การกำจัดฟีนอลด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา คอปเปอร์นิกเกิลอะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์

REMOVAL OF PHENOL BY OXIDATION REACTION USING COPPER NICKEL ALUMINIUM LAYERED DOUBLE HYDROXIDE AS CATALYST

กัญญาวีร์ เฉยศิริ

ณัฐญา สุนา

นพวรรณ ตันบริภัณฑ์

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

REMOVAL OF PHENOL BY OXIDATION REACTION USING COPPER NICKEL ALUMINIUM LAYERED DOUBLE HYDROXIDE AS CATALYST

Miss KANYAWEE CHERYSIRI
Miss NUTTAYA SUNA
Miss NOPPHAWAN TANBORIPHAN

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 2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ	การกำจัดฟีนอลด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์นิกเกิลอะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ Removal of Phenol by Oxidation Reaction Using Copper Nickel Aluminium Layered Double Hydroxide as Catalyst
ชื่อนักศึกษา	นางสาวกัญญาวีร์ เฉยศิริ รหัสนักศึกษา 58050438 นางสาวณัฐญา สุนา รหัสนักศึกษา 58050466 นางสาวนพวรรณ ตันบริภัณฑ์ รหัสนักศึกษา 58050487
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชา	เคมี
ปีการศึกษา	2561
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. อำนาจ เพิ่มทรัพย์สกุล

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2561

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร. ปานไพลิน สีหาราช ประธานกรรมการ	
ดร. ณัฐธิดา นุ่มวงศ์ กรรมการ	
ดร. อำนาจ เพิ่มทรัพย์สกุล กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ	การกำจัดฟีนอลด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์นิกเกิลอะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์
ชื่อนักศึกษา	นางสาวกัญญาวีร์ เฉยศิริ รหัสนักศึกษา 58050438
	นางสาวณัฐญา สุนา รหัสนักศึกษา 58050466
	นางสาวนพวรรณ ตันบริภัณฑ์ รหัสนักศึกษา 58050487
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชา	เคมี
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2561
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. อำนาจ เพิ่มทรัพย์สกุล

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการกำจัดฟีนอลด้วยวิธีออกซิเดชันโดยมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นตัวออกซิไดซ์และมีคอปเปอร์นิกเกิลอะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิล-ไฮดรอกไซด์ (CuNiAl-LDH) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยทำการศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการกำจัดฟีนอล ได้แก่ อัตราส่วนโดยโมลของ Cu/Ni และ (Cu+Ni)/Al ในตัวเร่งปฏิกิริยา ความเข้มข้นของฟีนอลเริ่มต้น ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เวลาในการทำปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาและการแคลไซน์ตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกเตรียมด้วยวิธีตกตะกอนร่วม (Co-precipitation) และพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) และวิเคราะห์พื้นที่ผิวด้วยเทคนิค BET นอกจากนี้ยังใช้เทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรสโคปี (UV-Visible Spectroscopy) ในการตรวจวัดความเข้มข้นของฟีนอลที่เหลือและผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นหลังทำปฏิกิริยา จากการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการเกิดปฏิกิริยาคือ ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl-LDH 2-1 ความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลเริ่มต้น 100 mg/L ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1.0 g/L ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 100 mM เวลา 60 นาที ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ซึ่งสภาวะดังกล่าวสามารถกำจัดฟีนอลได้ถึงร้อยละ 97.79 โดยไฮโดรควิโนนและแคทีคอลเป็นผลิตภัณฑ์หลักที่เกิดขึ้นหลังจากทำปฏิกิริยาออกซิเดชันของฟีนอล

คำสำคัญ : คอปเปอร์นิกเกิลอะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ แคลไซน์ ตกตะกอนร่วม ฟีนอล ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Removal of Phenol by Oxidation Reaction Using Copper Nickel Aluminium Layered Double Hydroxide as Catalyst
Students	Miss. Kanyawee Cherysiri Student ID 58050438
	Miss. Nuttaya Suna Student ID 58050466
	Miss. Nopphawan Tanboriphan Student ID 58050487
Degree	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)
Department	Chemistry
Faculty	Science
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
Academic Year	2018
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 nickel aluminium layered double hydroxide (CuNiAl-LDH) as catalyst. By studying the variables affecting the reaction such as Cu/Ni and (Cu+Ni)/Al mole ratio in catalyst, initial concentration of phenol, catalyst amount, concentration of hydrogen peroxide, reaction time, reaction temperature, and calcination of catalyst. The catalyst was prepared by co-precipitation method and characterized by X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscope (SEM), and BET surface area technique. UV-Visible Spectroscopy was applied to measure the concentration of phenol and the main product after reaction From the experiments, it was found that the optimum condition of this reaction was using the initial concentration of phenol 100 mg/L, 1.0 g/L of CuNiAl-LDH 2-1 catalyst, concentration of 100 mM of hydrogen peroxide at 70 °C for 60 minutes which can achieve 97.79% of phenol removal. Hydroquinone and catechol were the main product after the oxidation of phenol.

Keywords : calcination, copper nickel aluminium layered double hydroxide, co-precipitation, phenol, hydrogen peroxide

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาวิชาโครงงานพิเศษ ในหัวข้อเรื่องการกำจัดฟีนอลด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์นิกเกิลอะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ โครงงานพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดีด้วยความกรุณาจากบุคคลหลาย ๆ ฝ่ายที่ให้ความร่วมมือซึ่งคณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณทุก ๆ ท่านไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ ดร.อำนาจ เพิ่มทรัพย์สกุล ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานพิเศษที่กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ เอกสารต่าง ๆ รวมถึงให้ความช่วยเหลือชี้แนะแนวทางในระหว่างการทดลองและการตรวจสอบแก้ไขปัญหาข้อบกพร่องของโครงงานฉบับนี้ได้เป็นอย่างดีมาตลอดจนโครงงานพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี จึงขอกราบขอบพระคุณด้วยความเคารพเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการ ผศ.ดร.ปานไพลิน สีหาราช และ ดร.ณัฐธิดา นุ่มวงศ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการทดลองงานวิจัย ตลอดจนตรวจสอบและแก้ไขเพิ่มเติมทำให้โครงงานฉบับนี้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณท่านคณาจารย์ภาควิชาเคมีทุกท่านเป็นอย่างสูงที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาพร้อมทั้งให้คำแนะนำต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาในการทำปัญหาพิเศษครั้งนี้

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่คณะวิทยาศาสตร์ทุกท่านรวมถึงแม่บ้านที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเบิกเครื่องมืออุปกรณ์และสารเคมีต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองงานวิจัยนี้รวมทั้งอำนวยความสะดวกในการเปิดปิดห้องปฏิบัติการในวันที่มีการทดลอง

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณครอบครัวของผู้จัดทำสำหรับกำลังใจ และขอบคุณเพื่อนๆที่คอยให้ความช่วยเหลือจนโครงงานพิเศษฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี ผู้จัดทำหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่มีความสนใจหรือต้องการศึกษางานที่เกี่ยวข้องในโครงงานพิเศษนี้ หากเกิดข้อผิดพลาดประการใด ผู้จัดทำต้องขออภัยไว้ ณ ที่นี้ด้วย

กัญญาวีร์ เฉยศิริ
ณัฐญา สุนา
นพวรรณ ตันบริภัณฑ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ข
กิตติกรรมประกาศ ..... ค
สารบัญ ..... ง
สารบัญตาราง ..... ช
สารบัญรูป ..... ฌ
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2.วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย 3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4
2.1 ลักษณะทั่วไปของฟีนอล 4
2.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพ และเคมีของฟีนอล 4
2.1.2 การผลิตฟีนอล 5
2.1.3 ประโยชน์ฟีนอล 7
2.1.4 ผลกระทบของฟีนอลต่อคนและสัตว์ 7
2.2 ลักษณะทั่วไปของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ (Layered Double Hydroxide, LDH). 8
2.3 ลักษณะทั่วไปของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) 10
2.3.1 คุณสมบัติทางเคมีของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 10
2.3.2 อันตรายของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อสุขภาพ 11
2.4 การบำบัดน้ำเสีย 11
2.4.1 กระบวนการบำบัดน้ำเสีย 11
2.4.2 วิธีการบำบัดน้ำเสีย 13
2.4.3 หลักการจัดการน้ำเสีย 14
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 14
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย 19
3.1 สารเคมี 19
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ 20
3.3 วิธีการทดลอง 21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1 การเตรียมกราฟมาตรฐานของสารละลายฟีนอล สารละลายแคทีคอลและ
สารละลายไฮโดรควิโนน....21
3.3.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาและการวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา....21
3.3.2.1 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl-LDH....21
3.3.2.2 การวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา....22
3.3.3 การทำปฏิกิริยาออกซิเดชันของฟีนอล....24
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง....28
4.1 การวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์นิกเกิลอะลูมิเนียม
เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ (CuNiAl-LDH)....28
4.1.1 โครงสร้างและความเป็นผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบน
รังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction, XRD)....28
4.1.2 ลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
(Scanning Electron Microscope, SEM)....30
4.1.3 องค์ประกอบของธาตุในตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์นิกเกิลอะลูมิเนียม เลเยอร์
ดับเบิลไฮดรอกจาก SEM-EDS (Mapping)....31
4.1.4 พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาตรวจสอบด้วยวิธี BET..35
4.2 การเตรียมกราฟมาตรฐานสารละลาย....36
4.2.1 การเตรียมกราฟมาตรฐานสารละลายฟีนอล (Phenol)....36
4.2.2 การเตรียมกราฟมาตรฐานสารละลายแคทีคอล (Catechol)
และไฮโดรควิโนน (Hydroquinone)....37
4.3 ผลของตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการกำจัดฟีนอล....40
4.3.1 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของโลหะในตัวเร่งปฏิกิริยา....40
4.3.2 ผลของความเข้มข้นฟีนอลเริ่มต้น....42
4.3.3 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl-LDH....43
4.3.4 ผลของความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อการกำจัดฟีนอล....45
4.3.5 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อการกำจัดฟีนอล....48
4.3.6 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่อการกำจัดฟีนอล....49
4.3.7 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการแคลไซน์ต่อการกำจัดฟีนอล....50
4.3.8 การกำจัดฟีนอลภายใต้สภาวะที่เหมาะสม....51
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ....52
5.1 สรุปผลการทดลอง....52
5.2 ข้อเสนอแนะ....54
เอกสารอ้างอิง....55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก.....58
ภาคผนวก ก.....59
ภาคผนวก ข.....64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 แสดงสมบัติทางเคมีของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 10

3.1 น้ำหนักของสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl-LDH 22

3.2 สภาวะการทดลองสำหรับหาตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการกำจัดฟีนอล ด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน 25

3.3 ผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อการกำจัดฟีนอลด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl-LDH 26

4.1 วิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุในตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl-LDH โดยเทคนิค SEM-EDS 31

4.2 พื้นที่ผิวจำเพาะ และปริมาตรรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl-LDH 35

4.3 ค่าการดูดกลืนแสงของฟีนอลที่เป็นสารละลายมาตรฐาน 37

4.4 ค่าการดูดกลืนแสงของแคทีคอลที่เป็นสารละลายมาตรฐาน 38

4.5 ค่าการดูดกลืนแสงของไฮโดรควิโนนที่เป็นสารละลายมาตรฐาน 39

4.6 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของโลหะในตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละการกำจัดฟีนอล และผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น 40

4.7 ผลของความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลเริ่มต้นต่อการกำจัดฟีนอลและผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น 42

4.8 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl-LDH ต่อการกำจัดฟีนอลและผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น 43

4.9 ผลของความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อการกำจัดฟีนอลและผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น 45

4.10 ผลของการเติมและไม่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีต่อร้อยละการกำจัดฟีนอล เมื่อใช้ CuNiAl 2-1 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา 47

4.11 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อการกำจัดฟีนอลและผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น 48

4.12 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่อการกำจัดฟีนอลและผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น เมื่อใช้ CuNiAl 2-1 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา 49

4.13 เปรียบเทียบร้อยละการกำจัดฟีนอล เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการแคลไซน์ที่ 400°C และไม่ผ่านการแคลไซน์ 50

4.14 ร้อยละการกำจัดฟีนอล ร้อยละการเกิดไฮโดรควิโนนและแคทีคอล ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม 51

ข.1 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของโลหะในตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละการกำจัดฟีนอล และผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น 64

ข.2 ผลของความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลเริ่มต้นต่อการกำจัดฟีนอลและผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น 64

ข.3 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl-LDH ต่อการกำจัดฟีนอลและผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น 65

ข.4 ผลของความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อการกำจัดฟีนอลและผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น 65

เอกสารนี้มีลิขสิทธิ์ ใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของลิขสิทธิ์ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.5 ผลของการเติมและไม่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการทำปฏิกิริยาต่อการกำจัดฟีนอล
และผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น.....66
ข.6 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อการกำจัดฟีนอลและผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น.....66
ข.7 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่อการกำจัดฟีนอลและผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น.....67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 แสดงโครงสร้างของฟีนอล....4
2.2 แสดงโครงสร้างของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์....9
2.3 ตัวอย่างของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ที่พบในธรรมชาติ....10
2.4 โครงสร้างของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์....10
3.1 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชั่นสเปกโทรโฟโตมิเตอร์....23
3.2 เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นพรุน....23
3.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด....23
3.4 ชุดปฏิกรณ์สำหรับทำปฏิกิริยาออกซิเดชันของฟีนอล....24
3.5 เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์....25
4.1 ดิฟแฟรคโทรแกรมของ CuNiAl-LDH อัตราส่วน 2-1, 3-1, 3-3 และ 3-5....29
4.2 ลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด....31
4.3 องค์ประกอบของธาตุในตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl 2-1 และการกระจายตัว
จาก SEM-EDS (mapping)....32
4.4 องค์ประกอบของธาตุในตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl 3-1 และการกระจายตัว
จาก SEM-EDS (mapping)....33
4.5 องค์ประกอบของธาตุในตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl 3-5 และการกระจายตัว
จาก SEM-EDS (mapping)....34
4.6 ไอโซเทอมการดูดซับและการคายซับแก๊สไนโตรเจนของ CuNiAl-LDH....36
4.7 กราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของฟีนอล (mg/L) และค่าการดูดกลืนแสง (Abs.)....37
4.8 กราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของแคทีคอล (mg/L) และค่าการดูดกลืนแสง (Abs.)....38
4.9 กราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของไฮโดรควิโนน (mg/L) และค่าการดูดกลืนแสง (Abs.) 39
4.10 ร้อยละการกำจัดฟีนอล ร้อยละการเกิดไฮโดรควิโนนและแคทีคอล
ที่อัตราส่วนโดยโมลของโลหะใน CuNiAl-LDH ต่าง ๆ....41
4.11 ร้อยละการกำจัดฟีนอล ร้อยละการเกิดไฮโดรควิโนนและแคทีคอล
ที่ความเข้มข้นของฟีนอลเริ่มต้นต่าง ๆ เมื่อเร่งปฏิกิริยาด้วย CuNiAl 2-1....42
4.12 ร้อยละการกำจัดฟีนอล ร้อยละการเกิดไฮโดรควิโนนและแคทีคอล
ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาด้วย CuNiAl 2-1 ต่าง ๆ....44
4.13 ร้อยละการกำจัดฟีนอล ร้อยละการเกิดไฮโดรควิโนนและแคทีคอล
ที่ความเข้มข้น H_2O_2 ต่าง ๆ เมื่อเร่งปฏิกิริยาด้วย CuNiAl 2-1....45

เอกสารนี้เป็นกรรมสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ห้ามมิให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.14 เปรียบเทียบร้อยละการกำจัดฟีนอลในสภาวะเมื่อมีการเติมและไม่เติม H_2O_2 เมื่อใช้ CuNiAl 2-1 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....47
4.15 ร้อยละการกำจัดฟีนอล ร้อยละการเกิดของไฮโดรควิโนนและแคทีคอล ที่เวลาของการทำปฏิกิริยาต่าง ๆ เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl 2-1.....48
4.16 ร้อยละการกำจัดฟีนอล ร้อยละการเกิดของไฮโดรควิโนนและแคทีคอล ที่อุณหภูมิของปฏิกิริยาต่าง ๆ เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl 2-1.....49
ก.1.1 รูปแบบ XRD แสดงโครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl-LDH.....62

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันภาคอุตสาหกรรมมีแนวโน้มเติบโตขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งมีความสำคัญต่อการพัฒนาทางเศรษฐกิจอย่างมาก เมื่อมีอุตสาหกรรมก็จะมีสิ่งหนึ่งที่เกิดขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้คือ น้ำเสียหรือน้ำทิ้งจากกระบวนการอุตสาหกรรม ทั้งในกระบวนการผลิต กระบวนการจัดเก็บ กระบวนการขนส่ง และกระบวนการกำจัดน้ำเสีย โดยน้ำเสียจะถูกปล่อยสารเคมีในรูปของสารละลายลงสู่แหล่งน้ำต่าง ๆ ทำให้เกิดปัญหาน้ำเน่าเสีย ไม่สามารถนำมาใช้ในการอุปโภค บริโภค รวมทั้งยังส่งกลิ่นเหม็นรบกวน ถ้าไม่มีการบำบัดหรือน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว แต่ยังไม่เป็นไปตามมาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม เมื่อน้ำเสียถูกปล่อยไปแล้วจะส่งผลกระทบรุนแรงต่อระบบนิเวศสิ่งแวดล้อมเป็นอันตรายต่อสุขภาพอนามัยของประชาชนที่อยู่โดยรอบโรงงาน

ฟีนอลเป็นสารประกอบอินทรีย์ซึ่งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) พันธะกับวงเบนซีน มีสูตรทางเคมีคือ C_6H_6O มีสมบัติเป็นกรด ลักษณะทางกายภาพมีทั้งอยู่ในรูปผลึกที่ระเหยง่ายหรือของเหลวไม่มีสี หากสัมผัสอากาศจะกลายเป็นสีชมพู มีกลิ่นเฉพาะเป็นกลิ่นเหมือนกรด สารฟีนอลมีการนำมาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมหลายประเภท ได้แก่ อุตสาหกรรมปิโตรเคมี อุตสาหกรรมพลาสติก สารเคมีในการเกษตร อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมสีย้อม อุตสาหกรรมสารฆ่าเชื้อโรค อุตสาหกรรมยา เป็นต้น [1]

สารประกอบฟีนอล จัดเป็นสารเคมีอันตรายมีความเป็นพิษสูง สามารถแพร่เข้าสู่ร่างกายโดยซึมผ่านทางผิวหนังได้ง่ายจะทำให้เกิดอาการวิงเวียนศีรษะ หน้ามืด อาเจียน ท้องร่วง ไอของฟีนอลทำให้เกิดการระคายเคืองต่อเยื่อบุตา เยื่อบุระบบทางเดินหายใจ ฟีนอลในสถานะของแข็งหากมีการสัมผัสจะทำให้ผิวหนังถูกเผาไหม้ได้ นอกจากนี้ยังจัดเป็นสารก่อมะเร็ง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการลดหรือกำจัดสารกลุ่มนี้ในน้ำทิ้งก่อนปล่อยลงสู่แม่น้ำและมีการกำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม กำหนดให้มีสารประกอบกลุ่มฟีนอลได้สูงสุดไม่เกิน 1 มิลลิกรัม/ลิตร [2]

วิธีการกำจัดฟีนอลออกจากน้ำทิ้งมีหลายวิธีแบ่งเป็น วิธีทางชีวภาพ ทางกายภาพและทางเคมี สำหรับวิธีทางชีวภาพเป็นวิธีการดั้งเดิมที่บำบัดฟีนอลโดยใช้เอนไซม์เปอร์ออกซิเดส แต่ข้อเสียคือจะให้ผลการบำบัดที่ไม่ดีสำหรับน้ำทิ้งที่มีสารไม่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Non-biodegradable) จำนวนมากและต้องใช้ระยะเวลานานสำหรับจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารประกอบฟีนอล [3] ส่วนวิธีทางกายภาพ เช่น การตกตะกอน (Precipitation) และการดูดซับบนถ่านกัมมันต์เป็นวิธีที่ง่าย แต่หลังจากการบำบัดแล้วต้องมีกระบวนการทำลายสารประกอบฟีนอล ทำให้ขั้นตอนการบำบัดมีหลายขั้นตอน [4] ดังนั้นในระยะเวลาหลายปีที่ผ่านมาวิธีบำบัดฟีนอลทางเคมีได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเอกสารนี้ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม ได้แก่ กระบวนการ Fenton ซึ่งใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับรังสี UV (H_2O_2/UV) การใช้โอโซน (Ozone) และการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นสารออกซิแดนท์ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic Wet Peroxide Oxidation, CWPO) ซึ่งกระบวนการ CWPO เป็นวิธีหนึ่งที่ลดปริมาณสารอินทรีย์มลพิษให้เหลือน้อยที่สุด โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธุ์ (Homogeneous) หรือวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous) ภายใต้สภาวะที่ไม่รุนแรง (ความดันบรรยากาศ และอุณหภูมิต่ำกว่า 335 เคลวิน) [5]

ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ที่ประกอบด้วยโลหะทรานซิชันที่มีวาเลนซ์ต่ำ (Low valence transition metal) ถูกพบว่ามีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสารอินทรีย์มลพิษสำหรับกระบวนการ CWPO เมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธุ์ที่สภาวะเดียวกันของปฏิกิริยา นอกจากนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ที่เป็นของแข็งสามารถแยกออกจากปฏิกิริยาได้ง่ายและนำกลับมาใช้ใหม่ได้ [6] โดยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด Layered Double Hydroxide (LDH) ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างเป็นชั้นประกอบไปด้วยไอออนลบที่สามารถเกิดการแลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable anions) กำลังเป็นที่สนใจในการนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับกำจัดสารอินทรีย์มลพิษในน้ำเสีย

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดฟีนอลในน้ำทิ้งสังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยใช้คอปเปอร์นิกเกิลอะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ (CuNiAl-LDH) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและทำการศึกษาถึงตัวแปรที่มีผลต่อการกำจัดฟีนอล ได้แก่ อัตราส่วนของโลหะใน CuNiAl-LDH ความเข้มข้นของฟีนอลเริ่มต้น ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์-ออกไซด์ เวลาในการทำปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาและการแคลไซน์ตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งผลที่ได้จากการศึกษาจะเป็นข้อมูลสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในการลดปัญหามลพิษทางน้ำจากการปนเปื้อนของฟีนอลและสามารถขยายขนาดไปใช้ระดับภาคอุตสาหกรรมได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาวิธีการกำจัดฟีนอลในน้ำทิ้งสังเคราะด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยใช้คอปเปอร์นิกเกิลอะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ (CuNiAl-LDH) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยมีวัตถุประสงค์ดังนี้

1) ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดฟีนอลในน้ำเสียด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยใช้ CuNiAl-LDH ที่มีอัตราส่วนของโลหะต่าง ๆ กันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

2) ศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อการกำจัดฟีนอล ได้แก่ ความเข้มข้นของฟีนอลเริ่มต้น ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในปฏิกิริยา เวลาในการทำปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาและการแคลไซน์ตัวเร่งปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดฟีนอลของตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl-LDH ที่มีอัตราส่วน 2-1, 3-1, 3-3 และ 3-5

2. ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อการกำจัดฟีนอลโดยทำการศึกษาตัวแปรดังนี้

- ความเข้มข้นของฟีนอลเริ่มต้น 100, 175, 250 และ 325 มิลลิกรัมต่อลิตร
- ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.25, 0.5, 0.75 และ 1.0 กรัมต่อลิตร
- ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในปฏิกิริยา 40, 60, 80 และ 100 มิลลิโมลาร์
- เวลาในการทำปฏิกิริยา 30, 60, 90 และ 120 นาที
- อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส
- การแคลไซน์ตัวเร่งปฏิกิริยาอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่แคลไซน์

3. ศึกษาลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl-LDH ได้แก่

- ความเป็นผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา ตรวจสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction, XRD)
- สัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Election Microscope, SEM)
- พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธี BET

4. ตรวจวัดความเข้มข้นของฟีนอลด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโคปี (UV-Visible spectroscopy) ที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร

5. วิเคราะห์ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของฟีนอลด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทร-สโคปี (UV-Visible spectroscopy) ที่ความยาวคลื่น 275 และ 303 นาโนเมตร

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงประสิทธิภาพในการกำจัดฟีนอลในน้ำเสียด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยใช้ CuNiAl-LDH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

2. ทราบถึงตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อการกำจัดฟีนอล ได้แก่ อัตราส่วนของโลหะใน CuNiAl-LDH ความเข้มข้นของฟีนอลเริ่มต้น ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์-ออกไซด์ในปฏิกิริยา เวลาในการทำปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาและการแคลไซน์ตัวเร่งปฏิกิริยา

3. สามารถใช้เป็นแนวทางในการกำจัดฟีนอลในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อให้ได้น้ำที่ปราศจากการปนเปื้อนฟีนอลก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ

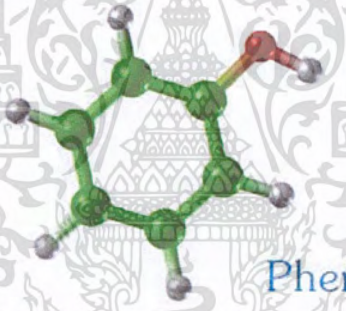
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ลักษณะทั่วไปของฟีนอล [7]

ฟีนอล (Phenol) เป็นสารประกอบอะโรมาติกที่ผลิตได้จากสารประกอบอะโรมาติกชนิดอื่น ๆ เช่น เบนซีน โทลูอีน เป็นสารที่ถูกนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตผลิตภัณฑ์เคมีหลายชนิด อาทิ สีย้อม สารเคมีกำจัดวัชพืชและศัตรูพืช ยาในทางการแพทย์ เป็นต้น

ฟีนอลมีสูตรเคมี C_6H_5OH เป็นสารสารประกอบที่มีหมู่ Hydroxyl (OH) ต่อกับกลุ่มอะโรมาติกมีสถานะเป็นของแข็งสีชมพูอ่อน มวลโมเลกุลเท่ากับ 94.01 กรัม/โมล สามารถละลายได้ดีในแอลกอฮอร์ คาร์บอนเตตระคลอไรด์และอะซิติกเอซิด เป็นต้น หากมีหมู่อื่นแทนที่หมู่ OH หรือมาเกาะกับวงแหวนของฟีนอล เช่น CH_3 หรือ Cl จะได้เป็นอนุพันธ์ของฟีนอล ซึ่งเรียกแตกต่างกันตามหมู่แทนที่ที่มาเกาะ



รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างของฟีนอล [7]

2.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพ และเคมีของฟีนอล [7]

สูตรโมเลกุล: C_6H_5OH

น้ำหนักโมเลกุล: 94.01 กรัมต่อโมล

สถานะ: ของแข็งสีชมพูอ่อน

ความหนาแน่น ที่ 20 องศาเซลเซียส: 1.0576 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

จุดเดือด: 181.75 องศาเซลเซียส

จุดหลอมเหลว: 40.9 องศาเซลเซียส

ความดันไอที่ 25 องศาเซลเซียส: 0.3513 ทอร์

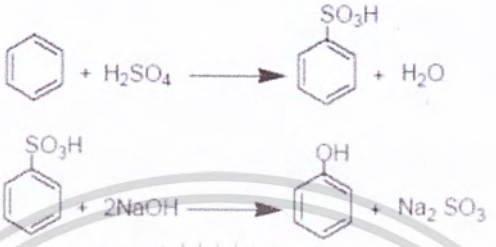
ความสามารถการละลาย: 86,000 กรัม/ลิตร ในน้ำ ละลายได้ดีในแอลกอฮอล์ อะซิติกเอซิด คาร์บอนเตตระคลอไรด์ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ คลอโรฟอร์ม คาร์บอนไดซัลไฟด์และเบนซีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

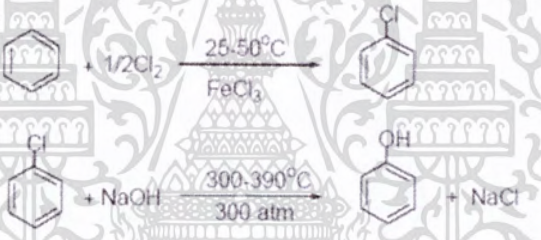
2.1.2 การผลิตฟีนอล [7]

การผลิตฟีนอลมีอยู่หลายวิธี ได้แก่

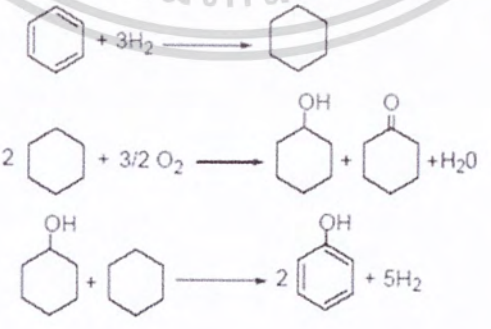
1. The Sulfonation Process เป็นวิธีการผลิตฟีนอลที่ใช้เบนซีน (Benzene) และกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) เป็นสารตั้งต้น ข้อเสียของวิธีการนี้คือ เกิด Sodium sulfate ในปริมาณสูง ปฏิกิริยาแสดงดังภาพด้านล่าง



2. Chlorination Process เป็นวิธีการผลิตฟีนอลที่ใช้เบนซีน (Benzene) และก๊าซคลอรีน (Cl_2) เป็นสารตั้งต้น เกิดผลิตภัณฑ์เป็นฟีนอลและโซเดียมคลอไรด์ ปฏิกิริยาแสดงดังภาพด้านล่าง

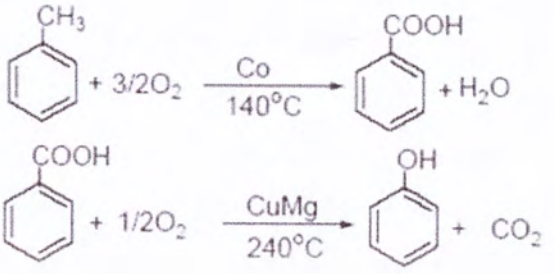


3. Cyclohexanone Process เป็นวิธีการผลิตฟีนอลที่ใช้เบนซีน (Benzene) และก๊าซไฮโดรเจน (H_2) เป็นสารตั้งต้นได้ Cyclohexane และถูกออกซิไดซ์ต่อเป็น Cyclohexanol และ Cyclohexanone และทำปฏิกิริยาต่อจนได้ผลิตภัณฑ์เป็นฟีนอล ปฏิกิริยาแสดงดังภาพด้านล่าง

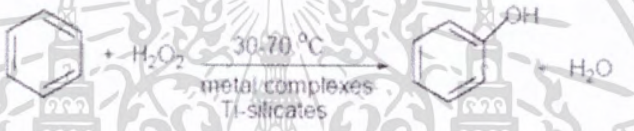


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

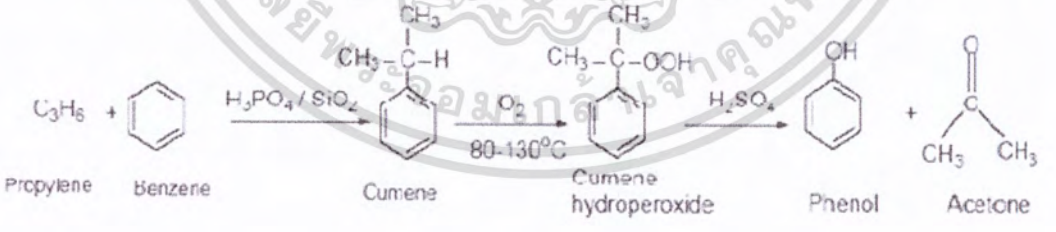
4. Benzoic Acid Process เป็นวิธีการผลิตฟีนอลที่ใช้โทลูอีนเป็นสารตั้งต้น ปฏิกิริยาแสดงดังภาพด้านล่าง



5. H_2O_2 Process เป็นวิธีการผลิตฟีนอลที่ใช้เบนซีน (Benzene) และไฮโดรเจนเปอร์-ออกไซด์ (H_2O_2) เป็นสารตั้งต้น ปฏิกิริยาแสดงดังภาพด้านล่าง



6. Cumene Process เป็นวิธีการผลิตฟีนอลที่ใช้เบนซีน (Benzene) และโพรพีลีน (Propylene) เป็นสารตั้งต้นและใช้ H_3PO_4/SiO_2 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ผลิตภัณฑ์จะได้ฟีนอลและอะซีโตน มีข้อดีคือสารตั้งต้นมีราคาถูก ข้อเสียคือผลิตภัณฑ์ที่ได้เสี่ยงต่อการระเบิดได้ (Cumene Hydroperoxide) และสารตัวเร่งปฏิกิริยามีฤทธิ์กัดกร่อน ปฏิกิริยาแสดงดังภาพด้านล่าง



สารฟีนอลที่เกิดการย่อยสลายจะให้ชนิดต่าง ๆ ที่เป็นอนุพันธ์ ซึ่งมีลักษณะคุณสมบัติทางเคมีที่แตกต่างกัน เช่น น้ำหนักโมเลกุล จุดหลอมเหลวและจุดเดือด เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 ประโยชน์ฟีนอล [8]

ฟีนอลมีการนำมาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมหลายประเภท ได้แก่ อุตสาหกรรมปิโตรเคมี อุตสาหกรรมพลาสติก สารเคมีในการเกษตร อุตสาหกรรมผลิตยา อุตสาหกรรมสารฆ่าเชื้อโรค น้ำยาทำความสะอาด อุตสาหกรรมสีย้อม อุตสาหกรรมสบู่และกระดาษ นอกจากนี้ฟีนอลยังสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อีก เช่น

(ก) ประโยชน์ต่อสุขภาพ สารประกอบฟีนอลหลายชนิดมีฤทธิ์เป็นสารต้านออกซิเดชัน (Antioxidant) ยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันและเป็นสารต้านการกลายพันธุ์ (Antimutagrns) มีสรรพคุณที่ดีต่อสุขภาพ สามารถป้องกันโรคต่าง ๆ โดยเฉพาะโรคหัวใจขาดเลือดและมะเร็ง โดยสารประกอบฟีนอลจะทำหน้าที่กำจัดอนุมูลอิสระ (Free radical) และไอออนของโลหะที่สามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันและโมเลกุลอื่น ๆ โดยใช้ตัวเองเป็นตัวรับอนุมูลอิสระ (Free radical) ทำให้ยับยั้งปฏิกิริยาลูกโซ่ที่มีอนุมูลอิสระเป็นสาเหตุ แต่สารต้านอนุมูลอิสระจะถูกทำลายไปด้วย

(ข) ใช้เพื่อการถนอมอาหาร โดยใช้เป็นสารกันหืน ป้องกันปฏิกิริยาการออกซิเดชันของลิพิด (Lipid oxidation)

(ค) การใช้ฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลในกระบวนการผลิต

- สารตั้งต้นพลาสติก
- สารตั้งต้นผลิตยา
- ส่วนผสมของสีย้อม
- สารผสมในการผลิตเส้นใยสังเคราะห์ Nylon 6,6 และ Nylon 6
- สารผสมสำหรับผลิตเป็นยากำจัดวัชพืช
- สารผสมของน้ำยาฆ่าเชื้อโรค น้ำยาทำความสะอาด ทั้งในด้านครัวเรือนและการเกษตร เนื่องจากฟีนอลมีฤทธิ์ทำลายเชื้อโรคแบคทีเรียและไวรัสได้
- สารตั้งต้นในการเตรียมสบู่ เช่น o - Cresol, m - Cresol และ p - Cresol
- Hydroquinone และ Pyrogallol ใช้สำหรับล้างฟิล์มถ่ายรูป

2.1.4 ผลกระทบของฟีนอลต่อคนและสัตว์ [7]

การปนเปื้อนของฟีนอลสู่สิ่งแวดล้อมมักมีแหล่งกำเนิดมากจากภาคอุตสาหกรรมที่อาจเกิดการแพร่ออกสู่สิ่งแวดล้อมในกระบวนการผลิต กระบวนการจัดเก็บ กระบวนการขนส่งและกำจัดของเสีย อุตสาหกรรมเหล่านั้น ได้แก่ การผลิตพลาสติก การผลิตยากำจัดศัตรูพืช อุตสาหกรรมพ่นสี รถยนต์การฟอกย้อมและสีย้อม เป็นต้น หากมีการปนเปื้อนจะทำให้เกิดอันตรายต่อคน สัตว์ ระบบนิเวศและสิ่งแวดล้อมได้สูง สำหรับความเป็นพิษของฟีนอลแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. การเป็นพิษเฉียบพลัน (Acute toxic) อันเกิดจากการสัมผัสจะทำให้เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนังเยื่อบุตา เยื่อบุระบบทางเดินหายใจ มีอาการวิงเวียนศีรษะ อาเจียน ท้องร่วง และการได้รับสารฟีนอลเข้าทางปากเพียง 4.8 มิลลิกรัม จะทำให้เสียชีวิตได้ภายใน 15 นาที

2. ความเป็นพิษเรื้อรัง (Chronic toxic) อันเกิดจากการสัมผัสและได้รับสารฟีนอลเป็นเวลานานจนเกิดการสะสมในร่างกายระยะยาวแล้วเริ่มปรากฏอาการ เช่น ท้องร่วง เบื่ออาหาร ตับวายและก่อให้เกิดโรคมะเร็งได้

ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งของสารฟีนอลจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม พ.ศ. 2539 กำหนดให้มีค่าฟีนอลไม่เกิน 1 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งปริมาณฟีนอลในน้ำเสียจะแตกต่างกันตามประเภทและขนาดอุตสาหกรรมนั้น ๆ 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 เป็นแผลที่ปากและระบบทางเดินอาหาร

Deich man (1994) ได้ศึกษาผลของฟีนอลต่อหมู หนูและกระต่าย ที่ได้รับฟีนอลในปริมาณ 26 - 52 มิลลิกรัม/ลิตร เป็นเวลา 7 ชั่วโมง/วัน พบว่าหลังจากวันที่ 28 ของการให้สารฟีนอล หมู 5 ตัวใน 12 ตัว เกิดการเสียชีวิต

2.2 ลักษณะทั่วไปของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ (Layered Double Hydroxide, LDH) [9,10]

เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์หรือสารประกอบแบบไฮโดรทัลไซต์ (Hydrotalcite-like compounds, HTLc) เป็นชั้นของดินเหนียวประจุลบที่มีสูตรทั่วไปดังนี้

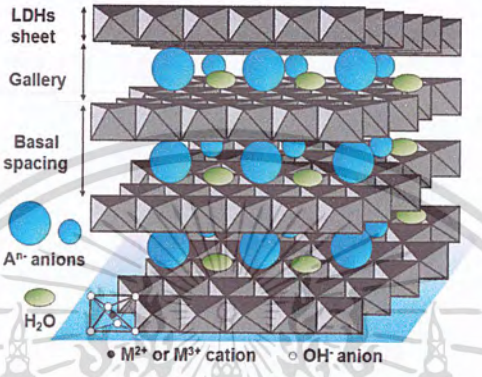
$$[M^{2+}_{1-x}M^{3+}_{x}(OH)_2]^{x+}(A^{n-})_{x/n}\cdot mH_2O$$

โดย M^{2+}, M^{3+} แทนโลหะประจุบวกที่มีวาเลนต์อิเล็กตรอนเท่ากับ 2 และ 3 ตามลำดับ X คือ อัตราส่วนโดยโมลของ $M^{3+}/(M^{2+}+M^{3+})$ โดย A คือไอออนประจุลบ มีประจุเท่ากับ n ซึ่ง M^{2+} ได้แก่ Mg^{2+} Fe^{2+} Co^{2+} Cu^{2+} Ni^{2+} Cd^{2+} หรือ Zn^{2+} และ M^{3+} ได้แก่ Al^{3+} Cr^{3+} Ga^{3+} หรือ Fe^{3+} โครงสร้างของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ ประกอบด้วยชั้นโลหะไฮดรอกไซด์ ($M^{2+}(OH)_2$) ซึ่งโลหะสองบวกมีการจัดเรียงตัวแบบออกตะฮีดรอล (Octahedral) กับไฮดรอกไซด์แอนไอออน (OH^-) โดยจะเกิดการซ้อนกันเป็นชั้นยึดกันด้วยพันธะไฮโดรเจนและเมื่อ M^{2+} ถูกแทนที่โดย M^{3+} จะทำให้ประจุโดยรวมของชั้นโลหะไฮดรอกไซด์เป็นบวกจึงต้องมีการดุลประจุนี้ด้วยไอออนประจุลบ (Anionic ion) และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โมเลกุลน้ำซึ่งอยู่ระหว่างชั้นโลหะไฮดรอกไซด์ โดยเรียกชั้นนี้ว่า “ช่องว่างระหว่างชั้น (Interlayer spacing)” แสดงโครงสร้างดังรูปที่ 2.2

เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ (Layered Double Hydroxide, LDH) ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในตัวเร่งปฏิกิริยา สารตั้งต้นตัวเร่งปฏิกิริยาหรือตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากโครงสร้างที่เป็นชั้นและมีความยืดหยุ่นในองค์ประกอบ



รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ [9]

เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์เป็นหนึ่งในสารประกอบแบบชั้น (Layered compounds) ซึ่งสามารถแบ่งตามชนิดประจุของไอออนภายในช่องว่างระหว่างชั้นได้ 3 กลุ่ม คือ

1. ไม่มีไอออนภายในช่องว่างระหว่างชั้น เนื่องจากประจุของชั้นโลหะเป็นกลางจึงไม่มีการดุลประจุภายในช่องว่างชั้น เช่น แกรไฟต์

2.ไอออนภายในช่องว่างระหว่างชั้นมีประจุบวก (Cationic ion) เช่น แร่ดินเหนียว (Clay mineral) ซึ่งประกอบด้วย แผ่นของชั้นโลหะไฮดรัสอะลูมิเนียมซิลิเกตที่มีประจุโดยรวมของชั้นเป็นลบ เกิดการจัดเรียงตัวซ้อนกันเป็นชั้น ๆ มีการดุลประจุด้วยชั้นของไอออนประจุบวก เช่น มอนมอริโลไนต์ (Montmorillonite)

3.ไอออนภายในช่องว่างระหว่างชั้นมีประจุลบ (Anionic ion) ประกอบด้วยชั้นโลหะไฮดรอกไซด์ที่มีประจุโดยรวมของชั้นเป็นบวกซ้อนกันเป็นชั้น ๆ โดยมีการดุลประจุด้วยชั้นของไอออนประจุลบ เช่น เลเยอร์ไฮดรอกไซด์ซอลท์ ($LDs\text{-}M^{2+}(OH)_{2-x}(A^{n-})_{x/n}$) เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ ($LDH\text{-}M^{2+}_{1-x}M^{3+}_{x}(OH)_2(A_n)_{x/n}\cdot nH_2O$) หรือไฮโดรทัลไซด์ (Hydrotalcite)

เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ มีลักษะเป็นผลึกจัดเรียงตัวซ้อนกันพบได้ในธรรมชาติ ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.3 หรือสังเคราะห์ขึ้นเอง ซึ่งการสังเคราะห์เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ที่ทำได้ง่ายทั้งในระดับห้องปฏิบัติการและระดับอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.3 ตัวอย่างของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ที่พบในธรรมชาติ [10]

2.3 ลักษณะทั่วไปของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) [11]

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide) มีสูตรทางเคมีว่า H_2O_2 เป็นสารประกอบเปอร์ออกไซด์ (สารที่ประกอบด้วยออกซิเจนสองตัวและเชื่อมกันด้วยพันธะเดี่ยว) รูปแบบที่ง่ายที่สุด มีสภาพเป็นของเหลวใส หนืดกว่าน้ำเล็กน้อย มีรสขม ไม่อยู่ตัว ซึ่งสามารถสลายตัวเป็นออกซิเจนกับน้ำ เมื่อเจือจางจะเป็นสารละลายไม่มีสี เนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถสลายตัวเป็นน้ำได้เมื่อถูกแสงและความร้อน จึงควรเก็บรักษาสารชนิดนี้ไว้ในภาชนะทึบแสง

รูปที่ 2.4 โครงสร้างของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ [11]

2.3.1 คุณสมบัติทางเคมีของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ [12]

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติทางเคมีของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

คุณสมบัติทางเคมีของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	
ชื่อเรียกอื่น	Hydrogen dioxide; hydroperoxide; Albone; Hioxyl.
สูตรโมเลกุล	H_2O_2
น้ำหนักโมเลกุล	34.02 กรัม/โมล
จุดเดือด	152 องศาเซลเซียส
จุดหลอมเหลว	-0.43 องซาเซลเซียส
คุณสมบัติ	ของเหลวที่ไม่คงตัว ไม่มีสี มีรสขม มักผลิตอยู่ในรูปสารละลายในน้ำความเข้มข้น 3-90% หากอุณหภูมิต่ำ (≤120 องศาเซลเซียส) จะเป็นเกล็ดแข็งสีขาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ยังเป็นสารฆ่าเชื้อ (Sanitizer) ที่มีฤทธิ์ในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์และแบคทีเรีย

โดยปกติไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะสลายตัวไปเองอย่างช้า ๆ ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำและแก๊สออกซิเจน ส่วนแสงสว่างและความร้อนจะช่วยเร่งให้เกิดการสลายตัวเร็วขึ้น หากมีส่วนผสมของโลหะโดยเฉพาะเหล็ก แมงกานีสและทองแดงจะทำให้เกิดการสลายตัวเร็วยิ่งขึ้น

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีปฏิกิริยาการสลายตัวดังนี้

$$2\,H_2O_2(aq) \longrightarrow 2\,H_2O(l) + O_2(g)$$

วิธีการเก็บรักษาไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ให้เก็บไว้ในที่มืดในภาชนะสีน้ำตาลเข้มหรือภาชนะทึบแสงและในที่เย็น นอกจากนี้อาจเติมสารบางชนิดลงไปเล็กน้อย เช่น แอลกอฮอล์ เพื่อป้องกันไม่ให้สลายตัวเร็วเกินไป

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ยังมีคุณสมบัติเป็นสารไวไฟ ซึ่งภาชนะบรรจุสารอาจระเบิดได้เมื่อสัมผัสกับอุณหภูมิสูง ในกรณีเกิดเพลิงไหม้ให้ใช้น้ำฉีดเป็นฝอย อาจใช้ผงเคมีแห้ง โฟมหรือคาร์บอน-ไดออกไซด์

2.3.2 อันตรายของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อสุขภาพอนามัย [11]

เนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีฤทธิ์กัดกร่อน การหายใจเอาสารชนิดนี้เข้าไปอาจทำให้เกิดอาการเจ็บคอ ไอ หายใจติดขัด เมื่อสัมผัสผิวหนังอาจเกิดผื่นแดง รู้สึกปวดแสบปวดร้อน เมื่อรับประทานเข้าไปจะเกิดอาการเจ็บคอ ปวดท้องและอาเจียนได้ หากสัมผัสถูกดวงตา จะก่อให้เกิดอาการระคายเคือง ตาแดง ปวดตา สายตาอาจพร่ามัวได้

2.4 การบำบัดน้ำเสีย [13]

การบำบัดน้ำเสีย หมายถึง การกำจัดหรือทำลายสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียให้หมดไปหรือเหลือน้อยที่สุดให้ได้มาตรฐานที่กำหนดและไม่ทำให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม น้ำเสียจากแหล่งต่างกันจะมีคุณสมบัติไม่เหมือนกันดังนั้นกระบวนการบำบัดน้ำจึงมีหลายวิธีคือ

