

MODIFICATION OF HYDROCHAR PRODUCED FROM
BAGASSE BY HYDROTHERMAL CARBONIZATION FOR
PHOSPHATE REMOVAL IN WATER



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ทำซ้ำหรือดัดแปลงในลักษณะใดๆ ที่อาจเป็นอันตรายต่อเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ACADEMIC YEAR 2018

หัวข้อโครงการพิเศษ

การดัดแปรถ่านไฮโดรที่ผลิตขึ้นจากขานอ้อยด้วยกระบวนการ
ไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนิเซชัน เพื่อกำจัดฟอสเฟตในน้ำ
MODIFICATION OF HYDROCHAR PRODUCED FROM
BAGASSE BY HYDROTHERMAL CARBONIZATION FOR
PHOSPHATE REMOVAL IN WATER

ชื่อนักศึกษา

นางสาวธารระวี อ่อนละมัย รหัสนักศึกษา 58050625
นายนันทกร เผือกผ่อง รหัสนักศึกษา 58050630
นางสาวรวีวรรณ สุขารมย์ รหัสนักศึกษา 58050672

ปริญญา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)

ภาควิชา

เคมี

ปีการศึกษา

2561

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (สาขาเคมี
สิ่งแวดล้อม) ประจำปีการศึกษา 2561

| คณะกรรมการสอบ | ลายมือชื่อ |
|---|------------|
| รศ.ดร.บรรจง บุญชม ประธานกรรมการ | |
| ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์ กรรมการ | |
| รศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา | |

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่แบบสิ่งเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | | | |
|--------------------|---|--------------|----------|
| หัวข้อโครงการพิเศษ | การดัดแปรถ่านไฮโดรที่ผลิตขึ้นจากขานอ้อยด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชัน เพื่อกำจัดฟอสเฟตในน้ำ | | |
| ชื่อนักศึกษา | นางสาวธารระวี อ่อนละมัย | รหัสนักศึกษา | 58050625 |
| | นายนทกร เผือกผ่อง | รหัสนักศึกษา | 58050630 |
| | นางสาวรวีวรรณ สุขารมย์ | รหัสนักศึกษา | 58050672 |
| ปริญญา | วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม) | | |
| ภาควิชา | เคมี | | |
| ปีการศึกษา | 2561 | | |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | รศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์ | | |

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ทำการศึกษาการดัดแปรถ่านไฮโดรจากขานอ้อยเพื่อใช้กำจัดฟอสเฟตในน้ำ โดยใช้ขานอ้อยที่ผ่านการบดและร่อนด้วยตะแกรงร่อนขนาด 70 เมช ถูกลำมาผลิตเป็นถ่านไฮโดรด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันโดยใช้เตาปฏิกรณ์พาร์แบบปั่นกววน สภาวะที่ใช้ในการผลิตคือใช้อัตราส่วนน้ำหนักของแข็งต่อปริมาตรน้ำกลั่นเท่ากับ 1:8 อุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ 230 องศาเซลเซียส ระยะเวลาเท่ากับ 1 ชั่วโมง ทำการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของถ่านโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรเมทรี (FT-IR) การวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเครื่องวิเคราะห์คาร์บอนไฮโดรเจนและไนโตรเจน และเทคนิคการวิเคราะห์การเรืองรังสีเอกซ์ (XRF) พร้อมทั้งศึกษาความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู (M.B.N.) และค่าพีเอชที่มีประจุสุทธิเป็นศูนย์ (pH_{pzc}) ถ่านที่ผลิตได้มีพื้นผิวขรุขระและมีค่าการดูดซับเมทิลีนบลูเท่ากับ 100.90 ± 17.94 มิลลิกรัมต่อกรัม ปริมาณคาร์บอนในสัดส่วน 60.99% มีค่าพีเอชที่มีประจุสุทธิเป็นศูนย์เท่ากับ 4.07 ทำการเตรียมถ่านไฮโดรดัดแปรที่มีการตรึงแคลไออน ได้แก่ เหล็ก แคลเซียม และแมกนีเซียมบนวัสดุโดยใช้ปฏิกิริยาตกตะกอนของเฟอร์ริกคลอไรด์ แคลเซียมคลอไรด์ และแมกนีเซียมคลอไรด์ รวมถึงใช้กระบวนการตกตะกอนร่วมของเฟอร์ริกและเฟอร์รัส ผลการศึกษาพบว่าถ่านไฮโดรดัดแปรที่มีการตรึงแคลไออนบนวัสดุสามารถกำจัดฟอสเฟตได้ดีกว่าถ่านไฮโดรและขานอ้อย เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านไฮโดรดัดแปรที่มีการจุ่มชุบแคลไออนทั้ง 4 แบบ พบว่าถ่านไฮโดรที่ดัดแปรด้วยเฟอร์ริกมีความสามารถในการกำจัดฟอสเฟตได้ดีกว่าโดยมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดฟอสเฟต เท่ากับ 41.47%

คำสำคัญ : ถ่านไฮโดรดัดแปร การกำจัดฟอสฟอรัส กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชัน

เอกสารนี้จัดทำขึ้นไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | | | |
|----------------------|--|------------|----------|
| Title | MODIFICATION OF HYDROCHAR PRODUCED FROM BAGASSE BY HYDROTHERMAL CARBONIZATION FOR PHOSPHATE REMOVAL IN WATER | | |
| Students | Miss Tanrawee Onlamai | Student ID | 58050625 |
| | Mr. Nontakorn Phurkphong | Student ID | 58050630 |
| | Miss Rawiwan Sukharom | Student ID | 58050672 |
| Degree | Bachelor of Science (Environmental Chemistry) | | |
| Department | Chemistry | | |
| Faculty | Science | | |
| University | King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL) | | |
| Academic Year | 2018 | | |
| Advisor | Assoc.Prof.Dr. Usarat Thawornchaisit | | |

Abstract

Modification of bagasse derived hydrochar for phosphate removal in water was investigated in this special project. Hydrochar was produced from bagasse that were ground and sieved through a #70 mesh sieve using a PARR stirred reactor. Process conditions were using 1:8 solids-to-DI water ratio, reactor temperature at 230 °C for 1 hr. The resulting hydrochars were characterized using means of SEM, FTIR, CHN analysis, XRF, M.B.N. and pH_{pzc} . The resultant hydrochar shows a rough surface with M.B.N. of 100.90 ± 17.94 mg/g. Carbon contents of the resultant hydrochar were 60.99% while pH_{pzc} was 4.07. The impregnation of Ca, Mg and Fe through either direct precipitation of $CaCl_2$, $MgCl_2$ or $FeCl_3$ as well as co-precipitation of Fe^{3+}/Fe^{2+} under atmospheric pressure were conducted to produce cation impregnated-modified hydrochar. Results showed that the modified hydrochar along with the impregnation of cations demonstrate better phosphate removal efficiency than hydrochar and original bagasse. Among the modified hydrochar with four different types of the impregnated cations, Fe(III)-impregnated hydrochar has the superior phosphate removal efficiency with phosphate removal percentage of 41.47%.

Keywords : Modified hydrochar, Phosphorus removal, Hydrothermal carbonization, Cation Impregnation

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ห้ามิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ อันเนื่องมาจากความกรุณาและความร่วมมือของทุก ๆ ท่าน ทางคณะผู้จัดทำต้องขอขอบพระคุณ รศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษที่ได้คอยให้คำปรึกษา สละเวลาให้ความช่วยเหลือแนะนำและให้ความรู้ที่ดีในการปรับปรุงข้อผิดพลาดหรือข้อบกพร่องในการทำโครงการพิเศษนี้ และขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ ได้แก่ รศ.ดร.บรรจง บุญชม และ ดร.ชวาลย์ ศรีวงศ์ ที่สละเวลามาให้คำแนะนำและแสดงความคิดเห็นเกี่ยวกับโครงการพิเศษ ทำให้โครงการพิเศษนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณพี่ ๆ นักวิทยาศาสตร์ประจำภาควิชาเคมีที่คอยช่วยเหลือดูแล ให้คำปรึกษาและให้ความช่วยเหลือในการจัดหาสารเคมี รวมถึงสอนการใช้เครื่องมือในการวิเคราะห์อย่างใกล้ชิด

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่อาคารฝึกงานทางอุตสาหกรรมเคมีและพอลิเมอร์ที่คอยให้คำแนะนำ ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องธุรการสาขาวิชาเคมี ที่คอยแนะนำและช่วยเหลือในการจัดการด้านการเงินทำให้โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณอาจารย์และพี่ ๆ นักวิทยาศาสตร์ประจำคณะเทคโนโลยีการเกษตรที่สละเวลาให้คำแนะนำและสอนการใช้เครื่องมืออย่างใกล้ชิด

ขอขอบพระคุณบิดามารดา รวมถึงเพื่อน ๆ ที่เป็นผู้ให้กำลังใจ เป็นแรงผลักดัน และร่วมกันทำโครงการพิเศษนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ตลอดจนร้านขายน้ำอ้อยที่เอื้อเพื่อชานอ้อยเพื่อนำมาเป็นวัสดุหลักในการทำโครงการพิเศษนี้ โดยทางคณะผู้จัดทำหวังเป็นอย่างยิ่งว่า โครงการพิเศษฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจและผู้ที่ทำการศึกษาในเรื่องที่เกี่ยวข้องกันนี้ หากมีข้อเสนอแนะเพื่อนำไปสู่การปรับปรุงโครงการพิเศษนี้ให้ดียิ่งขึ้น ทางคณะผู้จัดทำขอน้อมรับคำแนะนำ และคำติชมด้วยความยินดี ทางคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ธารระวี อ่อนละมัย

นนทกร เผือกผ่อง

รวีวรรณ สุขารมย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

| | หน้า |
|---|----------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ก |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | ข |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ค |
| สารบัญ..... | ง |
| สารบัญตาราง..... | ช |
| สารบัญรูป..... | ซ |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์..... | 2 |
| 1.3 ขอบเขต..... | 2 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 3 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 4 |
| 2.1 ไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชัน..... | 4 |
| 2.1.1 วัตถุประสงค์ที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชัน..... | 4 |
| 2.2 ชานอ้อย..... | 5 |
| 2.2.1 องค์ประกอบของชานอ้อย..... | 6 |
| 2.2.2 ประโยชน์ของชานอ้อย..... | 9 |
| 2.3 ถ่าน..... | 9 |
| 2.3.1 ประเภทของถ่าน..... | 9 |
| 2.4 ฟอสเฟต..... | 12 |
| 2.5 ปัญหามลพิษทางน้ำที่เกิดจากฟอสฟอรัส..... | 12 |
| 2.5.1 ปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน..... | 12 |
| 2.5.2 ปรากฏการณ์ซีปลาวาฟ..... | 13 |
| 2.6 กระบวนการดูดซับ..... | 14 |
| 2.6.1 ประเภทของตัวดูดซับ..... | 14 |
| 2.6.2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ..... | 14 |
| 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 15 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ใด ๆ การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย..... | 17 |
| 3.1 อุปกรณ์และสารเคมี..... | 17 |
| 3.1.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ..... | 17 |
| 3.1.2 สารเคมี..... | 18 |
| 3.2 การเตรียมขานอ้อยที่ใช้ในการศึกษา..... | 18 |
| 3.3 การผลิตถ่านไฮโดรจากขานอ้อยด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชัน..... | 19 |
| 3.4 การเตรียมถ่านไฮโดรตัดแปรด้วยเกลือของเหล็ก (Fe) เกลือของแคลเซียม (Ca) และเกลือของแมกนีเซียม (Mg)..... | 20 |
| 3.4.1 วิธีการเตรียมสาร..... | 20 |
| 3.4.2 วิธีการเติมสารตัดแปรลงบนถ่านไฮโดรจากขานอ้อย..... | 21 |
| 3.5 การศึกษาความสามารถในการกำจัดสารละลายออร์โธฟอสเฟต..... | 21 |
| 3.5.1 ชนิดของวัสดุที่ศึกษา..... | 21 |
| 3.5.2 วิธีเตรียมสารละลายสต็อกออร์โธฟอสเฟต..... | 22 |
| 3.5.3 ศึกษาความสามารถในการกำจัดฟอสเฟต..... | 22 |
| บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล..... | 23 |
| 4.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของถ่านไฮโดรจากขานอ้อย..... | 23 |
| 4.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของขานอ้อยและถ่านไฮโดร..... | 23 |
| 4.1.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้อง SEM..... | 24 |
| 4.1.3 หมู่ฟังก์ชันทางเคมีด้วยเครื่อง FT-IR..... | 24 |
| 4.1.4 ค่าความสามารถในการดูดซับเมทธิลีนบลู..... | 25 |
| 4.2 ผลของการตัดแปรถ่านไฮโดรด้วยเหล็ก แมกนีเซียม และแคลเซียม..... | 26 |
| 4.2.1 ลักษณะทางกายภาพ..... | 26 |
| 4.2.2 องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค XRF..... | 27 |
| 4.2.3 การศึกษาโครงสร้างทางเคมีด้วยเครื่อง FT-IR..... | 28 |
| 4.2.4 พีเอชที่ค่าประจุสุทธิเป็นศูนย์..... | 29 |
| 4.3 การกำจัดสารละลายออร์โธฟอสเฟต..... | 29 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... | 31 |
| 5.1 สรุปผลการวิจัย..... | 31 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ..... | 32 |
| เอกสารอ้างอิง..... | 33 |
| ภาคผนวก..... | 38 |
| ภาคผนวก ก..... | 39 |
| ภาคผนวก ข..... | 43 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 2.1 กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชัน..... | 4 |
| 2.2 โครงสร้างของเซลลูโลส..... | 7 |
| 2.3 โครงสร้างของลิกนิน..... | 7 |
| 2.4 โครงสร้างของเอมิเซลลูโลส..... | 8 |
| 2.5 โครงสร้างของแพนโตแซน..... | 8 |
| 2.6 ถ่านสีดำ..... | 9 |
| 2.7 ถ่านขาว..... | 10 |
| 2.8 ถ่านกัมมันต์..... | 10 |
| 2.9 ถ่านชีวภาพ..... | 11 |
| 2.10 ถ่านไฮโดร..... | 11 |
| 2.11 โครงสร้างของฟอสเฟต..... | 12 |
| 2.12 ปฏิกิริยาการณัฏยโทรฟิเคชัน..... | 13 |
| 2.13 ปฏิกิริยาการณัฏยชีปลาวาฬ..... | 13 |
| 3.1 เตาปฏิกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา..... | 20 |
| 4.1 ลักษณะทางกายภาพของชานอ้อยและถ่านไฮโดร..... | 23 |
| 4.2 ภาพถ่ายด้วยกล้อง SEM ของชานอ้อยและถ่านไฮโดร..... | 24 |
| 4.3 สเปกตรัม FT-IR ของชานอ้อยและถ่านไฮโดร..... | 25 |
| 4.4 ลักษณะทางกายภาพของถ่านไฮโดรและถ่านไฮโดรที่ดัดแปร..... | 26 |
| 4.5 สเปกตรัม FT-IR ของถ่านไฮโดรและถ่านไฮโดรดัดแปร..... | 28 |
| 4.6 เปรอ์เซ็นต์การกำจัดสารละลายออร์โธฟอสเฟตที่ระยะเวลาการทำปฏิกิริยาแตกต่างกัน..... | 30 |
| ข.1 กราฟเส้นตรงของ Methylene Blue Number ของชานอ้อยครั้งที่ 1..... | 46 |
| ข.2 กราฟเส้นตรงของ Methylene Blue Number ของชานอ้อยครั้งที่ 2..... | 47 |
| ข.3 กราฟเส้นตรงของ Methylene Blue Number ของชานอ้อยครั้งที่ 3..... | 47 |
| ข.4 กราฟเส้นตรงของ Methylene Blue Number ของถ่านไฮโดรครั้งที่ 1..... | 48 |
| ข.5 กราฟเส้นตรงของ Methylene Blue Number ของถ่านไฮโดรครั้งที่ 2..... | 48 |
| ข.6 กราฟเส้นตรงของ Methylene Blue Number ของถ่านไฮโดรครั้งที่ 6..... | 49 |
| ข.7 กราฟมาตรฐานฟอสเฟต..... | 52 |
| ข.8 กราฟมาตรฐานเมทิลีนบลู..... | 53 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ฟอสฟอรัส (Phosphorus, P) มีส่วนสำคัญต่อจุดเริ่มต้นของสายใยอาหาร (food webs) ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโตของผู้ผลิต (producer) ซึ่งเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ โดยเฉพาะสาหร่าย (algae) และแพลงก์ตอนพืช (phytoplankton) ในทางกลับกันการเพิ่มปริมาณฟอสฟอรัสที่มากเกินไปลงสู่แหล่งน้ำทำให้สมดุลในวัฏจักรของฟอสฟอรัส (phosphorus cycle) ในแหล่งน้ำเปลี่ยนแปลงไป จะเกิดการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วของสาหร่ายพืชน้ำ และแพลงก์ตอน (excessive growth) อาจนำไปสู่ปัญหามลพิษทางน้ำได้มากที่สุด การควบคุมปริมาณฟอสฟอรัสในน้ำหึ่งก่อนระบายลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติจึงเป็นแนวทางที่นิยมใช้ในการจัดการควบคุมมลพิษทางน้ำที่เกิดจากฟอสฟอรัส (วสันต์, 2556)

