกิริยาจะมีการทำซ้ำโดยไอออนเฟอร์ริก (Fe^{3+}) จะช่วยเร่งให้มีการแตกตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ไปเป็นก๊าซออกซิเจนและอนุมูลเปอร์ไฮดรอกซิล (Perhydroxyl radicals) โดยที่ความเข้มข้นของไอออนเฟอร์รัส (Fe^{2+}) จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆ ในขณะที่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะลดลงเรื่อยๆ ดังนี้



และ



อนุมูลเปอร์ไฮดรอกซิลเป็นตัวออกซิไดซ์ที่อ่อน (ระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเปอร์แมงกาเนต) แต่มีความสำคัญในกระบวนการเกิดไอออนของเฟอร์รัส (Fe^{2+}) โดยเมื่อทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จะทำให้อนุมูลไฮดรอกซิลเพิ่มมากขึ้น ซึ่งอนุมูลไฮดรอกซิลจะสามารถทำปฏิกิริยากับสารประกอบอินทรีย์เกือบทั้งหมดและให้ผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำในขั้นสุดท้าย ปัญหาโดยตรงของปฏิกิริยานี้คือการควบคุมสารเคมี (Reagents) และพีเอช (pH) ซึ่งหากมีการควบคุมองค์ประกอบเหล่านี้ไม่ดีพอก็จะทำให้ผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาเป็นเพียงน้ำและออกซิเจนเท่านั้น

ผลิตภัณฑ์จากการออกซิเดชัน (Oxidized products) ที่ต้องการอย่างยิ่งในการบำบัดน้ำเสียก็คือคาร์บอนไดออกไซด์เพราะหมายถึงสารประกอบอินทรีย์ได้ถูกเปลี่ยนรูปจนหมดสภาพการเป็นสารพิษ และในแง่ของการตรวจสอบสมบัติของน้ำเสียก่อนการปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ ด้วยการตรวจสอบค่า COD หรือค่า TOC ถ้าผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่จากการเกิดปฏิกิริยาคือคาร์บอนไดออกไซด์แล้วค่า COD หรือค่า TOC ที่ตรวจสอบหลังปฏิกิริยา ย่อมมีค่าน้อยจนสามารถปล่อยลงสู่แหล่งน้ำได้

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Qiang, W. และคณะ [12] ศึกษาปฏิกิริยาออกซิเดชันของฟีนอล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา คอปเปอร์บน MCM-41 (Copper/MCM-41) ซึ่ง MCM-41 เป็นตัวรองรับที่มีรูพรุนขนาดกลาง (mesoporous) และมีพื้นที่ผิวสูงมากกว่า $1400 \text{ m}^2/\text{g}$ ตัวเร่งปฏิกิริยาเตรียมขึ้นจากวิธีการดูดซับ (adsorption) ที่อุณหภูมิห้อง ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้จะนำไปใช้ในปฏิกิริยาออกซิเดชันของฟีนอล ที่ความเข้มข้นฟีนอลเริ่มต้น 1300 ppm ที่ 150 และ $200 \text{ }^\circ\text{C}$ จากผลการวิจัยพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยามีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดฟีนอล โดยร้อยละการกำจัดฟีนอลเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณคอปเปอร์บน MCM-41

Suranjana, C. และคณะ [13] ศึกษาปฏิกิริยาออกซิเดชันของฟีนอล, 2-คลอโรฟีนอล และ 2-ไนโตรฟีนอล โดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยมีไฮดรอกซิลและแมกนีเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากการวิจัย พบว่า การเพิ่มปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จะเพิ่มร้อยละการกำจัดของฟีนอล และ 2-คลอโรฟีนอล ในขณะที่ 2-ไนโตรฟีนอล ไม่สามารถกำจัดได้ และปฏิกิริยาออกซิเดชันนี้สามารถเกิดได้ถ้าใช้แก๊สออกซิเจนเป็นสารออกซิไดส์แทนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

Kim, K.H. และคณะ [14] ทำการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์บนตัวรองรับไททานเนียม ($\text{CuO}_x/\text{TiO}_2$) ที่ปริมาณคอปเปอร์ต่างๆ (1-25 wt%) เพื่อใช้ในปฏิกิริยา wet air oxidation ของฟีนอล ผลการทดลอง พบว่า ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{CuO}_x/\text{TiO}_2$ ในการกำจัดฟีนอลเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณคอปเปอร์เพิ่มจนถึง 20 wt% และ หลังจากนั้นแนวโน้มคงที่ เมื่อเพิ่มคอปเปอร์เป็น 25 wt% ดังนั้นปริมาณคอปเปอร์ที่เหมาะสมคือ 20 wt%

Aey, M.L. และคณะ [15] ศึกษาปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยใช้คอปเปอร์ออกไซด์บนถ่านกัมมันต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำการศึกษาในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะที่ $80 \text{ }^\circ\text{C}$ จากการวิจัย พบว่า การเปลี่ยน (conversion) ของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อย่างสมบูรณ์เกิดขึ้นภายใน 20 นาที และการกำจัดฟีนอล จะสมบูรณ์ที่ 30 นาทีแรก

Liu, P.J. และคณะ [16] ศึกษาปฏิกิริยา catalytic wet peroxide oxidation (CWPO) ของ m-cresol โดยใช้ $\text{Fe}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ และ $\text{Fe-Ce}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวแปรที่ทำการศึกษา ได้แก่ ปริมาณ Ce บนตัวเร่งปฏิกิริยา, ปริมาณ H_2O_2 , pH เริ่มต้นของสารละลาย, อุณหภูมิของปฏิกิริยา และความเข้มข้นเริ่มต้นของ m-cresol จากผลการวิจัย พบว่า การเติม 2 wt% ของ Ce ลงบน $\text{Fe}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ จะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดฟีนอลดีกว่า $\text{Fe}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ที่ไม่เติม Ce โดย m-cresol ถูกกำจัดไป 43.2% ที่ pH 4.0 อุณหภูมิ $60 \text{ }^\circ\text{C}$ เวลา 90 นาที ที่ความเข้มข้น H_2O_2 100 mmol/L

ณัฐนันท์ ชัยตระกูลเสรี และคณะ [17] ศึกษาการกำจัดฟีนอลในน้ำทิ้งสังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยใช้ คอปเปอร์ออกไซด์บนถ่านกัมมันต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของคอปเปอร์ออกไซด์บนถ่านกัมมันต์และเพิ่มเวลาดำเนินปฏิกิริยาจะทำให้สามารถกำจัดฟีนอลในน้ำได้สูงขึ้น สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดฟีนอลในน้ำทิ้งสังเคราะห์ คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์บนถ่านกัมมันต์ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก และใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 120 นาที โดยสามารถกำจัดฟีนอลได้ร้อยละ 96.06

ณัฐริตา แก้วเขียว และคณะ [18] ศึกษาการกำจัดฟีนอลในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยใช้คอปเปอร์ (II) บนโคโตซานเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากการทดลอง พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของคอปเปอร์ (II) บนโคโตซานและเพิ่มเวลาดำเนินปฏิกิริยา จะทำให้สามารถกำจัดฟีนอลได้สูงขึ้น สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัด ฟีนอลในน้ำเสียสังเคราะห์คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณคอปเปอร์ร้อยละ 5.09 อัตราส่วนโดยโมลของฟีนอล ต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็น 1:5 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และเวลาของปฏิกิริยา 90 นาที โดยสามารถกำจัดฟีนอลได้ร้อยละ 90.18

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

1. อะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium Oxide, Al_2O_3) เกรดวิเคราะห์บริษัท Carlo Erba จำกัด
2. คอปเปอร์(II) ไนเตรตไตรไฮเดรต (Copper(II) Nitrate Trihydrate, $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba จำกัด
3. ฟีนอล (Phenol, $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$) เกรดวิเคราะห์บริษัท Carlo Erba จำกัด
4. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide, H_2O_2) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba จำกัด
5. น้ำมันพาราฟิน เกรดการค้า บริษัท Lab System จำกัด
6. น้ำกลั่น

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ขวดก้นกลมสามคอ ขนาด 500 มิลลิลิตร
2. คอนเดนเซอร์
3. เทอร์โมมิเตอร์
4. ปีกเกอร์ ขนาด 50, 100, 250 และ 600 มิลลิลิตร
5. กระบอกตวง ขนาด 100 มิลลิลิตร
6. ขวดวัดปริมาตร ขนาด 10 และ 250 มิลลิลิตร
7. ปิเปต ขนาด 10 และ 50 มิลลิลิตร
8. แท่งแก้วคนสาร
9. ซ้อนตักสาร
10. เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง
11. เครื่องให้ความร้อน (Hot Plate)
12. ไขพัตกวน
13. เตาเผา
14. ตู้อบสาร
15. เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (X-ray Diffraction spectrophotometer, XRD) Bruker AXS รุ่น D8 Advance
16. เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis Spectrophotometer) รุ่น Genesys 10s UV-Vis
17. เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนด้วยเทคนิค BET (Surface area and porosity analyzer (BET)) Micromeritics รุ่น ASAP 2020

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

18. เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (X-ray Fluorescence Spectrophotometer, XRF) Bruker AXS รุ่น SRS 3400
19. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) EVO รุ่น MA10

3.3 วิธีการทดลอง

การทดลองแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่

- 3.3.1 การเตรียมกราฟมาตรฐานของสารละลายฟีนอล
- 3.3.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาและการวิเคราะห์คุณสมบัติตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำการสังเคราะห์
- 3.3.3 การทำปฏิกิริยาออกซิเดชันของฟีนอล

3.3.1 การเตรียมกราฟมาตรฐานของสารละลายฟีนอล

1. เตรียมสารละลายฟีนอลความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยชั่งฟีนอล 0.0625 กรัม ละลายน้ำใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตร จากนั้นทำการปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น
2. เตรียมสารละลายฟีนอลความเข้มข้น 25, 50, 75 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปิเปตสารละลายฟีนอลความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 1, 2, 3 และ 4 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น จะได้สารละลายฟีนอลความเข้มข้น 25, 50, 75 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ
3. นำสารละลายฟีนอลจากข้อ 2 ไปทำการตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสง ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร
4. ทำกราฟมาตรฐานเปรียบเทียบระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลที่เตรียมได้

3.3.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาและการวิเคราะห์คุณสมบัติตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำการสังเคราะห์

3.3.2.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์บนอะลูมินา

- 1) เตรียมสารละลายคอปเปอร์(II) ไนเตรต ความเข้มข้น 10% โดยน้ำหนัก จำนวน 30 มิลลิลิตร แล้วเทใส่ขวดสเปรย์
- 2) ชั่งอะลูมินา 10 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ จากนั้นค่อยๆ สเปรย์สารละลายคอปเปอร์ลงไปจนหมด
- 3) อบแห้งที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
- 4) ทำการเผา (calcine) ในเตาเผาที่อุณหภูมิ 550, 600 และ 700 องศาเซลเซียส นาน 5 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวเร่งปฏิกิริยาไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD และ BET

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 5) เมื่อได้อุณหภูมิในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมแล้ว ทำการทดลองซ้ำในข้อ 1-4 แต่เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณ CuO 3, 5, 7, 10 และ 15% โดยน้ำหนัก และทำการเผาด้วยอุณหภูมิที่เหมาะสม

3.3.2.2 การวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์บนอะลูมินา

ตรวจวัดวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์-ออกไซด์บนอะลูมินาโดยใช้เครื่องมือ ตรวจวัดดังนี้

1. โครงสร้างและความเป็นผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (X-ray diffraction spectrophotometer, XRD)