2.4.1 กระบวนการบำบัดน้ำเสีย

2.4.1.1. กระบวนการทางเคมี (Chemical process) เป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียโดยการแยกสารต่าง ๆ หรือปนเปื้อนในน้ำเสียที่บำบัด เช่น โลหะหนัก สารพิษ สภาพความเป็นกรด-ด่างสูง ๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ด้วยการเติมสารเคมีต่าง ๆ ลงไปเพื่อให้เข้าไปทำปฏิกิริยาซึ่งจะมีประโยชน์ในการแยกสาร แต่วิธีนี้มีข้อเสียคือ เมื่อเติมสารเคมีลงในน้ำเสียแล้ว ทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและวิธีนี้จะมีค่าใช้จ่ายสำหรับสารเคมีค่อนข้างสูง ดังนั้นกระบวนการทางเคมีจะเลือกใช้ก็

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อเมื่อน้ำเสียไม่สามารถบำบัดได้ด้วยกระบวนการทางกายภาพหรือชีวภาพ ซึ่งกระบวนการทางเคมีมีหลายวิธี ได้แก่

(ก) การทำให้เกิดตะกอน (Precipitation) อาศัยหลักการเติมสารเคมีลงไปทำปฏิกิริยาทำให้เกิดกลุ่มตะกอนตกลงมา โดยทั่วไปสารแขวนจะมีประจุลบ ดังนั้นสารเคมีที่เติมลงไปจึงเป็นประจุบวกเพื่อทำให้เป็นกลาง การแยกด้วยวิธีนี้มีค่าใช้จ่ายสูงแต่ก็มีประสิทธิภาพสูงเช่นกัน วิธีนี้จะเลือกใช้ต่อเมื่อไม่สามารถแยกได้โดยกระบวนการทางชีวภาพ หรือกายภาพ โดยส่วนมากสารเคมีที่ทำให้เกิดตะกอนจะละลายน้ำ เช่น เกลือของสารประกอบต่าง ๆ เช่น เกลืออะลูมิเนียมซัลเฟตหรือสารส้ม ($Al_2(SO_4)_3$) เกลือเหล็ก ($FeCl_3$, $FeSO_4$) และเกลือของแคลเซียม ($Ca(OH)_2$) ส่วนเกลือที่นำมาช่วยในการเกิดตะกอนได้ดียิ่งขึ้นนี้เป็นสารประกอบของกลุ่ม Activated ของ Silica และ Polyelectrolytes

(ข) การเกิดออกซิเดชันทางเคมี (Chemical oxidation) อาศัยหลักการเสียอิเล็กตรอนของอะตอมให้แก่สารเคมีที่เติมลงไปในน้ำเสียโดยสารเคมีนี้จะทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดซ์ (Oxidizing agent) ส่วนมากวิธีนี้จะนิยมใช้เปลี่ยนโมเลกุลของโลหะที่เป็นพิษ เช่น การเปลี่ยน Fe^{2+} ซึ่งมีพิษมากไปเป็นสาร Fe^{3+} ซึ่งมีพิษน้อยด้วยคลอรีน ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$2Fe^{2+} + Cl_2 \longrightarrow 2\,Fe^{3+} + 2Cl^-$$

(ค) การเกิดรีดักชันทางเคมี (Chemical reduction) เป็นปฏิกิริยาที่มีการรับอิเล็กตรอน วิธีการนี้เป็นการเปลี่ยนสภาพของสารพิษไปเป็นสารที่มีอันตรายน้อยลง อะตอมหรือไอออนของสารพิษจะรับอิเล็กตรอนจากสารเคมีที่เติมลงไปซึ่งมีสมบัติเป็นตัวรีดิวซ์ (reducing agent) เช่น การเปลี่ยน Cr^{6+} ซึ่งมีพิษมากไปเป็น Cr^{3+} ด้วย เฟอรัสซัลเฟต ($FeSO_4$) ในสภาพที่เป็นกรด ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$6\,FeSO_4 + 2\,CrO_3 + 6\,H_2SO_4 \longrightarrow 3\,Fe_2(SO_4)_3 + Cr_2(SO_4)_3 + 6\,H_2O$$

(ง) การสะเทิน (Neutralization) เป็นการเปลี่ยนค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำเสียให้มีฤทธิ์เป็นกลาง (pH = 7) ถ้าต้องการปรับค่าน้ำเสียที่มีฤทธิ์เป็นกรด (pH < 7) ในน้ำเสียให้สูงขึ้นต้องเติมสารที่มีฤทธิ์เป็นด่าง เช่น แคลเซียมคาร์บอเนตหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ ส่วนกรณีถ้าต้องการปรับน้ำเสียมีฤทธิ์เป็นด่าง (pH > 7) ให้มีค่า pH ลดลงจะต้องเติมกรด เช่น กรดซัลฟิวริก กรดไนตริก กรดเกลือและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น

2.4.1.2. กระบวนการทางชีววิทยา (Biological Process) เป็นการอาศัยหลักการใช้จุลินทรีย์ต่าง ๆ มาทำการย่อยสลายเปลี่ยนอินทรีย์สารไปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และแอมโมเนีย เป็นการบำบัดน้ำเสียที่ดีที่สุดในแง่ของการลดปริมาณสารอินทรีย์ในแหล่งน้ำ แต่หลักการนี้เลือกสภาวะแวดล้อมให้เหมาะกับการทำงานของจุลินทรีย์ โดยสัมพันธ์กับปริมาณของจุลินทรีย์และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลาที่ใช้ในการย่อยสลายแบคทีเรียที่เลือกใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์แยกออกได้เป็น 2 ประเภท คือ แบคทีเรียที่ต้องใช้ออกซิเจน (Aerobic bacteria) ส่วนกลุ่มที่ 2 เป็นพวกไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic bacteria)

2.4.1.3. กระบวนการทางกายภาพ (Physical process) เป็นการบำบัดน้ำเสียอย่างง่ายซึ่งจะ แยกของแข็งที่ไม่ละลายน้ำออก 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) เป็นการแยกตะกอนออกจากน้ำเสียโดยอาศัยหลักการเรื่องแรงโน้มถ่วง ซึ่งจะใช้กับตะกอนที่มีความถ่วงจำเพาะมากกว่าน้ำ

2.4.1.4. กระบวนการทางกายภาพ-เคมี (Physical-chemical process) เป็นกระบวนการที่ต้องมีอุปกรณ์ช่วยมากกว่ากระบวนการที่กล่าวมา ซึ่งกระบวนการนี้จะใช้ในขั้นตอนสุดท้ายในการบำบัดน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการในขั้นตอนอื่นแล้ว เช่น กระบวนการดังต่อไปนี้

(ก) การดูดซับด้วยถ่าน (Carbon adsorption) วิธีการนี้ใช้ผงถ่านหรือคาร์บอนเป็นตัวดูดซับสารเจือปนที่ละลายอยู่ในน้ำทิ้ง

(ข) การแลกเปลี่ยนประจุ วิธีการนี้อาศัยหลักการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างสารปนเปื้อนในน้ำเสียกับตัวกลางที่บรรจุซึ่งมีทั้งประจุบวกและประจุลบโดยจะมีการลำเลียงน้ำภายใน

2.4.2 วิธีการบำบัดน้ำเสีย

ขั้นตอนการบำบัดน้ำเสียโดยทั่วไปแบ่งออกได้เป็น 4 ขั้น ดังนี้

1. การบำบัดขั้นเตรียมการ (Preliminary treatment) เป็นขั้นตอนการแยกสิ่งสกปรกที่มีขนาดใหญ่ไม่ละลายน้ำออกจากน้ำโดยการใช้ตะแกรง (Screens)

2. การบำบัดขั้นต้น (Primary treatment) น้ำเสียที่ผ่านขั้นตอนจากข้อที่ 1 แล้วจะถูกนำมาตกตะกอนในถังตกตะกอนซึ่งเรียกว่า Primary sludge การบำบัดในขั้นนี้จะลดค่า BOD ได้ประมาณ 25 - 40% แล้วแต่คุณลักษณะของน้ำทิ้งและประสิทธิภาพของถังตกตะกอน

3. การบำบัดขั้นที่สอง (Secondary treatment) น้ำเสียจากข้อ 2 จะถูกนำเข้าไปสู่ถังเติมอากาศซึ่งจะมีการเติมอากาศให้แก่แบคทีเรียโดยใช้เครื่องเติมอากาศ ทำให้แบคทีเรียช่วยย่อยสลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และกำจัดสารอินทรีย์หรือ BOD ซึ่งอยู่ในรูปของสารละลายหรืออนุภาคคอลลอยด์ออกไปจากน้ำกลายเป็นตะกอนตกลงไปที่ก้นถังกากตะกอนในส่วนนี้จะถูกนำไปกำจัดต่อไป น้ำในส่วนบนของถังตกตะกอนจะใสขึ้นในขั้นตอนนี้จะช่วยลดค่า BOD ลงได้ประมาณ 75 - 95% ซึ่งค่า BOD ของน้ำส่วนนี้จะต่ำกว่า 20 มิลลิกรัม/ลิตร สามารถปล่อยทิ้งลงสู่แม่น้ำได้แต่ถ้าต้องการความสะอาดเหมาะแก่การนำกลับมาใช้ใหม่เข้าสู่การบำบัดขั้นที่ 3 ต่อไป

4. การบำบัดขั้นที่สาม (Tertiary treatment) ต้องการความบริสุทธิ์สะอาดสามารถนำกลับมาใช้อุปโภคและบริโภคได้ กระบวนการบำบัดนี้จึงเป็นกระบวนการเคมีรวมกับฟิสิกส์ - เคมี น้ำทิ้งจากการบำบัดขั้นตอนที่สองจะถูกนำมาตกตะกอนด้วยวิธีทางเคมีแยกสารประกอบฟอสเฟตออกด้วยปูนขาว จากนั้นจึงนำมากำจัดสารอินทรีย์ที่เหลืออยู่ด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์ - เคมีด้วยวิธีการ ion exchange ซึ่งจะได้น้ำที่สะอาดเมื่อผ่านการฆ่าเชื้อโรคแล้วจะได้น้ำที่สะอาด

2.4.3 หลักการจัดการน้ำเสีย

หลักการจัดการน้ำเสียที่สำคัญ ได้แก่ การนำน้ำเสียที่เกิดขึ้นเข้าสู่กระบวนการบำบัดให้ได้ตามมาตรฐาน น้ำทิ้งปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพอนามัย โดยทั่วไปการจัดการน้ำเสียจะประกอบด้วย

1. การรวบรวมน้ำเสีย (Collection)
2. การบำบัดน้ำเสีย (Treatment)
3. การนำกลับมาใช้ประโยชน์ (Reuse and reclamation)

สำหรับโรงงานอุตสาหกรรมมีการจัดการระบบบำบัดน้ำเสียต่างกันไปทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดพื้นที่ในการจัดการเรื่องระบบน้ำเสีย สำหรับโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ที่มีการถ่ายเทน้ำเสียในปริมาณมากออกสู่สิ่งแวดล้อม เช่น โรงงานน้ำตาล โรงงานผลิตอาหารทางการเกษตร จะมีการจัดการเรื่องระบบบำบัดซึ่งต้องใช้พื้นที่ขนาดใหญ่ ดังนั้นระบบบำบัดจึงเหมาะสำหรับเป็นระบบบ่อชนิดต่าง ๆ ทั้งมีการใช้ออกซิเจนและไม่มีการใช้ออกซิเจน

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

C. Catrinescu และคณะ [14] การศึกษาประสิทธิภาพของการแลกเปลี่ยน Fe และ Al-pillared ในการสังเคราะห์ Beidellite สำหรับปฏิกิริยา Wet Hydrogen Peroxide Oxidation ของฟีนอลในน้ำเสีย ตัวเร่งปฏิกิริยาถูกเตรียมโดยเทคนิค Cation doping technique และมีการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคต่าง ๆ ได้แก่ DRX BET และเทคนิคการวิเคราะห์ทางเคมี โดยทำการศึกษาตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาและประสิทธิภาพในการกำจัดฟีนอล ได้แก่ ค่า pH อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาและความเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา ผลจากการทดลองการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถกำจัดฟีนอลและมีผลในการลดค่า COD โดยไม่มีการชะล้างไอออนของ Fe ออก พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่ pH 5 อุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำปฏิกิริยา 50 องศาเซลเซียสและเวลาในการทำปฏิกิริยา 180 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยามีประสิทธิภาพในการลดค่า COD ได้ถึงร้อยละ 87.9

V. Rives และคณะ [15] ศึกษาการเกิดปฏิกิริยา Hydroxylation ของฟีนอลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาhydrotalcites ชนิด 3 องค์ประกอบคือ CoNiAl Hydrotalcites (HTs) ที่มีอัตราส่วนอะตอมของ (Co + Ni)/Al ใกล้เคียงกับ 2.6 และอัตราส่วนอะตอมของ Co:Ni ในช่วงตั้งแต่ 1:0 ถึง 0:1 ซึ่งมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นสารออกซิแดนท์และน้ำเป็นตัวทำละลาย จากการทดลอง พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงฟีนอลเล็กน้อย เนื่องจากพฤติกรรมการเร่งปฏิกิริยาขององค์ประกอบทั้งสองคือ CoAl-HT และ NiAl-HT อย่างไรก็ตามอัตราส่วนอะตอมของ Co/Ni ที่ต่างกันทำให้ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่างกันไปด้วย นอกจากนี้การลดลงของความเข้มข้นของโคบอลต์และความเป็นระเบียบของชั้นโครงสร้างมีผลให้ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง ในทางกลับกันตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเป็นผลึกมีผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น จากการวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเทคนิค TPR พบว่าการลดความเข้มข้นของโคบอลต์ลง มีผลทำให้แนวโน้มของประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลงในสภาวะที่ตัวเร่งปฏิกิริยามีอัตราส่วนอะตอมของ Co/Ni ที่ 1:5 พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงฟีนอลสูงสุดที่ 14.2% (สารตั้งต้น:สารออกซิแดนส์ = 2:1 ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส) โดยมีอัตราส่วนของ Catachol/Hydroquinone 3.8

N.S. Inchaurrondo และคณะ [5] ศึกษาการกำจัดฟีนอลด้วยปฏิกิริยา Catalytic Wet Peroxide Oxidation (CWPO) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CuO/Al_2O_3 ในการศึกษาปฏิกิริยาออกซิเดชันของตัวของสารละลายฟีนอลโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นตัวออกซิไดซ์และตัวเร่งปฏิกิริยา CuO/Al_2O_3 ที่สังเคราะห์ขึ้นโดยอัตราส่วนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ : อัตราส่วนโมลของฟีนอลสูงกว่าอัตราส่วนของปริมาณสารเกือบ 30% การทดลองถูกทำที่อุณหภูมิระหว่าง 303 และ 343 เคลวิน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน จากการทดลอง พบว่าการเปลี่ยนแปลงของฟีนอลและ TOC มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นตามอัตราการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่สูงขึ้น ซึ่งประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาสูงสุดที่สามารถเปลี่ยนฟีนอลได้อย่างสมบูรณ์และมีการกำจัด TOC ได้ถึง 80%

O. Wittine และคณะ [16] ศึกษาการกำจัดฟีนอลด้วยปฏิกิริยา Catalytic Wet Peroxide Oxidation โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/13X ซีโอไลต์ ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาถูกเตรียมโดยการแลกเปลี่ยนไอออนจากซีโอไลต์ 13X ภายหลังการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยามีการทำ Thermal treatment ด้วยการเผา Cu/13X ที่อุณหภูมิ 523, 773 และ 1,023 เคลวิน เป็นเวลา 5 ชั่วโมง เพื่อให้ได้ซีโอไลต์ที่มีความเสถียรสูงขึ้น จากการทดลอง พบว่าอุณหภูมิของปฏิกิริยาอยู่ 353 เคลวิน ความดันของออกซิเจนที่ 20 บาร์และน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 2.5 กรัมต่อลิตร โดยที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟีนอลอยู่ที่ 0.01 โมลต่อลิตรและความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.05, 0.10 และ 0.14 โมลต่อลิตร พบว่าการกำจัดฟีนอลด้วยปฏิกิริยา CWPO มีแนวโน้มสูงขึ้น

G. Wu และคณะ [17] ศึกษาชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl hydrotalcites (HTs) สำหรับใช้ในปฏิกิริยา Oxidation ของกลีเซอรอล (Glycerol) ด้วยออกซิเจน ผลการทดลอง พบว่า องค์ประกอบ โครงสร้าง และคุณสมบัติของพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา มีผลต่อประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยในตัวเร่งปฏิกิริยามีหมู่ฟังก์ชันของ Amino group ซึ่งเป็นตัวช่วยทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาที่ดีขึ้น เนื่องจากมีพื้นผิว Lewis basicity ที่สูงขึ้น ในสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของปฏิกิริยา พบว่ามีการเปลี่ยนกลีเซอรอลสูงสุดถึงร้อยละ 68.1 และเปลี่ยนเป็นกรดกลีเซอริกร้อยละ 76 นอกจากนี้ พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยายังคงมีประสิทธิภาพที่ดีหลังจากถูกนำไปรีไซเคิลถึง 6 ครั้ง

F. Tzompantzi และคณะ [18] ศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยา ZnAlLa Layered Double Hydroxides (โดยมีอัตราส่วนโมลของ La/Zn เท่ากับ 0.005, 0.01 และ 0.03) ถูกสังเคราะห์โดยวิธีการตกตะกอนร่วมและเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส รูปแบบของ XRD แสดงถึงตัวเร่งปฏิกิริยามีลักษณะเป็นชั้นและไม่แสดงในส่วนของ La_2O_3 หลังจากการเผา พบว่ามีการเกิดซิงค์ไคท์ (Zincite) ใน LDH บ่งบอกถึงโครงสร้างที่เรียงตัวเป็นชั้นถูกทำลายลง เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาไปกำจัดฟีนอลและตรวจสอบปริมาณฟีนอลด้วยยูวี - วิสิเบิล (254 นาโนเมตรและ 4400 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร) พบว่าสามารถกำจัดฟีนอลด้วย 88 - 66% เมื่อใช้ ZnAlLa เปรียบเทียบกับที่ได้จากออกไซด์ของ ZnAl (48%) ผลการทดลองผลแสดงให้เห็นว่าออกไซด์ผสมของ ZnAlLa ที่เกิดขึ้นจากการเผาของ ZnAlLa-LDH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีแนวโน้มว่ากำจัดฟีนอลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

กนกวรรณ โม่มาลา และคณะ [19] ศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการกำจัดฟีนอลด้วยวิธีออกซิเดชันโดยมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นตัวออกซิไดซ์ และมีคอปเปอร์-ออกไซด์บนอะลูมินาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยทำการศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการกำจัดฟีนอล ได้แก่ อุณหภูมิในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณคอปเปอร์บนอะลูมินา ความเข้มข้นของไฮโดรเจน-เปอร์ออกไซด์ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลในน้ำทิ้งสังเคราะห์ เวลาและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกเตรียมด้วยวิธีการทำให้เอิบชุ่ม (Impregnation) โดยจะทำการเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ไนเตรตและทำการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคต่าง ๆ ได้แก่ เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction) เทคนิคเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนต์ (X-ray Fluorescence) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy) และเทคนิค BET นอกจากนี้ยังใช้เทคนิคยูวี – วิสิเบิลสเปกโทรสโคปี (UV-Visible Spectroscopy) ในการตรวจวัดความเข้มข้นของฟีนอลที่เหลือหลังทำปฏิกิริยา จากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่าที่ความเข้มข้นฟีนอลเริ่มต้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยทำการเปลี่ยนตัวแปรอื่น ๆ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการเกิดปฏิกิริยา คือ ที่ตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์บนอะลูมินา 7% โดยน้ำหนัก ปริมาณ 2.0 กรัม/ลิตร ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.3 M ที่เวลา 60 นาทีและอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส โดยที่สภาวะดังกล่าวสามารถกำจัดฟีนอลได้ถึงร้อยละ 86.36

S.A. Hosseini และคณะ [20] ศึกษาการกำจัดฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลจากน้ำทิ้งด้วยปฏิกิริยา Catalytic Wet Peroxide Oxidation (CWPO) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Co-Ni Layered Double Hydroxide ซึ่งสังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วมและมีการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRD, FTIR, และ SEM โดยออกแบบการทดลองด้วยวิธี Box-Behnken และทำการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการกำจัดฟีนอล ได้แก่ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา Co-Ni LDH เวลาในการทำปฏิกิริยา ปริมาตรของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และความเข้มข้นของฟีนอล จากผลการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดฟีนอล คือ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4.03 กรัม/ลิตร เวลาในการทำปฏิกิริยา 77.8 นาที ปริมาตรของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ 0.5 มิลลิลิตร ความเข้มข้นของฟีนอล 100 มิลลิกรัมต่อลิตรและตัวเร่งปฏิกิริยา Co-Ni (1:1) LDH มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟีนอลสูงสุดถึงร้อยละ 92.9

H. Wang และคณะ [21] ศึกษาชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiFe-LDHs โดยการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโมลของ Cu/Ni เพื่อสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาการสลายตัวของฟีนอล ซึ่งมีการถ่ายโอนอิเล็กตรอนจาก Ni^{2+} ไปยัง Cu^{2+} ผ่านสะพาน Metal-oxo-metal และพบไอออนของ Cu^{+}, Cu^{2+}, Ni^{2+}, Ni^{3+} และ Fe^{3+} ปรากฏบนโครงสร้างของ LDHs โดยอัตราส่วนโมลของ Cu/Ni ที่ต่ำที่สุด ส่งผลให้มีการกระจายตัวแบบ MO_6 Octahedra เนื่องจากการให้อิเล็กตรอนของ Ni เป็นไปได้ง่ายจึงทำให้การถ่ายโอนอิเล็กตรอน และเปอร์เซ็นต์ของ Cu^{+} เพิ่มขึ้นด้วย จากการทดลอง พบว่าการลดลงของอัตราส่วนของ Cu/Ni มีผลทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น โดยตัวเร่งปฏิกิริยา $Cu_{0.5}Ni_{2.5}Fe$-LDH สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนฟีนอลได้สูงที่สุดร้อยละ 98.9 ปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มากเกินพอ (M_{H202} /M_{phenol}) สามารถเปลี่ยนฟีนอลได้ถึงร้อยละ 90 พบว่า Cu^{+} เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพของโครงสร้าง ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้อย่างรวดเร็วก่อให้เกิด Hydroxyl radical ในปฏิกิริยา นอกจากนี้ Fe^{3+} มีสภาวะคล้ายกับ Fenton Active site ซึ่งชนิดโครงสร้างของ CuNiFe -LDHs จะมีคุณภาพของพื้นผิวดีขึ้นและง่ายต่อการฟื้นฟู Cu^{+}

X. He และคณะ [22] ทำการสังเคราะห์ Mg-Al LDH ด้วยวิธีโม่แห้ง (Dry milling) ของ$Al(OH)_3$ และ $Mg(OH)_2$ โดยผ่านกระบวนการ 2 ขั้นตอนและใช้เพื่อดูดซับฟีนอลและ p-nitrophenol ออกจากน้ำทิ้ง โดยทำการพิสูจน์เอกลักษณ์ของ Mg-Al LDH ก่อนและหลังการดูด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซับด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM), การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD), การกระตุ้นสารด้วยพลังงานแสงช่วงแสงอินฟราเรด (FT-IR) ข้อมูลของการดูดซับสมดุลเกิดขึ้นโดยใช้แบบจำลองแลงเมียร์ (Langmuir) ด้วยลักษณะที่ดีเยี่ยมในการดูดซับได้ถึง 82.6 มิลลิกรัม/กรัมฟีนอล และ 356.4 มิลลิกรัม/กรัม p-nitrophenol ตามลำดับ แบบจำลองทางจลน์ศาสตร์อันดับสอง (Pseudo-second order) ระบุว่าฟีนอลถูกดูดซับบน Mg-Al LDH ได้อย่างดีและพบว่า Mg-Al LDH ไม่เป็นระเบียบจะมี Active sites อยู่มากกว่า Mg-Al LDH ที่มีโครงสร้างเป็นผลึกเสถียร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
วิธีการทำงานวิจัย