การดูดซับจัดเป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถนำมาใช้บำบัดฟอสฟอรัสในน้ำ ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) จัดเป็นตัวดูดซับที่นิยมใช้ในการกำจัดสารเจือปนในน้ำ เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีพื้นผิวสูงและมีความเป็นรูพรุนมาก ทำให้มีสมบัติในการดูดซับสารเจือปนในน้ำ โดยเฉพาะสารประกอบอินทรีย์ได้เป็นอย่างดี จากรายงานสถิติของกรมศุลกากรพบว่าประเทศไทยมีการนำเข้าถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลา 10 ปี ที่ผ่านมา โดยในปีพ.ศ. 2551 มีสถิติการนำเข้าถ่านกัมมันต์ในปริมาณ 3,853,152 กิโลกรัม คิดเป็นมูลค่า 244,428,846 บาท ปริมาณการนำเข้าถ่านกัมมันต์มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 11,099,079 กิโลกรัม ในปี พ.ศ. 2561 คิดเป็นมูลค่าการนำเข้า 794,771,508 บาท สะท้อนให้เห็นว่ามีการใช้งานถ่านกัมมันต์อย่างกว้างขวางและมีแนวโน้มขยายตัวเพิ่มขึ้นภายในประเทศ (กรมศุลกากร, 2562) ประกอบกับการนำเข้ามาจากต่างประเทศย่อมมีผลต่อราคาจำหน่ายของถ่านกัมมันต์ ซึ่งส่งผลกระทบต่อค่าใช้จ่ายของกระบวนการที่นำถ่านกัมมันต์ไปใช้ ตัวอย่างเช่นกระบวนการบำบัดน้ำด้วยการดูดซับ ทำให้การพัฒนาถ่านกัมมันต์หรือตัวดูดซับที่หาได้ง่าย ราคาถูก จึงเป็นเรื่องที่ยังคงได้รับความสนใจ

ชีวมวลจัดเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่เกิดขึ้นจำนวนมากทั้งในประเทศและต่างประเทศ จากข้อมูลของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน ปี พ.ศ. 2556 ประเทศไทยมีปริมาณวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรทั้งหมดประมาณ 134,134,102.21 ตัน และยังไม่มีการนำไปใช้ประโยชน์อีก 62,844,420.53 ตัน หรือประมาณ 47% ของปริมาณชีวมวลที่เกิดขึ้นทั้งหมด (กระทรวงพลังงาน, 2556) การนำชีวมวลที่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาใช้ประโยชน์ จึงเป็นแนวทางการจัดการชีวมวลที่สำคัญ การแปรรูปชีวมวลให้กลายเป็นถ่านหรือวัสดุที่มีคาร์บอนซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญเพื่อใช้เป็นตัวดูดซับเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะสามารถนำมาปฏิบัติเพื่อก่อให้เกิดมูลค่าเพิ่มกับชีวมวล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการสงวนสิทธิ์ในเนื้อหาและข้อมูลอื่น ๆ ที่ปรากฏในเอกสารฉบับนี้ หากมีการนำเอกสารฉบับนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ่านไฮโดร (Hydrochars) เป็นถ่านที่ได้จากการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลโดยใช้ความร้อนร่วมกับน้ำภายใต้แรงดันและอุณหภูมิสูง เรียกระบวนการดังกล่าวว่า ไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนิเซชัน (Hydrothermal carbonization, HTC) ถ่านชนิดนี้ได้รับความสนใจในการนำมาใช้ประโยชน์ทางสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะในเรื่องการดูดซับ เนื่องจากสามารถใช้ชีวมวลที่มีความชื้นสูงเป็นวัตถุดิบในการผลิตได้ (กวิรินทร์, 2555) นอกจากนี้ โครงสร้างของผลิตภัณฑ์ที่ได้ยังมีหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นส่วนประกอบอยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้ถ่านไฮโดรมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) ได้ดี สามารถดูดซับแคตไอออนอย่างโลหะหนักได้เป็นอย่างดี แต่ยังมีข้อจำกัดที่สำคัญคือ มีสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออนลบได้ต่ำ ทำให้จำเป็นต้องมีการปรับปรุงความสามารถในการดูดซับฟอสเฟตที่มีประจุเป็นลบก่อนนำมาใช้ในการกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำ แนวทางหนึ่งที่ยิยมใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของถ่านเพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับฟอสเฟต คือ การเติม/ตรึงสารประกอบออกไซด์หรือไฮดรอกไซด์ของโลหะลงบนพื้นผิวของวัสดุดูดซับ งานวิจัยของ Ren et al. (2014) ได้แสดงให้เห็นว่า การเติมเฟอร์ริกออกไซด์ลงบนถ่านชีวภาพเพิ่มความสามารถในการกำจัดฟอสเฟตได้ถึง 0.963 มิลลิกรัมต่อกรัม เมื่อเทียบกับถ่านชีวภาพที่ไม่ได้ดัดแปร งานวิจัยของ Takaya et al. (2016) แสดงให้เห็นว่า การเติมแมกนีเซียมจะช่วยเพิ่มความสามารถในการกำจัดฟอสฟอรัสของถ่านชีวภาพได้อย่างไรก็ตามพบว่า การศึกษาการดัดแปรโครงสร้างของถ่านไฮโดรด้วยสารประกอบออกไซด์หรือไฮดรอกไซด์ของเหล็กหรือแมกนีเซียมมีค่อนข้างจำกัด โครงการพิเศษนี้จึงได้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาการผลิตถ่านไฮโดรจากขานอ้อย พร้อมทั้งศึกษาแนวทางในการปรับปรุงความสามารถในการกำจัดฟอสเฟตของถ่านไฮโดรด้วยการโหลดสารประกอบออกไซด์หรือไฮดรอกไซด์ของแคลเซียม แมกนีเซียม และเหล็ก

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาการเตรียมถ่านไฮโดรจากขานอ้อยด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนิเซชัน และศึกษาการดัดแปรโครงสร้างของถ่านไฮโดรเพื่อให้สามารถกำจัดฟอสเฟตในน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ขานอ้อยที่ใช้ในการศึกษาจะผ่านการบดและร่อนให้มีขนาดไม่เกิน 70 เมช อบอุ่นความชื้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง
- 2) สมบัติของขานอ้อยที่ทำการวิเคราะห์ได้แก่ ธาตุที่เป็นองค์ประกอบ, ลักษณะทางสัณฐานวิทยา, หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว, ค่าการดูดซับเมทธิลีนบลู (MBN) และค่าพีเอชที่ทำให้ประจุสุทธิเป็นศูนย์ (pH_{pzc})

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) การผลิตถ่านไฮโดรจากขานอ้อยด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในเซชัน

- เตาปฏิกรณ์ที่ใช้ คือ PARR system บริษัท Parr Instrument รุ่น 4848 เป็นเตาปฏิกรณ์แบบปิด ปริมาตร 1 ลิตร ที่ความดัน 28-32 บาร์

- สภาวะที่ใช้ผลิต คือ อุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์เท่ากับ 230 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยานาน 1 ชั่วโมง และอัตราส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตรของชีวมวลต่อน้ำเท่ากับ 1: 8

- สมบัติของถ่านไฮโดรที่วิเคราะห์เป็นไปตามระบุไว้ในข้อ 2)

4) การเตรียมถ่านไฮโดรตัดแปรด้วยเกลือของเหล็ก (Fe) แคลเซียม (Ca) และแมกนีเซียม (Mg)

- ตัวแปรต้น คือ ชนิดของสารละลายที่ใช้ในการตัดแปร ได้แก่ $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, สารละลายผสมระหว่าง $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, CaCl_2 , MgCl_2

- สมบัติของถ่านไฮโดรที่วิเคราะห์เป็นไปตามระบุไว้ในข้อ 2)

5) การทดสอบความสามารถในการกำจัดฟอสเฟตในน้ำ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นแนวทางในการพัฒนาตัวดูดซับเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสีย
2. เป็นแนวทางในการจัดการและเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

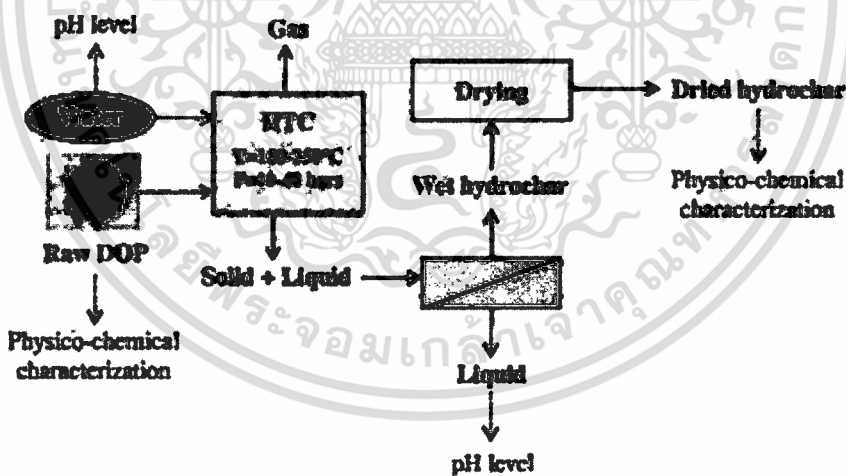
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน

ไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน (Hydrothermal carbonization, HTC) กระบวนการทางเคมี ความร้อนที่ใช้ในการเปลี่ยนชีวมวลที่มีความชื้นสูงให้กลายเป็นของแข็งที่มีสารประกอบคาร์บอน เป็นองค์ประกอบหลักหรือที่เรียกว่าถ่านไฮโดร (Hydrochar) โดยใช้ น้ำเป็นตัวกลางในการทำปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิระหว่าง 200 – 300 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดัน 20 – 60 บาร์ เป็นเวลาหลายชั่วโมง (กวินทร์, 2555) ทำให้ชีวมวลมีประสิทธิภาพในการนำไปใช้งานสูงขึ้น ถือเป็น การเพิ่มมูลค่าให้ชีวมวล ซึ่งองค์ประกอบและคุณสมบัติของถ่านไฮโดรขึ้นอยู่กับสภาวะที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชันและชนิดของชีวมวลที่จะนำมาผลิตเป็นถ่านไฮโดร นอกจากนี้ถ่านไฮโดรที่ผลิตขึ้นสามารถนำไปใช้งานได้หลายอย่าง เช่น ใช้เป็นเชื้อเพลิง ตัวดูดซับ ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดิน เป็นต้น



รูปที่ 2.1 กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน

ที่มา: Missaoui et al. (2017)

2.1.1 วัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน (กวินทร์, 2555)

ชีวมวล (Biomass) คือ สารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้ โดยที่ชีวมวลนั้นประกอบด้วยธาตุหลักๆ คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน รวมทั้งมีปริมาณของไนโตรเจนและธาตุอื่นๆ อีกเล็กน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับอาจารย์และบุคลากรในมหาวิทยาลัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1.1 สมบัติของชีวมวล

ชีวมวลมีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ คาร์โบไฮเดรต และ ลิกนิน

ก คาร์โบไฮเดรต คือ สารจำพวก แซ็กคาไรด์, เซลลูโลส, แป้ง และเฮมิเซลลูโลส

- เซลลูโลส เป็นเส้นใยพอลิแซ็กคาไรด์ ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญของผนังเซลล์ของพืช และมีอยู่มาก เซลลูโลสเป็นตัวอย่างที่ไม่ละลาย และไม่ค่อยทำปฏิกิริยา โดยเฉพาะไฮโดรไลซิส

- แป้ง เป็นเม็ดพอลิแซ็กคาไรด์ ถูกเก็บไว้ในส่วนต่างๆของพืช ได้แก่ เมล็ด, ราก, หัว และลำต้น ประกอบด้วย อะไมโลส 10-20% ซึ่งละลายน้ำ และอะไมโลเพคติน 80-90% ซึ่งไม่ละลายน้ำ

- เฮมิเซลลูโลส เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ ที่พบอยู่ร่วมกับเซลลูโลส แตกต่างกันไปเป็น amorphous และมีมวลโมเลกุลต่ำกว่า จึงละลายได้ดีกว่าเซลลูโลส

ข ลิกนิน เป็นสารกลุ่มสำคัญที่มีในชีวมวล เป็นองค์ประกอบพิเศษของผนังของ woody cell ทำหน้าที่เป็นกาวเชื่อมเกาะ ทำให้เกิดความแข็งแรงเชิงกล เป็น amorphous และละลายได้ดีกว่าเซลลูโลส สามารถแยกจากเนื้อไม้ได้โดยใช้ ใช้น้ำ ลิกนินต้านทานปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และแบคทีเรียไม่สามารถย่อยได้

2.2 ชานอ้อย

อ้อย มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Saccharum officinarum* เป็นพืชสกุล *Saccharu* เช่นเดียวกับ ข้าวฟ่าง ข้าวโพด และหญ้าจอร์นสัน มีถิ่นกำเนิดในเขตร้อนของทวีปเอเชีย เจริญเติบโตได้ดีในสภาพอากาศร้อน แสงแดดจัด และชุ่มชื้น เป็นพืชปลูกง่าย สามารถเก็บเกี่ยวได้หลายครั้ง มีความสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจและอุตสาหกรรม พันธุ์อ้อยที่นิยมปลูกในประเทศไทยแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ อ้อยชนิดเปลือกแข็งใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาลและอ้อยชนิดเปลือกอ่อนใช้ขบเคี้ยวหรือทำเป็นน้ำอ้อย (เกษม, 2523) เมื่อต้นอ้อยผ่านการหีบกดน้ำอ้อยออก เพื่อจุดประสงค์การใช้งานหลักแล้วจะเหลือเศษลำต้นอ้อยที่เรียกว่า ชานอ้อย (Bagasse)

ปัจจุบันประเทศไทยเป็นผู้ผลิตและส่งออกอ้อยเป็นอันดับ 2 ของโลก มีพื้นที่การเพาะปลูกอ้อยประมาณ 11.54 ล้านไร่ มีผลผลิตอ้อย 134.93 ล้านตัน และผลผลิตน้ำตาลทราย 14.71 ล้านตัน จำหน่ายภายในประเทศ 2.60 ล้านตัน จำหน่ายส่งออก 12.11 ล้านตัน การผลิตในช่วง 7 ปีที่ผ่านมา มีแนวโน้มขยายตัวเพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 6.20 ต่อปี โดยเป็นการขยายตัวตามพื้นที่ปลูกที่ขยายตัว เฉลี่ยร้อยละ 4.56 ต่อปี ทั้งนี้ในปี 2560 และ 2561 มีพื้นที่ปลูกอ้อย จำนวน 11.54 ล้านไร่ ผลผลิตอ้อย 134.93 ล้านตัน ผลผลิตน้ำตาลทราย 14.71 ล้านตัน มีกากน้ำตาลและชานอ้อย เป็นผลพลอยได้ที่ 5.49 ล้านตัน และ 37.78 ล้านตัน ตามลำดับ (สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย, 2561)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 แสดงการคาดการณ์ปริมาณอ้อยสดและชานอ้อยระหว่างปี พ.ศ. 2557 - พ.ศ. 2569

| ปี พ.ศ. | ปริมาณการเพิ่มขึ้นของอ้อย | | ปริมาณชานอ้อย |
|---------|---------------------------|--------|---------------|
| | ตัน | ร้อยละ | ตัน |
| 2557 | 103,665,750.46 | - | 30,011,234.76 |
| 2558 | 105,959,057.99 | 2.21 | 30,675,147.29 |
| 2559 | 112,875,421.62 | 6.53 | 32,677,434.56 |
| 2560 | 119,791,785.26 | 6.13 | 34,679,721.83 |
| 2561 | 126,708,148.89 | 5.77 | 36,682,009.10 |
| 2562 | 133,624,512.53 | 5.46 | 38,684,296.38 |
| 2563 | 140,540,876.17 | 5.18 | 40,686,583.65 |
| 2564 | 147,457,239.80 | 4.92 | 42,688,870.92 |
| 2565 | 154,373,603.44 | 4.69 | 44,691,158.20 |
| 2566 | 161,289,967.08 | 4.48 | 46,693,445.47 |
| 2567 | 168,206,330.71 | 4.29 | 48,695,732.74 |
| 2568 | 175,122,694.35 | 4.11 | 50,698,020.01 |
| 2569 | 182,039,057.99 | 3.95 | 52,700,307.29 |

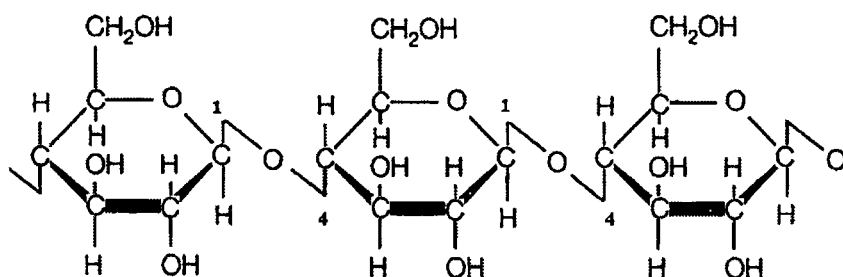
ที่มา: กระทรวงพลังงาน (2558)

2.2.1 องค์ประกอบของชานอ้อย

2.2.1.1 เซลลูโลส (Cellulose)

สารประกอบอินทรีย์ประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharides) เชิงเส้นตรงสายยาวของน้ำตาลกลูโคส โดยที่แต่ละสายจะเรียงขนานกันไปจากพันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นระหว่างสาย มีสูตรโมเลกุลทั่วไป คือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ เป็นโครงสร้างหลักในผนังเซลล์ของพืช โดยจะอยู่ร่วมกับเฮมิเซลลูโลส และเพกทิน เซลลูโลสจัดเป็นเส้นใยอาหาร (dietary fiber) ชนิดที่ไม่ละลายในน้ำและไม่สามารถย่อยได้ด้วยเอนไซม์ในระบบทางเดินอาหารของสิ่งมีชีวิตประเภทเดียว มีจำนวนกลูโคสที่มาต่อกันหรือ Degree of polymerization (Dp) จะมีประมาณ 3,000 หน่วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

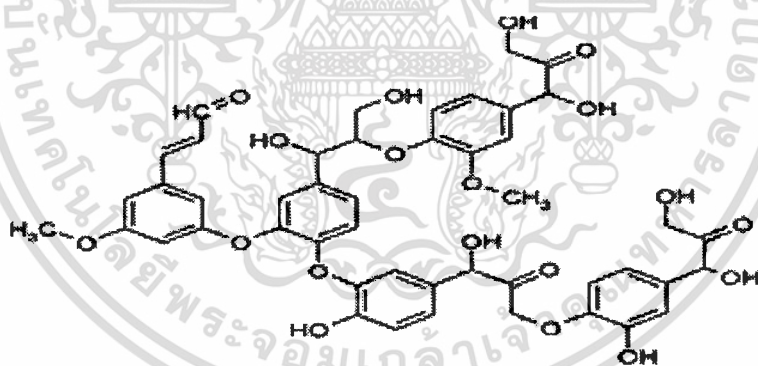


รูปที่ 2.2 โครงสร้างของเซลลูโลส

ที่มา: พิมพ์เพ็ญ และนิธิยา (2562)