รูปที่ 3.1 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

2. ปริมาณของคอปเปอร์และคอปเปอร์ออกไซด์บนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (X-ray Fluorescence Spectrophotometer, XRF)



รูปที่ 3.2 เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ สเปกโทรโฟโตมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. สัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)



รูปที่ 3.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

4. วิเคราะห์หาพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนด้วยเทคนิค BET



รูปที่ 3.4 เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 การทำปฏิกิริยาออกซิเดชันของฟินอล

- 1) ประกอบชุดปฏิกิริม์ ได้แก่ ขวดสามคอ ไบพัตควน เทอร์โมมิเตอร์ และคอนเดนเซอร์ โดยให้ความร้อนด้วยอ่างน้ำมันพาราฟินและแทนให้ความร้อน ดังรูปที่ 3.5
- 2) ปิดเตา สารละลายฟินอลและน้ำ ลงในชุดปฏิกิริม์ให้ความร้อนจนอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และทำการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ให้ได้ปริมาตรรวมทั้งหมด 200 ml
- 3) ทำการใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์บนอะลูมินาลงในชุดปฏิกิริม์
- 4) ปั่นกวนสารในชุดปฏิกิริม์ เมื่อครบเวลาของปฏิกิริยา นำสารผสมในชุดปฏิกิริม์ไปทำการกรองแยกตัวเร่งปฏิกิริยา
- 5) นำสารละลายที่ได้จากการกรองไปวิเคราะห์ปริมาณฟินอลที่เหลืออยู่ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร
- 6) ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรตามตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.5 ชุดปฏิกิริม์สำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชันของฟินอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 สภาวะของตัวแปรที่ทำการศึกษสำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชันของฟีนอล

การทดลองที่	ความเข้มข้นของฟีนอลเริ่มต้น (mg/L)	ปริมาณคอปเปอร์ออกไซด์บนอะลูมินา (%)	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (g/L)	ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (M)	เวลาในการดำเนินปฏิกิริยา (นาที)	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (°C)
1	250	7	2	0.2	60	80
2	500	7	2	0.2	60	80
3	1000	7	2	0.2	60	80
4	500	3	2	0.2	60	80
5	500	5	2	0.2	60	80
6	500	10	2	0.2	60	80
7	500	15	2	0.2	60	80
8	500	7	1	0.2	60	80
9	500	7	3	0.2	60	80
10	500	7	5	0.2	60	80
11	500	7	2	0.1	60	80
12	500	7	2	0.3	60	80
13	500	7	2	0.2	30	80
14	500	7	2	0.2	90	80
15	500	7	2	0.2	120	80
16	500	7	2	0.2	60	60
17	500	7	2	0.2	60	100
18	500	-	-	0.2	60	80
19	500	-	-	0.1	60	80
20	500	-	-	0.3	60	80

ปริมาตรสารละลายรวม = 200 มิลลิลิตร

หมายเหตุ การทดลองที่ 1-3 ศึกษาผลของความเข้มข้นฟีนอลเริ่มต้น
 การทดลองที่ 2, 4-7 ศึกษาผลของปริมาณคอปเปอร์ออกไซด์บนอะลูมินา
 การทดลองที่ 2, 8-10 ศึกษาผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา
 การทดลองที่ 2, 11-12 ศึกษาผลของความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในปฏิกิริยา
 การทดลองที่ 2, 13-15 ศึกษาผลของเวลาในการดำเนินปฏิกิริยา
 การทดลองที่ 2, 16-17 ศึกษาผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา
 การทดลองที่ 18-20 ศึกษาผลของความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษากระบวนการในการกำจัดฟีนอลด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยใช้ไฮโดรเจน-เปอร์ออกไซด์และเร่งปฏิกิริยาด้วยคอปเปอร์ออกไซด์บนอะลูมินา ($\text{CuO}/\text{Al}_2\text{O}_3$) ในการนำเสนอผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง จะกล่าวถึงการวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาและอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีต่อการกำจัดฟีนอลได้แก่ ปริมาณคอปเปอร์บนอะลูมินา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลในน้ำที่สังเคราะห์ ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เวลาและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา

4.1 การวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์บนอะลูมินา ($\text{CuO}/\text{Al}_2\text{O}_3$)

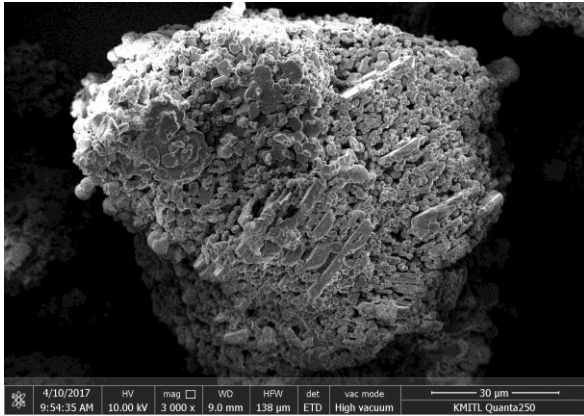
4.1.1 ลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

ตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์บนอะลูมินา จะนำมาตรวจสอบลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 3,000 และ 5,000 เท่า ดังแสดงผลการวิเคราะห์ในรูปแบบที่ 4.1

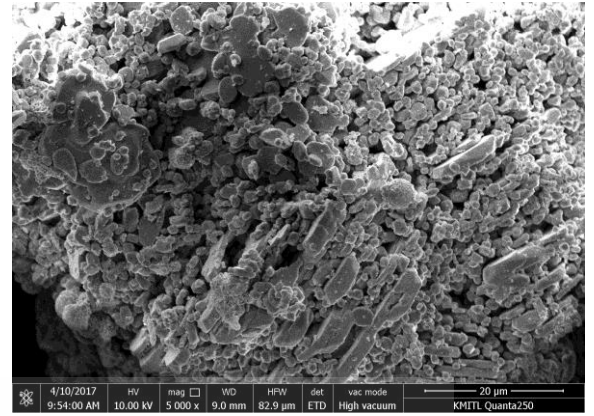


(ก)

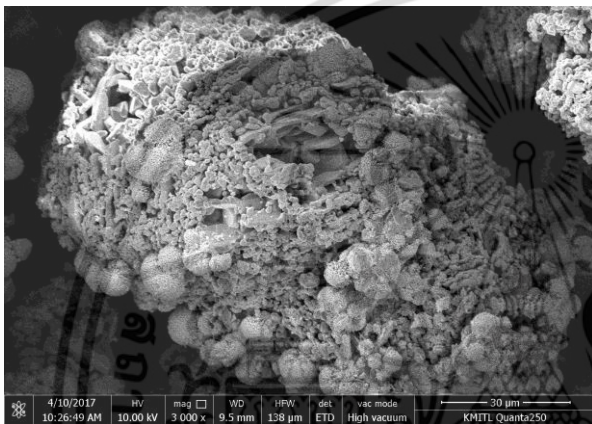
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



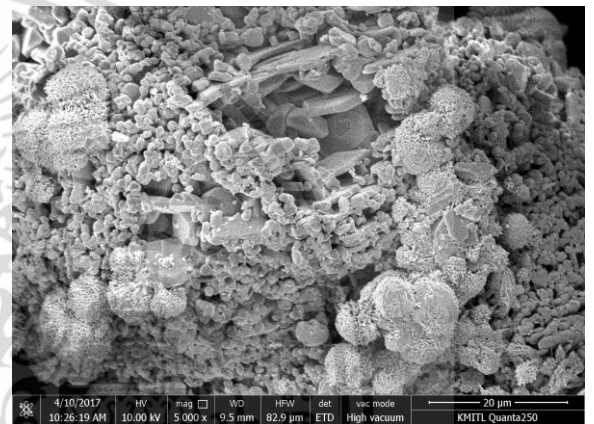
(ข)



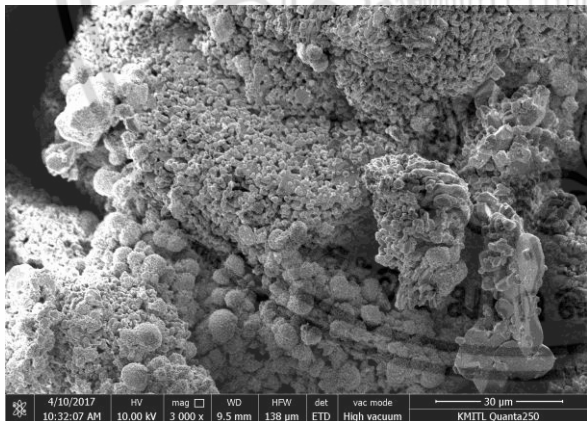
(ค)



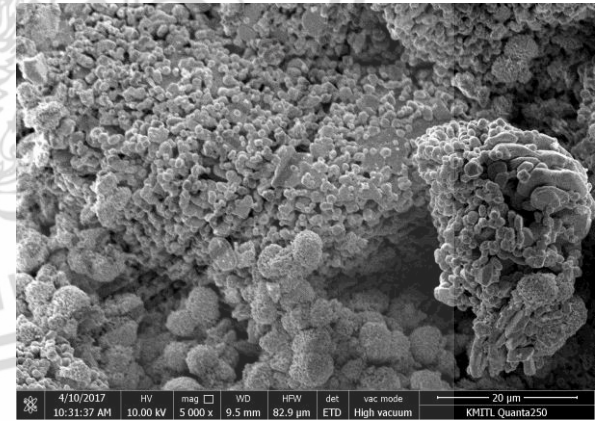
(ง)



(จ)



(ฉ)



(ช)

รูปที่ 4.1 ลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาจากกล่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

(ก) อะลูมินา (Al_2O_3) ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า

(ข), (ค) 5% $\text{CuO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่กำลังขยาย 3,000 และ 5,000 เท่า

(ง), (จ) 7% $\text{CuO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่กำลังขยาย 3,000 และ 5,000 เท่า

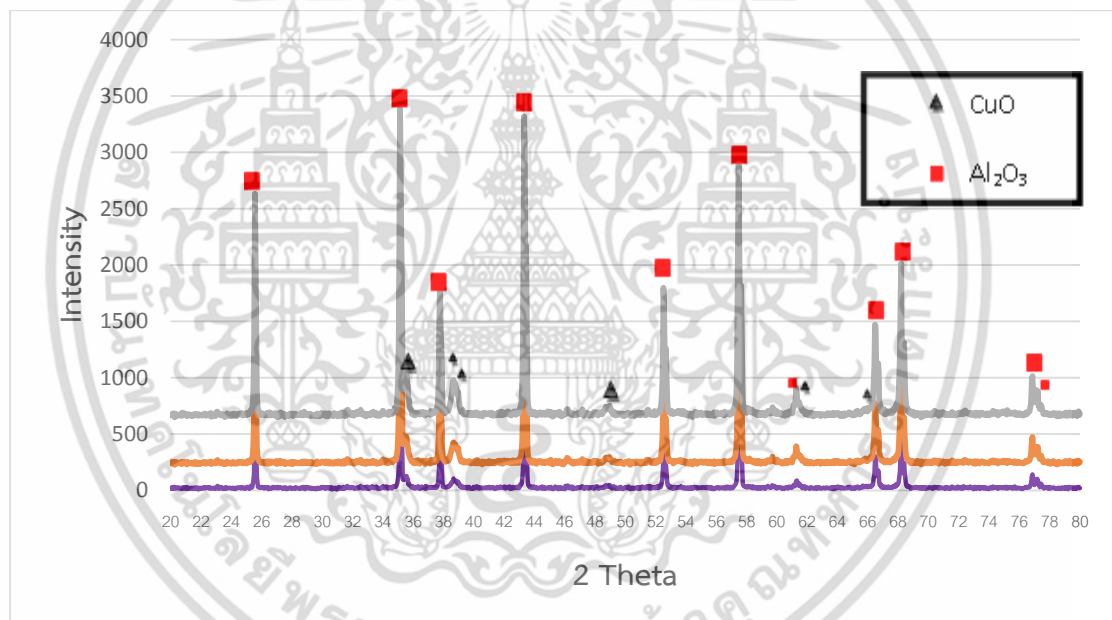
(ฉ), (ช) 10% $\text{CuO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่กำลังขยาย 3,000 และ 5,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.1 (ก) เป็นลักษณะพื้นผิวของตัวรองรับ Al_2O_3 ซึ่งมีลักษณะผิวเรียบและมีรูพรุน เมื่อทำการเติม CuO ลงบนตัวรองรับ Al_2O_3 พบว่า ลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{CuO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ มีลักษณะเป็นพื้นผิวขรุขระ โดยมี CuO ซึ่งมีลักษณะเป็นก้อนกลมเกาะอยู่บนพื้นผิวของอะลูมินา ที่ปริมาณความเข้มข้นของคอปเปอร์ 5% จะสังเกตเห็นได้ว่า มีปริมาณของ CuO เกาะบนพื้นผิวของอะลูมินาเล็กน้อยดังรูป (ข) และ (ค) เมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของคอปเปอร์เป็น 7 และ 10% จะเห็นว่า มีปริมาณ CuO เกาะบนพื้นผิวอะลูมินาเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ดังรูป (ง) ถึง (ช)