3.1 สารเคมี

1. นิกเกิล(II) ไนเตรตเฮกซะไฮเดรต (Nickel(II) nitrate hexahydrate, $Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Carlo Erba
2. คอปเปอร์(II) ไนเตรตไตรไฮเดรต (Copper(II) nitrate trihydrate, $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Carlo Erba
3. อลูมิเนียมไนเตรตโนนะไฮเดรต (Aluminium Nitrate 9-hydrate, $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Panreac Applichem
4. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Carlo Erba
5. พอลีเอทธิลีนไกลคอล (Polyethylene glycal, PEG) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Carlo Erba
6. แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Ammonium hydroxide, NH_4OH) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Carlo Erba
7. ฟีนอล (Phenol, C_6H_5OH) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Carlo Erba
8. ไฮโดรควิโนน (Hydroquinone, $C_6H_6O_2$) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Carlo Erba
9. แคทีคอล (Catechol, $C_6H_6O_2$) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Carlo Erba
10. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide, H_2O_2) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Carlo Erba
11. แมงกานีสไดออกไซด์ (Manganese(IV) oxide, MnO_2) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Acros organics
12. โซเดียมคาร์บอเนต (Sodium carbonate, Na_2CO_3) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Carlo Erba
13. อะซีโตน (Acetone, C_3H_6O) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท QRëC New Zealand
14. พาราฟินออยล์ (Paraffin Oil) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Etalmar
15. เอทานอล (Ethanol, C_2H_5OH) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Carlo Erba
16. น้ำกลั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ขวดก้นกลม 3 คอ ขนาด 500 มิลลิลิตร
2. คอนเดนเซอร์
3. เทอร์โมมิเตอร์
4. บีกเกอร์ ขนาด 50, 100, 250, 600 และ 1000 มิลลิลิตร
5. กระบอกตวง ขนาด 100 มิลลิลิตร
6. ขวดวัดปริมาตร ขนาด 10 และ 250 มิลลิลิตร
7. ปิเปต ขนาด 10, 20 และ 50 มิลลิลิตร
8. บิวเรต ขนาด 50 มิลลิลิตร
9. กระจกนาฬิกา
10. กระดาษกรอง
11. กระดาษยูนิเวอร์ซัลอินดิเคเตอร์
12. แท่งแก้วคนสาร
13. ช้อนตักสาร
14. เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง
15. เครื่องให้ความร้อนที่สามารถปั่นกวนได้ (Hotplate and magnetic stirrer)
16. ใบพัดกวน
17. ตู้อบสาร
18. เครื่องแยกตะกอนด้วยแรงเหวี่ยง (Centrifuges)
19. เครื่องวัดค่า pH
20. ชุดกรองแบบลดความดัน
21. เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชั่นสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (X-ray diffraction spectrophotometer , XRD)
22. เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible spectrophotometer)
23. เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นพรุน (Surface area and porosity analyzer, BET)
24. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 วิธีการทดลอง

การทดลองแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่

3.3.1 การเตรียมกราฟมาตรฐานของสารละลายฟีนอล แคทีคอลและไฮโดรควิโนน

3.3.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาและการวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา

3.3.3 การทำปฏิกิริยาออกซิเดชันของฟีนอล

3.3.1 การเตรียมกราฟมาตรฐานของสารละลายฟีนอล แคทีคอลและไฮโดรควิโนน

1. เตรียมสารละลายฟีนอลความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยชั่งฟีนอล 0.0625 กรัม ละลายน้ำใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตร จากนั้นทำการปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

2. เตรียมสารละลายฟีนอลความเข้มข้น 25, 50, 75 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปิเปตสารละลายฟีนอลความเข้มข้น 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-Visible spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร

4. ทำกราฟมาตรฐานเปรียบเทียบระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลที่เตรียมได้

5. ทำซ้ำโดยเปลี่ยนจากฟีนอลเป็นแคทีคอลและไฮโดรควิโนน โดยวัดที่ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 275 และ 303 นาโนเมตร ตามลำดับ

3.3.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาและการวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา

CuNiAl-LDH ที่ทำการสังเคราะห์ จะมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลของ Cu/Ni และ (Cu+Ni)/Al โดยใช้สัญลักษณ์ CuNiAl a-b เมื่อ a คือ Cu/Ni และ b คือ (Cu+Ni)/Al ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาในการทดลอง ได้แก่ CuNiAl 2-1, CuNiAl 3-1, CuNiAl 3-3 และ CuNiAl 3-5

3.3.2.1 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl-LDH

1. ทำการสังเคราะห์ CuNiAl-LDH ที่อัตราส่วนเท่ากับ (CuNiAl 2-1) โดยการชั่งคอปเปอร์(II) ไนเตรตไตรไฮเดรต (Copper(II) nitrate trihydrate, $Cu(NO_3)_2{\cdot}3H_2O$) 6.4494 กรัม (0.0267 โมล) นิกเกิล(II) ไนเตรตเฮกซะไฮเดรต (Nickel(II) nitrate hexahydrate, $Ni(NO_3)_2{\cdot}6H_2O$) 3.8675 กรัม (0.0133 โมล) และอลูมิเนียมไนเตรตโนนะไฮเดรต (Aluminium Nitrate nonahydrate, $Al(NO_3)_3{\cdot}9H_2O$) 15.0052 กรัม (0.04 โมล) ลงในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 120 มิลลิลิตร ใช้แท่งแก้วคนจนสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ชั่งโซเดียมคาร์บอเนต (Sodium carbonate, Na_2CO_3) 6.36 กรัม (0.06 โมล) ลงในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 120 มิลลิลิตร ใช้แท่งแก้วคนจนสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

3. นำบีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร มาเติมน้ำกลั่น 120 มิลลิลิตร จากนั้นทำการปั่นกวนที่อุณหภูมิห้องพร้อมกับเติมสารละลายที่เตรียมได้จากข้อ 1 และข้อ 2 จนหมด แล้วปั่นกวนทิ้งไว้ประมาณ 1 - 1.5 ชั่วโมง

4. ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) 10 กรัม จากนั้นเติมน้ำกลั่นพร้อมปรับปริมาตรให้ได้ 250 มิลลิลิตร แล้วนำมาเติมลงในสารละลายที่ได้จากข้อ 3 จนได้ค่า pH เท่ากับ 10

5. สารละลายที่ได้ในข้อ 4 จะมีลักษณะเป็นเจล ทำการ Aging ในเครื่อง Autoclaves โดยใช้อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 ชั่วโมง

6. ใช้เครื่องแยกตะกอนด้วยแรงเหวี่ยงในการแยกตะกอนออกมา พร้อมกับล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่นจนได้ค่า pH เท่ากับ 7

7. นำตะกอนที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมง

8. นำ CuNiAl-LDH ที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์คุณสมบัติด้วยเทคนิค XRD, BET และ SEM

9. ทำการสังเคราะห์ CuNiAl 3-1, CuNiAl 3-3 และ CuNiAl 3-5 โดยชั่งสารเคมีตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 น้ำหนักของสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl-LDH

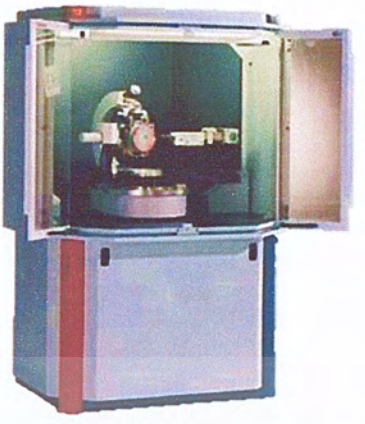
ตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl-LDH	น้ำหนักที่ชั่ง (กรัม)		
	$Cu(NO_3)_2{\cdot}3H_2O$	$Ni(NO_3)_2{\cdot}6H_2O$	$Al(NO_3)_3{\cdot}9H_2O$
2-1	6.4494	3.8675	15.0052
3-1	7.2465	2.9079	15.0052
3-3	21.7395	8.7237	15.0052
3-5	36.2325	14.5395	15.0052

3.3.2.2 การวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา

ทำการตรวจวัดและวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้เครื่องมือ ดังนี้

1. โครงสร้างและความเป็นผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันสเปกโทร-โฟโตมิเตอร์ (X-ray diffraction spectrophotometer, XRD)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชั่นสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ [28]

2. พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยเครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นพรุนด้วยเทคนิค BET (Surface area and porosity analyzer, BET)

รูปที่ 3.2 เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นพรุน [29]

3. สัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

รูปที่ 3.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [30]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 การทำปฏิกิริยาออกซิเดชันของฟีนอล

1. ประกอบชุดปฏิกรณ์ ได้แก่ ขวดสามคอ ใบพัดกวน เทอร์โมมิเตอร์และคอนเดนเซอร์ โดยให้ความร้อนด้วยอ่างน้ำมันพาราฟินและแท่นให้ความร้อน ดังรูปที่ 3.4

2. ปิเปตสารละลายฟีนอลและน้ำ ลงในชุดปฏิกรณ์ให้ความร้อนจนอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และทำการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ให้ได้ปริมาตรรวมทั้งหมด 200 มิลลิลิตร

3. ทำการใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาลงในชุดปฏิกรณ์

4. ปั่นกวนสารผสมในชุดปฏิกรณ์ เมื่อครบเวลาปฏิกิริยา นำสารผสมในชุดปฏิกรณ์ไปทำการกรองแยกตัวเร่งปฏิกิริยา

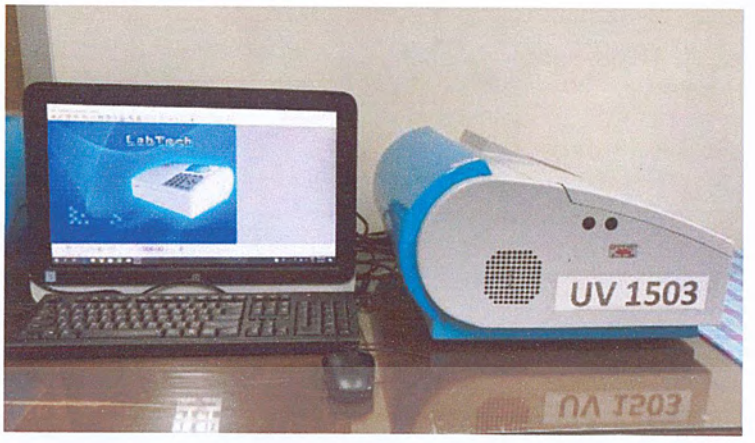
5. นำสารละลายที่ได้จากการกรองไปวิเคราะห์ปริมาณฟีนอลที่เหลืออยู่ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตรและวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยา-ออกซิเดชันด้วยเครื่องยูวี-สเปกโทรโฟโตมิเตอร์โดยวิเคราะห์ไฮโดรควิโนนและแคทีคอลที่ความยาวคลื่น 303 และ 275 นาโนเมตร ตามลำดับ

6. ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรตามตารางที่ 3.1

7. เลือกตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้การกำจัดฟีนอลสูงสุดจากการทดลองตามตางรางที่ 3.2 มาทำการทดลองตามตารางที่ 3.3

รูปที่ 3.4 ชุดปฏิกรณ์สำหรับทำปฏิกิริยาออกซิเดชันของฟีนอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

ตารางที่ 3.2 สภาวะการทดลองสำหรับหาตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการกำจัดฟีนอลด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน

การทดลองที่	ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	ความเข้มข้นของฟีนอลเริ่มต้น (mg/L)	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (g/L)	ความเข้มข้นของ H_2O_2 (mM)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (นาที)	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (°C)
1	CuNiAl 2-1	250	0.5	40	60	70
2	CuNiAl 3-1	250	0.5	40	60	70
3	CuNiAl 3-3	250	0.5	40	60	70
4	CuNiAl 3-5	250	0.5	40	60	70

หมายเหตุ ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถให้การกำจัดฟีนอลได้สูงที่สุด จะนำไปศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ ตามตารางที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 ผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อการกำจัดฟีนอลด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl-LDH

การทดลองที่	ความเข้มข้นของฟีนอลเริ่มต้น (mg/L)	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (g/L)	ความเข้มข้นของ H_2O_2 (mM)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (นาที)	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (°C)	หมายเหตุ Mol H_2O_2 / Phenol
1	100	0.5	40	60	70	37.56
2	175	0.5	40	60	70	21.50
3	250	0.5	40	60	70	15.04
4	325	0.5	40	60	70	11.58
5	250	0.25	40	60	70	15.04
6	250	0.75	40	60	70	15.04
7	250	1.0	40	60	70	15.04
8	250	2.0	40	60	70	15.04
9	250	0.5	60	60	70	22.56
10	250	0.5	80	60	70	30.08
11	250	0.5	100	60	70	37.56
12	100	0.5	-	60	70	-
13	250	0.5	-	60	70	-
14	250	0.5	40	30	70	15.04
15	250	0.5	40	90	70	15.04
16	250	0.5	40	120	70	15.04
17	250	0.5	40	60	60	15.04
18	250	0.5	40	60	80	15.04
19	250	0.5 (ผ่านการแคลไซน์)	40	60	70	15.04

ปริมาตรสารละลายรวม = 200 มิลลิลิตร

หมายเหตุ การทดลองที่ 1-4 ศึกษาผลของความเข้มข้นฟีนอลเริ่มต้น

การทดลองที่ 3, 5-8 ศึกษาผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl-LDH

การทดลองที่ 3, 9-11 ศึกษาผลของความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่ 1, 3, 12-13 ศึกษาผลของความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยไม่ใส่ตัวเร่งในปฏิกิริยา

การทดลองที่ 3, 14-16 ศึกษาผลของเวลาในการทำปฏิกิริยา

การทดลองที่ 3, 17-18 ศึกษาผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา

การทดลองที่ 3, 19 ศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการแคลไซน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษากระบวนการในการกำจัดฟีนอลด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเร่งปฏิกิริยาด้วยคอปเปอร์นิกเกิลอะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ (CuNiAl-LDH) ในการนำเสนอผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง จะกล่าวถึงการวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาและอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อการกำจัดฟีนอลได้แก่ ความเข้มข้นของฟีนอลเริ่มต้น ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เวลาในการทำปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาและการแคลไซน์ตัวเร่งปฏิกิริยา

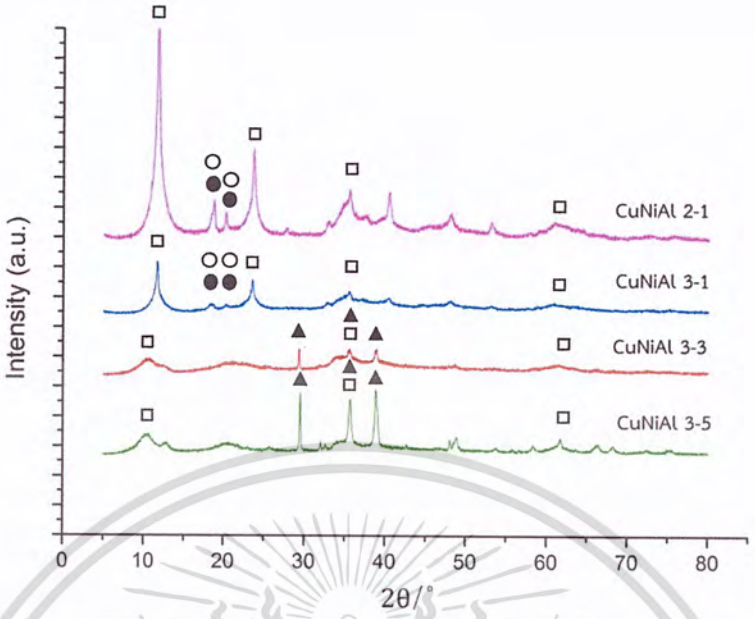
4.1 การวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์นิกเกิลอะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ (CuNiAl-LDH)

ตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl-LDH ถูกสังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วมโดยใช้เกลือไนเตรทของโลหะที่เป็นองค์ประกอบเป็นสารตั้งต้น (Precursors) และ $NaOH/Na_2CO_3$ เป็นสารช่วยตกตะกอน โดยในการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำการเปลี่ยนแปลงจำนวนโมลรวมของ Cu และ Ni ต่อ Al ((Cu+Ni)/Al) และอัตราส่วนโดยโมลของ Cu และ Ni (Cu/Ni) ดังนั้นจึงกำหนดสัญลักษณ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น CuNiAl a-b เมื่อ “a” คืออัตราส่วนโดยโมลของ Cu/Ni และ “b” คืออัตราส่วนโดยโมลของ (Cu+Ni)/Al ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำการสังเคราะห์ได้แก่ CuNiAl 2-1, CuNiAl 3-1, CuNiAl 3-3 และ CuNiAl 3-5

4.1.1 โครงสร้างและความเป็นผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X - ray diffraction, XRD)

ตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl-LDH ที่มีอัตราส่วน 2-1, 3-1, 3-3 และ 3-5 ถูกนำไปวิเคราะห์โครงสร้างและความเป็นผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ดิฟแฟรคโทรแกรมของตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวแสดงในรูปที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 ดิฟแฟรคโทรแกรมของ CuNiAl-LDH อัตราส่วน 2-1, 3-1, 3-3 และ 3-5 (▫) Hydrotalcites, (●) $Cu_2(CO_3)(OH)_2$, (○) $Al(OH)_3$ และ (▲) Mixture of $Cu(OH)_2$, $Ni(OH)_2$ และ $Al(OH)_3$

จากดิฟแฟรคโทรแกรมในรูปที่ 4.1 สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl 2-1 และ CuNiAl 3-1 ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิด ประกอบไปด้วย จำนวนโมลของ (Cu+Ni)/Al เท่ากันคือ 1:1 แต่แตกต่างที่จำนวนโมลของ Cu/Ni โดยจะปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 2θ = 12° 24° 36° และ 61° ซึ่งเป็นพีคเอกลักษณ์ของ Hydrotalcite ที่มีโครงสร้างเป็นชั้น (Layer) โดยพีคของ CuNiAl 2-1 มี Intensity สูงกว่า CuNiAl 3-1 แสดงว่า CuNiAl 2-1 มีความเป็นผลึกมากกว่าและเมื่อพิจารณาตำแหน่ง 2θ = 12° ซึ่งเป็นพีคที่มี Intensity สูงกว่าพีคอื่น ๆ จะเห็นได้ว่า CuNiAl 3-1 มีการเลื่อนของพีคที่ตำแหน่งนี้ไปยังมุม 2θ ที่ลดลง นั่นแสดงว่าขนาดผลึกเฉลี่ย (Mean Crystallite size) ของ CuNiAl 3-1 ใหญ่กว่าผลึกของ CuNiAl 2-1 โดย CuNiAl 3-1 มีขนาดเท่ากับ 16.22 nm และ CuNiAl 2-1 มีขนาดเท่ากับ 15.15 nm และมีระยะห่างระหว่างระนาบของผลึก (d-spacing) เท่ากับ 0.76 nm และ 0.75 nm ตามลำดับ ซึ่งเกิดขึ้นจากปริมาณของ Cu ที่เป็นองค์ประกอบในโครงสร้างของ CuNiAl 3-1 มีการแทรกตัวที่มากกว่าใน CuNiAl 2-1 [23]

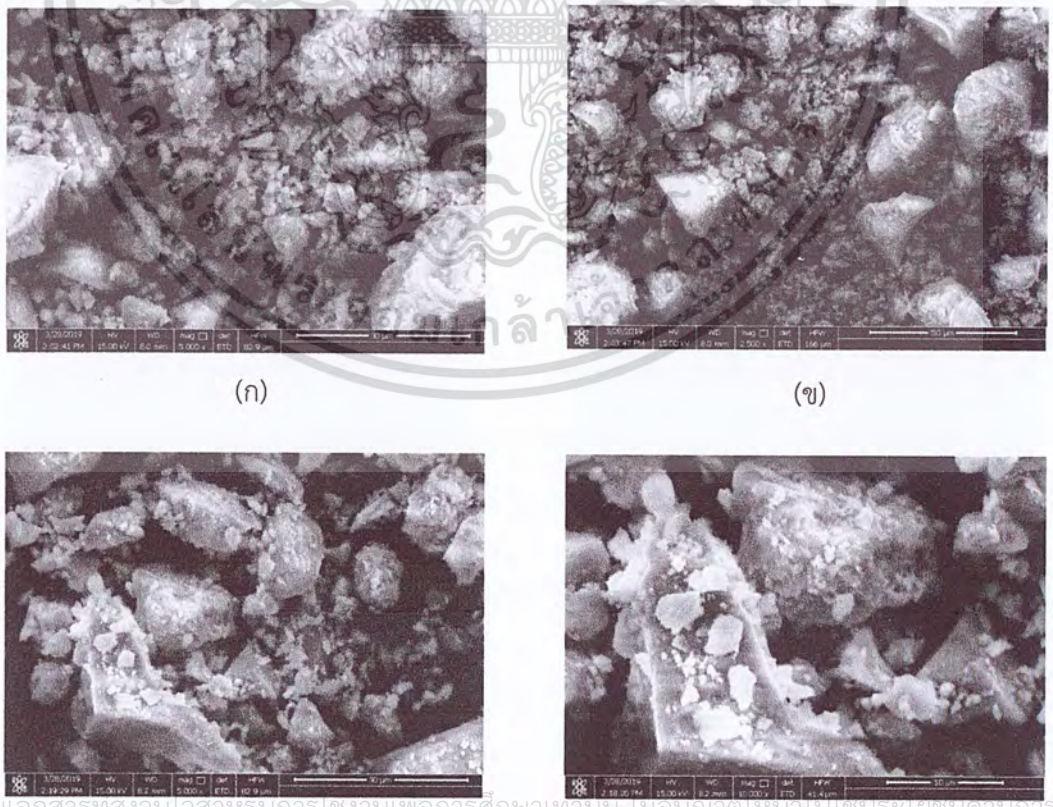
นอกจากพีคเอกลักษณ์ของ Hydrotalcite ที่พบใน CuNiAl 2-1 และ CuNiAl 3-1 แล้วยังพบพีคของ $Cu_2(CO_3)(OH)_2$ หรือ Malachite อีกด้วย ซึ่งอาจเกิดขึ้นจากการใช้ปริมาณของ Cu ที่มากกว่า Ni จึงทำให้ $Cu(NO_3)_2$ ที่ไม่ได้ตกตะกอนร่วมกับ $Ni(NO_3)_2$ และ $Al(OH)_3$ เกิดการรวมตัวกับ $NaOH/Na_2CO_3$ เกิดเป็นผลึกของ $Cu_2(CO_3)(OH)_2$ ปะปนในโครงสร้างผลึกของ Hydrotalcite [24] และยังพบ $Al(OH)_3$ เกิดขึ้นในตำแหน่ง 2θ ที่ใกล้เคียงกับ Malachite อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับ CuNiAl 3-3 และ CuNiAl 3-5 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีจำนวนโมลของ Cu/Ni เท่ากัน คือ 3:1 แต่แตกต่างกันที่อัตราส่วนโดยโมลของ (Cu+Ni)/Al จากรูปที่ 4.1 พบว่าดิฟแฟรคโทรแกรมของทั้ง CuNiAl 3-3 และ CuNiAl 3-5 ไม่ปรากฏพีคเอกลักษณ์ของ Hydrotalcite ที่ตำแหน่ง $2\theta = 24°$ บ่งบอกว่าทั้ง 2 ตัวเร่งปฏิกิริยามีโครงสร้างเป็นชั้นแบบไม่สมบูรณ์ นอกจากนั้นยังพบพีคที่ตำแหน่ง $2\theta = 29°$ 35° และ 39° ซึ่งเป็นพีคของสารประกอบที่ผสมกันของ $Cu(OH)_2$, $Ni(OH)_2$ และ $Al(OH)_3$ การที่เกิดสารประกอบผสมของโลหะไฮดรอกไซด์ทั้ง 3 ชนิดนั้นเกิดมาจากการใช้ปริมาณรวมของ Cu และ Ni มากเกินไป ทำให้ $Cu(NO_3)_2$, $Ni(NO_3)_2$ และ $Al(NO_3)_3$ บางส่วนเกิดการตกตะกอนร่วม แต่ได้โครงสร้างที่เป็นชั้นแบบไม่สมบูรณ์และยังมี $Cu(NO_3)_2$, $Ni(NO_3)_2$ และ $Al(NO_3)_3$ ส่วนที่เหลือ ซึ่งจะไปรวมกับไฮดรอกไซด์ไอออนเกิดเป็นสารประกอบโลหะไฮดรอกไซด์ปะปนในโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยา [25]