2.2.1.2 ลิกนิน (lignin)

คาร์โบไฮเดรต (carbohydrate) ประเภทใยอาหาร (dietary fiber) ที่ไม่ให้พลังงาน มีโครงสร้างทางเคมีเป็นวงแหวนอะโรมาติกขนาดใหญ่ ประกอบด้วยวงแหวนเบนซินของหมู่ฟีนอล ทั้งแบบที่มีและไม่มีหมู่เติมหมู่เมทิล ไม่ละลายในน้ำกรดและด่างแก่ ไม่มีสมบัติยืดหยุ่น จึงทำให้โครงสร้างของพืชมีความแข็งแรง คงทน ร่างกายมนุษย์ไม่สามารถย่อยสลายได้ และไม่มีสัตว์ชนิดใดสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของลิกนิน

ที่มา: สุรีย์วัลย์ (2560)

2.2.1.3 เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose)

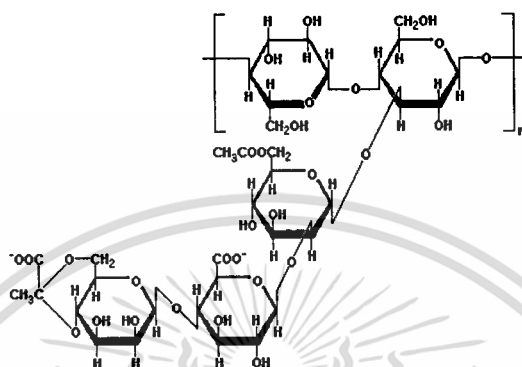
จัดเป็นคาร์โบไฮเดรต (carbohydrate) ภายในโมเลกุลประกอบด้วยน้ำตาลหลายชนิด (heteropolysaccharide) ซึ่งมีทั้งน้ำตาลไซโลส (xylose) แมนโนส (mannose)

กาแล็กโทส (galactose) เป็นโซ่หลักและมีน้ำตาลอย่างอะราบินอส (arabinose) กรดกลูคูโรนิก

(glucuronic acid) มาต่อกันเป็นโซ่สาขาหรือโซ่แขนง จัดเป็นเส้นใยอาหาร (dietary fiber) ที่ไม่

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ละลายน้ำ ไม่สามารถย่อยได้ด้วยเอนไซม์ในระบบทางเดินอาหารของมนุษย์และสัตว์กระเพาะเดี่ยว สามารถละลายได้ในสารละลายต่างเจือจาง สมบัติทางกายภาพที่สำคัญ คือ มีความสามารถในการอุ้มน้ำ (water holding capacity) และแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวก (cation exchange) เมื่ออยู่ในกระเพาะอาหารและลำไส้ของมนุษย์ (พิมพ์เพ็ญและนิธิยา, 2562)

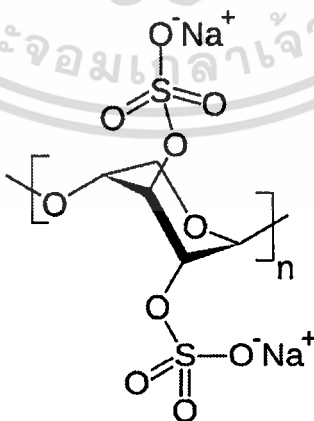


รูปที่ 2.4 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส

ที่มา: Vishakha et al. (2012)

2.2.1.4 เพนโตแซน

เป็นอีกรูปหนึ่งของเฮมิเซลลูโลส มีหน่วยของน้ำตาลเพนโตสมากกว่ากลูโคส มีค่า Dp ประมาณ 40 หน่วย มีความสามารถในการละลายน้ำ เมื่อสกัดเพนโตแซนจากขานอ้อย โดยใช้การไฮโดไลซิสด้วยสารละลายกรด จะได้ผลผลิตออกมาเป็นเฟอร์ฟูรอลหรือไซลิทอล ซึ่งเป็นสารเคมีที่มีราคาสูง (วิทยา และคณะ, 2554)



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของเพนโตแซน

ที่มา: Wikipedia, 2019

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 ประโยชน์ของขานอ้อย

ขานอ้อยเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่เกิดขึ้นในปริมาณที่สูงถึง 28,026,761.54 ตัน (กระทรวงพลังงาน, 2556) ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากมาย เช่น ใช้เป็นเชื้อเพลิงผลิตไอน้ำ และกระแสไฟฟ้า ใช้ผลิตวัสดุก่อสร้างโดยอาศัยกาก ใช้ผลิตเยื่อกระดาษ ใช้เป็นอาหารสัตว์ ใช้ทำปุ๋ยหมัก ใช้ผลิตบรรจุภัณฑ์อาหาร เป็นต้น

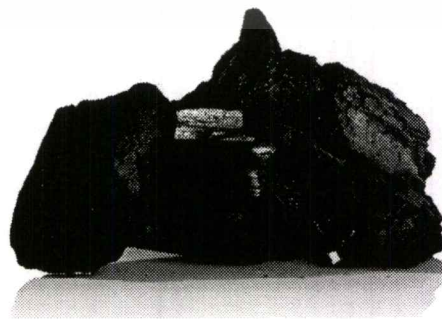
2.3 ถ่าน

ถ่าน คือ ไม้ที่นำไปผ่านกระบวนการเผาในสภาวะที่ปราศจากก๊าซออกซิเจน (O_2) จนเกิดการระเหยและสลายตัวออกไปของสารเฉพาะตัวในเนื้อไม้ เช่น เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส จนเหลือแต่สารประกอบที่เป็นคาร์บอน (Sub-aurairat, 2019)

2.3.1 ประเภทของถ่าน

การผลิตถ่านในปัจจุบันสามารถแบ่งถ่านออกได้เป็น 5 ประเภท ซึ่งมีกระบวนการเผาถ่านที่คล้ายคลึงกันแต่มีข้อแตกต่างอยู่เล็กน้อย ส่งผลให้คุณสมบัติในการใช้งานและมาตรฐานในการตรวจสอบถ่านทั้ง 5 ประเภท มีความแตกต่างกันไป ซึ่งจำแนกประเภทและวิธีการผลิตได้ ดังนี้

2.3.1.1 ถ่านสีดำ (Black or Soft Charcoal) จะใช้อุณหภูมิในการเผาอยู่ที่อุณหภูมิไม่เกิน 950 องศาเซลเซียส ในช่วงการทำถ่านให้เย็น ภายในเตาโดยการปิดเตาไว้อุณหภูมิของถ่านจะเย็นตัวลง เมื่ออุณหภูมิลดลงไปที่ 50 องศาเซลเซียส แล้วก็สามารถเปิดช่องเตาเพื่อนำถ่านออกจากเตา ได้ระยะเวลาในการเผาถ่านดำจะนานกว่าถ่านขาว เพราะต้องมีการรอให้ถ่านเย็นตัวลงภายในเตาก่อนนำออกมา (Sub-aurairat, 2019) ซึ่งถ่านสีดำสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากมาย เช่น ใช้เป็นเชื้อเพลิงในการประกอบอาหารและสร้างความอบอุ่น ใช้เป็นวัตถุดิบผลิตสารเคมี ใช้ผสมอาหารสัตว์ ใช้ดูดกลิ่นไม่พึงประสงค์และความชื้น ใช้เป็นสารปรับปรุงดินทำให้ดินร่วนซุย ใช้ในการทำปุ๋ยหมัก เป็นต้น



รูปที่ 2.6 ถ่านสีดำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและข้อมูลไปถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่มา: Sanook, 2016

2.3.1.2 ถ่านขาว (White or Hard Charcoal) จะใช้อุณหภูมิในการเผาสูงมากถึง 1,000 องศาเซลเซียส ขณะเดียวกันก็จะนำถ่านที่กำลังลุกไหม้อยู่ขึ้นออกจากเตาและใช้ขี้เถ้าผสมกับเศษดินและน้ำประมาณ 10-20 % มาโรยทับถ่านที่นำออกจากเตาเป็นตัวหยุดความร้อนของถ่านอย่างฉับพลัน ตัวถ่านจึงมีขี้เถ้าติดอยู่ทำให้มีสีขาวขึ้น ขี้เถ้าที่จับอยู่ที่ผิวของถ่านจะเป็นตัวช่วยให้จุดติดไฟง่าย โดยปกติแล้วถ่านขาวจะจุดติดไฟยากแต่เมื่อติดแล้วจะอยู่ได้นาน (Sub-aurairat, 2019) ซึ่งถ่านขาวสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากมาย เช่น ใช้ทำน้ำแร่สำหรับอาบ ใช้ขจัดกลิ่นเหม็นที่มีค่า ใช้ในการปรุงแต่งรสชาติของอาหารและเครื่องดื่ม ใช้ในการประกอบอาหารปิ้งย่างทำให้อาหารมีรสชาติดี เป็นต้น



รูปที่ 2.7 ถ่านขาว

ที่มา: Detudom Charcoal Group, 2019

2.3.1.3 ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) ผลิตจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ด้วยกระบวนการย่อยสลายด้วยความร้อนที่ไม่ใช้ออกซิเจนและใช้อุณหภูมิในการเผาอยู่ในช่วงระหว่าง 900 - 1,100 องศาเซลเซียส กระบวนการย่อยสลายดังกล่าวเรียกว่า กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว (fast pyrolysis) (สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2560) ซึ่งถ่านกัมมันต์สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากมาย เช่น ใช้ในอุตสาหกรรมตัวดูดซับสารพิษ ใช้เป็นไส้กรองของหน้ากากนิรภัย ใช้ในการทดลองวิจัยเพื่อแยกและเตรียมสารเคมี ใช้เป็นไส้กรองในการกำจัดกลิ่น สี กรดบางชนิด สารคลอรีน โลหะหนักบางชนิด และยาฆ่าแมลง เป็นต้น

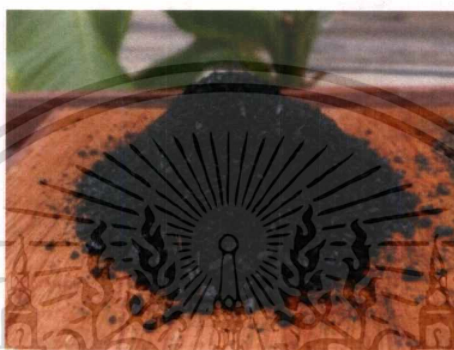


รูปที่ 2.8 ถ่านกัมมันต์

ที่มา: โปสเตอร์ทูเดย์, 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

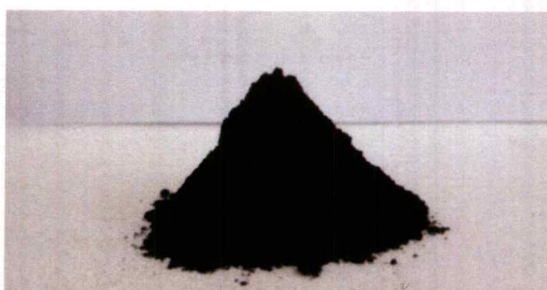
2.3.1.4 ถ่านชีวภาพ (Biochar) สามารถผลิตได้จากชีวมวลหรือวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร โดยกระบวนการย่อยสลายด้วยความร้อนที่ไม่ใช้ออกซิเจนและใช้อุณหภูมิในการเผาอยู่ในช่วงระหว่าง 10 - 500 องศาเซลเซียส กระบวนการย่อยสลายนี้นี้เรียกว่า กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า (slow pyrolysis) (สถาบันส่งเสริมการสนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2560) ซึ่งถ่านชีวภาพสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากมาย เช่น ใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทน ใช้ปรับปรุงคุณภาพดินและเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร ใช้กักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากบรรยากาศลงสู่ดินได้ในระยะยาว เป็นต้น



รูปที่ 2.9 ถ่านชีวภาพ

ที่มา: Nanagarden, 2018

2.3.1.5 ถ่านไฮโดร (Hydrochar) ผลิตจากวัตถุดิบตั้งต้นเป็นสารประกอบอินทรีย์ประเภทชีวมวลผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน (HTC) โดยมีน้ำเป็นตัวกลางในการทำปฏิกิริยาภายใต้อุณหภูมิ 200-300 องศาเซลเซียส และความดัน 20-60 บาร์ (กวินทร์, 2555) ในเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งคุณสมบัติของถ่านไฮโดรที่ผลิตได้จะขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้ชนิดของชีวมวลเริ่มต้น ความดัน อุณหภูมิ ระยะเวลาในการเผา ตัวกลางในการทำปฏิกิริยาที่สามารถเลือกใช้ได้ทั้งน้ำ กรดต่าง และเกลือถ่านไฮโดรสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ ทั้งในกระบวนการผลิตการเกษตรและอุตสาหกรรมเคมี เช่น ใช้เป็นเชื้อเพลิง ตัวเก็บพลังงาน ปรับปรุงคุณภาพดิน ใส่กรองน้ำ และตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น

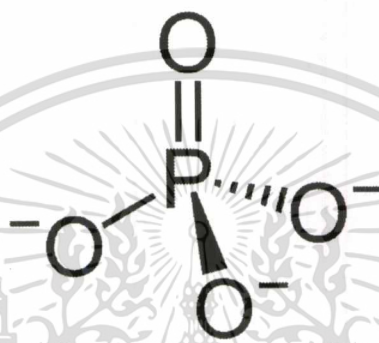


รูปที่ 2.10 ถ่านไฮโดร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแบบหรือลอกเลียนแบบข้อมูลหรืออ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ฟอสเฟต (Phosphate)

ฟอสเฟตเป็นสารประกอบของธาตุฟอสฟอรัส (P) ที่พบมากในธรรมชาติ ทั้งในรูปที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ ฟอสเฟตที่พบในแหล่งน้ำ ได้แก่ ออร์โธฟอสเฟต และโพลีฟอสเฟต ปริมาณฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำจะต้องมีความเหมาะสมเนื่องจากเป็นสารอาหารที่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืช หากมีปริมาณมากเกินไปจะส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมและระบบนิเวศของสิ่งมีชีวิตได้ เราสามารถนำฟอสเฟตไปใช้ประโยชน์ได้มากมาย เช่น ใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตปุ๋ย ใช้ผลิต Sodium tripolyphosphate ส่วนประกอบสำคัญของผงซักฟอก ใช้ในผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ เป็นต้น



รูปที่ 2.11 โครงสร้างของฟอสเฟต

ที่มา: Wikipedia, 2019

2.5 ปัญหามลพิษทางน้ำที่เกิดจากฟอสฟอรัส

สารประกอบฟอสฟอรัสในปริมาณมากที่เกิดจากกิจกรรมต่างๆของมนุษย์ เช่น การเกษตร ชุมชน และโรงงานอุตสาหกรรมที่ปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำ เป็นสาเหตุของการเกิดปัญหามลพิษในแหล่งน้ำ ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาทางลบมากมายทั้งทางด้านเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อม (พงศศักดิ์ และรัฐชา, 2557)

2.5.1 ปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน (eutrophication)

ยูโทรฟิเคชันเป็นปรากฏการณ์ที่มักเกิดในแหล่งน้ำนิ่งอย่างทะเลสาบหรืออ่างเก็บน้ำ เกิดจากการที่สาหร่ายได้รับปริมาณฟอสฟอรัสเป็นสารอาหาร และเกิดการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว จนทำให้มีสีเขียวคล้ำ บดบังการส่องผ่านของแสงอาทิตย์ ลดความสามารถในการละลายของก๊าซออกซิเจนสู่แหล่งน้ำลดระดับคุณภาพแหล่งน้ำ ทำให้น้ำเกิดรสและกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ (สำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 6 นนทบุรี, 2554)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 ปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน

ที่มา: LG Sonic, 2016

2.5.2 ปรากฏการณ์ซึปลาวาฬ (red tide)

เป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็วของแพลงก์ตอนบางชนิดจนทำให้น้ำทะเลเปลี่ยนสีไป เป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็วของแพลงก์ตอนบางชนิด จนทำให้น้ำทะเลเปลี่ยนสีไปส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำลดลงจนอาจขาดแคลนปลาบางชนิดไม่สามารถดำรงชีพได้ ปิดกั้นการส่องผ่านของแสงอาทิตย์ลงสู่แหล่งน้ำทำให้พืชที่อยู่ใต้น้ำตายเนื่องจากไม่สามารถรับแสงอาทิตย์เพื่อสังเคราะห์ด้วยแสง และสร้างอาหารได้ (ฐานข้อมูลความรู้ทางทะเล, 2562)



รูปที่ 2.13 ปรากฏการณ์ซึปลาวาฬ

ที่มา: กรวิภา, 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 กระบวนการดูดซับ (ภุขงค์, 2558)

กระบวนการดูดซับเป็นปรากฏการณ์ที่สารถูกดูดซับในสภาวะที่เป็นของเหลวหรือแก๊สมาเกาะกับพื้นผิวที่สารดูดซับที่เป็นของแข็ง ลักษณะของการดูดซับแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ซึ่งทั้งสองลักษณะนี้มีแรงกระทำต่อพื้นผิวของสารดูดซับในรูปแบบที่แตกต่างกัน ดังนี้