4.1.2 โครงสร้างและความเป็นผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD)

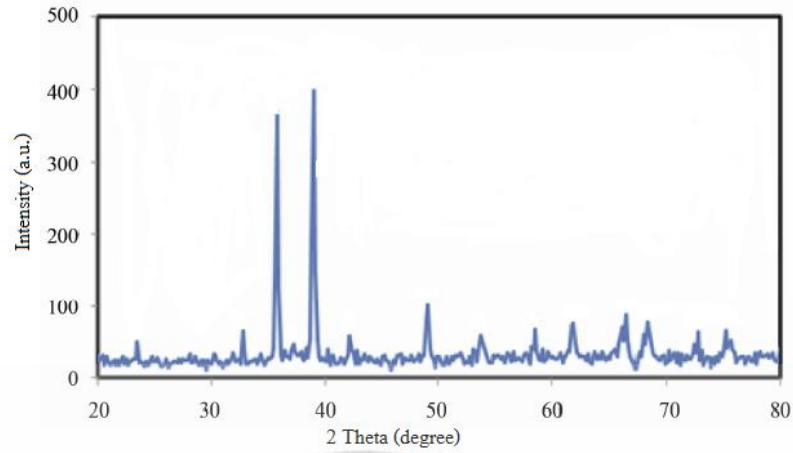
ตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์บนอะลูมินา 10% โดยน้ำหนัก เเผาที่อุณหภูมิ 550 °C, 600 °C และ 700 °C จะถูกนำไปวิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ดิฟแฟรคโทแกรมของ $\text{CuO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ แสดงในรูปที่ 4.2 และ 4.3 สำหรับดิฟแฟรคโทแกรมของ CuO และ Al_2O_3 แสดงในรูปที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ



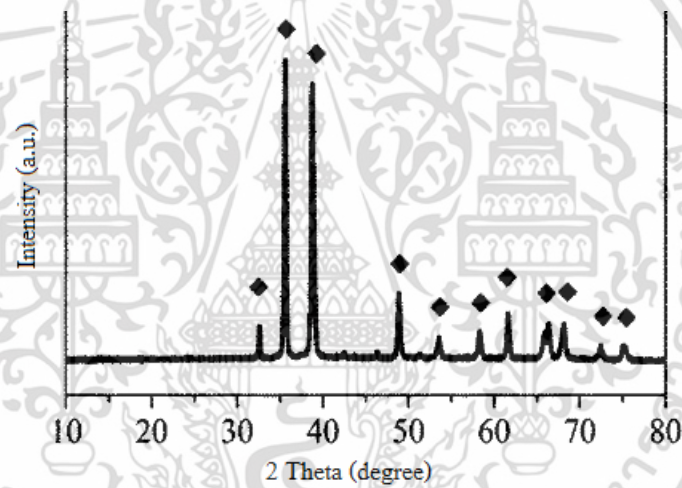
— $\text{CuO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 550°C — $\text{CuO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 600°C — $\text{CuO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 700°C

รูปที่ 4.2 ดิฟแฟรคโทแกรมของ 10% $\text{CuO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่เผาด้วยอุณหภูมิ 550 °C, 600 °C และ 700 °C

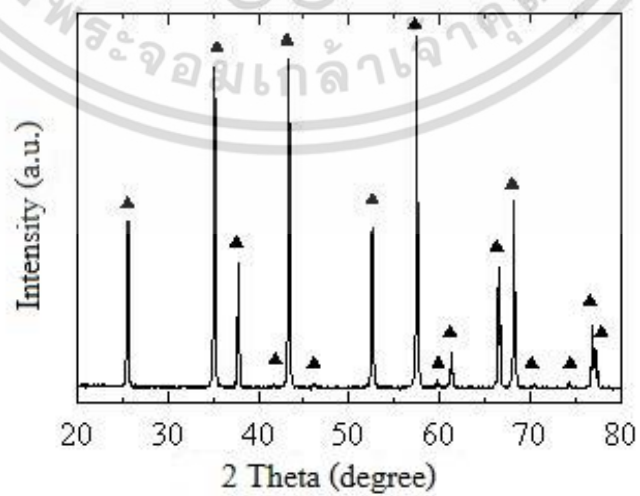
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 ดิฟแฟรคโทแกรมของคอปเปอร์ออกไซด์บนอะลูมินา [19]



รูปที่ 4.4 ดิฟแฟรคโทแกรมของคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) [20]



รูปที่ 4.5 ดิฟแฟรคโทแกรมของอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃) [21]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเร่งปฏิกิริยา 10% CuO/Al₂O₃ ที่ทำการเผาที่อุณหภูมิ 550 °C, 600 °C และ 700 °C จะนำไปวิเคราะห์โครงสร้างและความเป็นผลึกด้วยเทคนิค XRD เพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับเผาตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปริมาณคอปเปอร์ออกไซด์ต่างๆ ซึ่งแสดงดิฟแฟรคโทแกรมในรูปที่ 4.2 โดยจะเห็นได้ว่า ทุกอุณหภูมิในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาจะปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 2 Theta = 25° 34° 39° 43° 49° 66° และ 68° ซึ่งเป็นพีคเอกลักษณ์ของ CuO/Al₂O₃ (เปรียบเทียบกับรูปที่ 4.3) โดยพีคที่ตำแหน่ง 2 Theta = 35° 38° และ 49° เป็นพีคเอกลักษณ์ของ CuO (เปรียบเทียบกับรูปที่ 4.4) และพีคที่ตำแหน่ง 2 Theta = 25° 34° 43° 57° 66° และ 68° เป็นพีคเอกลักษณ์ของ Al₂O₃ (เปรียบเทียบกับรูปที่ 4.5) ซึ่งจะเห็นได้ว่าพีคของ CuO/Al₂O₃ ที่เผาที่อุณหภูมิ 700 °C มี intensity ที่สูงที่สุด แต่เมื่อเทียบกับผล BET แล้ว จะเห็นได้ว่า CuO/Al₂O₃ มีพื้นที่ผิวที่มากกว่า ดังนั้นจึงเลือกใช้อุณหภูมิ 550°C สำหรับทำการเผาตัวเร่งปฏิกิริยา CuO/Al₂O₃ ที่ปริมาณคอปเปอร์ออกไซด์อื่นๆ เนื่องจากอุณหภูมิ 550°C เป็นอุณหภูมิที่ต่ำที่สุดซึ่งสามารถทำให้เกิดตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเป็นผลึก และใช้พลังงานน้อยกว่าอุณหภูมิ 600 และ 700°C

4.1.3 พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาตรวจสอบด้วยวิธี BET

ตัวเร่งปฏิกิริยา 10% CuO/Al₂O₃ ที่ทำการเผาที่อุณหภูมิ 550, 600, และ 700°C 7% CuO/Al₂O₃ และ 15% CuO/Al₂O₃ จะถูกนำมาวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนด้วยเทคนิค BET ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา CuO/Al₂O₃

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิในการเผา (°C)	พื้นที่ผิวจำเพาะ (m ² /g)	ปริมาตรรูพรุน (cc/g)
10% CuO/Al ₂ O ₃	550	156.8	0.0084
10% CuO/Al ₂ O ₃	600	123.9	0.0041
10% CuO/Al ₂ O ₃	700	121.3	0.0039
7% CuO/Al ₂ O ₃	550	172.4	0.0098
15% CuO/Al ₂ O ₃	550	145.6	0.0065

จากตารางที่ 4.1 แสดงพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของ 10% CuO/Al₂O₃ เมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิ 550, 600, และ 700°C ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อเผา 10% CuO/Al₂O₃ ด้วยอุณหภูมิที่สูงขึ้น พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนมีแนวโน้มลดลง ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่า การเผา CuO/Al₂O₃ ที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ผลึก CuO เกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน จึงส่งผลให้พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนลดลง ดังนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยา CuO/Al₂O₃ คือ 550°C เพราะเป็นอุณหภูมิที่ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีพื้นที่จำเพาะและปริมาตรรูพรุนสูงสุด

จากนั้นนำตัวเร่งปฏิกิริยา 7% CuO/Al₂O₃ 10% CuO/Al₂O₃ และ 15% CuO/Al₂O₃ ซึ่งผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 550°C ไปวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุน ซึ่งพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของ CuO บนอะลูมินา จะทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุน มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากผลึกของ CuO จะฝังตัวอยู่บนพื้นผิวและในรูพรุนของอะลูมินา การเติมปริมาณ CuO มากเกินไปเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะทำให้ผลึก CuO เข้าไปในรูพรุนของอะลูมินามาก และผลึก CuO ก็อาจจะเกาะกลุ่มกันเป็นก้อน ดังนั้นจึงทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนลดลง

4.1.4 ปริมาณของคอปเปอร์บนอะลูมินา ด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray fluorescence, XRF)

ตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์บนอะลูมินา 5%, 7% และ 15% โดยน้ำหนัก เผาที่อุณหภูมิ 550°C ถูกนำมาวิเคราะห์หาองค์ประกอบที่เป็นโลหะด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF) ซึ่งแสดงผลวิเคราะห์ทั้งหมดในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบของโลหะในตัวเร่งปฏิกิริยา CuO/Al₂O₃ ด้วยวิธีวิเคราะห์ XRF

ปริมาณของคอปเปอร์บนอะลูมินา (%) โดยน้ำหนัก (ที่กำหนด)	CuO (%) โดยน้ำหนัก	Al ₂ O ₃ (%) โดยน้ำหนัก	Cu (%) โดยโมล	Al (%) โดยโมล	ปริมาณของคอปเปอร์บนอะลูมินา (%) โดยน้ำหนัก (จากผลที่วิเคราะห์)
5	32.8	66.7	26.2	35.3	3.88
7	44.7	54.9	35.7	29.0	4.84
15	61.8	37.8	49.4	20.0	8.93

จากผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่า ปริมาณคอปเปอร์และคอปเปอร์ออกไซด์บนตัวเร่งปฏิกิริยา CuO/Al₂O₃ มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลาย Cu(NO₃)₂ เพิ่มขึ้น ซึ่งผลการวิเคราะห์ที่ได้รับมีความสอดคล้องกับภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด นั่นคือการกระจายตัวของ คอปเปอร์บนพื้นผิวของ Al₂O₃ จะหนาแน่นขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย Cu(NO₃)₂