4.1.2 ลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

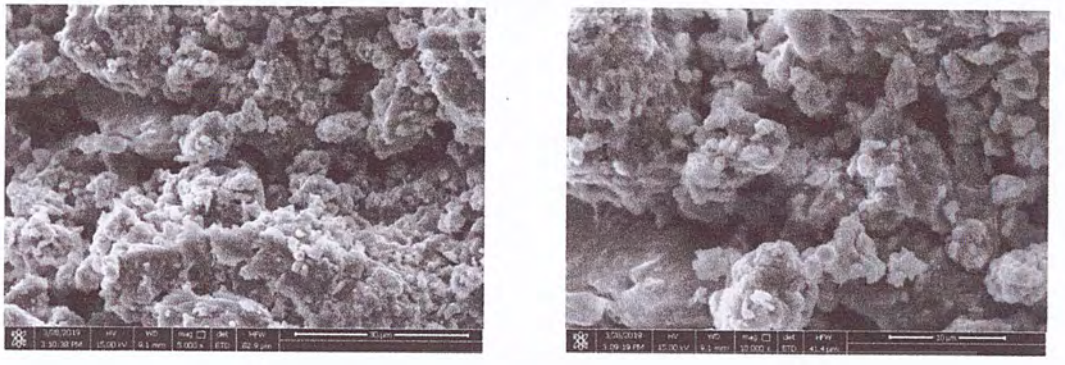
ตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์นิกเกิลอะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ ทำการตรวจสอบสัณฐานวิทยาและลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยใช้กำลังขยาย 5,000 และ 10,000 เท่า แสดงผลวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.2



(ก) (ข)

(ค) (ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ) (ฉ)

รูปที่ 4.2 ลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
(ก), (ข) CuNiAl 2-1 ที่กำลังขยาย 5,000 และ 10,000 เท่า ตามลำดับ
(ค), (ง) CuNiAl 3-1 ที่กำลังขยาย 5,000 และ 10,000 เท่า ตามลำดับ
(จ), (ฉ) CuNiAl 3-5 ที่กำลังขยาย 5,000 และ 10,000 เท่า ตามลำดับ

จากภาพถ่าย SEM ในรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่า ผลึกของ CuNiAl 2-1 มีขนาดเล็กกว่า CuNiAl 3-1 ซึ่งสอดคล้องกับผลของ XRD สำหรับ CuNiAl 3-5 พบว่ามีผลึกขนาดเล็กรวมตัวกันเป็นก้อนปกคลุมที่พื้นผิว ซึ่งคาดว่าเป็นผลึกของสารประกอบผสมของ $Cu(OH)_2$, $Ni(OH)_2$ และ $Al(OH)_3$ ดังที่ปรากฏในดิฟแฟรคโทรแกรม (รูปที่ 4.1)

4.1.3 องค์ประกอบของธาตุในตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์นิกเกิลอะลูมิเนียมเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ จาก SEM-EDS (Mapping)

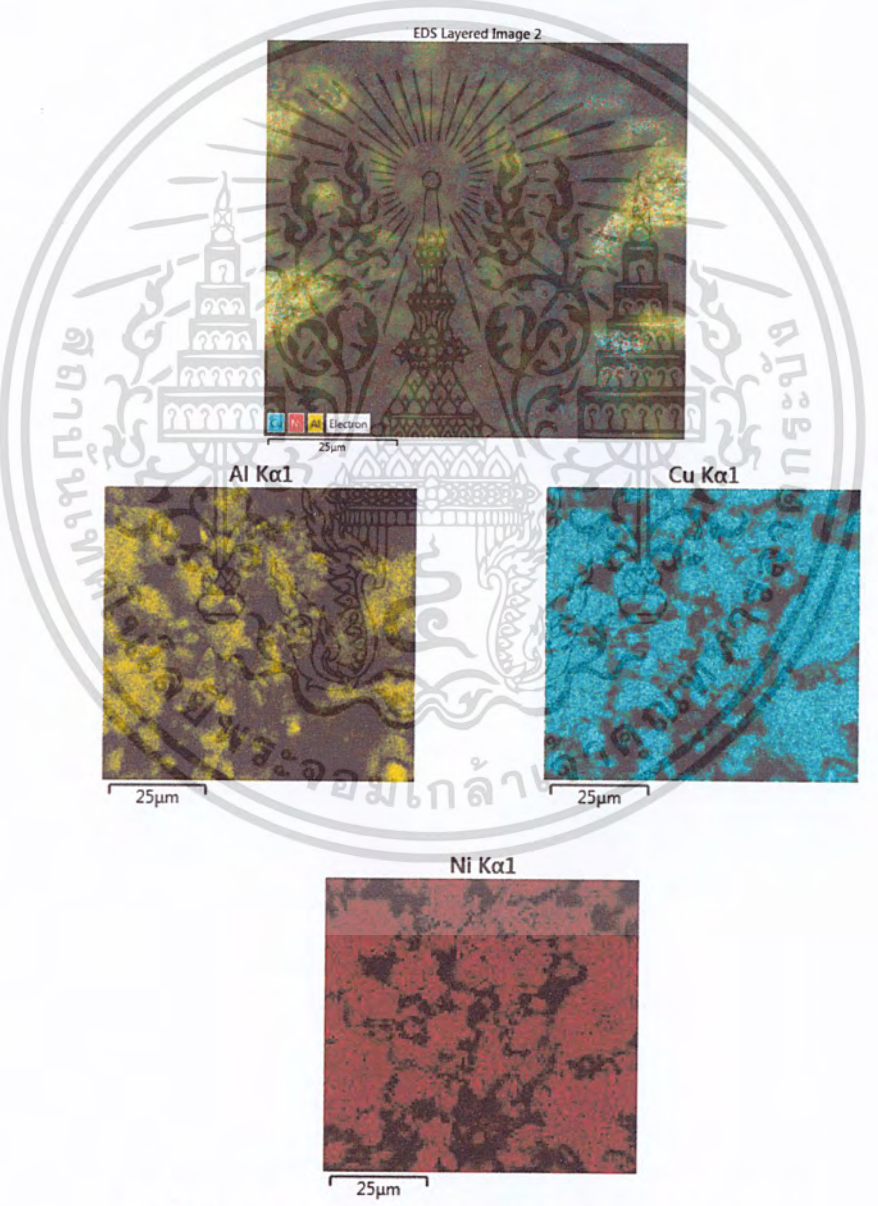
ตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์นิกเกิลอะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ ถูกนำมาวิเคราะห์หาองค์ประกอบ โดยใช้เทคนิค SEM-EDS แสดงผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 วิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุในตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl-LDH โดยเทคนิค SEM-EDS

ตัวเร่งปฏิกิริยา	Mol%			ผลจากการวิเคราะห์		อัตราส่วนโดยโมลที่กำหนด	
	Cu	Ni	Al	Cu/Ni	Cu+Ni/Al	Cu/Ni	Cu+Ni/Al
CuNiAl 2-1	0.7843	0.3832	1.0251	2.0467	1.1389	2	1
CuNiAl 3-1	0.7993	0.2610	1.2560	3.0625	0.8442	3	1
CuNiAl 3-5	1.1143	0.3285	0.3673	3.3921	3.9281	3	5

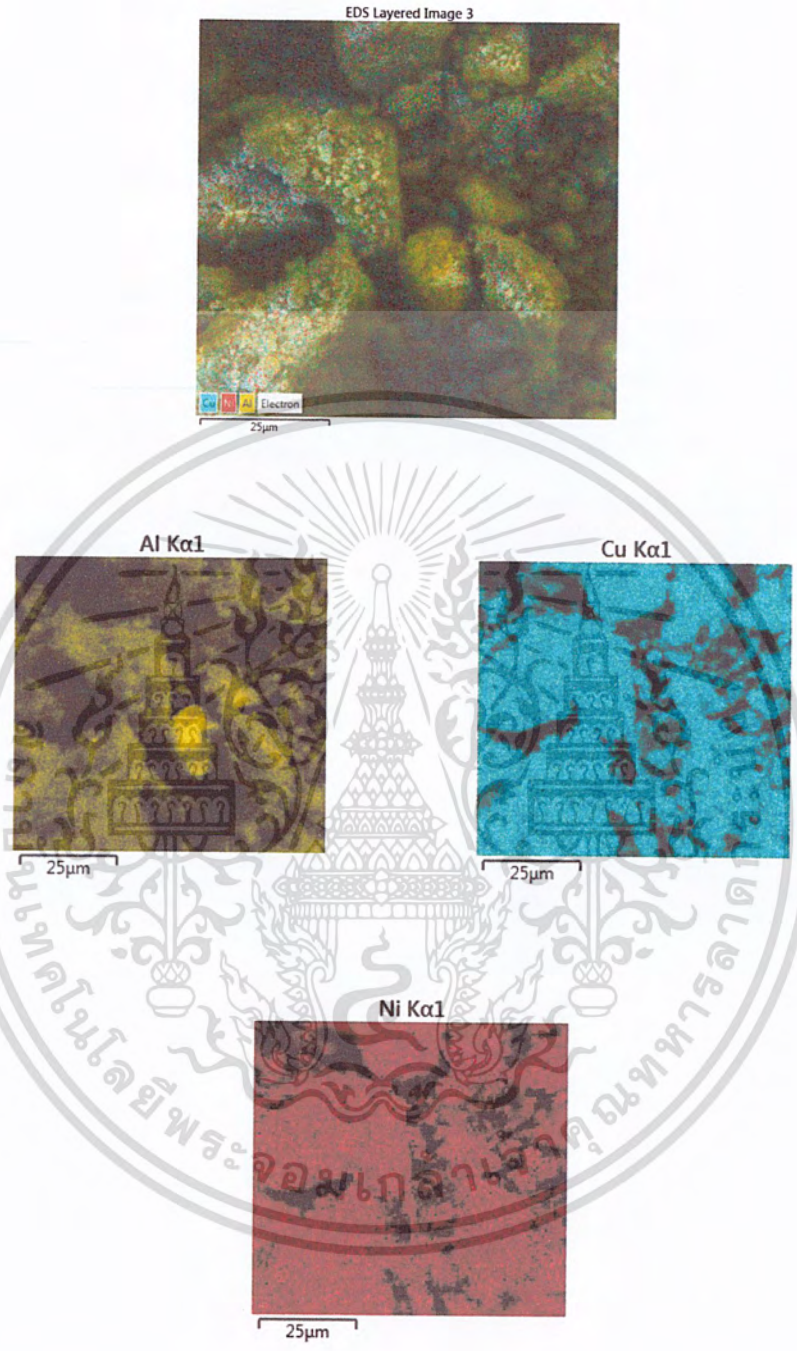
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุในตัวเร่งปฏิกิริยาในตารางที่ 4.1 พบว่าเมื่อเปรียบค่าจากการกำหนดและค่าจากการวิเคราะห์ในตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl 2-1 และ CuNiAl 3-1 มีค่าที่ใกล้เคียงกัน แต่ในตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl 3-5 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์น้อยกว่าจากค่าที่กำหนดไว้ อาจเนื่องมาจากในการเตรียม CuNiAl 3-5 ใช้อัตราส่วนโดยโมล (Cu+Ni)/Al มากถึง 5:1 ดังนั้นอาจมี Cu^{+2} และ Ni^{+2} ที่ไม่เกิดการตกตะกอนร่วม ซึ่งจะยังคงอยู่ในสารละลายและสูญเสียไปในขั้นตอนการกรองตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl 2-1, CuNiAl 3-1 และ CuNiAl 3-5 จะถูกนำไปวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค SEM-EDS ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์ ดังรูปที่ 4.3 - 4.5



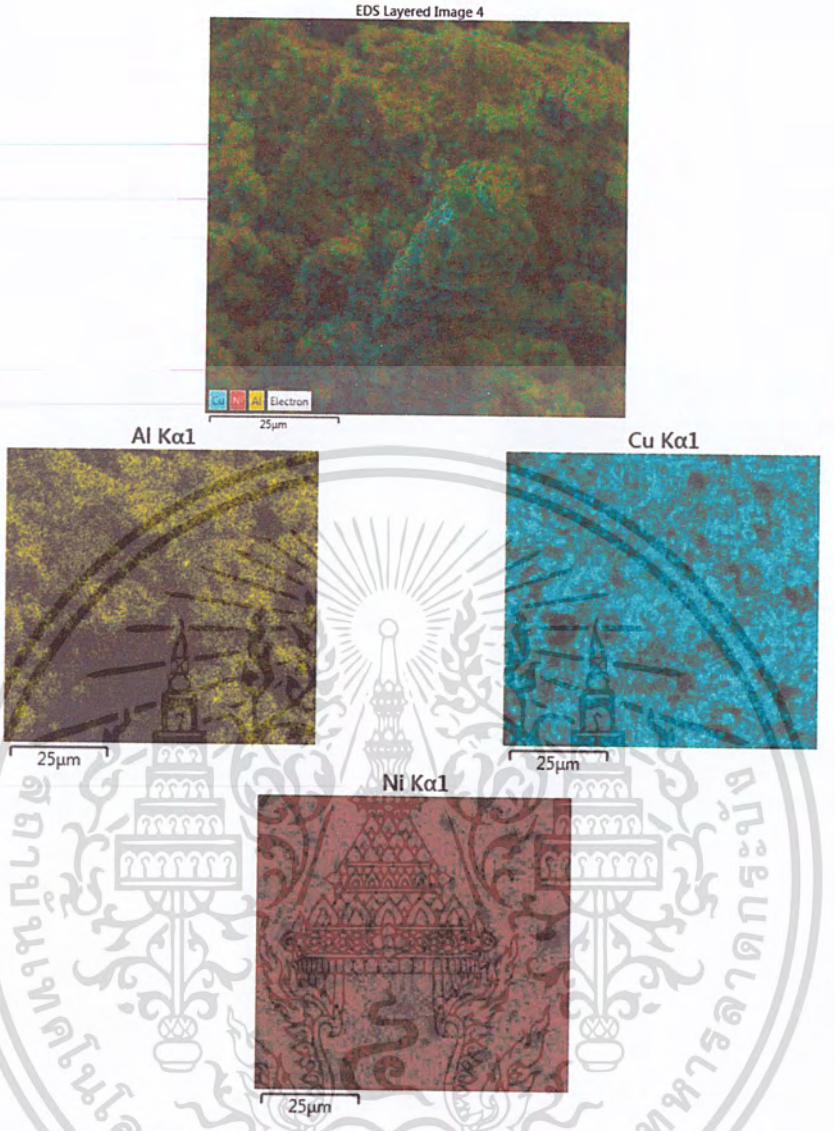
รูปที่ 4.3 องค์ประกอบของธาตุในตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl 2-1 และการกระจายตัวจาก SEM-EDS (Mapping)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 องค์ประกอบของธาตุในตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl 3-1 และการกระจายตัวจาก SEM-EDS (Mapping)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 องค์ประกอบของธาตุในตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl 3-5 และการกระจายตัวจาก SEM-EDS (Mapping)

จากรูปที่ 4.3 ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl 2-1 พบว่ามีธาตุอะลูมิเนียม คอปเปอร์และนิกเกิล เป็นองค์ประกอบ โดยแต่ละธาตุมีการกระจายตัวได้ดีมากและลักษณะโครงสร้างมีความเป็นผลึกมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl 3-1 (รูปที่ 4.4) ซึ่งผลึกมีขนาดใหญ่กว่าผลึกของ CuNiAl 2-1 อะลูมิเนียม คอปเปอร์และนิกเกิล มีการกระจายตัวค่อนข้างดี สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl 3-5 (รูปที่ 4.5) มีการกระจายตัวของธาตุคอปเปอร์และนิกเกิลอย่างไม่สม่ำเสมอ ธาตุองค์ประกอบมีการกระจุกในบางบริเวณอย่างหนาแน่นเนื่องจากการมีปริมาณของ Cu + Ni ในปริมาณที่มากกว่า CuNiAl 2-1 และ CuNiAl 3-1 และพบผลึกของ $Al(OH)_3$ เกิดขึ้นแยกออกจากเฟสของ Hydrotalcite อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4 พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาตรวจสอบด้วยวิธี BET

พื้นที่ผิวจำเพาะ และปริมาตรรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์นิกเกิลอะลูมิเนียมเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ วิเคราะห์ด้วยเทคนิคการดูดซับและคายซับแก๊สไนโตรเจน (N_2 Adsorption -Desorption; BET Surface Area Analyzer) แสดงผลดังตารางที่ 4.2

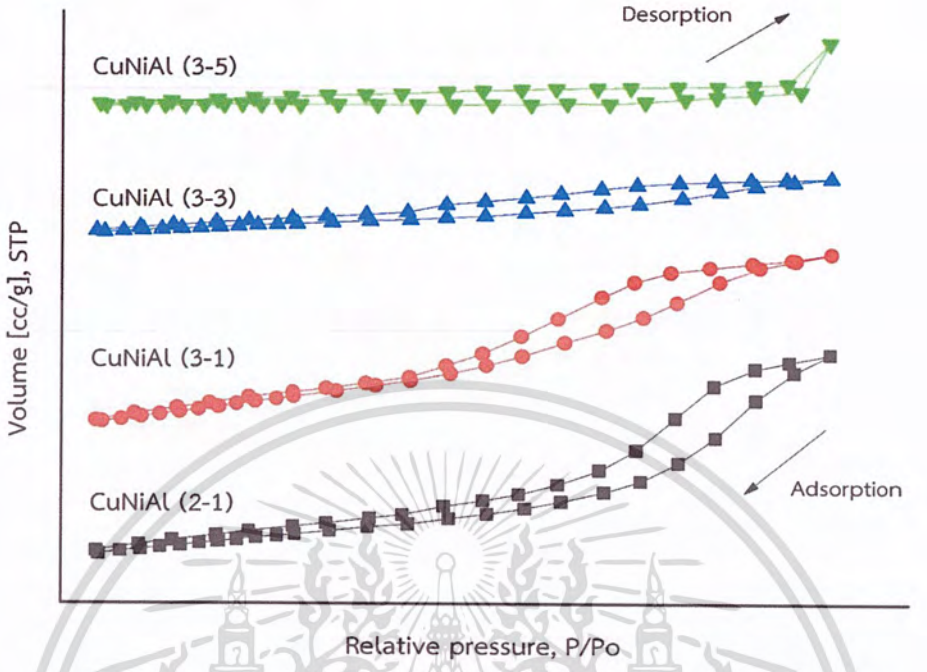
ตารางที่ 4.2 พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์นิกเกิลอะลูมิเนียมเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์

ตัวเร่งปฏิกิริยา	S_{BET} (m^2/g)	Pore volume (cm^3/g)	Pore size (nm)
CuNiAl 2-1	203.68	0.4062	7.9771
CuNiAl 3-1	230.62	0.3550	6.1569
CuNiAl 3-3	78.79	0.1169	5.9352
CuNiAl 3-5	9.12	0.1110	4.8688

จากตารางที่ 4.2 สำหรับกรณีตัวเร่งปฏิกิริยาที่มี Cu/Ni ต่างกัน แต่มี (Cu+Ni)/Al เท่ากัน ได้แก่ CuNiAl 2-1 และ CuNiAl 3-1 พบว่า CuNiAl 3-1 มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่า CuNiAl 2-1 เพียงเล็กน้อย ถึงแม้ว่า CuNiAl 3-1 จะมีขนาดผลึกใหญ่กว่า CuNiAl 2-1 แต่จากดิฟแฟรคโทรแกรม (รูปที่ 4.1) จะเห็นได้ว่าทั้ง CuNiAl 2-1 และ CuNiAl 3-1 มีผลึกของ $Cu_2(CO_3)(OH)_2$ ปะปนอยู่ โดย CuNiAl 2-1 จะมี $Cu_2(CO_3)(OH)_2$ ปะปนอยู่มากกว่า ดังนั้น ผลึกของ $Cu_2(CO_3)(OH)_2$ จึงอาจไปบดบังบริเวณพื้นผิวและภายในรูพรุนของ CuNiAl 2-1 จึงเป็นผลให้พื้นที่ผิวจำเพาะน้อยกว่า CuNiAl 3-1 เมื่อพิจารณาที่ขนาดรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl 2-1 จะมีขนาดรูพรุนใหญ่กว่าตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl 3-1

สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl 3-3 และ CuNiAl 3-5 ซึ่งมีปริมาณ Cu/Ni เท่ากันคือ 3:1 แต่มีอัตราส่วนโดยโมลของ (Cu+Ni)/Al ที่แตกต่างกัน จากตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีอัตราส่วนโดยโมลของ (Cu+Ni)/Al มากกว่า จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนที่ต่ำกว่า ซึ่ง CuNiAl 3-5 จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนที่ต่ำกว่า CuNiAl 3-3 เนื่องจากในขั้นตอนการสังเคราะห์เมื่อใช้ปริมาณของ (Cu+Ni) มากเกินไปจะทำให้เกิดการรวมตัวกับไฮดรอกไซด์เกิดเป็นสารประกอบไฮดรอกไซด์ผสม $Cu(OH)_2$, $Ni(OH)_2$ และ $Al(OH)_2$ ขึ้นได้ ซึ่งสารประกอบเหล่านี้จะปกคลุมที่พื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยเป็นผลมาจากปริมาณเฟส Hydrotalcite ที่มีพื้นที่ผิวเกิดขึ้นไม่เท่ากันและบดบังรูพรุน จึงทำให้พื้นที่ผิวและปริมาณรูพรุนลดลง ซึ่งผลการทดลองที่ได้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ A. Dubey และคณะ [26]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ไอโซเทอมการดูดซับและการคายซับแก๊สไนโตรเจนของ CuNiAl-LDH

ไอโซเทอมการดูดซับและคายซับแก๊สไนโตรเจนของ CuNiAl-LDH เป็นแบบชนิดที่ IV ตามการจำแนกของ IUPAC ดังรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl-LDH มีรูพรุนขนาดกลาง (Mesoporous) โดยไอโซเทอมการดูดซับและไอโซเทอมการคายซับไม่ซ้อนทับกันเรียกว่า Hyteresis loop ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของไอโซเทอมการดูดซับชนิดที่ IV

4.2 การเตรียมกราฟมาตรฐานสารละลาย

4.2.1 การเตรียมกราฟมาตรฐานสารละลายฟีนอล (Phenol)

ในงานวิจัยนี้จะศึกษากระบวนการกำจัดฟีนอลด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยใช้ H_2O_2 เป็นตัวออกซิไดส์และเร่งปฏิกิริยาด้วย CuNiAl-LDH ซึ่งความเข้มข้นของฟีนอลหลังจากทำปฏิกิริยาจะถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล ดังนั้นจึงต้องทำการเตรียมกราฟมาตรฐานสารละลายฟีนอล เพื่อใช้สำหรับเทียบหาความเข้มข้นที่เหลืออยู่ของฟีนอลหลังจากทำปฏิกิริยาแล้ว

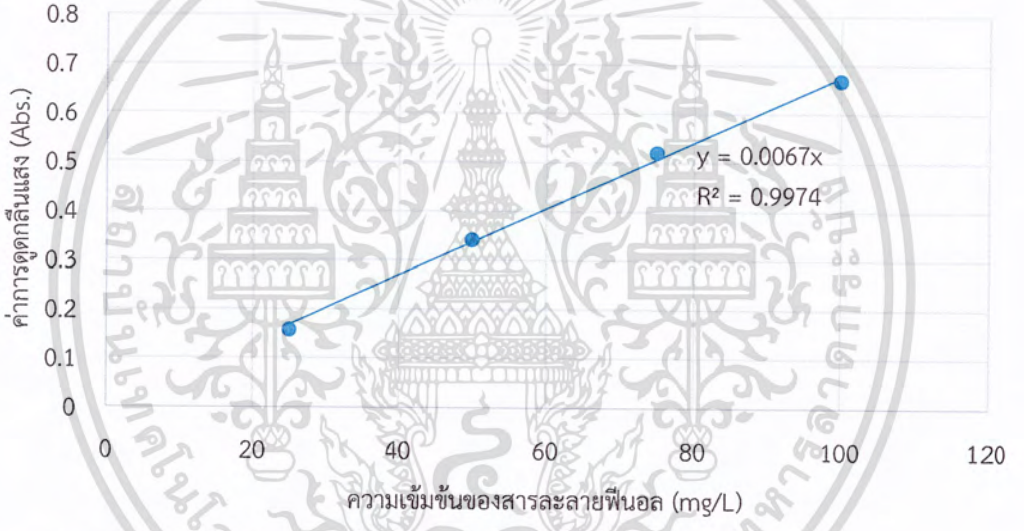
จากการเตรียมสารละลายมาตรฐานฟีนอลที่ความเข้มข้น 25, 50, 75 และ 100 mg/L แล้วนำไปตรวจสอบค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ที่ค่าความยาวคลื่น 254 nm ได้ค่าการดูดกลืนแสง ดังตารางที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ค่าการดูดกลืนแสงของฟีนอลที่เป็นสารละลายมาตรฐาน

ความเข้มข้นของฟีนอล (mg/L)	ค่าการดูดกลืนแสง (Abs.)
25	0.1569
50	0.3407
75	0.5187
100	0.6667

เมื่อนำไปสร้างกราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของฟีนอลกับค่าการดูดกลืนแสงจะได้กราฟเส้นตรงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 กราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของฟีนอล (mg/L) และค่าการดูดกลืนแสง (Abs.)

จากกราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลและค่าการดูดกลืนแสงที่ได้มีความสัมพันธ์กันเป็นเส้นตรงมีค่า R^2 = 0.9974 และเป็นไปตามสมการ y = 0.0067x เมื่อ x คือ ความเข้มข้นของสารละลายฟีนอล (mg/L) และ y คือ ค่าการดูดกลืนแสง (Abs.) กราฟมาตรฐานที่ได้จะนำไปใช้หาความเข้มข้นของฟีนอลหลังจากทำปฏิกิริยาออกซิเดชันต่อไป

4.2.2 การเตรียมกราฟมาตรฐานสารละลายแคทีคอล (Catechol) และไฮโดรควิโนน (Hydroquinone)

จากงานวิจัยของ S.Kannan และคณะ [27] ได้ทำการศึกษาปฏิกิริยาออกซิเดชันของฟีนอลโดยใช้ H_2O_2 เป็นตัวออกซิไดส์และเร่งปฏิกิริยาด้วย CuMgAl-LDH ซึ่งพบว่าฟีนอลจะถูกเปลี่ยนเป็นแคทีคอล (Catechol) และไฮโดรควิโนน (Hydroquinone) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

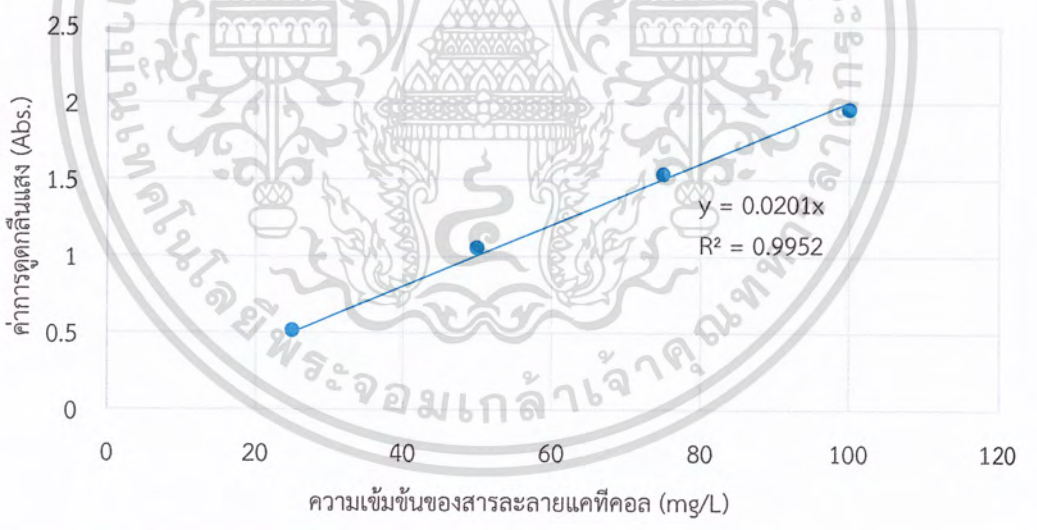
หาแคทีคอลและไฮโดรควิโนนที่เกิดขึ้นด้วยการวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทร-โฟโตมิเตอร์ ซึ่งต้องทำการเตรียมกราฟมาตรฐานสารละลายเพื่อใช้ในการวิเคราะห์

ทำการเตรียมสารละลายมาตรฐานแคทีคอลที่ความเข้มข้น 25, 50, 75 และ 100 mg/L แล้วนำไปตรวจสอบค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 275 nm ได้ค่าการดูดกลืนแสงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าการดูดกลืนแสงของแคทีคอลที่เป็นสารละลายมาตรฐาน

ความเข้มข้นของแคทีคอล (mg/L)	ค่าการดูดกลืนแสง (Abs.)
25	0.5124
50	1.0530
75	1.5366
100	1.9613

เมื่อนำไปสร้างกราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของแคทีคอลกับค่าการดูดกลืนแสงทำให้ได้กราฟเส้นตรงดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 กราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของแคทีคอล (mg/L) และค่าการดูดกลืนแสง (Abs.)

จากกราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของสารละลายแคทีคอลและค่าการดูดกลืนแสงที่ได้มีความสัมพันธ์กันเป็นเส้นตรงมีค่า R^2 = 0.9952 และเป็นไปตามสมการ y = 0.0201x เมื่อ x คือ ความเข้มข้นของสารละลายแคทีคอล (mg/L) และ y คือ ค่าการดูดกลืนแสง (Abs.) กราฟมาตรฐานที่ได้จะนำไปใช้หาความเข้มข้นของแคทีคอลที่เกิดขึ้นหลังจากทำปฏิกิริยาออกซิเดชันต่อไป

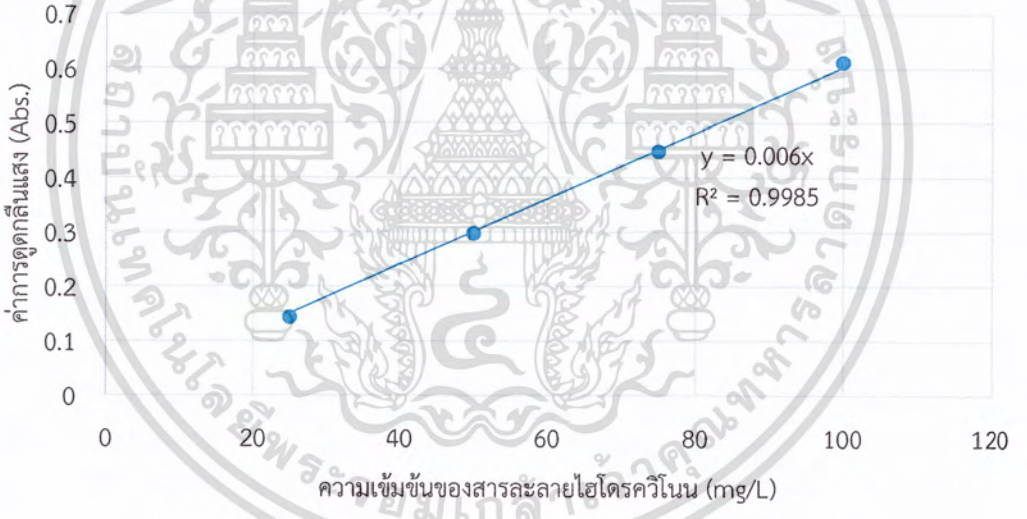
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการเตรียมสารละลายมาตรฐานไฮโดรควิโนนที่ความเข้มข้น 25, 50, 75 และ 100 mg/L แล้วนำไปตรวจสอบค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 303 nm ได้ค่าการดูดกลืนแสงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าการดูดกลืนแสงของไฮโดรควิโนนที่เป็นสารละลายมาตรฐาน

ความเข้มข้นของไฮโดรควิโนน (mg/L)	ค่าการดูดกลืนแสง (Abs.)
25	0.1419
50	0.2966
75	0.4479
100	0.6106

เมื่อนำไปสร้างกราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของไฮโดรควิโนนกับค่าการดูดกลืนแสงทำให้ได้กราฟเส้นตรงดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 กราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของไฮโดรควิโนน (mg/L) และค่าการดูดกลืนแสง (Abs.)

จากกราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรควิโนนและค่าการดูดกลืนแสงที่ได้มีความสัมพันธ์กันเป็นเส้นตรงมีค่า R^2 = 0.9985 และเป็นไปตามสมการ y = 0.006x เมื่อ x คือ ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรควิโนน (mg/L) และ y คือ ค่าการดูดกลืนแสง (Abs.) กราฟมาตรฐานที่ได้จะนำไปใช้หาความเข้มข้นของไฮโดรควิโนนที่เกิดขึ้นหลังจากทำปฏิกิริยาออกซิเดชันต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลของตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการกำจัดฟีนอล

การศึกษาผลของตัวแปรที่มีต่อกระบวนการกำจัดฟีนอลด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเร่งปฏิกิริยาด้วยคอปเปอร์นิกเกิลอะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ ตัวแปรที่ทำการศึกษา ได้แก่ อัตราส่วนโดยโมลของโลหะในตัวเร่งปฏิกิริยา ความเข้มข้นฟีนอลเริ่มต้น ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เวลาในการทำปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาและการแคลไซน์ตัวเร่งปฏิกิริยา

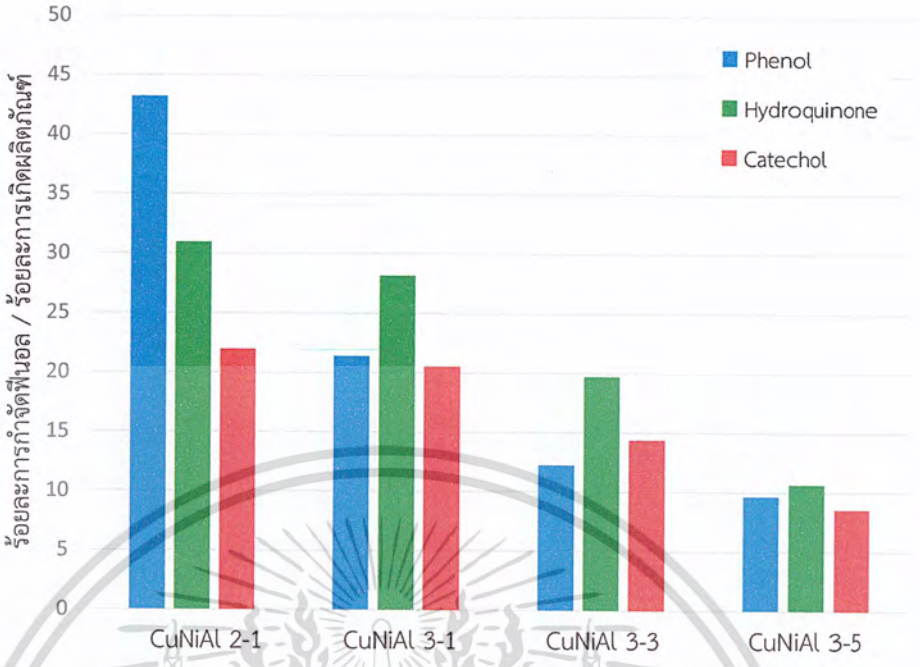
4.3.1 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของโลหะในตัวเร่งปฏิกิริยา

ในการทดลองนี้จะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันของฟีนอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl-LDH ที่อัตราส่วนโดยโมลของ Cu/Ni และ (Cu+Ni)/Al ที่แตกต่างกันในสภาวะที่ความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลเริ่มต้น 250 mg/L ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 g/L ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 40 mM เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 70 องศาเซลเซียส ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.10

ตารางที่ 4.6 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของโลหะในตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละการกำจัดฟีนอลและผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น

ตัวเร่งปฏิกิริยา	อัตราส่วนโดยโมล		ร้อยละการกำจัดฟีนอล	ร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์	
	Cu/Ni	(Cu+Ni)/Al		ไฮโดรควิโนน (HQ)	แคทีคอล (CT)
CuNiAl 2-1	2:1	1:1	43.22	30.97	21.93
CuNiAl 3-1	3:1	1:1	21.37	28.17	20.50
CuNiAl 3-3	3:1	3:1	12.27	19.71	14.39
CuNiAl 3-5	3:1	5:1	9.65	10.65	8.53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 ร้อยละการกำจัดฟีนอล ร้อยละการเกิดไฮโดรควิโนนและแคทีคอล ที่อัตราส่วนโดยโมลของโลหะใน CuNiAl-LDH ต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.10 เมื่อพิจารณาตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl 2-1 และ CuNiAl 3-1 ซึ่งมีอัตราส่วน Cu/Ni เป็น 2:1 และ 3:1 ตามลำดับ โดยมีอัตราส่วน (Cu+Ni)/Al คงที่เป็น 1:1 จะเห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ Cu/Ni จาก 2:1 เป็น 3:1 ร้อยละการกำจัดฟีนอลลดลงจาก 43.22 เป็น 21.37 และร้อยละการเกิดไฮโดรควิโนนและแคทีคอลลดลงเช่นกัน เมื่อพิจารณาจากพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยา (ตารางที่ 4.2) จะเห็นได้ว่า CuNiAl 2-1 มีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยกว่า CuNiAl 3-1 เพียงเล็กน้อย นอกจากนั้นการกระจายตัวของ Cu ใน CuNiAl 2-1 ดีกว่าใน CuNiAl 3-1 (รูปที่ 4.3 และ 4.4) รวมถึงขนาดผลึกของ CuNiAl 2-1 ที่เล็กกว่า CuNiAl 3-1 ดังนั้นจึงทำให้การเข้าทำปฏิกิริยาของฟีนอลเป็นไปได้มากและเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นผลิตภัณฑ์คือ ไฮโดรควิโนนและแคทีคอลได้มากเช่นกัน

เมื่อพิจารณาตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl 3-3 และ CuNiAl 3-5 ซึ่งมีอัตราส่วน (Cu+Ni)/Al เป็น 3:1 และ 5:1 ตามลำดับ โดยมีอัตราส่วน Cu/Ni เป็น 3:1 จะเห็นได้ว่าร้อยละการกำจัดฟีนอล ร้อยละการเกิดไฮโดรควิโนนและแคทีคอลมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วน (Cu+Ni)/Al โดยเป็นผลมาจากโครงสร้างของ CuNiAl 3-3 และ CuNiAl 3-5 มีลักษณะเป็นชั้นที่ไม่สมบูรณ์และยังมีการปะปนของผลึก $Cu(OH)_2$, $Ni(OH)_2$ และ $Al(OH)_3$ ซึ่งทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะที่ต่ำและการกระจายตัวที่ไม่ดีของ Cu บนตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณ (Cu+Ni)/Al ที่มากเกินไป จึงมีประสิทธิภาพต่ำในการกำจัดฟีนอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการกำจัดฟีนอลด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันคือ CuNiAl 2-1 ซึ่งจะนำไปใช้ในการศึกษาผลของตัวแปรอื่น ๆ ต่อไป

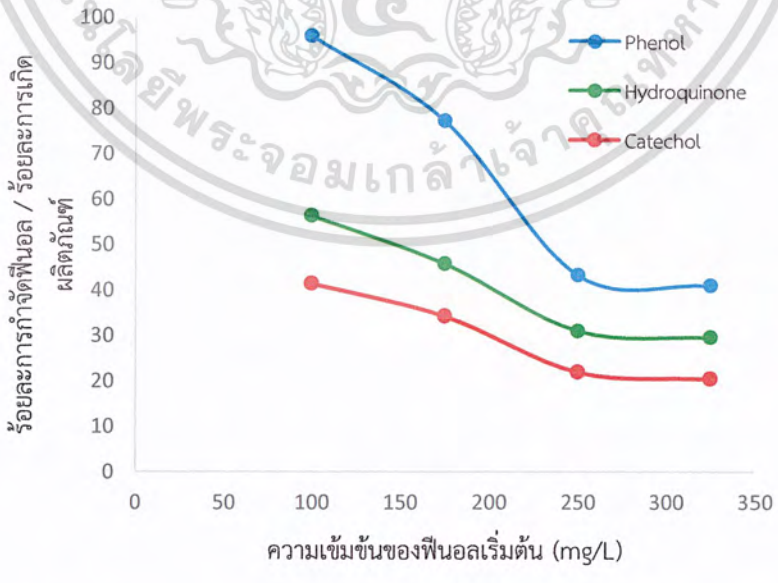
4.3.2 ผลของความเข้มข้นฟีนอลเริ่มต้น

ในการทดลองนี้จะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันของฟีนอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl 2-1 ทำการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลเริ่มต้น โดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 g/L ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 40 mM เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 70 องศาเซลเซียส ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.11

ตารางที่ 4.7 ผลของความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลเริ่มต้นต่อการกำจัดฟีนอลและผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น

ตัวเร่งปฏิกิริยา	สารละลายฟีนอล		Mol H_2O_2 / Phenol	ร้อยละการกำจัดฟีนอล	ร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์	
	ความเข้มข้นฟีนอลเริ่มต้น (mg/L)	จำนวนโมลเริ่มต้น (mmol)			ไฮโดรควิโนน (HQ)	แคทีคอล (CT)
CuNiAl 2-1	100	0.213	37.56	95.88	56.28	41.35
	175	0.372	21.50	77.22	45.78	34.25
	250	0.532	15.04	43.22	30.97	21.93
	325	0.691	11.58	40.94	29.54	20.46

หมายเหตุ จำนวนโมล H_2O_2 = 8 mmol ในทุก ๆ การทดลอง



รูปที่ 4.11 ร้อยละการกำจัดฟีนอล ร้อยละการเกิดไฮโดรควิโนนและแคทีคอล ที่ความเข้มข้นของฟีนอลเริ่มต้นต่าง ๆ เมื่อเร่งปฏิกิริยาด้วย CuNiAl 2-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.11 จะเห็นได้ว่า เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลเพิ่มขึ้นจาก 100 mg/L เป็น 325 mg/L พบว่าร้อยละการกำจัดฟีนอลจะมีแนวโน้มลดลง รวมถึงการเกิดขึ้นของผลิตภัณฑ์ที่เป็นแคทีคอลและไฮโดรควิโนนมีแนวโน้มลดลงด้วย

เนื่องมาจากสำหรับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของฟีนอลที่สมบูรณ์ เป็นดังสมการที่ 4.1 [20]

$$C_6H_5OH + 14H_2O_2 \longrightarrow 17H_2O + 6CO_2 \qquad (4.1)$$

จากสมการที่ 4.1 ฟีนอลจำนวน 1 โมล จะทำปฏิกิริยาพอดีกับ H_2O_2 14 โมล เกิดผลิตภัณฑ์เป็น H_2O และ CO_2 (อัตราส่วนโดยระหว่าง H_2O_2 : Phenol = 14:1) ดังนั้นเมื่ออัตราส่วนระหว่าง H_2O_2 ต่อ Phenol มากขึ้น (จำนวนโมล H_2O_2 คงที่ แต่จำนวน Phenol ลดลง) ก็จะทำให้ Phenol ถูกเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ได้มากขึ้น ดังนั้นที่ความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลเริ่มต้น 100 mg/L จึงถูกกำจัดฟีนอลได้มากที่สุดถึงร้อยละ 95.88 เนื่องจากสภาวะในการทดลองกำหนดให้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์คงที่ เมื่อปริมาณฟีนอลเริ่มต้นเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไม่เพียงพอที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับฟีนอลได้อย่างสมบูรณ์

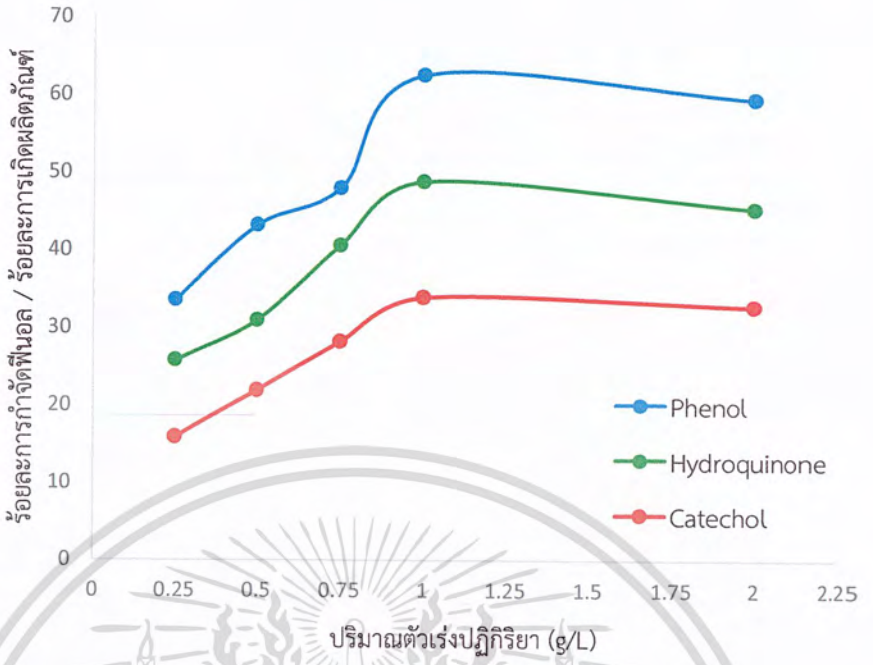
4.3.3 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl-LDH

ในการทดลองนี้จะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันของฟีนอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl 2-1 ที่ทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลเริ่มต้น 250 mg/L ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 40 mM เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 70 องศาเซลเซียส ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.12

ตารางที่ 4.8 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl-LDH ต่อการกำจัดฟีนอลและผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น

ตัวเร่งปฏิกิริยา	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (g/L)	ร้อยละการกำจัดฟีนอล	ร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์	
			ไฮโดรควิโนน (HQ)	แคทีคอล (CT)
CuNiAl 2-1	0.25	33.55	25.76	15.89
	0.50	43.22	30.97	21.93
	0.75	48.00	40.63	28.19
	1.00	62.58	48.82	33.90
	2.00	59.48	45.40	32.76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 ร้อยละการกำจัดฟีนอล ร้อยละการเกิดไฮโดรควิโนนและแคทีคอล ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl 2-1 ต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.12 จะเห็นได้ว่า ร้อยละการกำจัดฟีนอล ร้อยละการเกิดการเกิดไฮโดรควิโนนและแคทีคอลเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl 2-1 จาก 0.25 g/L เป็น 1.00 g/L แต่เมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยามากกว่า 1.00 g/L ร้อยละการกำจัดฟีนอลมีแนวโน้มลดลง ทำให้การเกิดขึ้นของแคทีคอลและไฮโดรควิโนนลดลงด้วย การเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นการเพิ่มจำนวน Active site และพื้นที่ผิวที่ฟีนอลจะเข้าทำปฏิกิริยา ดังนั้นฟีนอลจึงถูกกำจัดเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 0.25 g/L เป็น 1.00 g/L แต่การเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มากเกินไปไม่สามารถกำจัดฟีนอลได้มากขึ้น เนื่องจากทำให้เกิดการก่อตัวของ Coke ขึ้นทำให้สารละลายในปฏิกิริยามีสีที่เข้มมากขึ้น โดย Coke นี้คือผลิตภัณฑ์ที่เกิด Polymerization กันกลายเป็นสารประกอบ Aromatic ทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้นและ Coke ที่เกิดขึ้นยังไปบดบังการเข้าถึงของสารตั้งต้นที่จะเข้าไปในตัวเร่งปฏิกิริยาอีกด้วย ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ S.Kannan และคณะ [27]