1. การดูดซับแบบกายภาพ (Physisorption) คือ การดูดหรือดึงสารถูกดูดซับไว้บนผิวของตัวดูดซับด้วยแรงกายภาพ ซึ่งได้แก่ แรงดึงดูดระหว่างขั้วแรงดึงดูดระหว่างประจุ และแรงดึงดูดระหว่างมวล อาจเกิดจากชนิดหนึ่งหรือหลายชนิดรวมกัน โดยจะเกิดการดูดซับได้ดี ณ อุณหภูมิปกติ และเกิดได้ดีมากยิ่งขึ้น ณ อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิบรรยากาศ สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งบนผิวของตัวดูดซับโดยตรง เกิดขึ้นบนชั้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับที่สะสมบนผิวของตัวดูดซับแล้ว ซึ่งไม่จำกัดจำนวนโมเลกุลของสารถูกดูดซับที่ซ้อนทับกันเรียกรวมการดูดซับประเภทนี้ว่า การดูดซับหลายชั้น (Multilayer Adsorption)

2. การดูดซับแบบเคมี (Chemisorptions) คือ การเกิดพันธะเคมีหรือการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับในลักษณะเดียวกันกับการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี การดูดซับประเภทนี้จึงต้องการพลังงานกระตุ้นเช่นเดียวกับการเกิดปฏิกิริยาเคมีทั่วไป ดังนั้นการดูดซับจึงมักเกิดขึ้นได้ดีหรือเกิดได้เร็ว ณ อุณหภูมิสูงๆ และการดูดซับจะเกิดขึ้นเฉพาะบนผิวของตัวดูดซับเท่านั้นเรียกรวมการดูดซับประเภทนี้ว่า การดูดซับชั้นเดียว (Monolayer Adsorption)

2.6.1 ประเภทของตัวดูดซับ (นิสาพร และคณะ, 2559)

1. สารอินทรีย์ เช่น ดินเหนียวต่างๆ ซิลิกาแกมมันต์ ถ่านกระดูก หรือสินแร่จำพวกอลูมิเนียม ตัวดูดซับสารอินทรีย์มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ $50-200 \text{ m}^2/\text{g}$
2. ถ่านแกมมันต์ ตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ $500-1,400 \text{ m}^2/\text{g}$ เป็นตัวดูดซับที่มีการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวางในด้านต่างๆ เช่น ฟอกสี กำจัดกลิ่น กำจัดตะกอนในโรงเบียร์
3. สารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารแลกเปลี่ยนไอออน (เรซิน) ชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อกำจัด สารอินทรีย์ต่างๆ สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ $50-200 \text{ m}^2/\text{g}$
4. วัสดุชีวภาพ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นของเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น ชีลื้อย ไคโตซาน กากกาแฟ กากชา กากถั่วเหลือง ถั่วแกลบดำ
5. สารดูดซับชีวภาพ ได้แก่ เอนไซม์ต่างๆ เซลล์แบคทีเรีย

2.6.2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ (ประสิทธิ์ชัย และคณะ, 2556)

1. ขนาดและพื้นที่ผิวของการดูดซับ (Size and Surface Area) มีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะ อัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของตัวดูดซับ และพื้นที่ผิวของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวดูดซับ มีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ (Adsorption Capacity) อัตราการดูดซับจะเป็นสัดส่วนผกผันกับเส้นผ่านศูนย์กลางในการดูดซับเมื่อตัวดูดซับนั้น

2. ลักษณะของสารถูกดูดซับ (Natural of Adsorption) สิ่งที่สำคัญประการหนึ่งในการดูดซับ คือ ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลาย การดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายมีค่าลดลง

3. อัตราเร็วการปั่นกวน (Mixing Speed) อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับ การขนส่งโมเลกุลของระบบ ซึ่งจัดว่าเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราเร็วของการดูดซับ ขั้นตอนนี้ ประกอบด้วย การแพร่ผ่านฟิล์ม (Film Diffusion) และการแพร่เข้าสู่โพรง (Pore Diffusion) ซึ่งแล้วแต่การปั่นกวนของระบบถ้ามีการปั่นกวนต่ำฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบด้วยสารดูดซับจะมีความหนามาก ดังนั้นการแพร่เข้าสู่โพรงจะเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

4. ช่วงระยะเวลาการสัมผัส (Contact Time) เวลาสัมผัสเป็นอีกปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ ซึ่งระยะเวลาการสัมผัสที่ใช้จะต้องเหมาะสม เพื่อจะทำให้เกิดประสิทธิภาพในการดูดซับที่ดีที่สุด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวดูดซับและสารถูกดูดซับ

5. ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ค่าพีเอชของสารละลายเป็นปัจจัยที่สำคัญของการดูดซับ เนื่องจากประสิทธิภาพของการดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุดที่ค่าพีเอชที่เหมาะสม

6. อุณหภูมิ กระบวนการดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic) ดังนั้นการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ความสามารถในการดูดซับมีแนวโน้มลดลง แต่การดูดซับของเหลวนั้น การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมีน้อยมาก เนื่องจากของเหลวมีค่าความจุความร้อนสูงการเพิ่มอุณหภูมิทำให้เกิดการกระตุ้นหมู่ฟังก์ชัน ซึ่งอยู่บนพื้นผิวของตัวดูดซับ ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) บนตัวดูดซับกับประจุบวกของโมเลกุลสารถูกดูดซับ นอกจากนี้การเพิ่มอุณหภูมิทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (mass transfer coefficient) มีค่าเพิ่มขึ้นจึงทำให้ปริมาณดูดซับจำเพาะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น

7. ความเข้มข้นของสารละลาย การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายทำให้ปริมาณสารถูกดูดซับจำเพาะที่สมดุลเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายเป็นการเพิ่ม แรงขับเคลื่อนให้กับการถ่ายเทมวล ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างระหว่างปริมาณของสารถูกดูดซับบนตัวดูดซับกับสารละลาย ทำให้ปริมาณสารถูกดูดซับจำเพาะที่สมดุลของตัวดูดซับมีค่าเพิ่มสูงขึ้น

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จรงค์ (2560) ได้ทำการศึกษาการผลิตถ่านไฮโดรจากสิ่งปฏิกูลโดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง พบว่า อัตราผลผลิตของถ่านไฮโดรประมาณร้อยละ 70-75 ของสิ่งปฏิกูลแห้งและปริมาณพลังงานความร้อนของถ่านไฮโดรประมาณ 15-20 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับถ่านหินธรรมชาติ ดังนั้นถ่านไฮโดรที่ผลิตได้ราคาไม่แพงเกินไป ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จึงสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการเผาไหม้ทั่วไปได้ เป็นกระบวนการที่เหมาะสมและควรนำมาพิจารณาในการใช้บำบัดสิ่งปฏิกูลและผลิตถ่านไฮโดรให้มีมูลค่าสูง

Ren et al. (2014) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการอัดเม็ดและตรึงเพอร์ริกออกไซด์ บนผงถ่านชีวภาพจากกากมันฝ้ายเพื่อใช้ดูดซับฟอสเฟตในน้ำ พบว่าหลังจากการอัดเม็ดและตรึงเพอร์ริกออกไซด์ ทำให้ผงถ่านชีวภาพจากกากมันฝ้าย มีความสามารถในการดูดซับฟอสเฟตเป็น 0.963 มิลลิกรัมต่อกรัม เมื่อเทียบกับผงถ่านชีวภาพที่ไม่ผ่านการอัดเม็ดและตรึงเพอร์ริกออกไซด์

Pruksakit and Patumsawad (2016) ได้ทำการศึกษาผลของสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านไฮโดรจากขานอ้อยควั่นด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในเซชัน โดยทำการศึกษาถึงความแตกต่างของอุณหภูมิ (180, 220 และ 250 องศาเซลเซียส) ในการผลิต เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และระยะเวลาในการผลิตที่ต่างกัน (0.5, 1 และ 2 ชั่วโมง) ที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่ออุณหภูมิแปรผันตรงกับปริมาณคาร์บอน แต่ผกผันกับปริมาณไฮโดรเจนและออกซิเจน เนื่องจากเกิดการย่อยสลายของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส และระยะเวลาในการผลิตแปรผกผันกับร้อยละผลผลิตโดยรวม อย่างไรก็ตามการเพิ่มระยะเวลาในการผลิตมากกว่า 1 ชั่วโมง ปริมาณร้อยละผลผลิตจะคงที่ไม่มีเปลี่ยนแปลง

Silva et al. (2017) ได้ทำการศึกษาแร่ธาตุที่ถูกตรึงบนถ่านไฮโดร จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (HTC) โดยใช้ขานอ้อยผสมน้ำกากส่า เต็มตัวกลางของปฏิกิริยาที่เป็นกรดเบสและเกลือให้ความร้อนที่ 150, 190 และ 230 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1-3 ชั่วโมง ทำการกรองแบบลดความดัน และอบไล่ความชื้นที่ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงพบว่าที่ 230 องศาเซลเซียส ถ่านไฮโดรมีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนสูงและจะเพิ่มขึ้นอีกหากใช้ตัวกลางของปฏิกิริยาเป็นกรดซัลฟูริก และกรดฟอสฟอริก การตรึงแร่ธาตุสามารถเกิดได้ทั้งการดูดซับบนผิวถ่านไฮโดรและการตกตะกอน

Yang et al. (2018) ทำการศึกษาการดัดแปรถ่านชีวภาพด้วยสารละลาย Fe^{3+} และสารละลายผสมระหว่าง Fe^{3+} และ Fe^{2+} เพื่อใช้ดูดซับฟอสเฟต พบว่าหลังจากการดัดแปรถ่านชีวภาพด้วยสารละลาย Fe^{3+} แล้วทำให้ถ่านชีวภาพมีความสามารถในการดูดซับฟอสเฟตในน้ำได้ถึง 111 มิลลิกรัมต่อกรัม และยังคงประสิทธิภาพสูงกว่า 60% เมื่อผ่านการใช้งานซ้ำมากกว่า 5 ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis spectrophotometer) รุ่น 5300 ยี่ห้อ Labtech
2. เตาศัลยกรรม PARR system รุ่น 4848 บริษัท Parr Instrument
3. เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุโดยหลักการเผาไหม้ (CHN Analyzer) รุ่น 628 บริษัท LECO
4. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) รุ่น LEO 1455 VP ยี่ห้อ LEO ประเทศเยอรมัน
5. เครื่องวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer, XRD) รุ่น D8 Advance ยี่ห้อ Bruker AXS ประเทศเยอรมัน
6. เครื่องวัดหาปริมาณธาตุ (X-ray Fluorescence Spectrometry, XRF) รุ่น SRS 3400 ยี่ห้อ Bruker AXS ประเทศเยอรมัน
7. เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer, AAS) รุ่น AAS-200 บริษัท PerkinElmer
8. เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer, FT-IR) บริษัท PerkinElmer รุ่น Spectrum GX
9. เครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Balance) รุ่น MS204TS ยี่ห้อ METTLER TOLEDO
10. เครื่องเขย่าสารแขวนลอย ยี่ห้อ GALLENKAMP
11. เครื่องบดหยาบ (Coarse grinding) ยี่ห้อ Bosco รุ่น B65
12. เครื่องบดละเอียด (Hammer mill) บริษัท ย.ย่ง ฮะ เฮง ประเทศไทย รุ่น VLFJ-OD
13. เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH meter) รุ่น FiveEasy Plus ยี่ห้อ METTLER TOLEDO
14. ตู้อบ (Oven) ยี่ห้อ Memmert รุ่น UN 55
15. โถดูดความชื้น (Desiccator)
16. เครื่องกรองสุญญากาศ (Vacuum Filtration Apparatus) รุ่น A-1000S ยี่ห้อ EYELA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

17. ตะแกรงร่อน (Sieve) ขนาด 70 เมช มาตรฐาน ASTM E11 ประเทศอังกฤษ
18. กระดาษวัดพีเอช (pH Paper) ยี่ห้อ MERCK
19. กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42
20. บริภัณฑ์เครื่องแก้ว

3.1.2 สารเคมี

1. โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) AR Grade, Fisher Scientific
2. ไดโซเดียมฟอสเฟต (Na_2HPO_4) AR Grade, Carlo Erba
3. เมทิลีนบลู (Methylene blue) AR Grade, Fisher Scientific
4. โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) AR Grade, Carlo Erba
5. กรดไฮโดรคลอริก 35.4% (HCl) AR Grade, LobaChemie
6. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) AR Grade, Carlo Erba
7. เฟอร์ริกคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) AR Grade, LobaChemie
8. เฟอร์รัสซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) AR Grade, LobaChemie
9. แมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl_2) AR Grade, Carlo Erba
10. แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) AR Grade, Carlo Erba
11. กรดไนตริก เข้มข้น 65% (HNO_3) AR Grade, Carlo Erba
12. โพแทสเซียมแอนติโมนีทาร์เทรตเฮมิไฮเดรต ($\text{K}(\text{SbO})\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_8 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) AR Grade, Carlo Erba
13. แอมโมเนียมโมลิบเดตเตตระไฮเดรต ($(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) AR Grade, Carlo Erba
14. กรดแอสคอร์บิก (Ascorbic acid) AR Grade, Carlo Erba
15. กรดซัลฟิวริก เข้มข้น 98% (H_2SO_4) AR Grade, Carlo Erba
16. ฟีนอล์ฟทาลีน (phenolphthalein) AR Grade, Fisher Scientific
17. น้ำกลั่นปราศจากไอออน (Deionized water)

3.2 การเตรียมขานอ้อยที่ใช้ในการศึกษา

นำขานอ้อยที่เหลือทิ้งจากการหีบน้ำอ้อยมาล้างน้ำประปา 2 ครั้ง และล้างด้วยน้ำกลั่น 2 ครั้ง จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปบดด้วยเครื่องบดหยาบ และเครื่องบดละเอียด ตามลำดับ จากนั้นจึงนำขานอ้อยที่บดแล้วมาร้อนด้วยตะแกรงร่อนขนาด 70 เมช ทำการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของขานอ้อยและถ่านไฮโดรจากขานอ้อย

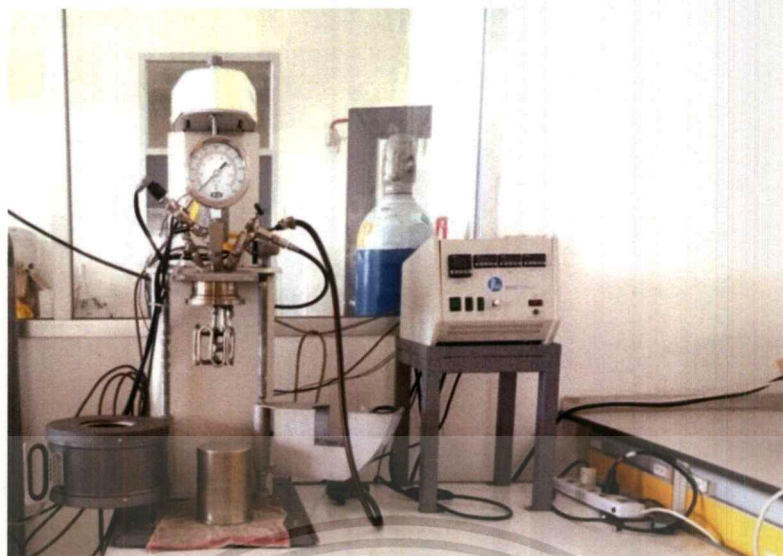
| พารามิเตอร์ | วิธีวิเคราะห์/เครื่องมือ |
|--|---|
| องค์ประกอบธาตุ | เครื่องวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน (CHN Analyzer) และเครื่องวัดการเรืองรังสีเอกซ์ (X-ray Fluorescence, XRF) |
| ลักษณะทางสัณฐานวิทยา | กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) |
| หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว | เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer, FT-IR) |
| ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู (Methylene Blue Number, MBN) | การหาค่าความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู อ้างอิงตามงานวิจัยของปรินทร (2551) |
| ค่าพีเอชที่ทำให้ประจุสุทธิเป็นศูนย์ (pH_{pzc}) | วิธี pH drift method (กรวรรณและคณะ, 2561) |

3.3 การผลิตถ่านไฮโดรจากขานอ้อยด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในชั้น

ขานอ้อยที่เตรียมขึ้นจากข้อ 3.2 จะถูกเผาให้เป็นถ่านหรือคาร์บอนด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในชั้น โดยใช้เตาปฏิกรณ์ PARR system ปริมาตร 1 ลิตร (รูปที่ 3.1) ที่ความดันระหว่าง 28-32 บาร์ สภาพที่ใช้ในการผลิต อ้างอิงจากงานวิจัยของ Pruksakit and Patumsawad (2016) และ Hoekman et al. (2011) โดยมีรายละเอียดการดำเนินการดังนี้

- นำขานอ้อยที่ผ่านการบดและร่อนแล้วมาผสมกับน้ำกลั่นในอัตราส่วน 1:8 (ขานอ้อย 70 กรัม ต่อน้ำ 500 มิลลิลิตร) ใส่ลงในเตาปฏิกรณ์ PARR system เติมน้ำที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด ทำการบันทึกอุณหภูมิและความดันของเครื่อง จากนั้นปรับลดอุณหภูมิของเครื่องเป็น 45 องศาเซลเซียส เพื่อให้เตาปฏิกรณ์เย็นลง
- เทสารละลายจากเตาปฏิกรณ์ลงในปีกเกอร์ขนาด 1 ลิตร แล้วนำไปกรองแบบลดความดันโดยใช้กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 แล้วนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมี ดังระบุในตารางที่ 3.1 และนำไปศึกษาการเติมแคทไอออนชนิดต่างๆต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 เตาปฏิกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา

3.4 การเตรียมถ่านไฮโดรด์ดแปรด้วยเกลือของเหล็ก (Fe) เกลือของแคลเซียม (Ca) และเกลือของแมกนีเซียม (Mg)

3.4.1 วิธีการเตรียมสาร

1. สารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต เข้มข้น 0.27 โมลาร์ เตรียมโดยชั่งเฟอร์ริกคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) 72.67 กรัม ละลายในน้ำกลั่น ใส่ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 1 ลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดวัดปริมาตร
2. สารละลายผสมเฟอร์ริกคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตและเฟอร์รัสซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต เข้มข้น 0.27 โมลาร์ เตรียมโดย ชั่งเฟอร์ริกคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) มา 36.33 กรัม และเฟอร์รัสซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) 39.00 กรัม ละลายในน้ำกลั่น ใส่ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 1 ลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดวัดปริมาตร
3. สารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ เข้มข้น 0.27 โมลาร์ เตรียมโดย ชั่งแมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl_2) 25.67 กรัม ละลายในน้ำกลั่น ใส่ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 1 ลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดวัดปริมาตร
4. สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ เข้มข้น 0.27 โมลาร์ เตรียมโดย ชั่งแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) 29.9646 กรัม ละลายในน้ำกลั่น ใส่ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 1 ลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดวัดปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 วิธีการเติมสารดัดแปรลงบนถ่านไฮโดรจากชานอ้อย