4.2 การเตรียมกราฟมาตรฐานสารละลายฟินอล

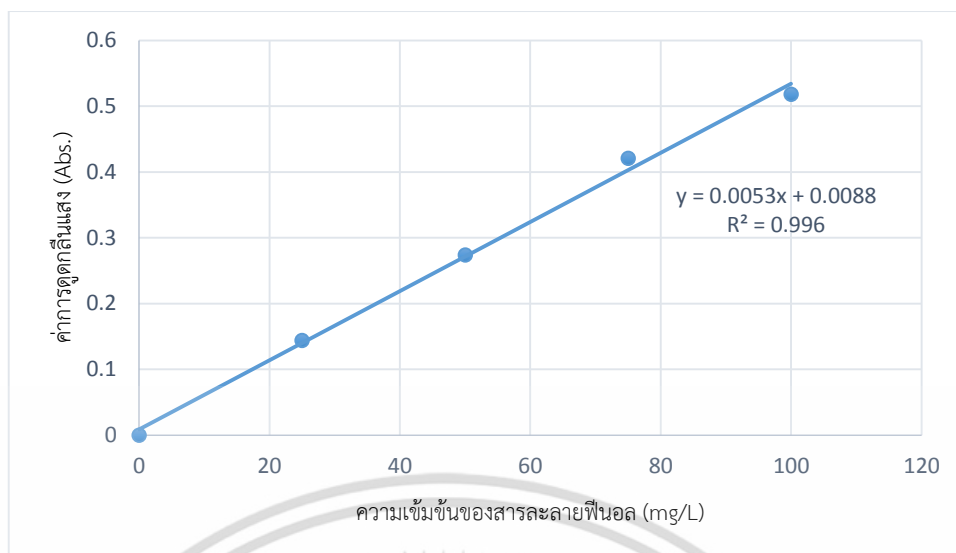
จากการเตรียมสารละลายมาตรฐานฟินอลที่ความเข้มข้น 25, 50, 75 และ 100 mg/L แล้วนำไปตรวจสอบค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ได้ค่าการดูดกลืนแสงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าการดูดกลืนแสงของฟินอลที่เป็นสารละลายมาตรฐาน

ความเข้มข้นของฟินอล (mg/L)	ค่าการดูดกลืนแสง (Abs.)
25	0.144
50	0.274
75	0.421
100	0.518

เมื่อนำไปสร้างกราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของฟินอลกับค่าการดูดกลืนแสงทำให้ได้กราฟเส้นตรงดังรูปที่ 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 กราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของพินอล (mg/L) และค่าการดูดกลืนแสง (Abs.)

จากกราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของสารละลายพินอลและค่าการดูดกลืนแสงที่ได้มีความสัมพันธ์กันเป็นเส้นตรงที่มีค่า $R^2 = 0.996$ และเป็นไปตามสมการ $y = 0.0053x + 0.0088$ เมื่อ y คือ ค่าการดูดกลืนแสง (Abs.) และ x คือ ความเข้มข้นของสารละลายพินอล (mg/L) กราฟมาตรฐานที่ได้จะนำไปใช้หาความเข้มข้นของพินอลหลังจากปฏิกิริยาออกซิเดชันต่อไป

4.3 ผลของตัวแปรที่มีต่อกระบวนการกำจัดพินอล

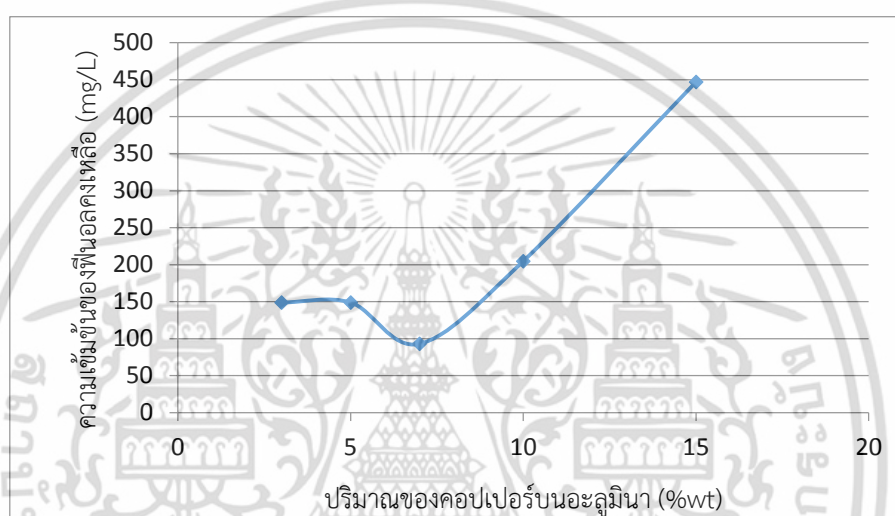
ในการศึกษาผลของตัวแปรที่มีต่อการกำจัดพินอลด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเร่งปฏิกิริยาด้วยคอปเปอร์ออกไซด์บนอะลูมินา ($\text{CuO} / \text{Al}_2\text{O}_3$) ตัวแปรเหล่านั้นได้แก่ ผลของปริมาณคอปเปอร์บนอะลูมินา ผลของความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของพินอล ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา และผลของเวลาการทำปฏิกิริยา ดังแสดงในหัวข้อ 4.3.1 - 4.3.6

4.3.1 ผลของปริมาณคอปเปอร์บนตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการกำจัดพินอล

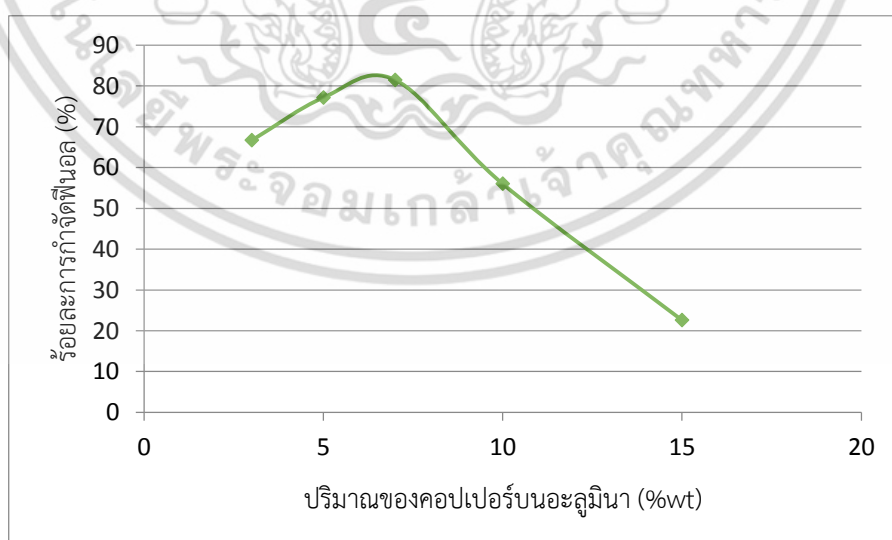
ในการทดลองนี้จะทำการออกซิเดชันพินอลในน้ำทิ้งสังเคราะห์โดยทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณคอปเปอร์บนตัวเร่งปฏิกิริยา ที่มีความเข้มข้น 3, 5, 7, 10 และ 15% โดยน้ำหนัก ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ 2.0 กรัมต่อลิตร เวลาในการดำเนินปฏิกิริยา 60 นาที ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.2 M อุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา 80 °C และความเข้มข้นของสารละลายพินอลเริ่มต้น 500 mg/L ปริมาตร 200 mL ความเข้มข้นพินอลคงเหลือและร้อยละการกำจัดพินอลแสดงดังตาราง 4.4 และรูปที่ 4.7 - 4.8

ตารางที่ 4.4 ผลของปริมาณคอปเปอร์บนตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อการกำจัดฟีนอล

ปริมาณคอปเปอร์บนอะลูมินา (%)	ความเข้มข้นฟีนอล คงเหลือ (mg/L)	ร้อยละการกำจัดฟีนอล (%)
3	148.9	66.68
5	114.2	77.16
7	93.1	81.48
10	204.8	56.00
15	446.9	22.59



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของคอปเปอร์บนอะลูมินา (%wt) กับ ปริมาณฟีนอลคงเหลือ (mg/L)



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของคอปเปอร์บนอะลูมินา (%wt) กับ ร้อยละการกำจัดฟีนอล (%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.7 และ 4.8 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณคอปเปอร์บนอะลูมินาจาก 3% เป็น 7% ทำให้ความเข้มข้นของฟีนอลลดลงและร้อยละการกำจัดฟีนอลเพิ่มขึ้น โดยฟีนอลถูกกำจัดได้สูงสุดถึงร้อยละ 81.48 เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 7%CuO/Al₂O₃ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณคอปเปอร์บนอะลูมินามากกว่า 7%wt จะเห็นว่า ความเข้มข้นของฟีนอลคงเหลือนั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และร้อยละการกำจัดมีแนวโน้มที่ลดลง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากในขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาจะเกิด CuO บนพื้นผิวของ Al₂O₃ ซึ่ง CuO ทำหน้าที่เป็นหมู่ว่องไว (Active site) ต่อปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดย CuO จะดูดซับโมเลกุลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เอาไว้ จากนั้นฟีนอลจะเข้าทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ตำแหน่งของ CuO ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยา 7% CuO/Al₂O₃ มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุด ดังนั้น CuO จะกระจายตัวได้ดี และสามารถดูดซับโมเลกุลของ H₂O₂ ได้มาก ดังนั้น ฟีนอลจึงเข้าทำปฏิกิริยากับ H₂O₂ และถูกกำจัดได้สูงสุดด้วย แต่การที่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณคอปเปอร์มากกว่า 7%wt เกิดปฏิกิริยาได้น้อยลงนั้น เนื่องจากมีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาน้อยลง เพราะ CuO มีการกระจายตัวและเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ส่งผลให้พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง จึงทำให้การกำจัดฟีนอลลดลงไปด้วย

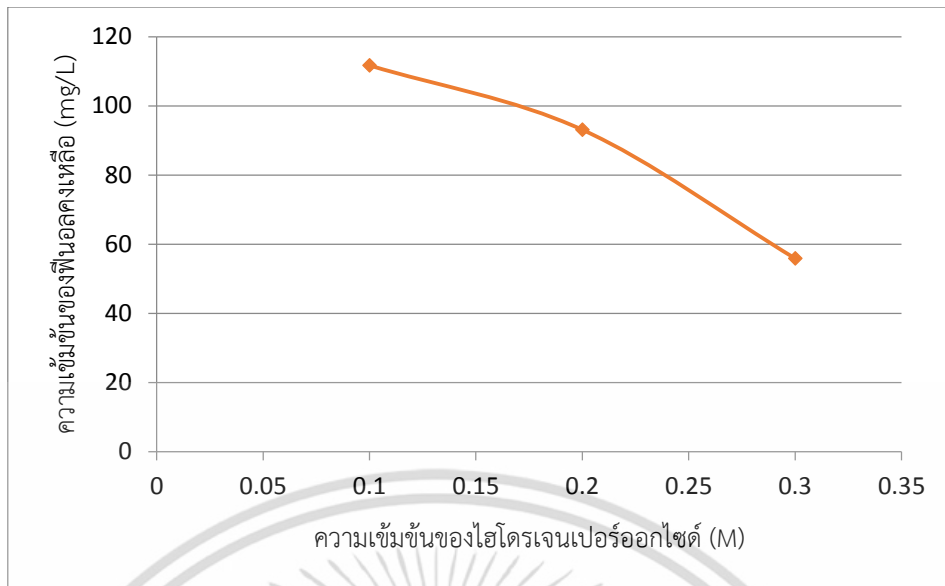
ดังนั้น ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีการกระจายตัวของ CuO บนผิวของ Al₂O₃ อย่างสม่ำเสมอไม่รวมเป็นกลุ่มก้อน จะสามารถกำจัดฟีนอลได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากมี active site มาก จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาได้มาก