ดังนั้นปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดฟีนอลที่เหมาะสมที่สุดคือ 1.00 g/L โดยสามารถกำจัดฟีนอลได้สูงสุดถึงร้อยละ 62.58

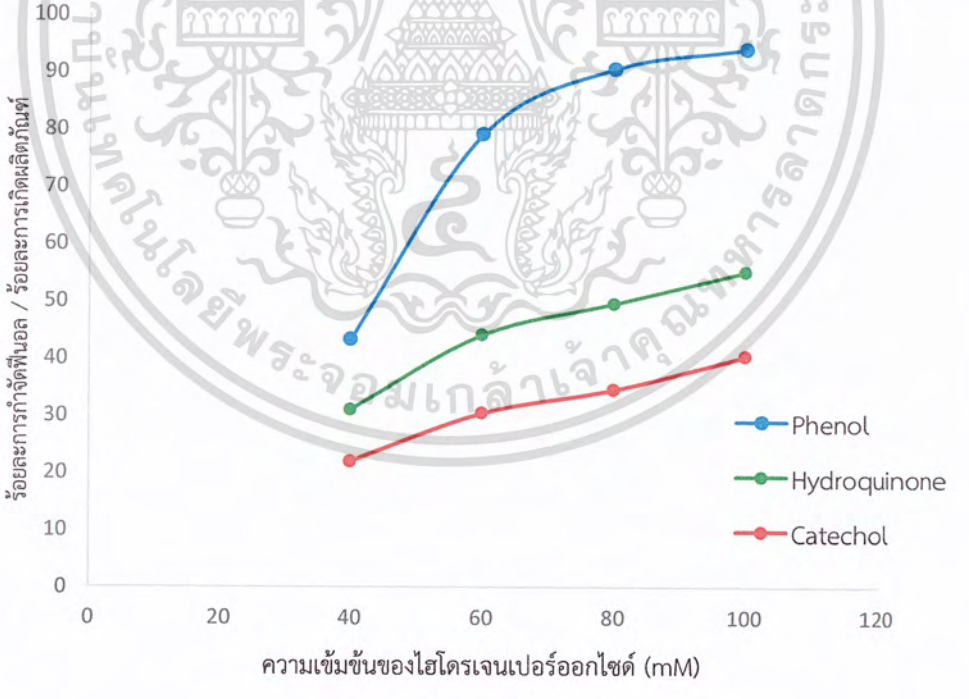
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.4 ผลของความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อการกำจัดฟีนอล

ในการทดลองนี้จะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันของฟีนอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl-LDH 2-1 ทำการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลเริ่มต้น 250 mg/L ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 g/L เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 70 องศาเซลเซียส ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.13

ตารางที่ 4.9 ผลของความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อการกำจัดฟีนอลและผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น

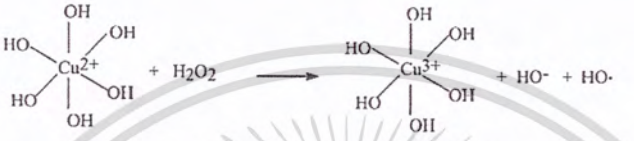
ตัวเร่งปฏิกิริยา	ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (mM)	ร้อยละการกำจัดฟีนอล	ร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์	
			ไฮโดรควิโนน (HQ)	แคทีคอล (CT)
CuNiAl 2-1	40	43.22	30.97	21.93
	60	79.12	44.07	30.39
	80	90.60	49.53	34.47
	100	94.06	55.13	40.33



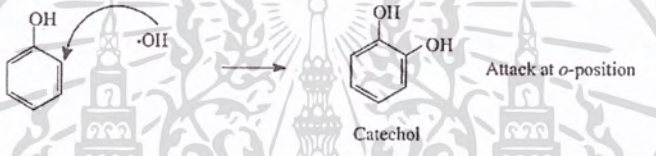
รูปที่ 4.13 ร้อยละการกำจัดฟีนอล ร้อยละการเกิดไฮโดรควิโนนและแคทีคอล ที่ความเข้มข้น H_2O_2 ต่าง ๆ เมื่อเร่งปฏิกิริยาด้วย CuNiAl 2-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

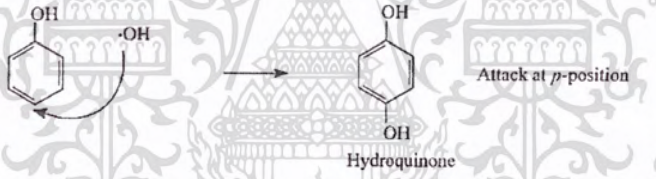
จากรูปที่ 4.13 จะเห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จาก 40 mM จนถึง 100 mM ร้อยละการกำจัดฟีนอลที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น รวมถึงการเกิดขึ้นของผลิตภัณฑ์ที่เป็นแคทีคอลและไฮโดรควิโนนซึ่งเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะทำให้มีไฮดรอกซิลเรดิคอลมากขึ้นโดย H_2O_2 จะออกซิไดส์ Cu^{2+} ใน CuNiAl-LDH เป็น Cu^{3+} และเกิดไฮดรอกซิล (OH•) ขึ้นดังสมการที่ 4.2 จากนั้นไฮดรอกซิลแรดิคอลจะเข้าที่ตำแหน่ง Ortho และ Para ของฟีนอลได้ผลิตภัณฑ์เป็น Dihydroxybenzenes หรือแคทีคอล (Catechol) และไฮโดร-ควิโนน (Hydroquinone) ดังสมการที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ [26]



(4.2)



(4.3)



(4.4)

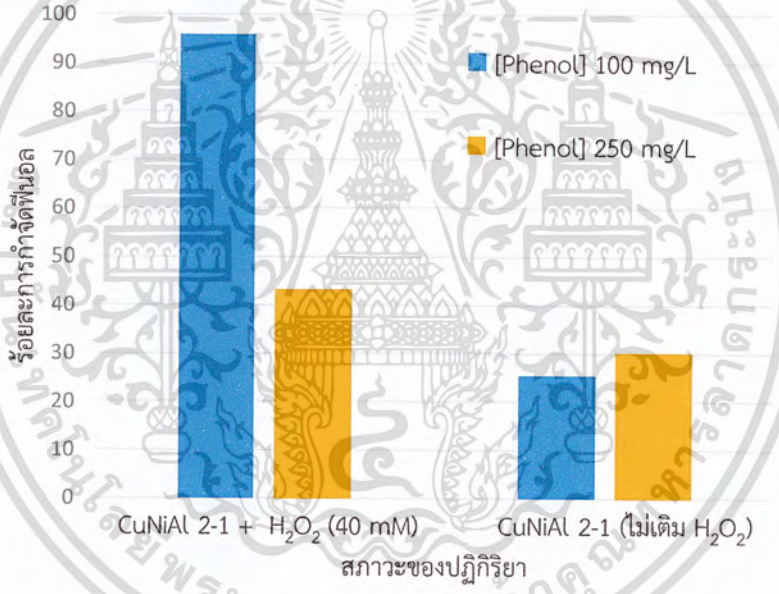
ดังนั้นความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 100 mM จึงเหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของฟีนอล เพราะให้ผลการกำจัดฟีนอลได้สูงสุดถึงร้อยละ 94.06

เพื่อศึกษาว่าการใช้ H_2O_2 มีผลอย่างไรต่อการเกิดกำจัดฟีนอล จึงได้ทำการทดลองโดยใส่เฉพาะตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl 2-1 ในสารละลายฟีนอลความเข้มข้น 100 และ 250 mg/L โดยไม่ใส่ H_2O_2 ซึ่งสภาวะในการทำปฏิกิริยาคือ ใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 g/L เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาทีและอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา 70 องศาเซลเซียส ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.14 โดยเปรียบเทียบร้อยละการกำจัดฟีนอลในสภาวะที่ CuNiAl 2-1 ร่วมกับ H_2O_2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 ผลของการเติมและไม่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีต่อร้อยละการกำจัดฟีนอล เมื่อใช้ CuNiAl 2-1 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

สภาวะของปฏิกิริยา	ความเข้มข้นของฟีนอลเริ่มต้น (mg/L)	ร้อยละการกำจัดฟีนอล	ร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์	
			ไฮโดรควิโนน (HQ)	แคทีคอล (CT)
CuNiAl 2-1 + H_2O_2 (40 mM)	100	95.88	56.28	41.35
	250	43.22	30.97	21.93
CuNiAl 2-1 (ไม่เติม H_2O_2)	100	25.48	0.00	0.00
	250	30.21	0.00	0.00



รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบร้อยละการกำจัดฟีนอลในสภาวะเมื่อมีการเติมและไม่เติม H_2O_2 เมื่อใช้ CuNiAl 2-1 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

จากรูปที่ 4.14 จะเห็นได้ว่าที่ความเข้มข้นฟีนอล 100 และ 250 mg/L การใส่เฉพาะตัวเร่งปฏิกิริยาและไม่ใส่ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จะให้ร้อยละการกำจัดฟีนอลที่ต่ำกว่าการใส่ H_2O_2 ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า H_2O_2 จะมีบทบาทในการเข้าออกซิไดส์ Cu^{2+} ใน CuNiAl-LDH และเกิดเป็น Hydroxyl radical จากนั้นจะเข้าทำปฏิกิริยากับฟีนอลต่อไปตามสมการที่ 4.3 และ 4.4 แต่ในกรณีใช้เฉพาะ CuNIAl-LDH เพียงอย่างเดียว ฟีนอลสามารถถูกกำจัดได้ด้วยกระบวนการดูดซับที่พื้นผิวของ CuNiAl-LDH ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า การกำจัดฟีนอลในสภาวะที่ใส่ H_2O_2 และตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl-LDH จะเกิดการกำจัดฟีนอล 2 วิธีร่วมกัน นั่นคือการดูดซับฟีนอลที่บริเวณพื้นผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

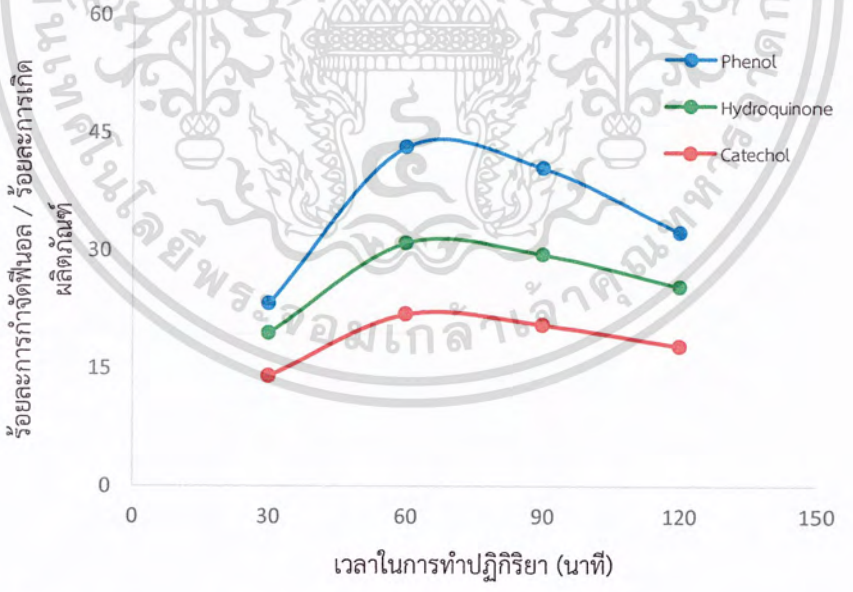
ของ CuNiAl-LDH และการเปลี่ยนเป็นไฮโดรควิโนนและแคทีคอล เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างไฮดรอกซิลแรดิคอลและฟีนอล

4.3.5 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อการกำจัดฟีนอล

ในการทดลองนี้จะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันของฟีนอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl-LDH 2-1 ทำการเปลี่ยนแปลงเวลาในการทำปฏิกิริยา โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายฟีนอล 250 mg/L ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 g/L ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 40 mM และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 70 องศาเซลเซียส ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.11 และรูปที่ 4.15

ตารางที่ 4.11 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อการกำจัดฟีนอลและผลิตภัณฑ์เกิดขึ้น

ตัวเร่งปฏิกิริยา	เวลาในการทำปฏิกิริยา (นาที)	ร้อยละการกำจัดฟีนอล	ร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์	
			ไฮโดรควิโนน (HQ)	แคทีคอล (CT)
CuNiAl 2-1	30	23.20	19.49	13.99
	60	43.22	30.97	21.93
	90	40.53	29.52	20.55
	120	32.36	25.43	17.85



รูปที่ 4.15 ร้อยละการกำจัดฟีนอล ร้อยละการเกิดของไฮโดรควิโนนและแคทีคอล ที่เวลาของการทำปฏิกิริยาต่าง ๆ เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl 2-1

จากรูปที่ 4.15 จะเห็นได้ว่า เมื่อเวลาของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 30 เป็น 60 นาที ร้อยละการกำจัดฟีนอล ร้อยละการเกิดไฮโดรควิโนนและแคทีคอลเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นมากกว่า 60 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

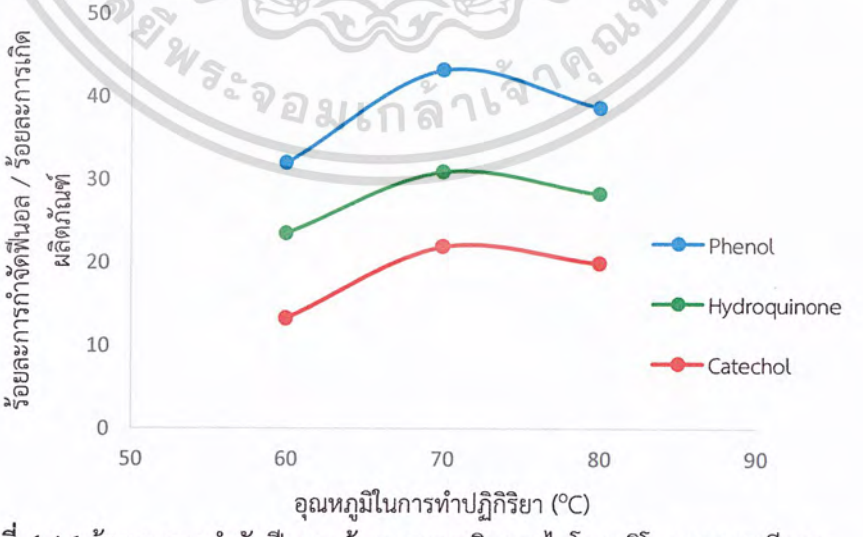
พบว่าร้อยละการกำจัดฟีนอลร้อยละการเกิดขึ้นของไฮโดรควิโนนและแคทีคอลมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ซึ่งสาเหตุอาจเกิดจากเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยานานขึ้น จะทำให้ H_2O_2 เกิดการสลายตัว และอาจมีการสะสมของสารตั้งต้นหรือผลิตภัณฑ์ภายในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl 2-1 จึงทำให้พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง ทำให้กำจัดฟีนอลได้น้อยลง ดังนั้นการทำปฏิกิริยาที่เวลา 60 นาที จึงเป็นเวลาที่เหมาะสม เพราะให้การกำจัดฟีนอลสูงสุดถึงร้อยละ 43.22

4.3.6 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่อการกำจัดฟีนอล

ในการทดลองนี้จะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันของฟีนอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl-LDH 2-1 ทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายฟีนอล 250 mg/L ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 g/L ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 40 mM และเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.12 และรูปที่ 4.16

ตารางที่ 4.12 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่อการกำจัดฟีนอลและผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น เมื่อใช้ CuNiAl 2-1 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (°C)	ร้อยละการกำจัดฟีนอล	ร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์	
			ไฮโดรควิโนน (HQ)	แคทีคอล (CT)
CuNiAl 2-1	60	31.98	23.52	13.29
	70	43.22	30.97	21.93
	80	38.69	28.30	19.92



รูปที่ 4.16 ร้อยละการกำจัดฟีนอล ร้อยละการเกิดของไฮโดรควิโนนและแคทีคอล ที่อุณหภูมิของปฏิกิริยาต่าง ๆ เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl 2-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.16 จะเห็นได้ว่าร้อยละการกำจัดฟีนอล ร้อยละการเกิดไฮโดรควิโนนและแคทีคอลเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 60°C เป็น 70°C ซึ่งการเพิ่มอุณหภูมิจะเป็นการเพิ่มอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยา จึงทำให้การกำจัดฟีนอลเป็นไปได้มากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 80°C พบว่าร้อยละการกำจัดฟีนอล ร้อยละการเกิดไฮโดรควิโนนและแคทีคอลมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เกิดการสลายตัวด้วยความร้อน (Thermal decomposition) ได้เป็นน้ำและแก๊สออกซิเจน ดังนั้นจึงทำให้ร้อยละการกำจัดฟีนอลลดลง ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ S.Kannan และคณะ [27] ดังนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาคือ 70°C ซึ่งกำจัดฟีนอลได้สูงถึง 43.22

4.3.7 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการแคลไซน์ต่อการกำจัดฟีนอล

ในการทดลองนี้จะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันของฟีนอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl-LDH 2-1 เปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ในสภาวะที่ความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลเริ่มต้น 250 mg/L ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 g/L ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 40 mM เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 70 องศาเซลเซียส ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 เปรียบเทียบร้อยละการกำจัดฟีนอล เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการแคลไซน์ที่ 400°C และไม่ผ่านการแคลไซน์

ตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl 2-1	ความเข้มข้นฟีนอลคงเหลือ (mg/L)	ร้อยละการกำจัดฟีนอล (%)
ไม่ผ่านการแคลไซน์	141.94	43.22
ผ่านการแคลไซน์ที่ 400°C	ไม่สามารถวัดได้	ไม่สามารถคำนวณได้

จากตารางที่ 4.13 จะเห็นได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl-LDH ที่ไม่ได้ผ่านการแคลไซน์ซึ่งมีโครงสร้างเป็นชั้น สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและกำจัดฟีนอลได้ ในทางกลับกันเมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ไปทำปฏิกิริยาออกซิเดชันของฟีนอล พบว่าสารละลายหลังจากทำปฏิกิริยามีสีดำและเข้มขึ้นจากเดิมมาก ไม่สามารถวัดความเข้มข้นของฟีนอลที่เหลือได้ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ซึ่งอาจเกิดขึ้นจากการแคลไซน์ที่ 400°C จะทำให้โครงสร้างที่เป็นชั้นของ CuNiAl-LDH พังทลายลงเกิดเป็นออกไซด์ผสมของคอปเปอร์ นิกเกิลและอะลูมิเนียม ซึ่งอาจไม่มีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของฟีนอลได้ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ R. Vicente และคณะ [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.8 การกำจัดฟีนอลภายใต้สภาวะที่เหมาะสม

ในการทดลองนี้จะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันฟีนอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl-LDH 2-1 ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละตัวแปร ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลเริ่มต้น 100 mg/L ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1.0 g/L ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 100 mM เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 70 องศาเซลเซียส ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 ร้อยละการกำจัดฟีนอล ร้อยละการเกิดไฮโดรควิโนนและแคทีคอล ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม

ตัวเร่งปฏิกิริยา	ร้อยละการกำจัดฟีนอล	ร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์	
		ไฮโดรควิโนน	แคทีคอล
CuNiAl 2-1	97.79	56.53	41.84

จากตารางที่ 4.14 จะเห็นได้ว่า เมื่อนำตัวแปรที่ดีที่สุดของแต่ละการทดลองมารวมกันแล้วทำการกำจัดฟีนอลจะทำให้ร้อยละการกำจัดฟีนอลที่สูงที่สุดถึง 97.79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการกำจัดฟีนอลด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์-ออกไซด์เป็นสารออกซิแดนท์ คอปเปอร์นิกเกิลอะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ (CuNiAl-LDH) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งตัวแปรที่มีผลต่อการกำจัดฟีนอล ได้แก่ อัตราส่วนโดยโมลของโลหะในตัวเร่งปฏิกิริยา ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล ปริมาณของตัวเร่ง ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เวลาในการทำปฏิกิริยาและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา เพื่อหาสภาวะเหมาะสมที่ให้ร้อยละการกำจัดฟีนอลสูงสุด อีกทั้งศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดฟีนอลของตัวเร่งปฏิกิริยาหลังจากการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของโลหะในตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl-LDH ที่ปริมาณอัตราส่วน Cu/Ni และ (Cu+Ni)/Al ต่างกัน ได้แก่ CuNiAl 2-1, CuNiAl 3-1, CuNiAl 3-3 และ CuNiAl 3-5 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl 2-1 มีความสามารถในการกำจัดฟีนอลสูงสุดที่ร้อยละ 43.22 เนื่องจากผลึกมีขนาดเล็กและมีการกระจายตัวของ Cu ที่ดีแต่เมื่อตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl 3-1 มีปริมาณของคอปเปอร์ที่มากเกินไปทำให้ความสามารถในการกำจัดฟีนอลลดลง เพราะปริมาณคอปเปอร์ มากเกินไปจะเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนและดูดซับที่พื้นผิวด้านนอกรูพรุนของโครงสร้างชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ ทำให้พื้นผิวของบริเวณที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาลดลง จึงสรุปได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl 2-1 เหมาะสมที่สุด เนื่องจากให้ร้อยละการกำจัด ฟีนอลสูงถึง 43.22 ส่วน CuNiAl 3-3 และ CuNiAl 3-5 มีโครงสร้างเป็นชั้นไม่สมบูรณ์จึงมีประสิทธิภาพต่ำในการกำจัดฟีนอล

5.1.2 ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล

เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของฟีนอลสูงขึ้นที่ 100, 175, 250 และ 325 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ พบว่าร้อยละการกำจัดฟีนอลมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์คงที่ โดยความเข้มข้นฟีนอลเริ่มต้นที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาการกำจัดฟีนอลคือ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งสามารถกำจัดฟีนอลได้สูงสุดถึงร้อยละ 95.88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.3 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl-LDH

เมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 0.25 เป็น 1.00 กรัมต่อลิตร ความสามารถในการกำจัดฟีนอลสูงขึ้น เนื่องจากเป็นการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้บริเวณที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยามากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 2.00 กรัมต่อลิตร ความสามารถในการกำจัดฟีนอลลดลง เนื่องจากเกิด Coke ที่ไปบดบังการเข้าถึงของสารตั้งต้นบนตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้พื้นผิวของบริเวณที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาลดลง จึงสรุปได้ว่าปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 1.00 กรัมต่อลิตรเหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาการกำจัดฟีนอล เนื่องจากให้ค่าร้อยละการกำจัดฟีนอลสูงสุดถึง 62.58

5.1.4 ปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่าความสามารถในการกำจัดฟีนอลสูงขึ้น เนื่องจากเมื่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แตกตัวเกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคอลจะสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับฟีนอลได้ ดังนั้นการเพิ่มปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดฟีนอลได้ดีขึ้น จึงสรุปได้ว่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ 100 มิลลิโมลาร์ ให้ร้อยละการกำจัดฟีนอลสูงสุดถึง 94.07

5.1.5 เวลาในการเกิดปฏิกิริยา

เมื่อเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 30 เป็น 60 นาที พบว่าร้อยละการกำจัดฟีนอลเพิ่มมากขึ้นแต่เมื่อปฏิกิริยาทำไปมากกว่า 60 นาที พบว่าร้อยละของการกำจัดฟีนอลมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เนื่องจากเวลาในการทำปฏิกิริยาที่นานขึ้นอาจทำให้เกิดการสะสมสารตั้งต้นหรือผลิตภัณฑ์ภายในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาและทำให้พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง ดังนั้นเวลาที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาคือ 60 นาที ซึ่งสามารถกำจัดฟีนอลได้สูงสุดถึงร้อยละ 43.22

5.1.6 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา

เมื่ออุณหภูมิของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 60 เป็น 70 องศาเซลเซียส ร้อยละการกำจัดฟีนอลเพิ่มขึ้นเนื่องจากอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 80 องศาเซลเซียส การกำจัดฟีนอลมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากเกิดการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ดังนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาคือ 70 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถกำจัดฟีนอลได้สูงสุดถึงร้อยละ 43.22

5.1.7 เปรียบเทียบปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใส่ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และไม่ใส่ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ปฏิกิริยาที่มีการใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะมีความสามารถในการกำจัดสูงกว่าการทำปฏิกิริยาการกำจัดฟีนอลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเพียงอย่างเดียว เนื่องจากมีการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร่วมกันระหว่างการดูดซับฟีนอลบนตัวเร่งปฏิกิริยาและปฏิกิริยาออกซิเดชันจากไฮโดรเจนเปอร์-ออกไซด์

5.1.8 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส และไม่ผ่านการแคลไซน์

จากการทดลองพบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ไม่มีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของฟีนอลได้ เนื่องจากการแคลไซน์ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 400 องซาเซลเซียส ทำให้โครงสร้างชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์พังลง ส่งผลให้พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลงและอาจเกิดเป็นสารประกอบออกไซด์ จึงสรุปได้ว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของฟีนอลคือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ผ่านการแคลไซน์

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาความเป็นไปได้ของการกำจัดฟีนอลด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl-LDH โดยการทดลองทำปฏิกิริยากำจัดฟีนอลในสภาวะที่เหมาะสมในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีฟีนอลปะปนอยู่เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมและงานด้านสิ่งแวดล้อม
2. ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl-LDH ที่ทำปฏิกิริยาแล้วนำกลับมาใช้ใหม่
3. ศึกษาตัวแปรสภาวะอื่น ๆ ที่มีผลต่อการกำจัดฟีนอล เช่น pH ของน้ำทิ้งและอัตราการปั่นกวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] กฤษณล กีรติวิทยายุด, **การหาปริมาณฟีนอลในแหล่งน้ำโดยใช้เทคนิคสเปกโตรโฟโตมิเตอร์**, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา, 2528.