- นำถ่านไฮโดรที่ผลิตได้จากข้อ 3.3 มาแช่ในสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) เข้มข้น 0.27 โมลาร์ ใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักถ่านต่อปริมาตรสารละลายเท่ากับ 1:30
- ทำการปั่นกวนที่ความเร็วรอบ 150 รอบ/นาที พร้อมกับค่อยๆหยดสารละลาย NaOH เข้มข้น 1 นอร์มอล ทีละหยดจนพีเอชของของผสมมีค่าเท่ากับ 11 และตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- นำของผสมที่ได้ไปกรองแบบลดความดัน เพื่อแยกส่วนระหว่างของแข็ง (Fe(III)-HC) กับสารละลาย
- ทำการทดลองตั้งแต่ข้อ 1-8 โดยเปลี่ยนสารละลายจากเฟอร์ริกคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) เข้มข้น 0.27 โมลาร์ เป็นสารละลายผสมระหว่างเฟอร์ริกคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) และเฟอร์รัสซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) สารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl_2) และสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) ทั้งนี้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเรียกว่า ถ่านไฮโดรดัดแปรด้วย $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ (Fe(III)/Fe(II)-HC), ถ่านไฮโดรดัดแปรด้วย Mg^{2+} (Mg-HC) และถ่านไฮโดรดัดแปรด้วย Ca^{2+} (Ca-HC) ตามลำดับ

ตารางที่ 3.2 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของถ่านไฮโดรดัดแปรที่ทำการศึกษา

| พารามิเตอร์ | วิธีวิเคราะห์/เครื่องมือ |
|--|---|
| องค์ประกอบธาตุ | เครื่องวัดการเรืองรังสีเอกซ์ (X-ray Fluorescence, XRF) |
| หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว | เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer, FT-IR) |
| ค่าพีเอชที่ทำให้ประจุสุทธิเป็นศูนย์ (pH_{pzc}) | วิธี pH drift method (กรวาร์เรนและคณะ, 2561) |

3.5 การศึกษาความสามารถในการกำจัดสารละลายออร์โธฟอสเฟต

3.5.1 ชนิดของวัสดุที่ศึกษา

วัสดุที่ใช้ศึกษา ได้แก่ ชานอ้อย (BG) , ถ่านไฮโดรจากชานอ้อย (HC) , ถ่านไฮโดรดัดแปร ทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ Fe(III) – HC, Fe(III)/Fe(II) – HC, Mg-HC, Ca-HC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.2 วิธีเตรียมสารละลายสต็อกออร์โทฟอสเฟต

ชั่ง KH_2PO_4 0.2195 กรัม แล้วละลายในน้ำกลั่น ใส่ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 1 ลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดวัดปริมาตร ได้สารละลายเข้มข้น 50.0

3.5.3 ศึกษาความสามารถในการกำจัดฟอสเฟต

1. ชั่งตัวดูดซับที่ต้องการศึกษามา 0.1000 กรัม ใส่ลงในสารละลายออร์โทฟอสเฟตเข้มข้น 25 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ปิดด้วยจุกยางแล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า แนวนอนที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
2. กรองแบบลดความดันผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 นำสารละลายที่กรองได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณออร์โทฟอสเฟตที่เหลืออยู่ในสารละลายด้วยเทคนิคการทำให้เกิดสีด้วย Ascorbic acid (APHA et al, 2012)
3. ทำการทดลองซ้ำ แต่เปลี่ยนระยะเวลาที่ใช้ในการสัมผัสจาก 1 ชั่วโมง เป็น 3 , 6 , 12 และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ
4. ทำชุดควบคุม โดยทำการทดลองเหมือนข้อที่ 1-3 แต่ไม่ใส่ตัวดูดซับลงในสารละลายออร์โทฟอสเฟต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

โครงการพิเศษนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาการเตรียมถ่านไฮโดรจากขานอ้อยด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในเซชัน และศึกษาการดัดแปรถ่านไฮโดรเพื่อให้สามารถกำจัดฟอสเฟตในน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยแบ่งขั้นตอนการศึกษาเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้คือ ขั้นตอนที่ 1 การผลิตถ่านไฮโดรจากขานอ้อยด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในเซชัน ขั้นตอนที่ 2 การเติมเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) เฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) แมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) และแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ลงบนถ่านไฮโดรจากขานอ้อย ผลที่ได้เป็นดังนี้

4.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของถ่านไฮโดรจากขานอ้อย

เมื่อนำขานอ้อยที่เก็บรวบรวมมาได้ไปล้างด้วยน้ำประปาและน้ำกลั่น จากนั้นนำไปอบแห้ง บดและร่อนด้วยตะแกรกร่อนขนาด 70 เมช จะได้ขานอ้อยที่มีลักษณะเป็นผงเนื้อละเอียด สีเหลืองอ่อน ดังรูปที่ 4.1ก เมื่อนำขานอ้อยไปผลิตเป็นถ่านไฮโดรด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในเซชัน โดยสภาวะที่ใช้ในการผลิต คือ อุณหภูมิที่ใช้ภายในเตาปฏิกรณ์เท่ากับ 230 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยานาน 1 ชั่วโมง แล้วนำไปอบไล่ความชื้น ซึ่งจะได้ออกมาเป็นผงถ่านสีดำ เนื้อละเอียด ดังรูปที่ 4.1ข



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของ (ก) ขานอ้อย และ (ข) ถ่านไฮโดรอ้อย

4.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของขานอ้อยและถ่านไฮโดร

จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของขานอ้อยและถ่านไฮโดร พบว่า ปริมาณธาตุของถ่านไฮโดรมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับปริมาณธาตุของขานอ้อย คือปริมาณคาร์บอนของถ่านไฮโดรเพิ่มขึ้นจาก 45.44% เป็น 60.99% ปริมาณไฮโดรเจนของถ่านไฮโดรลดลงจาก 6.29% เป็น 5.64% และปริมาณไนโตรเจนของถ่านไฮโดรเพิ่มขึ้นจาก 0.12% เป็น 0.23% ดังตารางที่ 4.1

ซึ่งการที่ถ่านไฮโดรมีปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้นและปริมาณไฮโดรเจนลดลงเกิดจากในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันมีการเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันและดีคาร์บอกซิเลชันที่จะกำจัดน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากชีวมวล (กมลวัฒน์ และคณะ, 2559)

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีของชานอ้อยและถ่านไฮโดร

| ตัวอย่าง | คาร์บอน (C) | ไฮโดรเจน (H) | ไนโตรเจน (N) |
|-----------|-------------|--------------|--------------|
| | เปอร์เซ็นต์ | เปอร์เซ็นต์ | เปอร์เซ็นต์ |
| ชานอ้อย | 45.44 | 6.29 | 0.12 |
| ถ่านไฮโดร | 60.99 | 5.64 | 0.23 |

4.1.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้อง SEM

จากการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้อง SEM ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า พบว่าลักษณะพื้นผิวของชานอ้อย มีลักษณะเป็นแผ่น ซ้อนกันเป็นชั้นๆ (รูปที่ 4.2ก) ในกรณีของถ่านไฮโดรจากชานอ้อยพบว่าการเปลี่ยนแปลงไปคือ ลักษณะพื้นผิวเป็นแผ่นขรุขระและมีเม็ดกลมเล็กๆเกาะอยู่ที่พื้นผิว (รูปที่ 4.2ข) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wang et al.(2018) ในเรื่องการผลิตถ่านไฮโดรจากของเสียชีวมวลด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชัน



(ก)

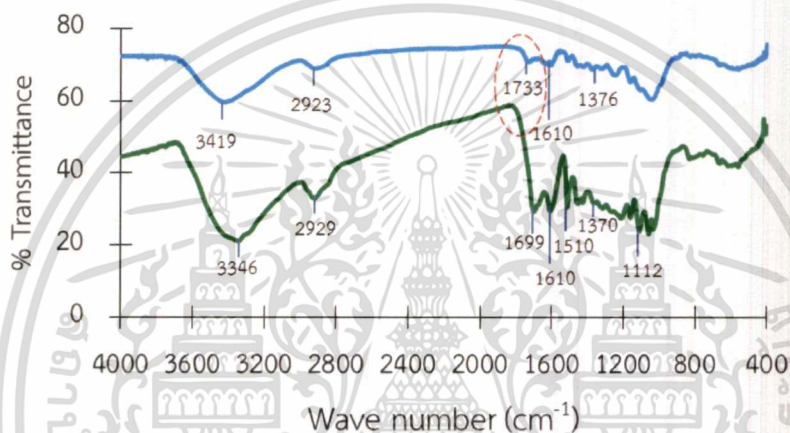
(ข)

รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายด้วยกล้อง Scanning Electron Microscope (SEM) ที่กำลังขยาย 5,000 เท่าของ (ก) ชานอ้อย และ (ข) ถ่านไฮโดร

4.1.3 หมู่ฟังก์ชันทางเคมีด้วยเทคนิค FT-IR

ผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันทางเคมีด้วยเทคนิค FT-IR พบว่าสเปกตรัมอินฟราเรดของชานอ้อยและถ่านไฮโดรมีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน โดยปรากฏพีคในช่วงเลขคลื่น $3600-3200\text{ cm}^{-1}$ แสดงพันธะเอกส O-H stretching ของหมู่ไฮดรอกซิล พีคในช่วงเลขคลื่น $3000-2800\text{ cm}^{-1}$ แสดงการสั่นระหว่างพันธะคาร์บอนไฮโดรเจนของคาร์บอนกับไฮโดรเจนจาก C-H aliphatic ในโครงสร้างของเซลลูโลส พีคที่เลขคลื่น 1733 cm^{-1} ใช้

แสดงพันธะ C=O stretching ในหมู่ Ester Carbonyl ของลิกนิน (Ning Chuang et al., 2010) ในขณะที่ไม่มีการปรากฏของพีคนี้ในสเปกตรัมอินฟราเรดของถ่านไฮโดรเนื่องถูกทำลายด้วยความร้อน พีคที่เลขคลื่น 1699 cm^{-1} ของถ่านไฮโดรแสดงถึง methoxy C-H stretching ของหมู่ carbonyl พีคที่เลขคลื่น $1650\text{-}1600\text{ cm}^{-1}$ แสดงหมู่ Carbonyl จากกลุ่ม Carboxylate พีคที่เลขคลื่นประมาณ 1510 cm^{-1} สอดคล้องกับ C=C aromatic พีคที่เลขคลื่นประมาณ 1370 ถึง 1376 cm^{-1} แสดงพันธะระหว่างคาร์บอนและไนโตรเจน ของ C-N groups (Ahmad, 2019) และปรากฏพีคของ Si-O-Si ในหมู่ซิลิกอนของถ่านลอยที่ 1112 cm^{-1} (Deshmukh et al., 2012) ที่เลขคลื่น $3600\text{-}3200\text{ cm}^{-1}$ และ $1650\text{-}1600\text{ cm}^{-1}$ ยืนยันถึงบทบาทของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันในการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลและหมู่คาร์บอกซิเลต ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญในการแลกเปลี่ยนไอออนโลหะ



รูปที่ 4.3 สเปกตรัม FT-IR ของชานอ้อย (—) และถ่านไฮโดร(—)

4.1.4 ค่าความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู (Methylene blue number; M.B.N.)

ผลการวิเคราะห์ค่า M.B.N. ของถ่านไฮโดรเทียบกับชานอ้อย พบว่า การเปลี่ยนชานอ้อยเป็นถ่านไฮโดร ช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู ดังเห็นได้จาก M.B.N. มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 100.90 ± 17.94 มิลลิกรัมต่อกรัม เมื่อเทียบกับชานอ้อย (ตารางที่ 4.2) แสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของพื้นผิวและ/หรือความพรุนที่เกิดจากกระบวนการทำให้เป็นถ่านด้วย HTC นอกจากนี้ค่า M.B.N. ที่เพิ่มขึ้นอาจเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของหมู่ฟังก์ชันแลกเปลี่ยนไอออนในถ่านไฮโดร

ตารางที่ 4.2 ค่าความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูของชานอ้อยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและถ่านไฮโดรจากชานอ้อย

| ตัวอย่าง | ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู (มิลลิกรัมต่อกรัม) |
|-----------|---|
| ชานอ้อย | 39.95 ± 11.14 |
| ถ่านไฮโดร | 100.90 ± 17.94 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลของการตัดแปรถ่านไฮโดรด้วยเหล็ก แมกนีเซียม และแคลเซียม

ในการศึกษาครั้งนี้ ทำการศึกษาแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟตของถ่านไฮโดรจากขานอ้อยด้วยวิธีการตกตะกอนของเหล็ก แมกนีเซียม และแคลเซียม ลงบนพื้นผิวของถ่านไฮโดร อ้างอิงวิธีการตัดแปรวัสดุตามงานวิจัยของ Yang et al. (2018) ผลการศึกษาที่ได้เป็นดังนี้

4.2.1 ลักษณะทางกายภาพ

จากรูปที่ 4.4 พบว่าถ่านไฮโดรจากขานอ้อยที่ผลิตด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชัน ที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง มีลักษณะเป็นผงเนื้อละเอียด สีดำ (รูปที่ 4.4ก) เมื่อนำมาตัดแปรด้วยแมกนีเซียม (Mg) และแคลเซียม (Ca) จะได้ถ่านไฮโดรตัดแปรที่มีเนื้อละเอียดและสีที่ใกล้เคียงกับถ่านไฮโดรก่อนตัดแปร (รูปที่ 4.4ข และ 4.4ค) ความใกล้เคียงกันของสีอาจเป็นผลมาจากสารละลายเกลือของแคลเซียมและแมกนีเซียมเป็นสารละลายใสไม่มีสี ในกรณีของถ่านไฮโดรที่ตัดแปรด้วยปฏิกิริยาตกตะกอนของเหล็กจำพวกเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) และปฏิกิริยาตกตะกอนร่วมของเหล็กจำพวกเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) กับเหล็กจำพวกเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) พบว่า ปรากฏของสีน้ำตาลแดงในวัสดุ (รูปที่ 4.4ง และ 4.4จ) เนื่องจากลักษณะของสารละลายเหล็กเป็นสารละลายที่มีสีส้มแดง ดังนั้นสีน้ำตาลแดงที่ปรากฏในถ่านไฮโดรยืนยันให้เห็นถึงการเกาะติดของเหล็กในวัสดุ



รูปที่ 4.4 ลักษณะทางกายภาพของ (ก) ถ่านไฮโดร (ข) ถ่านไฮโดรตัดแปรด้วย Mg^{2+}

(ค) ถ่านไฮโดรตัดแปรด้วย Ca^{2+} (ง) ถ่านไฮโดรตัดแปรด้วย Fe^{3+}

(จ) ถ่านไฮโดรตัดแปรด้วย Fe^{3+}/Fe^{2+}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค XRF

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชานอ้อย ถ่านไฮโดร และถ่านไฮโดรดัดแปรด้วยเทคนิค XRF พบว่าชานอ้อยมีซิลิกา (Si) เป็นส่วนประกอบหลัก และเมื่อนำไปผลิตเป็นถ่านด้วยกระบวนการ HTC พบว่าเกิดการสูญหายหรือลดลงของธาตุบางชนิด สันนิษฐานว่ากระบวนการ HTC เป็นกระบวนการผลิตถ่านซึ่งเป็นวัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ การเพิ่มขึ้นของสัดส่วนคาร์บอนในถ่านไฮโดร (ตารางที่ 4.1) อาจเป็นสาเหตุที่ทำให้ปริมาณของธาตุอื่นมีสัดส่วนลดลง ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของถ่านไฮโดรดัดแปรทั้ง 4 ชนิด พบว่าถ่านไฮโดรดัดแปรด้วย Fe^{3+} , ถ่านไฮโดรดัดแปรด้วย Fe^{3+}/Fe^{2+} , ถ่านไฮโดรดัดแปรด้วย Ca^{2+} และถ่านไฮโดรดัดแปรด้วย Mg^{2+} มีปริมาณของ Fe_2O_3 , CaO และ MgO เท่ากับ 43.8%, 54.0%, 19.9% และ 4.93% ตามลำดับ ซึ่งยืนยันให้เห็นว่าถ่านไฮโดรดัดแปรด้วยเหล็ก แคลเซียม และแมกนีเซียมมีการเกาะติดของไอออนโลหะทั้ง 3 ชนิด บนพื้นผิวของวัสดุ อย่างไรก็ตามพบว่าปริมาณของเหล็ก พบในเปอร์เซ็นต์ที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับตัวอย่างอื่นๆ แสดงให้เห็นว่าการแลกเปลี่ยนของไอออนเหล็กเกิดขึ้นได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับแคลเซียมและแมกนีเซียม (ตารางที่ 4.3)