4.3.2 ผลของความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อการกำจัดฟีนอล

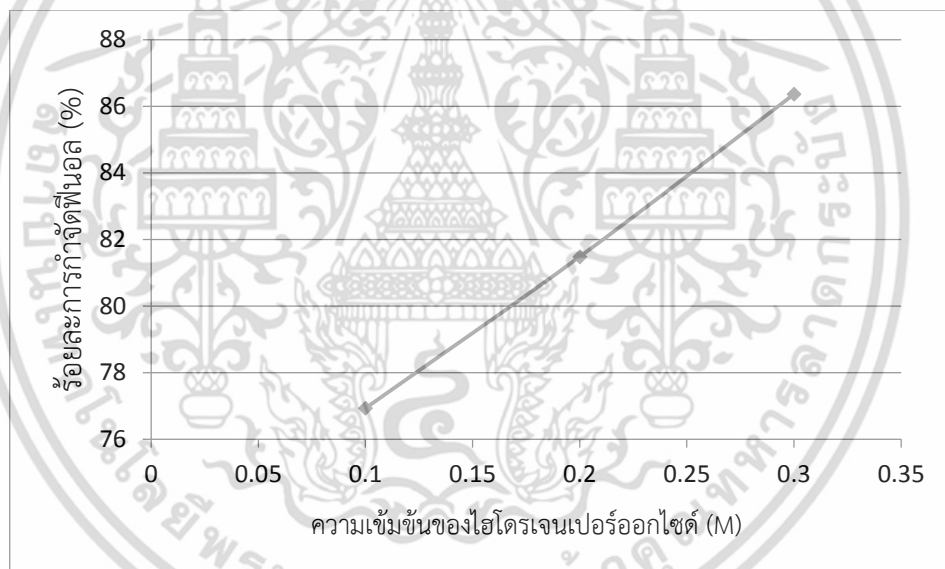
ในการทดลองนี้จะทำการออกซิเดชันฟีนอลในน้ำทิ้งสังเคราะห์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา คอปเปอร์ออกไซด์บนอะลูมินา 7% โดยน้ำหนัก โดยเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งจะใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 2 g/L เวลาในการดำเนินปฏิกิริยา 60 นาที อุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา 80 °C และความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลเริ่มต้น 500 mg/L ปริมาตร 200 mL ความเข้มข้นฟีนอลคงเหลือและร้อยละการกำจัดฟีนอลแสดงดังตาราง 4.5 และรูปที่ 4.9 - 4.10

ตารางที่ 4.5 ผลของความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อการกำจัดฟีนอล

ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (M)	ความเข้มข้นฟีนอลคงเหลือ (mg/L)	ร้อยละการกำจัดฟีนอล (%)
0.1	111.7	76.93
0.2	93.1	81.48
0.3	55.9	86.36

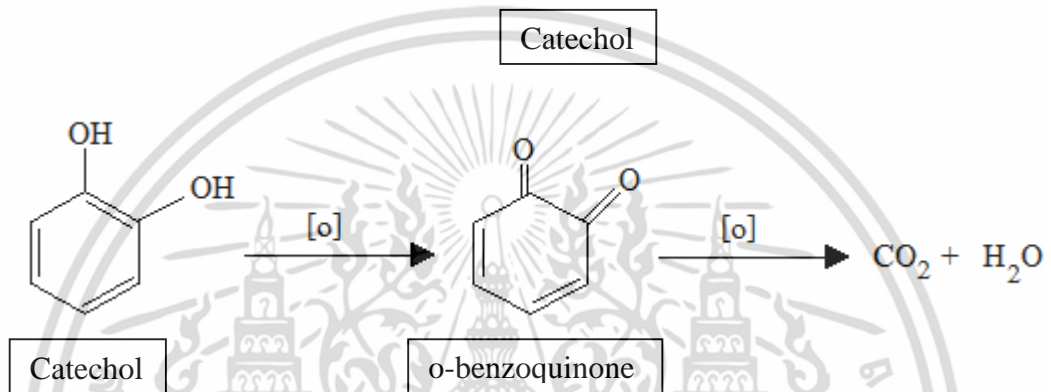
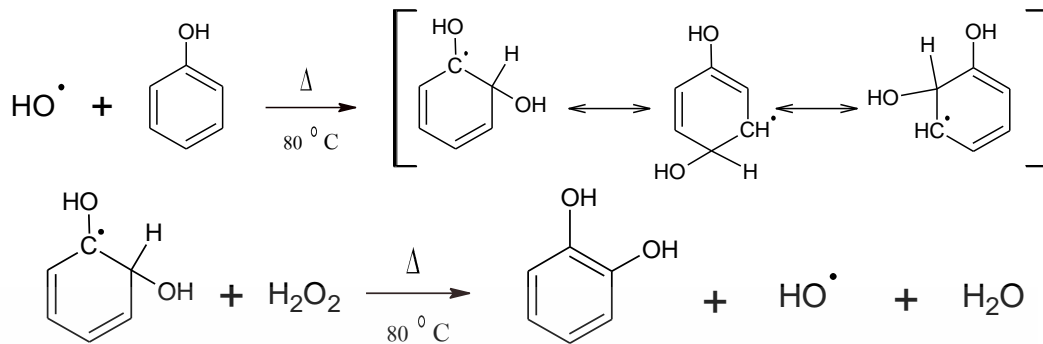
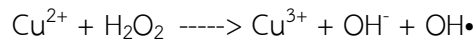


รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (M) กับความเข้มข้นของฟีนอลคงเหลือ (mg/L)



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (M) กับร้อยละการกำจัดฟีนอล (%)

จากรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าเมื่อความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้นจะทำให้ความเข้มข้นของฟีนอลคงเหลือมีแนวโน้มที่ลดลงซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 4.10 โดยค่าร้อยละการกำจัดฟีนอลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะทำให้ได้ไฮดรอกซิลเรดิคัล ($\text{OH}\cdot$) ที่มากขึ้น โดยคอปเปอร์ออกไซด์จะเข้าไปทำลายพันธะของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล และไฮดรอกซิลเรดิคัลจะเข้าไปทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับฟีนอลได้เป็น catechol จากนั้นปฏิกิริยาออกซิเดชันก็จะเกิดต่อเนื่องจนได้ o-benzoquinone และจะได้ CO_2 และ H_2O ในขั้นสุดท้าย ดังสมการ [22]



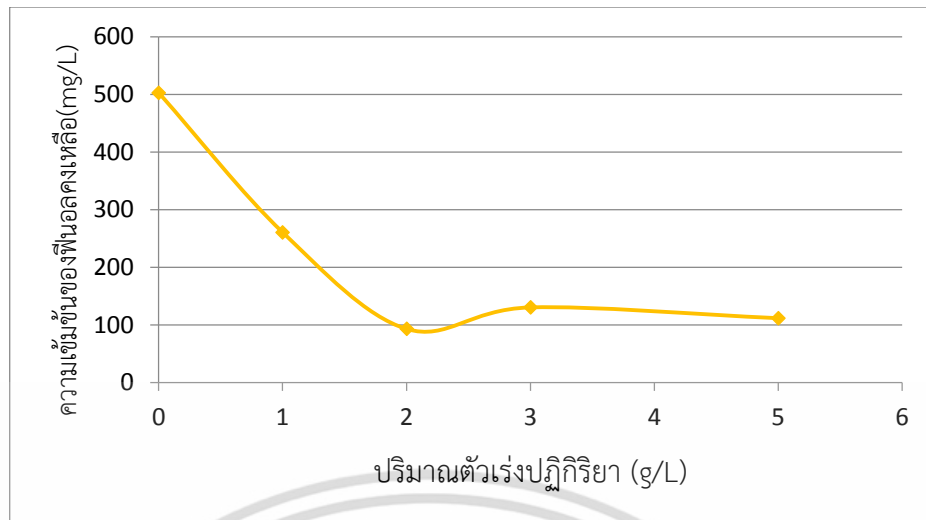
4.3.3 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการกำจัดฟีนอล

ในการทดลองนี้จะทำการออกซิเดชันฟีนอลในน้ำทิ้งสังเคราะห์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา คอปเปอร์ออกไซด์บนอะลูมินา 7% โดยน้ำหนัก ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.2 M ทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1, 2, 3 และ 5 g/L ใช้เวลาในการดำเนินปฏิกิริยา 60 นาที อุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา 80°C และความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลเริ่มต้น 500 mg/L ปริมาตร 200 mL ความเข้มข้นฟีนอลคงเหลือและร้อยละการกำจัดฟีนอลแสดงดังตาราง 4.6 และรูปที่ 4.11 - 4.12

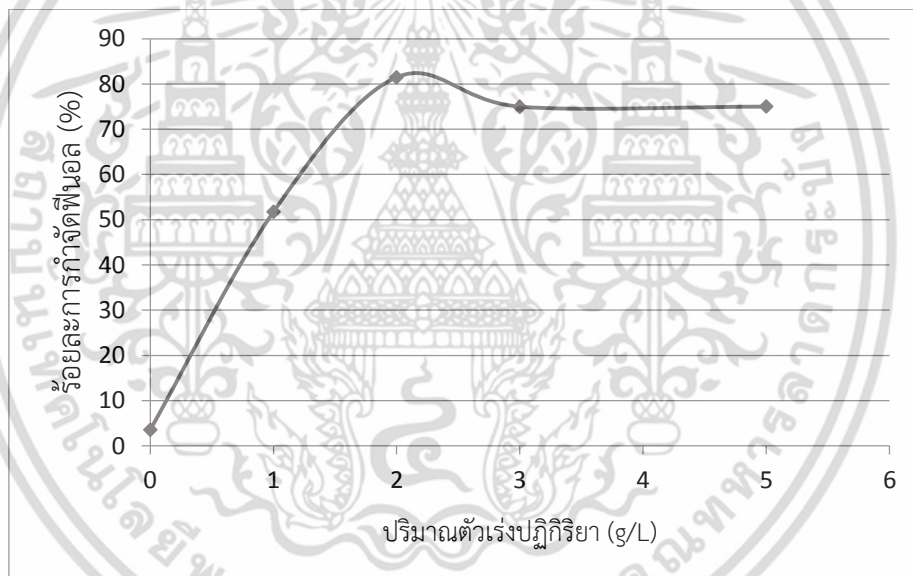
ตารางที่ 4.6 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการกำจัดฟีนอล

ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (g/L)	ความเข้มข้นฟีนอลคงเหลือ (mg/L)	ร้อยละการกำจัดฟีนอล (%)
0	482.2	3.56
1	260.7	51.72
2	93.1	81.48
3	130.4	74.99
5	111.7	75.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (g/L) กับ ความเข้มข้นของฟีนอลคงเหลือ (mg/L)



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (g/L) กับ ร้อยละการกำจัดฟีนอล (%)

จากรูปที่ 4.11 และ 4.12 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 0 g/L (ไม่ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา) เป็น 2 g/L ความเข้มข้นของฟีนอลมีแนวโน้มลดลง ซึ่งสอดคล้องกับร้อยละการกำจัดฟีนอลที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 3 และ 5 g/L ร้อยละการกำจัดฟีนอลมีแนวโน้มคงที่ ดังนั้นปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดฟีนอลที่เหมาะสมที่สุดคือ 2 g/L ซึ่งกำจัดฟีนอลสูงสุดถึงร้อยละ 81.48 ในกรณีปฏิกิริยาที่ใช้เพียงไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียว (ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0 g/L) สามารถกำจัดฟีนอลได้เพียงร้อยละ 3.56 เท่านั้น ดังนั้นการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับการเร่งปฏิกิริยาด้วย $\text{CuO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดฟีนอลได้มากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