[2] ทรงพล รดิศพงศ์, กรรณิการ์ บุตรเอก และขนิษฐา อัศวชัยณรงค์, **สารประกอบฟีนอลิค (Phenolic compound)** (ออนไลน์) สืบค้นจาก : www.dss.go.th/dssweb/pep_12_2546phenolic.pdf.

[3] Caza, N., Bewtra, J.A., Biswas, N., and Taylor, K.E. **Removal of Phenolic Compounds from Synthetic Waskwater using Soybean Peroxidates. Water** Research 1998 ; 33 : 3012-3018.

[4] Killic, M., Apaydin-Varol, E., Putun, A.E. **Adsorptive removal of phenol from aqueous solutions on activated carbon prepared from tobacco residues**: equilibrium, kinetics and thermodynamics. J Hazard Mater 200 ; 189 : 397-403.

[5] Inchaurrondo, N.S., Massa, P., Fenoglio, R., Font, J., Haure, P. **Efficient catalyst wet peroxide oxidation of phenol at moderate temperature using a high-load supported copper catalyst**. Chem Eng J 2012 ; 198-199 : 426-434.

[6] Inchaurrondo, N.S., Cechinia, J., Font, J., Haurea, P. **Strategies for enhanced CWPO of phenol solutions**. Appl Catal B Environ 2012 ; 111 : 641-648.

[7] เคมีอุตสาหกรรม(ฟีนอล). **ฟีนอล(Phenol).** (ออนไลน์). สืบค้จาก:https://www.siamchemi.com/ฟีนอล/

[8] ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์, ศาสตราจารย์เกียรติคุณ, ดร.นิธิยา รัตนาปนนท์. **Phenolic compounds/สารประกอบฟีนอล.** (ออนไลน์). สืบค้นจาก:http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/2585/phenolic-compounds-สารประกอบฟีนอล

[9] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. **Layered double hydroxides.** (ออนไลน์). สืบค้นจาก:https://enwikipedia.org/wiki/Layered_double_hydroxides

[10] **เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์.** (ออนไลน์). สืบค้นจาก:http://doi.nrct.go.th/ListDoi/Download/127260/252b557ae2aed9329c9c26dcad322d68?Resolve_DOI=10.14457/CU.the.2010.580

[11] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. **ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์.** (ออนไลน์). สืบค้นจาก: https://th.wikipedia.org/wiki/ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์

[12] กองควบคุมวัตถุเสพติด สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา. **ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ Hydrogen peroxide.** (อ้อนไลน์). สืบค้นจาก:http://narcotic.fda.moph.go.th/welcome/?p=1553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[13] **การบำบัดน้ำเสีย.** (ออนไลน์). สืบค้นจาก: https://il.mahidol.ac.th/emedia/ecology/chapter3/chapter3_water13.htm

[14] Cezar, C., Carmen, T., Matei, M., Jocelyne, M. B., and Ronan, L. D. **Catalytic wet peroxide oxidation of phenol over Fe-exchanged pillared beidellite.** Water R 2003; 37:1154-1160.

[15] Vicente, R., Olga, P., Amit, D., and Srinivasan K. **Synergistic effect in the hydroxylation of phenol over CoNiAl ternary hydrotalcites**. Catalysis 2003; 220:161-171.

[16] Wittine, O., Maduna, V. K., and Zrncevic, S. **Hydrogen peroxide promoted CWAO of phenol over cu/13x catalyst**. 2013.

[17] Gongde, W., Xiaoli W., Yuan, H., Xianfeng, L., Fang, Z., Keqia, D., and Xiaolan, Y. **Selective oxidation of glycerol with O_2 catalyzed by low-cost CuNiAl hydrotalcites**. Chem J 2013; 379:185-191.

[18] Tzompantzi, F., Mendoza-Damian, G., Rico, J.L., and Mantilla. A. **Enhanced photoactivity for the phenol mineralization on ZnAlLa mixed oxides prepared from calcined LDHs**. Cat J 2014; 220-222:56-60.

[19] กนกวรรณ โม่มาลา, จักรพงษ์ ทานะเวช, จิรัชญา สอนสมบูรณ์. 2559. **การกำจัดฟีนอลด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์บนอะลูมินา**. โครงงานพิเศษตามหลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

[20] Hosseini, S.A., Davodian, M., and Abbasian, A.R.. **Remediation of phenol and phenolic derivatives by catalytic wet peroxide oxidation over Co-Ni layered double nano hydroxides**. Chem Eng J 2017; 75:97-104.

[21] Hao, W., Mengmeng, J., Yan, W., Weiliang, C., and Yao, R. **Effective degradation of phenol via Fenton reaction over CuNiFe layered double hydroxides**. Hazardaous Material J 2012; 353:53-61.

[22] Xiaoman, H., Bentao, W., and Qiwu, Z. **Phenols removal from water by precursor preparation for Mg-Al layered double hydroxide: Isotherm, kinetic ang mechanism**. Chem and Phy J 2019; 221:108-117.

[23] Ling, Z., Jun, D., Shuwen, Y., Xinyong, L., Qifeng, L., and Christopher, J.M. **Cu promoted hydrotalcite-based NiAl mixed oxides in adsorption and oxidation of SO_2 reaction: Experimental and theoretical study.** Separation and Purification Technology 2018; 207:231-239.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[24] Alejandre, A., Medina, F., Rodriquez, X., Salagre, P., and Sueiras, J.E. **Prepareation and activity of Cu-Al mixed oxides via hydrotalcites-like precursors for the oxidation of phenol aqueous solutions.** Journal of Catalysis 1999; 188:311-324.

[25] Shiwei, Z., Zhengying, Q., Tao, S., Jinguang, X., and Chuanhai, X. **Catalytic wet peroxide oxidation of phenol over Cu-Ni-Al hydrotalcite.** Applied Clay Science 2011; 53:627-633.

[26] Dubey, A., Rives, V., and Kannan, S. **Catalytic hydroxylation of phenol over ternary hydrotalcites containing Cu, Ni and Al.** Journal of Molecular Catalysis A:Chemical 2002; 181:151-160.

[27] Kannan, S., Dubey, A., and Knozinger, H. **Synthesis and Characterization of CuMgAl hydrotalcites as catalysts for the hydroxylation of phenol.** Journal of Catalysis 2005; 231:381-392.

[28] Barbara, L., and Christine M. **X-ray Powder Diffraction (XRD).** (ออนไลน์). สืบค้นจาก: https://serc.carleton.edu/research_education/geochemsheets/techniques/XRD.html

[29] **เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิว (BET).** (ออนไลน์). สืบค้นจาก: https://mysourcing.alibaba.com/rfq/request/post_buy_request.htm?spm=a2700.md_th_TH.sefqeorf6.1.22e1275bzvaNRx&productId= 60106141200&tracelog= search_detail_bottom_201406&languageShortName=th_TH

[30] ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสุรนารี. **Scanning Electron Microscope.** (ออนไลน์). สืบค้นจาก: http://cste.sut.ac.th/2014/?p=1749&lang=en

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.
การคำนวณ

1. การหาปริมาณ H_2O_2 ที่ใช้ในการทดลอง

จากสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีความเข้มข้น 30 % w/v

จาก $C = \frac{\%D10}{MW}$

เมื่อ D คือความหนาแน่นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 1.135 g/cm^3

จะได้ว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีความเข้มข้น $= \frac{30 \times 1.135 \times 10}{34.015}$

$= 10.01$ M

ทำการเจือจางไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จาก 10 M ให้เป็น 1 M เพื่อง่ายต่อการคำนวณและเตรียม stock ไว้

คำนวณได้จาก $C_1V_1 = C_2V_2$

ต้องการเตรียม stock สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 1 M ปริมาตร 250 mL

ดังนั้น ต้องใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ $10\ M \times V_1 = 1\ M \times 250\ mL$

$V_1 = 25$ mL

ดังนั้น ปริมาตรของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ในการเตรียม stock สารละลายไฮโดรเจนเปอร์-ออกไซด์คือ 25 mL

ถ้าต้องการทราบปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ในปฏิกิริยา

คำนวณได้จาก $C_1V_1 = C_2V_2$

จากปฏิกิริยาใช้ปริมาตรรวมของสารละลายเท่ากับ 200 mL และต้องการความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 40 mM

ดังนั้น ต้องใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ $1\ M \times V_1 = 40\ mM \times 200\ mL$

$V_1 = 8$ mL

ดังนั้น ปริมาตรของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ในปฏิกิริยาคือ 8 mL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การคำนวณหาร้อยละการกำจัดฟีนอลหลังทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน

จากการทดลอง เมื่อคำนวณหาความเข้มข้นคงเหลือของฟีนอลหลังทำปฏิกิริยาออกซิเดชันของฟีนอลได้แล้วจึงนำมาคำนวณหาร้อยละการกำจัดจากสมการ

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

ตัวอย่างการคำนวณ ความเข้มข้นคงเหลือของฟีนอลในสารละลายหลังปฏิกิริยาออกซิเดชันฟีนอลเท่ากับ 141.94 mg/L โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลเท่ากับ 250 mg/L

$$\text{ร้อยละการกำจัด} = \frac{(250 - 141.94) \times 100}{250}$$

$$= 43.22$$

ดังนั้น ร้อยละการกำจัดฟีนอลเท่ากับ 43.22

3. การคำนวณหาร้อยละการเกิดไฮโดรควิโนนหลังทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน

จากการทดลอง เมื่อคำนวณหาความเข้มข้นของไฮโดรควิโนนในสารละลายหลังปฏิกิริยาออกซิเดชันฟีนอลได้แล้ว จึงนำมาคำนวณหาร้อยละการเกิดจากสมการ

$$\text{ร้อยละการเกิดไฮโดรควิโนน} = \frac{\text{ความเข้มข้นไฮโดรควิโนนที่เกิดขึ้น} \times 100}{\text{ความเข้มข้นของฟีนอลเริ่มต้น}}$$

ตัวอย่างการคำนวณ ความเข้มข้นของไฮโดรควิโนนในสารละลายหลังปฏิกิริยาออกซิเดชันฟีนอลเท่ากับ 26.6167 mg/L โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลเท่ากับ 250 mg/L

$$\text{ร้อยละการเกิดไฮโดรควิโนน} = \frac{26.6167 \times 100}{250}$$

$$= 10.6467$$

ดังนั้น ร้อยละการเกิดขึ้นของไฮโดรควิโนนเท่ากับ 10.6467

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การคำนวณหาร้อยละการเกิดแคทิคอลหลังทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน

จากการทดลอง เมื่อคำนวณหาความเข้มข้นของแคทิคอลในสารละลายหลังปฏิกิริยาออกซิเดชันฟีนอลได้แล้วจึงนำมาคำนวณหาร้อยละการเกิดจากสมการ

$$\text{ร้อยละการเกิดแคทิคอล} = \frac{\text{ความเข้มข้นแคทิคอลที่เกิดขึ้น} \times 100}{\text{ความเข้มข้นของฟีนอลเริ่มต้น}}$$

ตัวอย่างการคำนวณ ความเข้มข้นของแคทิคอลในสารละลายหลังปฏิกิริยาออกซิเดชันฟีนอลเท่ากับ 21.3284 mg/L โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลเท่ากับ 250 mg/L

$$\text{ร้อยละการเกิดแคทิคอล} = \frac{21.3284 \times 100}{250}$$

$$= 8.5314$$

ดังนั้น ร้อยละการเกิดขึ้นของแคทิคอลเท่ากับ 8.5314

5. การคำนวณหาขนาดผลึก (Crystalline size) จากเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction)

คำนวณขนาดผลึกจากสมการของ Scherrer ดังแสดงในสมการที่ ก-1

สูตร

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos\theta} \qquad \text{(ก-1)}$$

เมื่อ D คือ ขนาดของผลึก (หน่วยนาโนเมตร, nm)

K คือ ค่าคงที่ของ Scherrer มีค่าเท่ากับ 0.89

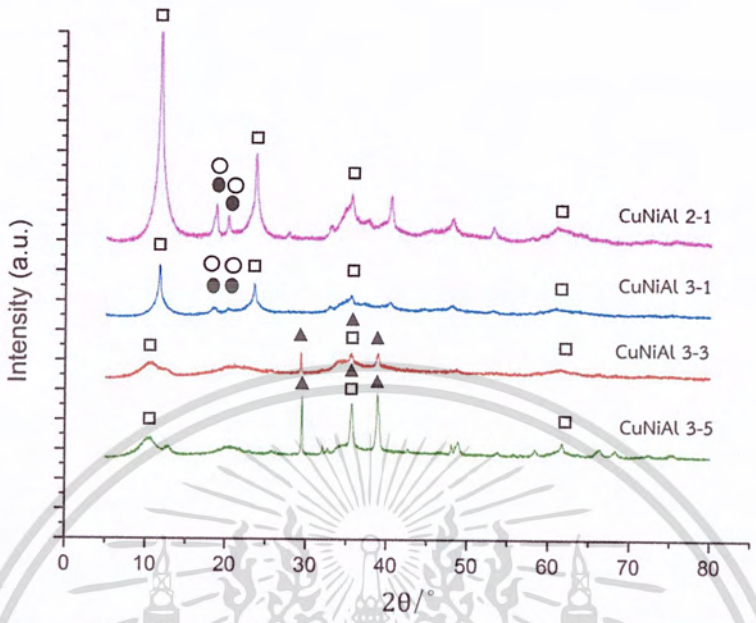
λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ (หน่วยอังสตรอม)

β คือ ค่าความกว้างที่ความสูงครึ่งหนึ่งของพีค (Full Width at Half Maximum, FWHM) ของพีคในมุมเรเดียนที่ 2θ (หน่วยเรเดียน, rad)

θ คือ มุมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (หน่วยองศา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่าง การคำนวณหาขนาดผลึกของ CuNiAl 2-1



รูปที่ ก.1 รูปแบบ XRD แสดงโครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl-LDH

จากรูป ก.1 พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl 2-1 ที่มุม 2θ = 11.7879° จะได้ θ = 5.8940°

โดยค่า FWHM จากเทคนิค XRD = 0.5218°, λ = 1.5406 Å

ค่า β = $\frac{\pi \text{ (rad)} \times 0.5218^\circ}{180^\circ}$ = 0.0091 rad

จากสมการ Scherrer

$$D = \frac{K\lambda}{\beta\cos\theta}$$

$$D = \frac{0.89 \times 1.5406 \text{ Å}}{0.0091(\text{rad}) \times \cos(5.8940^\circ)}$$

$$D = 151.4748 \text{ Å}$$

$$D = 15.15 \text{ nm}$$

ดังนั้น ขนาดผลึกของ CuNiAl 2-1 มีค่าเท่ากับ 15.15 nm

สำหรับ CuNiAl 3-1 มีขนาดผลึกเท่ากับ 16.22 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. การคำนวณหาระยะห่างระหว่างระนาบของผลึก (Distance between lactice planes) จากเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction)

คำนวณขนาดผลึกจากสมการของ Bragg ดังแสดงในสมการที่ ก-2

สูตร $$n\lambda = 2d\sin\theta \qquad \text{(ก-2)}$$

เมื่อ **n** คือ ค่าคงที่ของ Scherrer มีค่าเท่ากับ 1

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ (หน่วยอังสตรอม)

d คือ ขนาดของผลึก (หน่วยนาโนเมตร, nm)

θ คือ มุมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (หน่วยองศา)

ตัวอย่าง การคำนวณหาระยะห่างระหว่างระนาบของผลึก CuNiAl 2-1

จากรูป ก.1 พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl 2-1 ที่มุม **2θ** = 11.7879° จะได้ θ = 5.8940°

โดยค่า **λ** = 1.5406 Å

จากสมการ Scherrer

$n\lambda = 2d\sin\theta$

$$d = \frac{1 \times 1.5406}{2\sin(5.8940)}$$

d = 7.5014 Å

d = 0.75 nm

ดังนั้น ระยะห่างระหว่างระนาบของผลึก CuNiAl 2-1 มีค่าเท่ากับ 0.75 nm

สำหรับ CuNiAl 3-1 มีระยะห่างระนาบของผลึกเท่ากับ 0.76 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.
ผลการทดลองความเข้มข้นฟีนอลคงเหลือ ความเข้มข้นของไฮโดรควิโนนและแคทิคอลที่เกิดขึ้น

ตาราง ข.1 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของโลหะในตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละการกำจัดฟีนอลและผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น

ลำดับ	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (g/L)	ความเข้มข้น (mg/L)			ร้อยละการกำจัดฟีนอล	ร้อยละการเกิด	
		ฟีนอล	ไฮโดร-ควิโนน	แคทีคอล		ไฮโดร-ควิโนน	แคทีคอล
1	2-1	141.94	77.43	54.83	43.22	30.97	21.93
2	3-1	196.56	70.42	51.25	21.37	28.17	20.50
3	3-3	219.33	49.28	35.98	12.27	19.71	14.39
4	3-5	225.88	26.63	21.33	9.65	10.65	8.53

ตาราง ข.2 ผลของความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลเริ่มต้นต่อการกำจัดฟีนอลและผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น

ความเข้มข้นของฟีนอลเริ่มต้น (mg/L)	จำนวนโมลของฟีนอลเริ่มต้น	ความเข้มข้น (mg/L)			ร้อยละการกำจัดฟีนอล	ร้อยละการเกิด	
		ฟีนอล	ไฮโดร-ควิโนน	แคทีคอล		ไฮโดร-ควิโนน	แคทีคอล
100	0.000213	4.12	56.28	41.35	95.88	56.28	41.35
175	0.000372	39.87	80.12	59.94	77.22	45.78	34.25
250	0.000532	141.94	77.43	52.83	43.22	30.97	21.13
325	0.000691	191.95	96.01	66.50	40.94	29.54	20.46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข.3 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา CuNiAl-LDH ต่อการกำจัดฟีนอลและผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น

ตัวเร่งปฏิกิริยา	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (g/L)	ความเข้มข้น (mg/L)			ร้อยละการกำจัดฟีนอล	ร้อยละการเกิด	
		ฟีนอล	ไฮโดร-ควิโนน	แคทีคอล		ไฮโดร-ควิโนน	แคทีคอล
CuNiAl 2-1	0.25	166.12	64.40	39.73	33.55	25.76	15.89
	0.50	141.94	77.43	54.83	43.22	30.97	21.93
	0.75	130.00	101.58	70.48	48.00	40.63	28.19
	1.00	93.55	122.05	84.75	62.58	48.82	33.90
	2.00	101.28	113.50	81.90	59.48	45.40	32.76

ตาราง ข.4 ผลของความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อการกำจัดฟีนอลและผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น

ตัวเร่งปฏิกิริยา	ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (mM)	ความเข้มข้น (mg/L)			ร้อยละการกำจัดฟีนอล	ร้อยละการเกิด	
		ฟีนอล	ไฮโดร-ควิโนน	แคทีคอล		ไฮโดร-ควิโนน	แคทีคอล
CuNiAl 2-1	40	141.94	77.43	54.83	43.22	30.97	21.93
	60	52.21	110.18	75.98	79.12	44.07	30.39
	80	23.49	123.83	86.18	90.60	49.53	34.47
	100	14.84	137.83	100.83	94.07	55.13	40.33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข.5 ผลของการเติมและไม่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการทำปฏิกิริยาต่อการกำจัดฟีนอลและผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น

สภาวะของปฏิกิริยา	ความเข้มข้นของฟีนอลเริ่มต้น (mg/L)	ความเข้มข้น (mg/L)			ร้อยละการกำจัดฟีนอล	ร้อยละการเกิด	
		ฟีนอล	ไฮโดร-ควิโนน	แคทีคอล		ไฮโดร-ควิโนน	แคทีคอล
CuNiAl 2-1 + H_2O_2 (40 mM)	100	4.12	77.43	41.35	95.88	56.28	41.35
	250	141.94	49.28	52.83	43.22	30.97	21.93
CuNiAl 2-1 (ไม่เติม H_2O_2)	100	74.52	0.00	0.00	25.48	0.00	0.00
	250	174.47	0.00	0.00	30.21	0.00	0.00

ตาราง ข.6 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อการกำจัดฟีนอลและผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น

ตัวเร่งปฏิกิริยา	เวลาของปฏิกิริยา (นาที)	ความเข้มข้น (mg/L)			ร้อยละการกำจัดฟีนอล	ร้อยละการเกิด	
		ฟีนอล	ไฮโดร-ควิโนน	แคทีคอล		ไฮโดร-ควิโนน	แคทีคอล
CuNiAl 2-1	30	192.00	48.73	34.98	23.20	19.49	13.99
	60	141.94	77.43	54.83	43.22	30.97	21.93
	90	148.66	73.80	51.38	40.54	29.52	20.55
	120	169.10	63.58	44.63	32.36	25.43	17.85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข.7 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่อการกำจัดฟีนอลและผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น

ตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา (°C)	ความเข้มข้น (mg/L)			ร้อยละการกำจัดฟีนอล	ร้อยละการเกิด	
		ฟีนอล	ไฮโดร-ควิโนน	แคทีคอล		ไฮโดร-ควิโนน	แคทีคอล
CuNiAl 2-1	60	170.05	58.80	33.15	31.98	23.52	13.29
	70	141.94	77.43	54.83	43.22	30.97	21.93
	80	153.28	70.75	49.80	38.69	28.30	19.92

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้