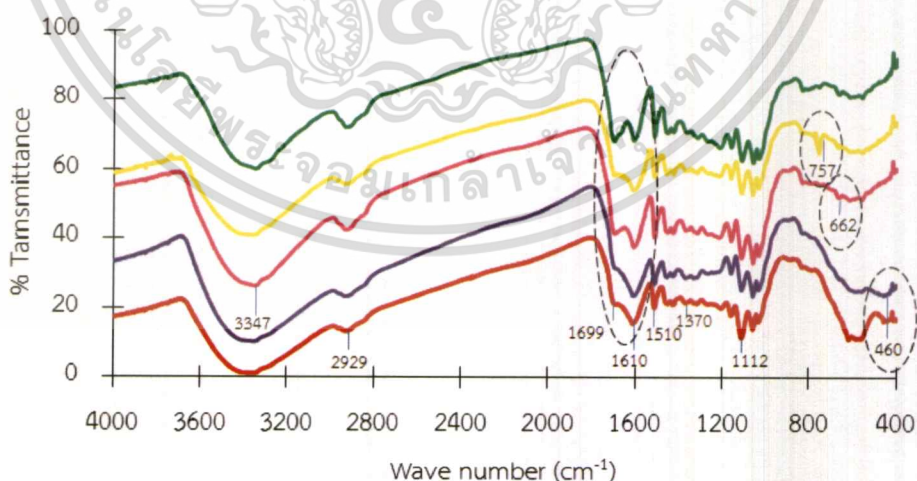
ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบของธาตุของในตัวอย่างชานอ้อยด้วยเทคนิค XRF

| สูตรทางเคมี | ชานอ้อย (%) | ถ่านไฮโดร (%) | ถ่านไฮโดรดัดแปร (%) | | | |
|-------------|-------------|---------------|---------------------|----------------|-------|-------|
| | | | Fe(III) | Fe(III)-Fe(II) | Mg | Ca |
| Al_2O_3 | ND | 9.94 | 19.3 | 18.3 | 77.9 | 35.0 |
| Au | ND | ND | ND | ND | ND | ND |
| CaO | 5.93 | 1.37 | ND | ND | ND | 19.9 |
| Cl | ND | 3.99 | 7.79 | 4.73 | ND | 17.8 |
| CoO | ND | ND | ND | ND | 1.02 | ND |
| CuO | 4.79 | 2.54 | 0.291 | 0.406 | 0.460 | ND |
| Fe_2O_3 | 6.04 | 4.02 | 43.8 | 54.0 | ND | ND |
| K_2O | 13.2 | 3.38 | 2.88 | 3.89 | 3.46 | 4.15 |
| MgO | 6.69 | 5.05 | ND | ND | 4.93 | ND |
| Na_2O | ND | ND | 10.4 | 9.87 | 2.09 | 8.95 |
| P_2O_5 | 10.7 | 5.52 | ND | ND | ND | ND |
| SiO_2 | 34.2 | 52.7 | ND | ND | ND | ND |
| SO_3 | 14.40 | 12.3 | 7.54 | 9.03 | ND | 5.90 |
| ZnO | ND | ND | 0.175 | ND | ND | ND |
| ผลรวม | 95.95 | 100.81 | 92.18 | 100.23 | 89.86 | 91.70 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ ND ไม้สำหรับ ND ใช้งานเพื่อ 0.175 ศึกษาเท่านั้น ND อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม้ว่าผลรวม ทั้งลิ้มมี 100.81 ลงเนื้อ 92.18 ต้องอ้างอิง 100.23 ของเอกสาร 89.86 รังที่มี 91.70 ไปใช้

4.2.3 หมู่ฟังก์ชันทางเคมีด้วยเทคนิค FT-IR

ผลการศึกษามูฟังก์ชันที่เป็นส่วนประกอบโดยใช้เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) ที่เลขคลื่นในช่วง $400\text{-}4000\text{ cm}^{-1}$ พบว่าสเปกตรัมอินฟราเรดของถ่านไฮโดรและถ่านไฮโดรที่ผ่านการดัดแปร มีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน โดยปรากฏพีคที่สำคัญได้แก่ พีคในช่วงเลขคลื่น $3600\text{-}3200\text{ cm}^{-1}$ แสดงพันธะ O-H stretching ของหมู่ไฮดรอกซิล พีคในช่วงเลขคลื่น $3000\text{-}2800\text{ cm}^{-1}$ แสดงการสั่นระหว่างพันธะของคาร์บอนกับไฮโดรเจนจาก C-H aliphatic ซึ่งเป็นโครงสร้างของเซลลูโลส ปรากฏพีคที่เลขคลื่น 1699 cm^{-1} ของถ่านไฮโดรแสดงถึง methoxy C-H stretching ของหมู่ carbonyl พีคที่ในช่วงเลขคลื่น $1650\text{-}1600\text{ cm}^{-1}$ แสดงหมู่ Carbonyl จากกลุ่ม Carboxylate เมื่อสังเกตจะพบว่าพีคที่เลขคลื่น 1610 cm^{-1} มีความเข้มลดลงในถ่านไฮโดรที่ดัดแปรด้วยไอออนของโลหะ แสดงให้เห็นถึงการทำปฏิกิริยากับไอออนของโลหะที่หมู่ฟังก์ชันดังกล่าว พีคที่เลขคลื่นประมาณ 1510 cm^{-1} สอดคล้องกับ C=C aromatic พีคที่เลขคลื่นประมาณ 1370 cm^{-1} แสดงพันธะระหว่างคาร์บอนและไนโตรเจน ของ C-N groups (Ahamad, 2019) และปรากฏพีคของ Si-O-Si ในหมู่ซิลิกอนของเถ้าลอยที่ 1112 cm^{-1} (Deshmukh et al., 2012) นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถ่านไฮโดรที่ดัดแปรด้วย Ca^{2+} พบว่ามีการปรากฏขึ้นของพันธะ Ca-O ที่ช่วงเลขคลื่น $600\text{-}800\text{ cm}^{-1}$ (Putra et al. 2017) ยืนยันการเกาะติดของแคลเซียมในถ่านไฮโดร สำหรับถ่านไฮโดรที่ดัดแปรด้วย Mg^{2+} ปรากฏแถบพันธะของ Mg-O ที่เลขคลื่นประมาณ 662 cm^{-1} (Hofmeister et al., 2003) สำหรับสเปกตรัมอินฟราเรดของถ่านไฮโดรที่ดัดแปรด้วย Fe^{3+} และ $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ ปรากฏพีคของพันธะ Fe-O ในช่วงเลขคลื่นที่ $550\text{-}450\text{ cm}^{-1}$ (Veronica et al. 2013) ยืนยันให้เห็นถึงการยึดติดไอออนของเหล็กที่เติมลงบนถ่านไฮโดร



รูปที่ 4.5 สเปกตรัม FT-IR ของ ถ่านไฮโดร(—), ถ่านไฮโดรที่ดัดแปรด้วยแคลเซียม(—), ถ่านไฮโดรที่ดัดแปรด้วยแมกนีเซียม(—), ถ่านไฮโดรที่ดัดแปรด้วยเฟอร์ริก(—)

และถ่านไฮโดรที่ดัดแปรด้วยเฟอร์รัสและเฟอร์ริก(—)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 พีเอชที่ค่าประจุสุทธิเป็นศูนย์ (pH_{pzc})

ผลการวิเคราะห์ pH_{pzc} ของวัสดุต่างๆ ซึ่งได้แก่ ชานอ้อย ถ่านไฮโดร ถ่านไฮโดรดัดแปรด้วย Fe^{3+} , Fe^{3+}/Fe^{2+} , Ca^{2+} และ Mg^{2+} พบว่าค่า pH_{pzc} ของวัสดุสามารถเรียงจากค่าต่ำสุดไปสูงสุดคือ ถ่านไฮโดร (3.97) ชานอ้อย (4.07) ถ่านไฮโดรที่เติม Fe^{3+}/Fe^{2+} (5.55) ถ่านไฮโดรที่เติม Mg^{2+} (7.17) ถ่านไฮโดรที่เติม Ca^{2+} (7.29) ถ่านไฮโดรที่เติม Fe^{3+} (7.95) ตามลำดับ ซึ่งค่า pH_{pzc} สามารถบอกความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก (CEC) และความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนลบ (AEC) ได้ เมื่อค่าพีเอชของสารละลายมีค่าน้อยกว่าค่า pH_{pzc} ของวัสดุ ผิวของตัวดูดซับจะแสดงค่าเป็นบวก วัสดุจะดูดซับสารจำพวกไอออนลบรวมถึงฟอสเฟตไอออนได้ดี จากตารางที่ 4.4 พบว่าชานอ้อยและถ่านไฮโดรมีค่า pH_{pzc} น้อยกว่า 7.0 ส่งผลให้ผลรวมของประจุสุทธิของวัสดุมีค่าเป็นลบ แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตในน้ำอาจไม่เต็มที่เท่าที่ควร หากนำไปใช้บำบัดน้ำเสียชุมชนที่มีค่าพีเอชอยู่ที่ 6-8 (กรมควบคุมมลพิษ, 2553) จากตารางที่ 4.4 พบว่าการดัดแปรถ่านไฮโดรด้วยแคทไอออนสามารถเพิ่มค่า pH_{pzc} ให้มีค่าสูงกว่า 7.0 การนำวัสดุดังกล่าวไปใช้บำบัดน้ำที่มีค่า pH ต่ำกว่า pH_{pzc} ทำให้สามารถกำจัดฟอสเฟตได้ดีขึ้นเมื่อเทียบกับถ่านไฮโดร และชานอ้อย เนื่องจากที่สภาวะดังกล่าวผลรวมของประจุสุทธิของวัสดุมีค่าเป็นบวก (ตารางที่ 4.4) ในกรณีของถ่านไฮโดรที่เติม Fe^{3+}/Fe^{2+} มีค่า pH_{pzc} น้อยกว่า 7.0 แต่สามารถกำจัดฟอสเฟตในน้ำดี สันนิษฐานว่าการเติมแคทไอออนของเหล็กลงในถ่านไฮโดรจะส่งผลให้วัสดุมีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็กจึงทำให้สามารถดูดซับฟอสเฟตในน้ำได้ (Saleh et al., 2016)

ตารางที่ 4.4 แสดงผลของค่า pH_{zpc} ของวัสดุต่างๆ

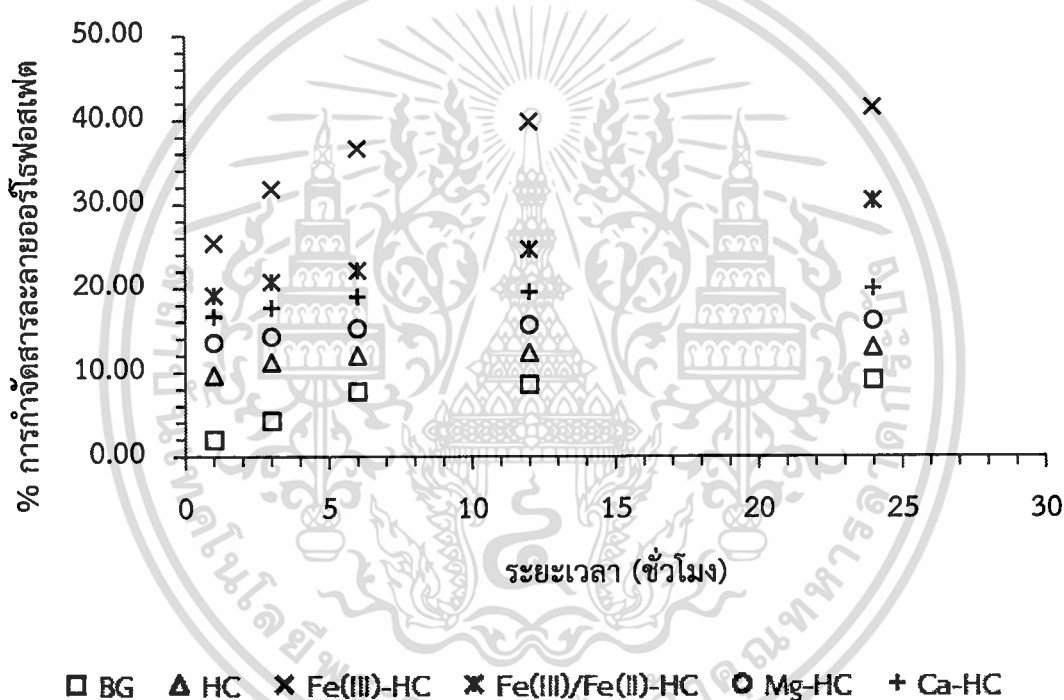
| วัสดุ | ค่า pH_{zpc} |
|--------------------------------------|----------------|
| ชานอ้อย | 4.07 |
| ถ่านไฮโดร | 3.97 |
| ถ่านไฮโดรที่เติม Fe^{3+} | 7.95 |
| ถ่านไฮโดรที่เติม $Fe^{2+} + Fe^{3+}$ | 5.55 |
| ถ่านไฮโดรที่เติม Ca^{2+} | 7.29 |
| ถ่านไฮโดรที่เติม Mg^{2+} | 7.17 |

4.3 การกำจัดสารละลายออร์โธฟอสเฟต

จากการศึกษาความสามารถในการกำจัดสารละลายออร์โธฟอสเฟตของชานอ้อย (BG)

ถ่านไฮโดร (HC) และถ่านไฮโดรที่ผ่านการดัดแปรด้วยโลหะทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ 1) ถ่านไฮโดรดัดแปรด้วย Fe^{3+} ($Fe(III)$ -HC) 2) ถ่านไฮโดรดัดแปรด้วย Fe^{3+}/Fe^{2+} ($Fe(III)/Fe(II)$ -HC) 3) ถ่านไฮโดรดัดแปร

ด้วย Mg^{2+} (Mg-HC) และ 4) ถ่านไฮโดรคาร์บอนด้วย Ca^{2+} (Ca-HC) โดยใช้ปริมาณของวัสดุดูดซับคงที่ ที่ 0.10 กรัม ใส่ลงในสารละลายออร์โธฟอสเฟตเข้มข้น 25 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร ที่ระยะเวลาสัมผัสแตกต่างกัน พบว่าวัสดุทั้ง 6 ชนิด สามารถกำจัดฟอสเฟตได้อย่างรวดเร็วในช่วง 1 ชั่วโมงแรก หลังจากนั้นเปอร์เซ็นต์การกำจัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนเข้าสู่สมดุลที่ระยะเวลา 12 ชั่วโมง และมีแนวโน้มคงที่ที่ 24 ชั่วโมง (รูปที่ 4.6) เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดฟอสเฟตระหว่างวัสดุทั้ง 6 ชนิด พบว่า Fe(III)-HC มีเปอร์เซ็นต์การกำจัดฟอสเฟตสูงสุด รองลงมาคือ Fe(III)/Fe(II)-HC, Ca-HC, Mg-HC, HC และ BG ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า ถ่านไฮโดรที่เติมไอออนบวกของโลหะจำพวกเฟอร์ริกจะช่วยเพิ่มความสามารถในการกำจัดฟอสเฟตในน้ำได้ดีกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับ Ca และ Mg



รูปที่ 4.6 เปอร์เซ็นต์การกำจัดสารละลายออร์โธฟอสเฟตที่ระยะเวลาการทำปฏิกิริยาแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

โครงการพิเศษทำการศึกษาการผลิตถ่านไฮโดรจากขานอ้อยด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชัน โดยใช้เตาปฏิกรณ์ PARR system เติมน้ำที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง พร้อมทั้งศึกษาแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพของถ่านไฮโดร เพื่อใช้ในการกำจัดฟอสเฟตในน้ำโดยอาศัยปฏิกิริยาการตกตะกอนของเหล็ก แมกนีเซียม และแคลเซียมลงบนวัสดุ สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

1. ถ่านไฮโดรจากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง มีองค์ประกอบของคาร์บอนเพิ่มขึ้นจาก 45.44% เป็น 60.99% เมื่อเทียบกับขานอ้อย ที่ใช้ในการผลิต ถ่านไฮโดรที่ผลิตได้มีพื้นผิวขรุขระและมีอนุภาคขนาดเล็กเกาะที่พื้นผิว ซึ่งอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้ถ่านที่สังเคราะห์ได้มีค่าความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูเพิ่มขึ้นจาก 39.95 ± 11.14 เป็น 100.90 ± 17.94 มิลลิกรัมต่อกรัม ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FT-IR ในถ่านไฮโดร ปรากฏพีคที่ชัดเจนขึ้นที่ตำแหน่งเลขคลื่นระหว่าง $3,200-3,600 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นแถบของการสั่นหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล และในช่วงเลขคลื่นประมาณ $1,600-1,650 \text{ cm}^{-1}$ แสดงเป็นหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิลที่มีบทบาทสำคัญในการแลกเปลี่ยนไอออนกับโลหะ

2. ผลการวิเคราะห์สมบัติของถ่านไฮโดรจากขานอ้อย ที่ถูกดัดแปรพื้นผิวด้วยการเติมเหล็ก (เฟอร์ริกและเฟอร์รัสไอออน) แมกนีเซียม และ/หรือแคลเซียมลงบนวัสดุ ในสถานะที่เป็นต่าง ด้วยเทคนิค XRF และ FT-IR ยืนยันถึงการเกาะติดของเหล็ก แมกนีเซียม และแคลเซียมบนพื้นผิวของ ถ่านไฮโดรที่ดัดแปรด้วย Fe^{3+} , $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$, Mg^{2+} และ Ca^{2+} ทั้งนี้ถ่านไฮโดรที่ผ่านการดัดแปรดังกล่าว มีปริมาณของเหล็กเป็นองค์ประกอบในสัดส่วน 43.8% และ 54.0% สำหรับถ่านไฮโดรที่ดัดแปรด้วย Fe^{3+} และ $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ ตามลำดับ มีปริมาณของ MgO และ CaO ที่พบในถ่านไฮโดรที่ดัดแปรด้วย Mg^{2+} และถ่านไฮโดรที่ดัดแปรด้วย Ca^{2+} มีสัดส่วนเท่ากับ 4.93% และ 19.9% ตามลำดับ ค่าพีเอชที่ทำให้ประจุสุทธิเป็นศูนย์ (pH_{pzc}) ของถ่านไฮโดรดัดแปรด้วยเหล็ก, แมกนีเซียม, หรือแคลเซียมมีค่าสูงกว่า เมื่อเทียบกับขานอ้อยและถ่านไฮโดรก่อนการดัดแปร ถ่านที่ผ่านการดัดแปรด้วยโลหะจึงมีความสามารถในการกำจัดฟอสเฟตในน้ำได้ดีขึ้น