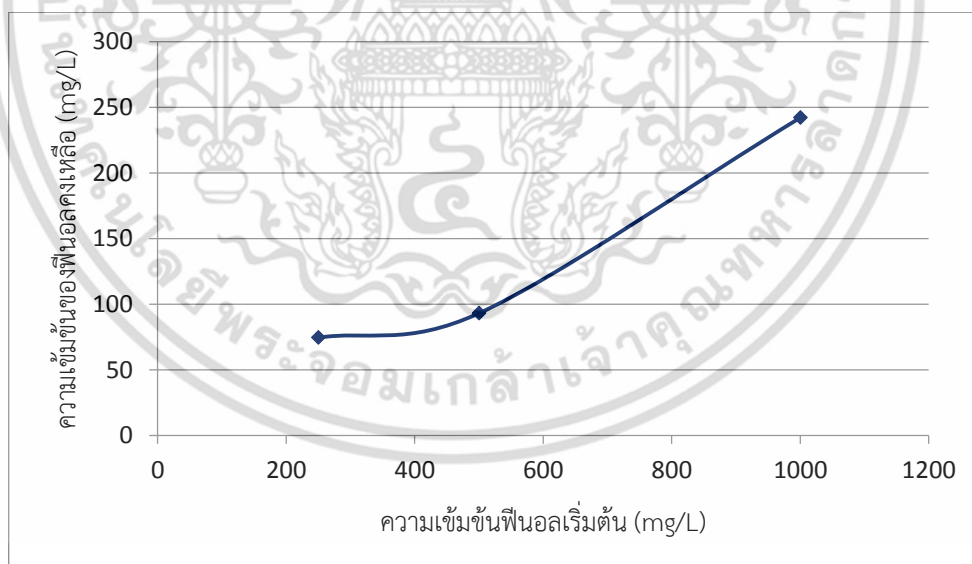
จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มากเกินไป ไม่สามารถกำจัดฟีนอลได้มากขึ้นเนื่องจากสภาวะที่ทำการทดลองกำหนดให้ความเข้มข้นของคอปเปอร์บนอะลูมินาและความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์คงที่ ดังนั้นปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เติมไปมากเกินไปกว่าจุดเหมาะสม จะไม่สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเพิ่มขึ้นได้

4.3.4 ผลของความเข้มข้นฟีนอลเริ่มต้นต่อการกำจัดฟีนอล

ในการทดลองนี้จะทำการออกซิเดชันฟีนอลในน้ำทิ้งสังเคราะห์โดยเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นฟีนอลเริ่มต้นที่ 250, 500 และ 1000 ppm โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์บนอะลูมินา 7% โดยน้ำหนักความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.2 M ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 2 g/L ใช้เวลาในการดำเนินปฏิกิริยา 60 นาที อุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา 80 °C ความเข้มข้นฟีนอลคงเหลือและร้อยละการกำจัดฟีนอลแสดงดังตาราง 4.7 และรูปที่ 4.13 - 4.14

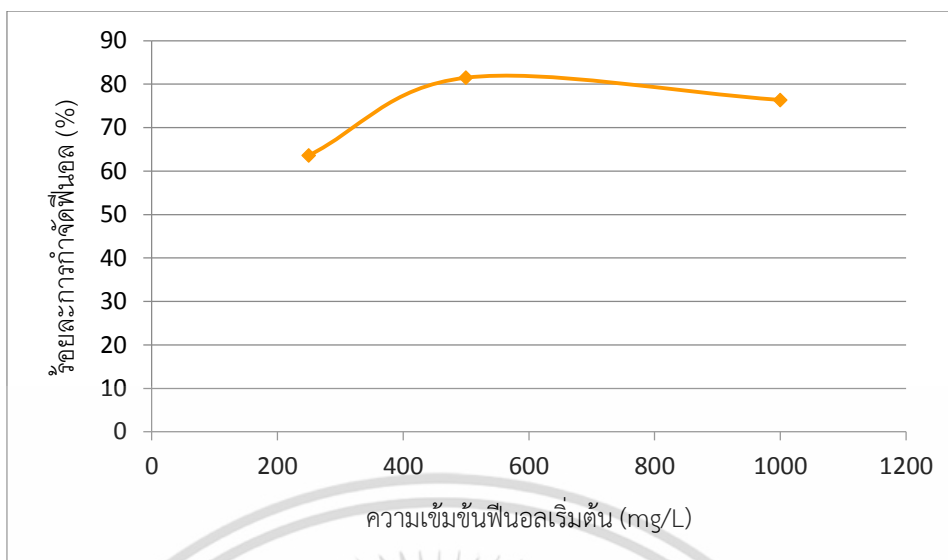
ตารางที่ 4.7 ผลของความเข้มข้นฟีนอลเริ่มต้นต่อการกำจัดฟีนอล

ความเข้มข้นของฟีนอลเริ่มต้น (mg/L)	ความเข้มข้นฟีนอลคงเหลือ (mg/L)	ร้อยละการกำจัดฟีนอล (%)
250	74.5	63.62
500	93.1	81.48
1000	242.1	76.36



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นฟีนอลเริ่มต้น (mg/L) กับความเข้มข้นของฟีนอลคงเหลือ (mg/L)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นฟินอลเริ่มต้น (mg/L) กับ ร้อยละการกำจัดฟินอล (%)

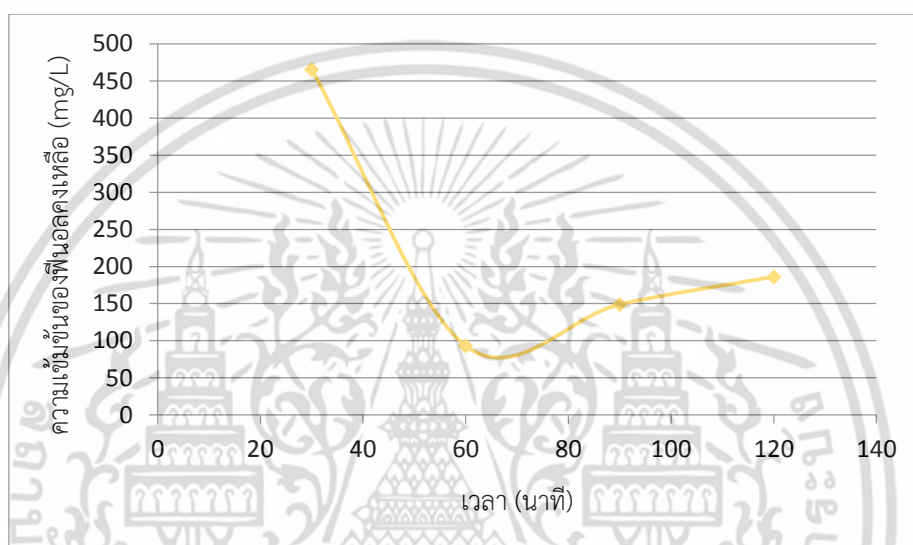
จากรูปที่ 4.13 จะเห็นได้ว่า เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของฟินอลเพิ่มขึ้น ทำให้ความเข้มข้นของฟินอลคงเหลือเพิ่มมากขึ้น และจากรูปที่ 4.14 จะเห็นได้ว่า ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟินอล 250 mg/L จะสามารถกำจัดฟินอลได้ร้อยละ 63.62 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟินอล 500 mg/L สามารถกำจัดฟินอลได้ร้อยละ 81.48 และที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 1000 mg/L สามารถกำจัดฟินอลได้ร้อยละ 76.36 พบว่าร้อยละการกำจัดฟินอลจะมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของฟินอลมากกว่า 500 mg/L การที่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของฟินอลมากกว่า 500 mg/L แล้วร้อยละการกำจัดฟินอลมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เนื่องจากสภาวะการทดลองมีการกำหนดให้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์คงที่ เมื่อปริมาณฟินอลมากกว่าปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จะทำให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไม่เพียงพอที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับฟินอล ดังนั้นจึงเหลือความเข้มข้นฟินอลเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.13 และส่งผลให้ร้อยละการกำจัดฟินอลมีแนวโน้มลดลงดังรูปที่ 4.14 ดังนั้นถ้าต้องการให้การกำจัดฟินอลเพิ่มขึ้น อาจต้องเพิ่มความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

4.3.5 ผลของเวลาการทำปฏิกิริยาต่อการกำจัดฟินอล

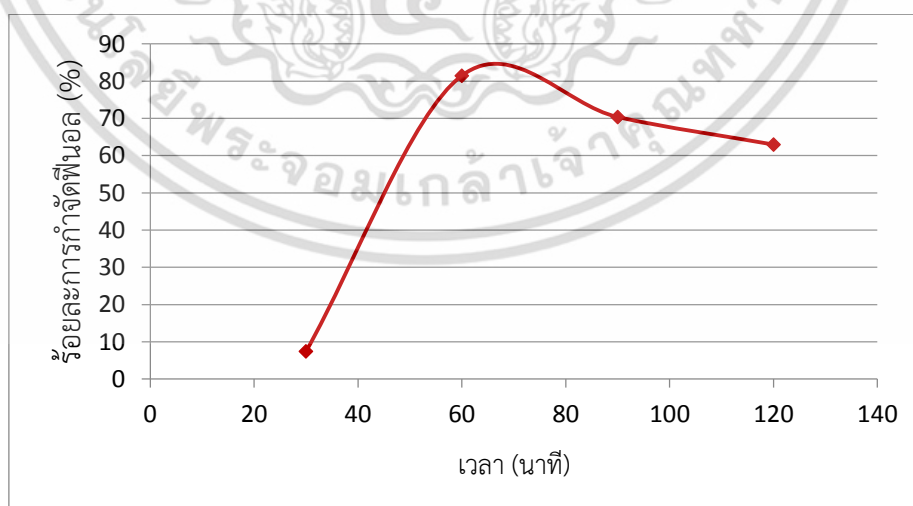
ในการทดลองนี้จะทำการออกซิเดชันฟินอลในน้ำทิ้งสังเคราะห์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา คอปเปอร์ออกไซด์บนอะลูมินา 7% โดยน้ำหนัก ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็น 0.2 M ใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 2 g/L ทำการเปลี่ยนแปลงเวลาในการดำเนินปฏิกิริยาที่ 30, 60, 90 และ 120 นาที อุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา 80 °C และความเข้มข้นของสารละลายฟินอลเริ่มต้น 500 mg/L ปริมาตร 200 mL ความเข้มข้นฟินอลคงเหลือและร้อยละการกำจัดฟินอลแสดงดังตาราง 4.8 และรูปที่ 4.15 - 4.16

ตารางที่ 4.8 ผลของเวลาการทำปฏิกิริยาต่อการกำจัดฟีนอล

เวลาของปฏิกิริยา (นาที)	ความเข้มข้นฟีนอลคงเหลือ (mg/L)	ร้อยละการกำจัดฟีนอล (%)
30	465.5	7.42
60	93.1	81.48
90	149.0	70.37
120	186.2	62.97



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการทำปฏิกิริยา (นาที) กับ ความเข้มข้นฟีนอลคงเหลือ (mg/L)



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการทำปฏิกิริยา (นาที) กับ ร้อยละการกำจัดฟีนอล (%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

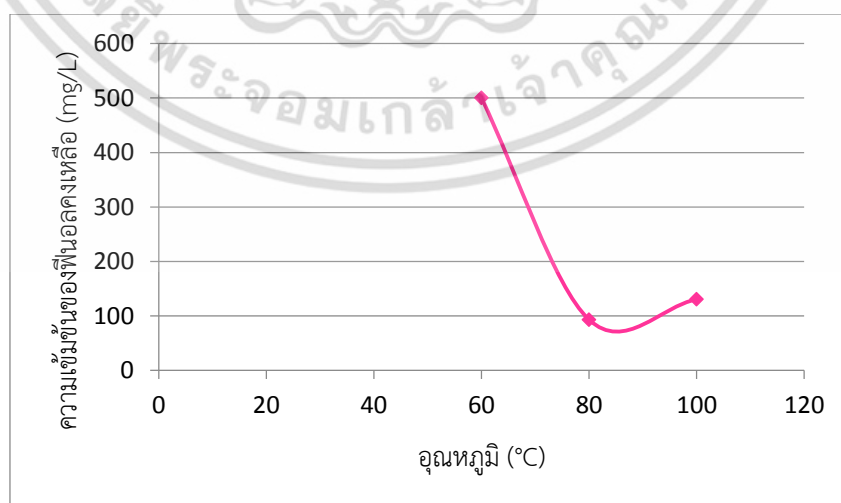
จากรูปที่ 4.15 จะเห็นได้ว่า เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจาก 30 เป็น 60 นาที ความเข้มข้นของฟีนอลคงเหลือมีแนวโน้มลดลง แต่เมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้นความเข้มข้นของฟีนอลคงเหลือมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น และจากรูปที่ 4.16 พบว่า เมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้นทำให้ร้อยละการกำจัดฟีนอลเพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปจนถึง 60 นาที จะเห็นได้ว่าร้อยละของการกำจัดฟีนอลมีแนวโน้มที่เริ่มลดลงสาเหตุที่เป็นเช่นนี้ อาจเกิดจากตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{CuO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ มีลักษณะเป็นผลึก มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง และมีรูพรุนขนาดเล็ก ปฏิกิริยาเริ่มต้นในการเกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล จะเกิดบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยานานขึ้น อาจมีการสะสมของสารตั้งต้น หรือผลิตภัณฑ์ภายในรูพรุนของ $\text{CuO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ จึงทำให้พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง ทำให้กำจัดฟีนอลได้น้อยลงด้วย ดังนั้นเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 60 นาที จึงเป็นเวลาที่เหมาะสม เพราะให้ร้อยละการกำจัดฟีนอลสูงสุด

4.3.6 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่อการกำจัดฟีนอล

ในการทดลองนี้จะทำการออกซิเดชันฟีนอลในน้ำทิ้งสังเคราะห์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา คอปเปอร์ออกไซด์บนอะลูมินา 7% โดยน้ำหนัก ซึ่งจะทำให้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาเป็น 60, 80 และ 100 °C โดยให้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็น 0.2 M ใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 2 g/L เวลาในการดำเนินปฏิกิริยา 60 นาที และความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลเริ่มต้น 500 mg/L ปริมาตร 200 mL ความเข้มข้นฟีนอลคงเหลือและร้อยละการกำจัดฟีนอลแสดงดังตาราง 4.9 และรูปที่ 4.17 - 4.18

ตารางที่ 4.9 ผลของอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาต่อการกำจัดฟีนอล

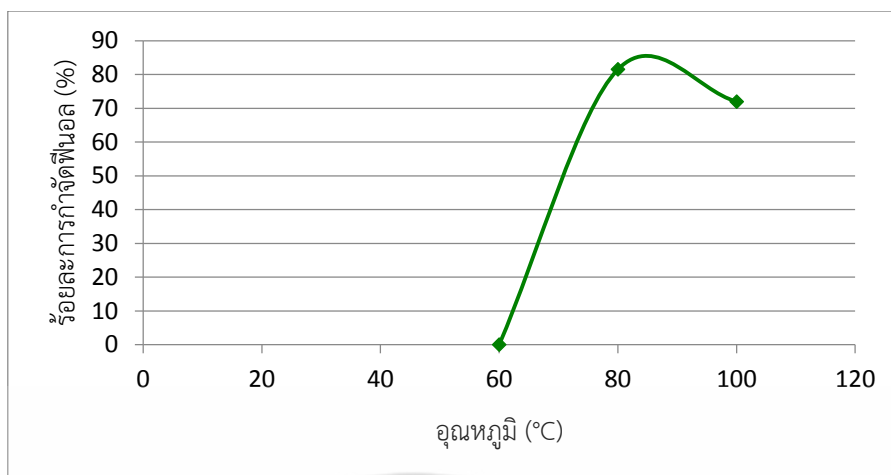
อุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา(°C)	ความเข้มข้นฟีนอลคงเหลือ (mg/L)	ร้อยละการกำจัดฟีนอล (%)
60	500	0
80	93.1	81.48
100	130.4	71.99



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา (°C) กับ

ความเข้มข้นฟีนอลคงเหลือ (mg/L)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ส่วนตัวเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่ให้ผู้อื่นทราบ หากมีข้อผิดพลาดประการใด ขออภัยเป็นอย่างสูง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

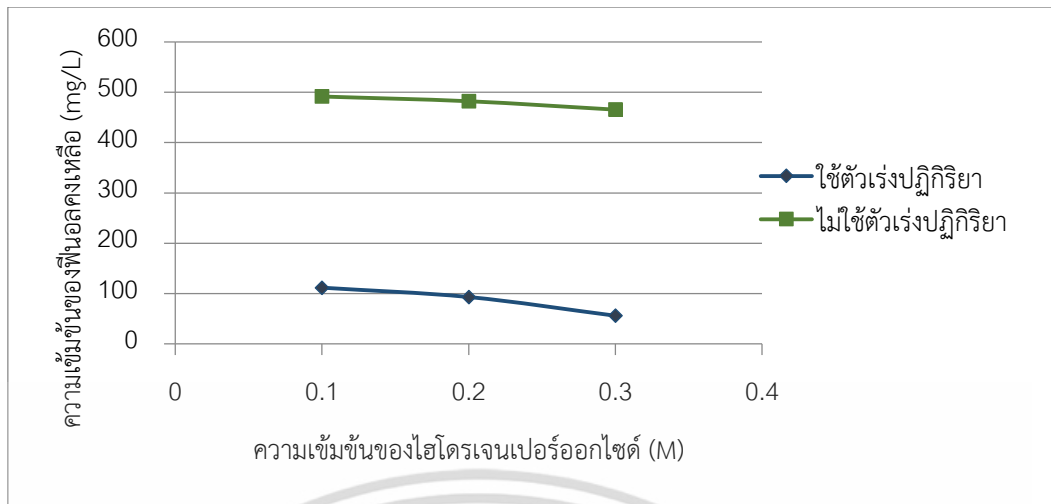


รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา (°C) กับ ร้อยละการกำจัดฟีนอล (%)

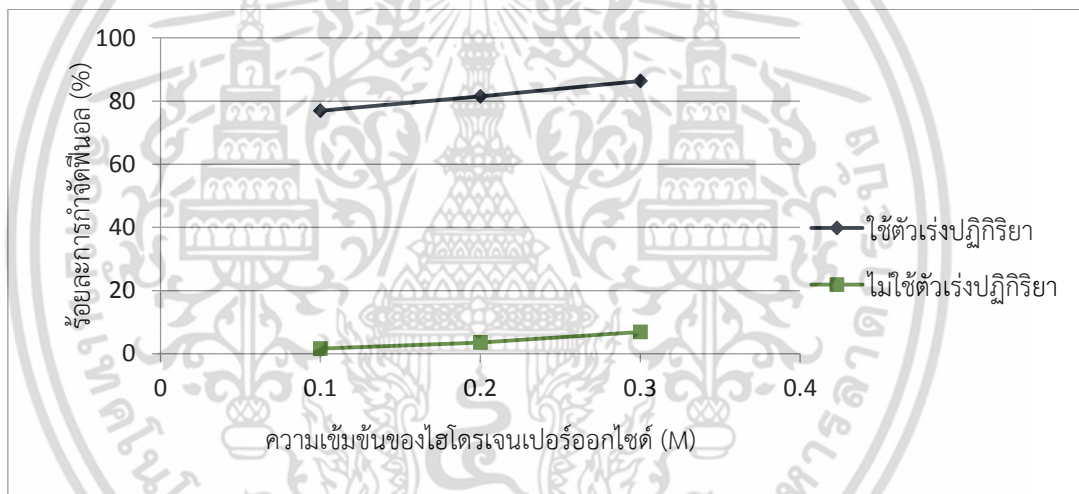
จากรูปที่ 4.17 จะเห็นได้ว่า เมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 60 °C เป็น 80 °C ทำให้ความเข้มข้นของฟีนอลคงเหลือมีค่าลดลง แต่เมื่อปฏิกิริยามีอุณหภูมิสูงถึง 100 °C กลับทำให้ความเข้มข้นของฟีนอลคงเหลือมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น และจากรูป 4.18 จะเห็นว่า ร้อยละการกำจัดฟีนอลมีค่าเพิ่มขึ้น และมีแนวโน้มลดลงเมื่อถึงอุณหภูมิจุดหนึ่ง ที่เป็นเช่นนี้เป็นเพราะเมื่อถึงอุณหภูมิหนึ่งซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาคือที่ 80 °C จะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้เป็นอย่างดี เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นถึง 100 °C ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดซ์ จะเกิดการสลายตัวทำให้ฟีนอลถูกกำจัดได้น้อย ส่งผลให้ร้อยละของการกำจัดฟีนอลนั้นมีแนวโน้มไปในทางที่ลดลง

4.4 การเปรียบเทียบปฏิกิริยาออกซิเดชันของฟีนอลเมื่อใช้และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

จากการศึกษาตัวแปรทั้งหมดข้างต้น จะเห็นได้ว่าความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยามีผลเป็นอย่างยิ่งต่อร้อยละการกำจัดฟีนอล รูปที่ 4.19 และ 4.20 เป็นการเปรียบเทียบความเข้มข้นของฟีนอลคงเหลือและร้อยละการกำจัดฟีนอล เมื่อปฏิกิริยามีการใช้และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 7% CuO/Al₂O₃ เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 80 °C ความเข้มข้นของฟีนอลเริ่มต้น 500 mg/L ที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.1, 0.2 และ 0.3 M



รูปที่ 4.19 เปรียบเทียบความเข้มข้นของฟินอลคงเหลือที่ความเข้มข้น H_2O_2 ต่างๆ เมื่อมีการใช้และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 7% CuO/Al_2O_3



รูปที่ 4.20 เปรียบเทียบร้อยละการกำจัดฟินอลที่ความเข้มข้น H_2O_2 ต่างๆ เมื่อมีการใช้และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 7% CuO/Al_2O_3

จากรูปที่ 4.19 จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 7% CuO/Al_2O_3 ร่วมกับ H_2O_2 ความเข้มข้นคงเหลือของฟินอลจะต่ำกว่ากรณีไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา จึงทำให้ร้อยละการกำจัดฟินอลมีค่าสูงกว่าดังรูปที่ 4.20 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าปฏิกิริยาออกซิเดชันของฟินอล ซึ่งจะเปลี่ยนฟินอลไปเป็น o-benzoquinone จะเกิดได้ดีขึ้นเมื่อมีการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นตัวออกซิไดส์ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา CuO/Al_2O_3

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาวิธีการกำจัดฟีนอลในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นตัวออกซิไดส์ และคอปเปอร์ออกไซด์บนอะลูมินา ($\text{CuO}/\text{Al}_2\text{O}_3$) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากผลการทดลองพบว่า

1. อุณหภูมิในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{CuO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่เหมาะสมคือ 550 องศาเซลเซียส เนื่องจากการเผาที่อุณหภูมิต่ำตัวเร่งปฏิกิริยามีความเป็นผลึกสูง พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนสูงกว่าการเผาที่อุณหภูมิ 600 และ 700 องศาเซลเซียส
2. จากการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละการกำจัดฟีนอล สรุปได้ว่า
 - 2.1 ปริมาณคอปเปอร์บนตัวเร่งปฏิกิริยา 7% โดยน้ำหนัก ให้ร้อยละการกำจัดฟีนอลสูงกว่าที่ปริมาณคอปเปอร์ 3%, 5%, 10% และ 15% เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยา 7% $\text{CuO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ มีพื้นที่จำเพาะสูงสุด และ CuO มีการกระจายตัวได้ดี
 - 2.2 ร้อยละการกำจัดฟีนอลเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ H_2O_2 ที่เพิ่มขึ้น และการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{CuO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ จะกำจัดฟีนอลได้ดีกว่าใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียว โดยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 0.3 โมลต่อลิตร ให้ร้อยละการกำจัดฟีนอลสูงสุด
 - 2.3 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการกำจัดฟีนอลคือ 2 กรัมต่อลิตร และการกำจัดฟีนอลมีแนวโน้มคงที่เมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยามากกว่า 2 กรัมต่อลิตร
 - 2.4 ร้อยละการกำจัดฟีนอลเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลจาก 250 เป็น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังจากนั้นร้อยละการกำจัดฟีนอลมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย
 - 2.5 ร้อยละการกำจัดฟีนอลเพิ่มขึ้นตามเวลาในการทำปฏิกิริยา แต่เมื่อเวลามากกว่า 60 นาที พบว่าการกำจัดฟีนอลลดลง เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาอาจเสื่อมสภาพจากการอุดตันรูพรุนของสารตั้งต้นหรือผลิตภัณฑ์
 - 2.6 เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 60 องศาเซลเซียส เป็น 80 องศาเซลเซียส พบว่าร้อยละการกำจัดฟีนอลเพิ่มขึ้นและสูงกว่าที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นเพราะเกิดการสลายตัวของ H_2O_2 ได้ที่อุณหภูมิสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรนำสถานะที่เหมาะสมของปฏิกิริยาซึ่งทดลองกับสารละลายฟีนอล ไปกำจัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีฟีนอลปะปนอยู่ เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำปฏิกิริยาออกซิเดชันของฟีนอลด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{CuO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมและงานด้านสิ่งแวดล้อม
2. ศึกษาตัวแปรสถานะอื่นๆ ที่มีผลต่อการกำจัดฟีนอล เช่น pH ของน้ำทิ้ง อัตราการปั่นกววน
3. พิสูจน์เอกลักษณ์ทางเคมีของฟีนอลหลังเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยเทคนิค HPLC ว่าฟีนอลที่ถูกออกซิเดชันจะมีลักษณะโครงสร้างอย่างไร
4. ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{CuO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่ทำปฏิกิริยาแล้วนำกลับมาใช้ใหม่



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] การบำบัดน้ำเสีย. [online]. Available : http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/ecology/chapter3/chapter3_water13.htm.
- [2] ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์, ศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร.นิธิยา รัตนานนท์. **Phenolic compounds**. [online]. Available : <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/2585/phenolic-compound>.
- [3] พันโทนายแพทย์วชิร โอนพรัตน์วิบูล. **Phenol**. [online]. Available : [http://www.occmednop.com/nrhc/web/search/chemical_attribute_show.php?UN_Number=2312&Chemical_name=Phenol%20\(%E0%B8%9F%E0%B8%B5%00%B8%99%E0%B8%AD%E0%B8%A5\)%20\(molten\)%20&Att_parent=0](http://www.occmednop.com/nrhc/web/search/chemical_attribute_show.php?UN_Number=2312&Chemical_name=Phenol%20(%E0%B8%9F%E0%B8%B5%00%B8%99%E0%B8%AD%E0%B8%A5)%20(molten)%20&Att_parent=0).
- [4] เคมีอุตสาหกรรม(ฟินอล). [online]. Available : <http://www.siamchemi.com/%E0%B8%9F%E0%B8%B5%E0%B8%99%E0%B8%AD%E0%B8%A5/>.
- [5] กรมโรงงานอุตสาหกรรม. พระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ.2535. [online]. Available : <http://www.diw.go.th/hawk/default.php>
- [6] พญ.เกศ สัตยพงศ์. 2555. **Phenol**. [online]. Available : http://www.summacheeva.org/index_thaitox_phenol.htm.
- [7] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. 2558. **อะลูมิเนียมออกไซด์**. [online]. Available : <https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%AD%E0%B8%B0%E0%B8%A5%E0%B8%B9%E0%B8%A1%E0%B8%B4%E0%B9%80%E0%B8%99%E0%B8%B5%E0%B8%A2%E0%B8%A1%E0%B8%AD%E0%B8%AD%E0%B8%81%E0%B9%84%E0%B8%8B%E0%B8%94%E0%B9%8C>.
- [8] สุรศักดิ์ ไททองวงศ์สกุล. **อลูมินา วัสดุสารพัดประโยชน์**. [online]. Available : <http://www.material.chula.ac.th/RADIO44/FEBRUARY/RADIO2-5.HTM>.
- [9] Natthakarn Rahong. 2015. **HYDROGEN PEROXIDE**. [online]. Available : <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache%3AhdYKMsVyyocJ%3AAccessgrouphailand.com%2Fdownload%2FdownloadFiles.php%3Ffile%3DMH4xOTU0NX5pbWFnZXVwbG9hZC80MjMyNC9leWRyb2dlblBlcm94aWRLXzU3OF83OTQucGRm+&cd=6&hl=en&ct=clnk&gl=th>.
- [10] ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา(ตัวเร่งปฏิกิริยา). [online]. Available : <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/ap-chemistry2/kinetics/catalyst.htm>.
- [11] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. 2559. **การเร่งปฏิกิริยา**. [online]. Available : <https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B9%80%E0%B8%A3%E0%B9%88%E0%B8%87%E0%B8%9B%E0%B8%8F%E0%B8%B4%E0%B8%81%E0%B8%B4%E0%B8%A3%E0%B8%B4%E0%B8%A2%E0%B8%B2>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] Q. Wu, X. Hu, P.L. Yue, X.S. Zhao, G.Q. Lu, **Copper/MCM-41 as catalyst for the wet oxidation of phenol**: Applied Catalysis B:Environmental. 32 (2001) 151–156.
- [13] S. Chalika, K.G. Bhattacharyya, **Catalytic wet oxidation of phenol and its derivatives with Fe₂O₃ and MnO₂**: Indian Journal of Chemistry Technology. 13 (2006) 499-504.
- [14] K.H. Kim, S.K. Ihm, **Characteristics of titania supported copper oxide catalysts for wet air oxidation of phenol**: Journal of Hazardous Materials. 146 (2007) 610-616.
- [15] A.M Liou, C.H. Chen, **CuO impregnated activated carbon for catalytic wet peroxide oxidation of phenol**: Journal of Hazardous Materials. 172 (2009) 498-506.
- [16] P.J. Liu, H.Z. Wei, S.B. He, **Catalytic wet peroxide oxidation of m-cresol over Fe/ γ -Al₂O₃ and Fe-Ce/ γ -Al₂O₃**: Chemical Papers. 69 (2015) 827-838.
- [17] ณัฐนันท์ ชัยตระกูลเสรี, เบญจมาภา เลหาคุณากร, ประสิทธิ์ชัย มีระคำ. 2553. “การกำจัดฟีนอลด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยมีคอปเปอร์ออกไซด์บนถ่านกัมมันต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.” โครงการพิเศษตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [18] ณัฐธิดา แก้วเขียว, พรพิมล ผสมทรัพย์, อติศา ภาสสุวรรณ. 2555. “การกำจัดฟีนอลในน้ำทิ้งด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และคอปเปอร์ (II) บนโคโคซานเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.” โครงการพิเศษตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [19] F. Shehata , M. Abdelhameed, A. Fathy, M. Elmahdy, **Preparation and Characteristics of Cu-Al₂O₃ Nanocomposite**: Open Journal of Metal. 1 (2011) 25-33.
- [20] P. Hirunsit, C. Luadthong, K. Faunghawakij, **Effect of alumina hydroxylation on glycerol hydrogenolysis to 1,2-propanediol over Cu/Al₂O₃: combined experiment and DFT investigation**: RSC Adv. 5 (2015) 11188-11197.
- [21] K.Q. Dang, M. Nankoto, **Transparent Cr-doped Al₂O₃ made by pulsed electric current sintering process**. [online]. Available : <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=5511>.
- [22] A. Alejandre, F. Medina, P. Salagre, A. Frabegat, J.E. Sueiras, **Characterization and activity of copper and nickel catalysts for the oxidation of phenol aqueous solutions**: Applied Catalysis B: Environmental. 18 (1998) 307-315.



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

การคำนวณ

1. การหาปริมาณคอปเปอร์(II) ที่เติมบนตัวเร่งปฏิกิริยา

ถ้ามีCu(II) อยู่ 63.5463 g ใน $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 1 mol หนัก 241.5234 g

$$\text{ถ้าต้องการCu(II) 7\% จะต้องชั่ง}\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O} = \frac{0.7 \times 241.5234}{63.5463} \\ = 2.6622 \text{ g}$$

เพราะฉะนั้นปริมาณคอปเปอร์ที่เติมลงบนตัวเร่งปฏิกิริยา คือ 2.6622 g

2. การหาปริมาณ H_2O_2 ที่ใช้ในการทดลอง

จากสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีความเข้มข้น 30 % w/v

$$\text{จาก } C = \frac{\%10}{\text{MW}}$$

$$\text{จะได้ว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีความเข้มข้น} = \frac{30 \times 10}{34} \\ = 8.82 \text{ M}$$

ถ้าต้องการทราบปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ในปฏิกิริยา

$$\text{คำนวณได้จาก } C_1V_1 = C_2V_2$$

จากปฏิกิริยาใช้ปริมาตรรวมของสารละลายเท่ากับ 200 mL และ ต้องการความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.2 M

$$\text{ดังนั้น ต้องใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ } 8.82 \text{ M} \times V_1 = 0.2 \text{ M} \times 200 \text{ mL}$$

$$V_1 = 4.54 \text{ mL}$$

เพราะฉะนั้น ปริมาตรของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ในปฏิกิริยา คือ 4.54 mL

3. การคำนวณหาร้อยละการกำจัดฟีนอลในน้ำทิ้งสังเคราะห์

จากการทดลอง เมื่อคำนวณหาความเข้มข้นคงเหลือของฟีนอลในน้ำทิ้งสังเคราะห์หลังปฏิกิริยาออกซิเดชันฟีนอลได้แล้ว จึงนำมาคำนวณหาร้อยละการกำจัดจากสมการ

$$\text{ร้อยละการกำจัด} = \frac{(\text{ความเข้มข้นฟีนอลเริ่มต้น} - \text{ความเข้มข้นฟีนอลคงเหลือ}) \times 100}{\text{ความเข้มข้นของฟีนอลเริ่มต้น}}$$

ตัวอย่างการคำนวณ ความเข้มข้นคงเหลือของฟีนอลในน้ำทิ้งสังเคราะห์หลังปฏิกิริยาออกซิเดชันฟีนอลเท่ากับ 93.1 mg/L โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลเท่ากับ 500 mg/L

$$\text{ร้อยละการกำจัด} = \frac{(500 - 93.1) \times 100}{500}$$

$$= 81.48$$

เพราะฉะนั้นร้อยละการกำจัดฟีนอลเท่ากับ 81.48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้