3. ผลการทดสอบความสามารถในการกำจัดฟอสเฟต พบว่าถ่านไฮโดรดัดแปรด้วยไอออนของโลหะมีความสามารถในการกำจัดฟอสเฟตได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านไฮโดรและขานอ้อย โดยถ่านไฮโดรที่ดัดแปรด้วย Fe^{3+} มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟตสูงสุดที่ 24 ชั่วโมง รองลงมาคือ ถ่านไฮโดรที่ดัดแปรด้วย $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ ถ่านไฮโดรดัดแปรด้วย Ca^{2+} และถ่านไฮโดรที่ดัดแปรด้วย Mg^{2+}

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาความเป็นไปได้ในการกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียชุมชนหรือน้ำเสียอุตสาหกรรม
2. ควรศึกษาการคายซับฟอสเฟต พร้อมทั้งศึกษาความเป็นไปได้ในการนำวัสดุดูดซับที่เสื่อมสภาพแล้วไปใช้งานทางเกษตรกรรม
3. ควรควบคุมปริมาณของไอออนที่เติมลงบนวัสดุให้มีปริมาณที่เท่ากัน
4. ควรศึกษาความหนาแน่นของวัสดุ
5. ควรเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาในกระบวนการ HTC



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] กมลวัฒน์ นาคะสรรค์, วรณัฐ อธิธิเบญจพงศ์ และประเสริฐ ภาสันต์. 2559. “การดูดซับสารอินทรีย์ระเหยง่ายด้วยชีวมวลที่ปรับสภาพโดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในเซชันวารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี หัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ. 2(2) : 7-19.
- [2] กรมควบคุมมลพิษ. 2553. **มาตรฐานคุณภาพน้ำ**. [Online]. Available: water.rid.go.th/wrd/con_tst14/images/KL/KL3.pdf
- [3] กรมศุลกากร. 2562. **การนำเข้าถ่านกัมมันต์**. [Online]. Available: http://www.customs.go.th/statistic_report.php?show_search=1.
- [4] กรวรรณ ดอนนอก, ณัฏภัทร สำเภาน้อย และพิมพ์วิมล พลศิลป์. 2561. “การผลิตวัสดุดูดซับฟอสเฟตจากฟางข้าว.” **โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**.
- [5] กรวิภา เอี่ยมสำอาง. 2562. **ปรากฏการณ์ขี้ปลาอาฟ**. [Online]. Available: <http://www.nsm.or.th/other-service/1757-online-science/knowless-inventory/sci-article/science-article-nsm/2847>.
- [6] กระทรวงพลังงาน. 2556. **ศักยภาพชีวมวลในประเทศไทย**. [Online]. Available: http://biomass.dede.go.th/biomass_web/index.html.
- [7] กระทรวงพลังงาน. 2558. **การผลิตไฟฟ้าจากขาน้อยตัวช่วยหลักของแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก AEDP 2015**. [Online]. Available: <http://webkcdede.go.th/testmax/node/2331>.
- [8] กลุ่มงานเฝ้าระวังและควบคุมคุณภาพสิ่งแวดล้อม สำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 6 นนทบุรี. 2554. **ยูโทรฟิเคชัน (EUTROPHICATION)**. [Online]. Available: http://reo06.mnre.go.th/home/index.php?option=com_content&task=view&id=1723&Itemid=264
- [9] กลุ่มวิชาการและสารสนเทศอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลทราย สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย. 2561. **การผลิตไฟฟ้าและไอน้ำของอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลทราย**. [Online]. Available: <http://www.ocsb.go.th/upload/bioindustry/fileupload/10169-3442.pdf>.
- [10] กวินทร์ ศุภวิทย์โยธิน. 2555. “การประเมินปัจจัยของการผลิตถ่านจากไม้ไผ่โดยใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในเซชัน.” **วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่**.
- [11] เกษม สุขสถาน. 2523. **อ้อย**. [Online]. Available: <http://kanchanapisek.or.th/kp6/sub/book/book.php?book=5&chap=3&page=t5-3-infodetail18.html>.

- [12] จงรักษ์ ผลประเสริฐ. 2560. การผลิตถ่านไฮโดรจากสิ่งปฏิกูลโดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน. [Online]. Available: <http://www.royin.go.th/?p=17292>.
- [13] ฐานข้อมูลความรู้ทางทะเล. 2562. ปราภฏการณ์น้ำทะเลเปลี่ยนสี. [Online]. Available: http://www.mkh.in.th/index.php?option=com_content&view=article&id=73&Itemid=179&lang=th.
- [14] นิสافر มุหะมัด, สมภพ เกาทอง, อุบล ต้นสม และ ปิยศิริ สุนทรนนท์. 2559 “การดูดซับสี ย้อมด้วยกากขา.” งานวิจัยวิทยาศาสตร์บัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา.
- [15] ประสิทธิ์ชัย สุขสาร, วิษุฒ ยิ้มมุด และ สิริเชษฐ์ เครือเพ็ชร. 2556. “การดูดซับสังกะสีและตะกั่ว ในน้ำเสีย สังกะสีโดยใช้เปลือกส้มโอที่ปรับปรุงทางเคมี.” โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [16] ปรินทร เต็มญารศิลป์ . 2551. “การเตรียมและวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของถ่านกัมมันต์ จากไม้ตอง และไม้พม่าจู้”. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมี, มหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์. วิทยาเขตบางเขน.
- [17] พงศ์ศักดิ์ หนูพันธ์ และ รัฐชา ชัยชนะ. 2557. ผลกระทบของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสต่อการเกิดยูโทรฟิเคชันในแหล่งน้ำและการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัส. [Online]. Available: <https://www.tci-thaijo.org/index.php/kuengi/article/view/79575/63542>.
- [18] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และ นิธิยา รัตนาปนนท์. 2562. เฮมิเซลลูโลส. [Online]. Available: <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/3154/hemicellulose>.
- [19] ภูซังค์ ศรีหิ่ง. 2558. “การศึกษาการดูดซับมีเทนและไฮโดรเจนในถ่านกัมมันต์ที่มีนิกเกิลบนพื้นผิวโดยแบบจำลองมอนติคาร์โล.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรม เคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- [20] วสันต์ ธีระพิทยานนท์. 2556. ผลกระทบของฟอสฟอรัสต่อสิ่งแวดล้อม. [Online]. Available: dss.go.th/images/st-article/pep-12-2556-impact-envi.pdf.
- [21] วิทยา ปันสุวรรณ, วิวัฒน์ อรรถนพานุรักษ์ และ พิลาณี ไวกอนอมสัจย์. 2554. เพอร์ฟิวรอลและแอลฟาเซลลูโลสจากขานอ้อย. [Online]. Available: http://www2.mtec.or.th/th/searchsys/search_proj/detail.asp?proj_id=MT-B-47-POL-11-299-G&lang=1.
- [22] สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2560. “ปรับกิจกรรมเก่าให้เข้ากับเทรนด์สะเต็ม.” นิตยสารสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 45(205) : 14-17.
- เอกส[23] สุรีย์วัลย์ สิทธิจันต์. 2560. “หญ้าเนเปียร์ กับการผลิตพลังงานทดแทน.” นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีไควารัส สาร สิ่งแวดล้อม. 21(1) : 19-24. หาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [24] โพสต์ทูเดย์. 2557. ฟินสวยด้วยถ่านกัมมันต์. [Online]. Available : <https://www.posttoday.com/life /300666>.
- [25] Ahamad, T. , Naushad, M. , Ruksana, Ameen N. , Alhabarah and Alshehri, S.M. 2019. "N/S doped highly porous magnetic carbon aerogel derived from sugarcane bagasse cellulose for the removal of bisphenol'A." *International Journal of Biological Macromolecules*. 1(132) : 1031-1038.
- [26] APHA, AWWA and WEF. 2012. "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater" 22nd Edition. USA: American Public Health Association.
- [27] Borchert, H. , Jürgens, B. , Zielasek, V. , Rupprechter, G. , Giorgio, S. , Henry, C.R. and Bäumer, M. 2007. "Pd nanoparticles with highly defined structure on MgO as model catalysts: An FTIR study of the interaction with CO, O₂, and H₂ under ambient conditions." *Journal of Catalysis*. N.D.(247) : 145-154.
- [28] Deshmukh, P. , Peshwe, D. and Pathak, S. 2012. "FTIR and TGA analysis in relation with the % crystallinity of the SiO₂ obtained by burning rice husk at various temperatures." *Advanced Materials Research*. N.D.(585) : 77-81.
- [29] Detudom Charcoal Group. 2019. ถ่านอัดแท่ง. [Online]. Available : http://www.ddcharcoal.com/product_line_detail.php?n=3.
- [30] Detudom Charcoal Group. 2019. ถ่านขาว. [Online]. Available : http://www.ddcharcoal.com/product_line_detail.php?n=4.
- [31] Fang, N.C. , Guo, X.Y. and Liang, S. 2010. "Enhanced Cu(II) adsorption by orange peel modified with sodium hydroxide." *Transaction of Nonferrous Metals Society of China*. 20 : 146-152.
- [32] Garcia, V.P. , Toledo, N. , Denardin, J. , Yazigi, D.V. , Cruz, C. , Spodine, E. and Luo, Z. 2013. "One pot Solvothermal synthesis of organic acid coated magnetic iron oxide nanoparticles." *Journal of the Chilean Chemical Society*. 58(4) : 2011-2015.
- [33] Hoekman, S.K. , Broch, A. and Robbins, C. 2011. "Hydrothermal carbonization (HTC) of lignocellulosic biomass." *Energy Fuels*. N.D.(1) : 1802-1810.
- [34] Hofmeister, A. M. , Keppel, E. and Speck, A. K. 2003. "Absorption and reflection infrared spectra of MgO and other diatomic compounds." *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 1(345) : 16-38.

- [35] Leite, R. , Medeiros, Y. Almeida, D. Sarmiento, S.M. , Alves, K.G.B. , Melo, E.F.D.and Maior, R.M.S. 2015. “Solvent-fractionated sugar cane bagasse lignin : structural characteristics and electro-spinnability.” *e-Polymers* 2016. 16(2) : 137-144.
- [36] LG Sonic. 2016. **Algae Control Methods for Lakes and Reservoirs**. [Online]. Available: <http://www.utilis.co.th/algae-control-methods-for-lakes-and-reservoirs>.
- [37] Missaoui, A. , Bostyn, S. , Beldria, V. , Cagnon, B. , Sarh, B. and Gökalp, I. 2017. “Hydrothermal carbonization of dried olive pomace: Energy potential and process performances.” *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. N.D. (1) : 281-290.
- [38] Nanagarden. 2018. **ถ่านชีวภาพ (Biochar) ผสมจุลินทรีย์สังเคราะห์แสง**. [Online]. Available : <https://www.nanagarden.com/product/294832>.
- [39] Pruksakit, W. and Patumsawad, S. 2016. “Hydrothermal carbonization (HTC) of sugarcane stranded: Effect of operation condition to hydrochar production.” *Energy Prpcedia*. N.D.(100) : 223-226.
- [40] Putra, R.S. , Liyanita, A. , Arifah, N. , Puspitasari, E. , Sawaludin and Hizam, M.N. 2017. “Enhanced electro-catalytic process on the synthesis of FAME using CaO from eggshell.” *Energy Procedia*. N.D.(105) : 289-296.
- [41] Ren, J. , Li, N. , Li, L. , Kun An, J. , Zhao, L. and Qi Ren, N. 2014. “Granulation and ferric oxides loading enable biochar derived from cotton stalk to remove phosphate from water.” *Bioresource Technology*. N.D.(178) : 119-125.
- [42] Saleh, S. , Kamarudin, K.B. , Ghani, W.A.W.A.K. and Kheang , L.S. 2016 “Removal of Organic Contaminant from Aqueous Solution Using Magnetic Biochar.” *Procedia Engineering*. N.D.(148) : 228-235.
- [43] Sanook. 2016. ประโยชน์ของถ่านก๊อมนๆสีดำแต่แสนล้ำค่า. [Online]. Available : <https://www.sanook.com/home/11213/>.
- [44] Silva, C.C. , Melo, C.A. , Junior, F.H.S. , Moreira, A.B. , Ferreira, O.P. and Bisinoti, M.C. 2017. “Effect of the reaction medium on the immobilization of nutrients in hydrochars obtained using sugarcane industry residues.” *Bioresource Technology*. N.D.(237) : 213-221.
- [45] Sub-aurairat, N. 2019. ถ่านดูดกลิ่นจากผลไม้. [Online]. Available: <https://nongtuey009.wixsite.com/nitiphat/blank-z9ky7>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [46] Takaya, C.A. , Fletcher, L.A. , Singh, S. , Okwuosa, U.C. and Ross, A.B. 2016. “Recovery of phosphate with chemically modified biochars.” *Journal of Environmental Chemical Engineering*. N.D.(4) : 1156–1165.
- [47] Vishakha, G.K. , Butte, K. and Rathod, S. 2012. “Natural polymers- A comprehensive review.” *International Journal of Research in Pharmaceutical and Biomedical Sciences*. 3(4) : 1597-1613.
- [48] Wang, T. , Zhai, Y. , Zhu, Y. , Li, C. and Zeng, G. 2018. “A review of the hydrothermalcarbonization of biomass waste for hydrochar formation: Process conditions, fundamentals, and physicochemical properties.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. N.D.(90) : 223-247.
- [49] Wikipedia. 2019. **Pentosan polysulfate**. [Online]. Available : https://en.wikipedia.org/wiki/Pentosan_polysulfate.
- [50] Wikipedia. 2019. **Phosphate**. [Online]. Available : <https://en.wikipedia.org/wiki/Phosphate#/media/File:Phosphat-Ion.svg>.
- [51] Yang, Q. , Wang, X. , Luo, W. , Sun, J. , Xu, Q. , Chen, F. , Zhao, J. , Wang, S. , Yao, F. ,Wang, D. , Li, X. and Guangming, Z. 2018. “Effectiveness and mechanisms of phosphate adsorption on iron-modified biochars derived from waste activated sludge.” *Bioresource Technology*. N.D.(247) : 537–544.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

วิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ

ก.1 การวิเคราะห์ปริมาณออร์โธฟอสเฟตในน้ำ (Orthophosphate)

การวิเคราะห์ปริมาณออร์โธฟอสเฟตในน้ำทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการทำให้เกิดสีโดยวิธี Ascorbic acid ตามวิธีของ APHA et al. (2012) ซึ่งมีรายละเอียดวิธีการวิเคราะห์ดังนี้

1. การเตรียมสารละลายสต็อกฟอสเฟตเข้มข้น

- ละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) 219.5 มิลลิกรัม ในน้ำกลั่นและเทลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดวัด สารละลาย KH_2PO_4 จะมีปริมาณฟอสเฟต 50.0 ไมโครกรัมฟอสฟอรัสต่อมิลลิลิตร

2. การเตรียมสารละลายมาตรฐานสำหรับทำการกราฟมาตรฐานฟอสเฟต

- นำสารละลายจากข้อที่ 1 มา 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 1 ลิตร จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดวัด จะได้สารละลายมาตรฐานฟอสเฟต ที่มีความเข้มข้นฟอสเฟต 2.5 ไมโครกรัมฟอสฟอรัสต่อมิลลิลิตร สารละลายนี้จะถูกนำไปเตรียมทำการกราฟมาตรฐานฟอสเฟต ตามตารางที่ ก.1

ตารางที่ ก.1 การเตรียมสารละลายสำหรับทำการกราฟมาตรฐานฟอสเฟต

| สารละลายมาตรฐานฟอสเฟต (มิลลิลิตร) | น้ำยารวม (มิลลิลิตร) | น้ำกลั่น (มิลลิลิตร) | ปริมาตรรวม (มิลลิลิตร) | มวลของฟอสเฟต (ไมโครกรัมฟอสฟอรัส) |
|-----------------------------------|----------------------|----------------------|------------------------|----------------------------------|
| 0 | 8 | 42 | 50 | 0 |
| 2 | 8 | 40 | 50 | 5 |
| 6 | 8 | 36 | 50 | 15 |
| 10 | 8 | 32 | 50 | 25 |
| 16 | 8 | 26 | 50 | 40 |
| 24 | 8 | 18 | 50 | 60 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การเตรียมน้ำยารวม (Combined reagent) ผสมน้ำยาเคมีในสัดส่วนสำหรับ 100 มิลลิลิตร โดยผสมสารละลาย ดังนี้

- กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) เข้มข้น 5.0 นอร์มอล ปริมาตร 50 มิลลิลิตร
- สารละลายแอนติโมนีโพแทสเซียมทาเทรต ปริมาตร 5 มิลลิลิตร
- สารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต ปริมาตร 15 มิลลิลิตร
- กรดแอสคอร์บิก ปริมาตร 30 มิลลิลิตร

4. ปิเปตน้ำตัวอย่างมา 50 มิลลิลิตร ใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร เติมฟีนอล์ฟทาลีน 1 หยด ทารปรากกุสีแดงให้เต็มกรดซัลฟิวริก 5 นอร์มอล ที่ละหยดจนสีแดงหายไป แล้วเติมน้ำยารวม 8 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ 10 นาที จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร นำค่า Absorbance ที่ได้สร้างกราฟมาตรฐานฟอสเฟต โดยที่แกน x คือ มวลของฟอสเฟต (μg) และแกน y คือ Absorbance จากนั้นทำการหาฟังก์ชันสมการเส้นตรง จะได้กราฟมาตรฐานของสารละลายฟอสเฟต

5. การคำนวณ

$$\text{ความเข้มข้นฟอสเฟต (mg-P/L)} = \frac{\text{มวลที่อ่านได้จากกราฟ } (\mu g) \times \text{Dilution factor}}{\text{ปริมาตรน้ำตัวอย่าง (mL)}}$$

ก.2 การทดสอบความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู (Methylene Blue Number, M.B.N.)

เป็นการทดสอบ เพื่อวิเคราะห์หาความสามารถสูงสุดในการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลู อ้างอิงตามงานวิจัยของปรินทร (2551) ซึ่งมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้

1. การเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช เท่ากับ 7.0

- ออบสาร (A) คือ โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) และสาร (B) คือ ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4) ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น จากนั้นชั่งสาร (A) มา 9.08 กรัม และสาร (B) 23.88 กรัม ตามลำดับ และละลายด้วยน้ำกลั่น ปรับปริมาตรเป็น 1000 มิลลิลิตร นำสารละลาย (A) มา 400 มิลลิลิตร และสารละลาย (B) มา 600 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันจะได้สารละลายบัฟเฟอร์พีเอช เท่ากับ 7.0

2. การเตรียมสารละลายสต็อกเมทิลีนบลูความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร (พีเอชเท่ากับ 7.0)

- ละลายเมทิลีนบลู 0.5000 กรัม ในสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช เท่ากับ 7.0 และเทลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 500 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรด้วยสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช เท่ากับ 7.0 จนถึงขีดวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การเตรียมกราฟมาตรฐานเมทธิลีนบลู ความเข้มข้น 2, 4, 6, 8 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

- ปิเปตสารละลายมาตรฐานเมทธิลีนบลู ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร มา 200, 400, 600, 800 และ 1000 ไมโครลิตร ใส่ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร ตามลำดับ และปรับปริมาตรด้วยสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช เท่ากับ 7.0 จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น 667 นาโนเมตร นำค่า Absorbance ที่ได้ไปสร้างกราฟมาตรฐาน โดยที่แกน x คือ ความเข้มข้นของสารละลายเมทธิลีนบลู (mg/L) และแกน y คือ Absorbance จากนั้นทำการหาฟังก์ชันสมการเส้นตรง จะได้กราฟมาตรฐานของสารละลายเมทธิลีนบลู

4. การเตรียมสารละลายเมทธิลีนบลูที่มีความเข้มข้น 10, 25, 50, 100, 250 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร

- ปิเปตสารละลายมาตรฐานเมทธิลีนบลูความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร มา 1, 2.5, 5, 10, 25 และ 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร ตามลำดับ และปรับปริมาตรด้วยสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช เท่ากับ 7.0

5. ชั่งตัวดูดซับมาอย่างละ 0.0100 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ที่บรรจุสารละลายเมทธิลีนบลูเข้มข้น 10, 25, 50, 100, 250 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการทอพออ์ลและเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแบบแนวนอน ที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

6. เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด นำชุดทดลองในข้อที่ 5 มากรองด้วยชุดกรองแบบลดความดันด้วยกระดาษกรอง whatman เบอร์ 42

7. นำสารละลายที่ได้จากการกรองไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น 667 นาโนเมตร

8. คำนวณค่าความจุในการดูดซับเมทธิลีนบลู (Q_e) ในแต่ละขวด โดยใช้สมการต่อไปนี้

$$Q_e = \frac{(C_0 - C_e) \times V}{M}$$

เมื่อ Q_e คือ ความจุในการดูดซับสารละลายเมทธิลีนบลู (mg/g)

C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเมทธิลีนบลู (mg/L)

C_e คือ ความเข้มข้นที่เหลือของสารละลายเมทธิลีนบลู (mg/L)

V คือ ปริมาตรสารละลายเมทธิลีนบลู (L)

M คือ น้ำหนักตัวดูดซับที่ใช้ (g)

9. ทำการพล็อตกราฟเส้นตรงระหว่างค่า $1/C_e$ คือ แกน x และค่า $1/Q_e$ คือ แกน y จะได้กราฟฟังก์ชันสมการเส้นตรง โดยส่วนกลับของจุดตัดแกน y จะเป็นค่าความจุสูงสุดในการดูดซับสารละลายเมทธิลีนบลู (q_m) หรือเป็นค่า Methylene Blue Number หน่วยคือ mg/g

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง หากมีข้อผิดพลาดประการใด ขออภัยและสงวนสิทธิ์ในเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.3 การศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่างที่ประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ (Point of zero charge, pH_{pzc}) โดยใช้วิธี pH Drift Method

เป็นการศึกษาผลรวมของประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับมีค่าเป็นศูนย์

1. เตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่มีความเข้มข้น 0.01 โมลาร์
2. นำสารละลายจากข้อ 1. มา 50 มิลลิลิตร ปรับความเป็นกรด-เบส ให้อยู่ในช่วงพีเอชระหว่าง 3.00 – 12.00 ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่มีความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ โดยวัดความเป็นกรด-เบส ด้วยเครื่องพีเอชมิเตอร์
3. ชั่งตัวดูดซับมา 0.1500 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ และเติมสารละลายจากข้อ 2. จากนั้นปิดปากขวดรูปชมพู่ให้สนิท
4. นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแบบแนวนอนด้วยความเร็ว 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
5. เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด นำสารละลายที่ผ่านการเขย่าไปวัดค่าพีเอชหลังการเขย่าอีกครั้ง
6. นำไปเขียนความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรด-เบสเริ่มต้น (pH_i) และความเป็นกรด-เบสสุดท้าย (pH_f) โดยประจุที่ผิวเป็นศูนย์ของตัวดูดซับหาได้จาก ผลต่างของความเป็นกรด-เบสสุดท้าย กับความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นตัดกับเส้นความเป็นกรด-เบสเริ่มต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข

ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 การวิเคราะห์ค่า Methylene Blue Number ของขานอ้อยและถ่านไฮโดร

| ตัวดูด ซับ | น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม) | | | ฟังก์ชันสมการเส้นตรง | ค่าการดูดกลืนแสงก่อนเขย่า | | | ค่าการดูดกลืนแสงหลังเขย่า | | | | | |
|---------------|------------------------|----------|----------|-----------------------|---------------------------|----------|----------|---------------------------|---------|----------|---------|----------|---------|
| | ครั้งที่ | ครั้งที่ | ครั้งที่ | | ครั้งที่ | ครั้งที่ | ครั้งที่ | ครั้งที่ | เจือจาง | ครั้งที่ | เจือจาง | ครั้งที่ | เจือจาง |
| | 1 | 2 | 3 | | 1 | 2 | 3 | 1 | (เท่า) | 2 | (เท่า) | 3 | (เท่า) |
| ขาน อ้อย | 0.0105 | 0.0101 | 0.0105 | $y = 0.1355x + 0.164$ | 1.4833 | 1.4833 | 1.4833 | 0.4168 | - | 0.4904 | - | 0.7438 | - |
| | 0.0107 | 0.0106 | 0.0115 | | 0.4547 | 0.4547 | 0.4547 | 0.5706 | - | 0.5550 | - | 1.2252 | - |
| | 0.0107 | 0.0103 | 0.0107 | | 0.7271 | 0.7271 | 0.7271 | 0.7946 | 5 | 0.7320 | 5 | 0.8296 | 5 |
| | 0.0100 | 0.0102 | 0.0106 | | 1.3609 | 1.3609 | 1.3609 | 0.8325 | 10 | 0.8129 | 10 | 0.7233 | 10 |
| | 0.0103 | 0.0101 | 0.0103 | | 0.6435 | 0.6435 | 0.6435 | 0.5608 | 50 | 0.5420 | 50 | 0.5664 | 50 |
| | 0.0103 | 0.0102 | 0.0102 | | 0.6624 | 0.6624 | 0.6624 | 0.5151 | 100 | 0.7255 | 100 | 0.7086 | 100 |

ตารางที่ ข.1 การวิเคราะห์ค่า Methylene Blue Number ของขานอ้อยและถ่านไฮโดร (ต่อ)

| ตัวดูด ซับ | น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม) | | | ฟังก์ชันสมการเส้นตรง | ค่าการดูดกลืนแสงก่อนเขย่า | | | ค่าการดูดกลืนแสงหลังเขย่า | | | | | |
|---------------|------------------------|----------|----------|-----------------------|---------------------------|----------|----------|---------------------------|---------|----------|---------|----------|---------|
| | ครั้งที่ | ครั้งที่ | ครั้งที่ | | ครั้งที่ | ครั้งที่ | ครั้งที่ | ครั้งที่ | เจือจาง | ครั้งที่ | เจือจาง | ครั้งที่ | เจือจาง |
| | 1 | 2 | 3 | | 1 | 2 | 3 | 1 | (เท่า) | 2 | (เท่า) | 3 | (เท่า) |
| ถ่าน ไฮโดร | 0.0101 | 0.0109 | 0.0117 | $y = 0.1355x + 0.164$ | 0.8106 | 0.8106 | 0.8106 | 0.0980 | - | 0.0707 | - | 0.1339 | - |
| | 0.0100 | 0.0107 | 0.0118 | | 0.8431 | 0.8431 | 0.8431 | 0.1367 | - | 0.1367 | - | 0.1774 | - |
| | 0.0103 | 0.0107 | 0.0110 | | 0.8222 | 0.8222 | 0.8222 | 0.9305 | - | 0.7016 | - | 0.6024 | - |
| | 0.0102 | 0.0104 | 0.0105 | | 0.8791 | 0.8791 | 0.8791 | 0.6148 | 10 | 0.7592 | 10 | 0.4384 | 10 |
| | 0.0100 | 0.0106 | 0.0122 | | 0.8991 | 0.8991 | 0.8991 | 0.5820 | 50 | 0.5854 | 50 | 0.7846 | 25 |
| | 0.0101 | 0.0104 | 0.0119 | | 0.6792 | 0.6792 | 0.6792 | 0.7357 | 100 | 0.6820 | 100 | 0.5087 | 100 |

การคำนวณ

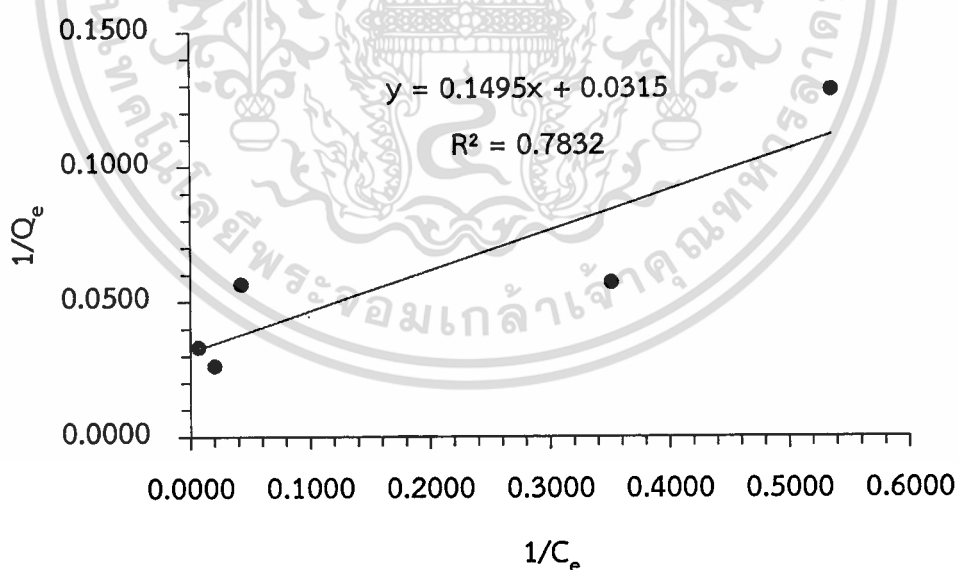
ตัวอย่างการคำนวณค่า Methylene Blue Number ของชานอ้อยครั้งที่ 1 โดยชั่งชานอ้อย 0.0102 กรัม (M) ในสารละลายเมทิลีนบลูที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น (C_0) เท่ากับ 88.33 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 มิลลิลิตร (V) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นกรองชานอ้อยแล้วนำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของเมทิลีนบลูที่เหลือ (C_e) ได้เท่ากับ 49.34 มิลลิกรัมต่อลิตร นำมาคำนวณความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู (Q_e) ของชานอ้อยด้วยสมการ

$$Q_e = \frac{(C_0 - C_e) \times V}{M}$$

$$Q_e = \frac{(88.33 \text{ mg/L} - 49.34 \text{ mg/L}) \times 0.010 \text{ L}}{0.0102 \text{ g}}$$

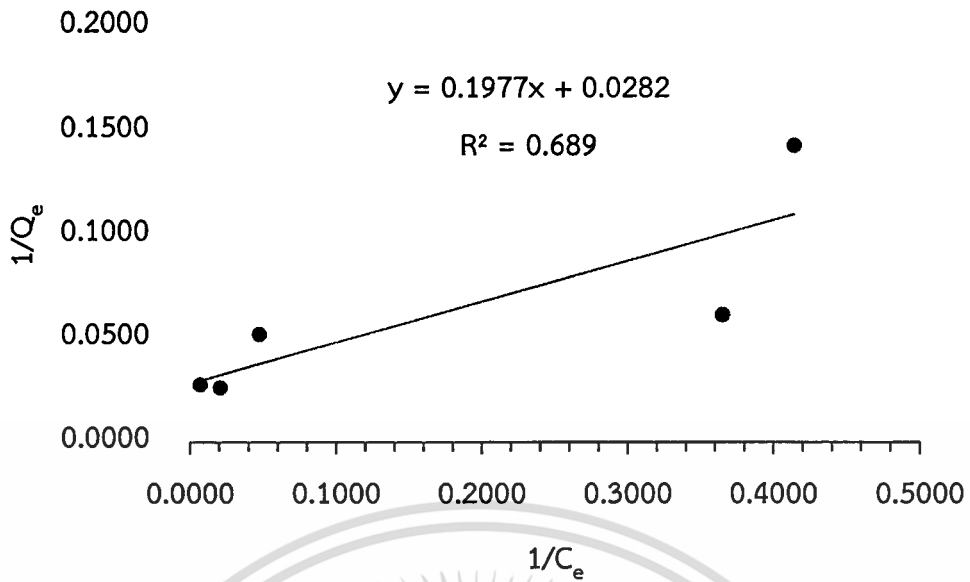
$$Q_e = 38.2 \text{ mg/g}$$

ทำการทดลองซ้ำแต่เปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูจาก 10 mg/L เป็น 25, 50, 100, 250 และ 500 mg/L จากนั้นพล็อตกราฟเส้นตรงระหว่าง $1/C_e$ กับค่า $1/Q_e$ จะได้กราฟดังรูปที่ ข.1 โดยส่วนกลับของจุดตัดแกน y ของกราฟจะเป็นค่าความจุสูงสุดในการดูดซับเมทิลีนบลู (q_m) หรือค่า Methylene Blue Number ซึ่งมีหน่วยเป็น mg/g

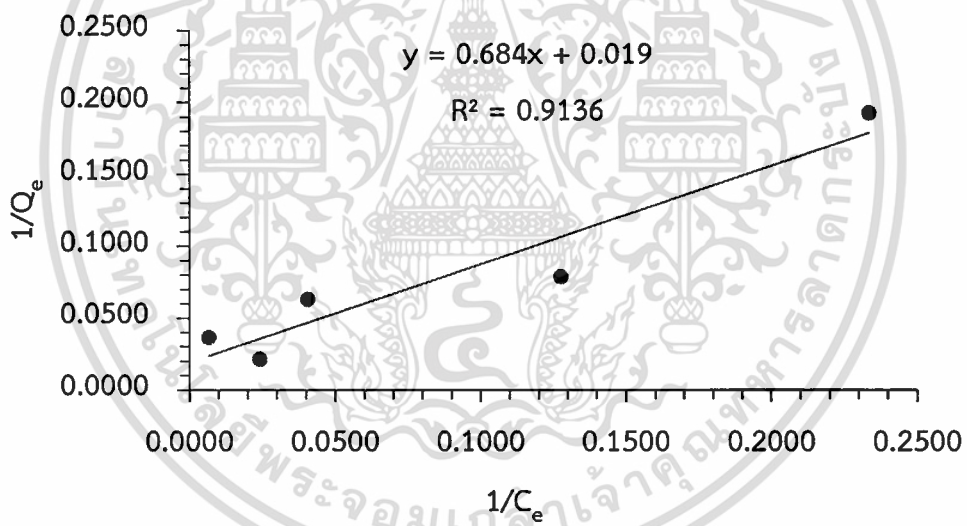


รูปที่ ข.1 กราฟเส้นตรงของ Methylene Blue Number ของชานอ้อยครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

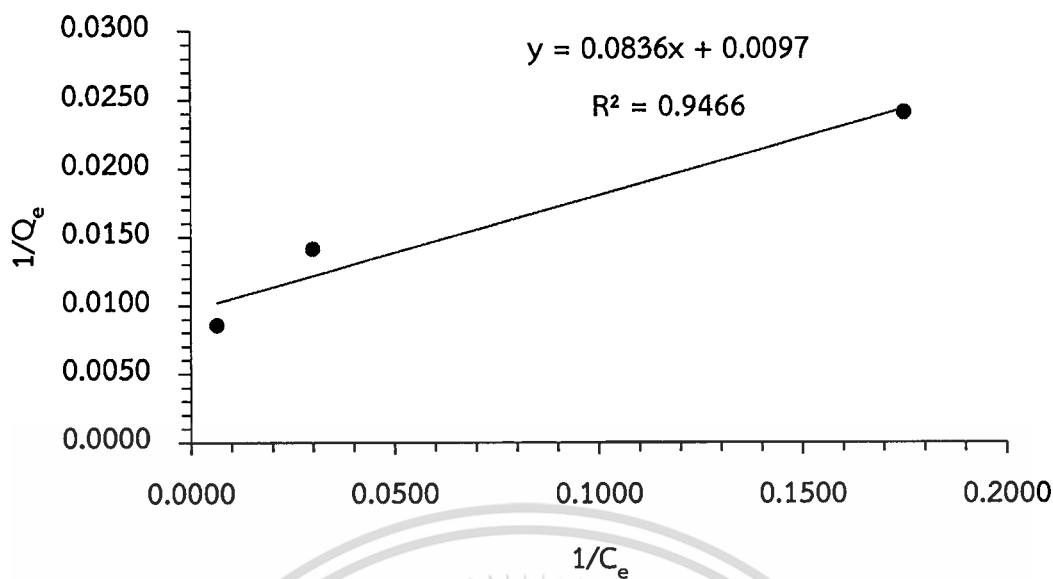


รูปที่ ข.2 กราฟเส้นตรงของ Methylene Blue Number ของขานอ้อยครั้งที่ 2

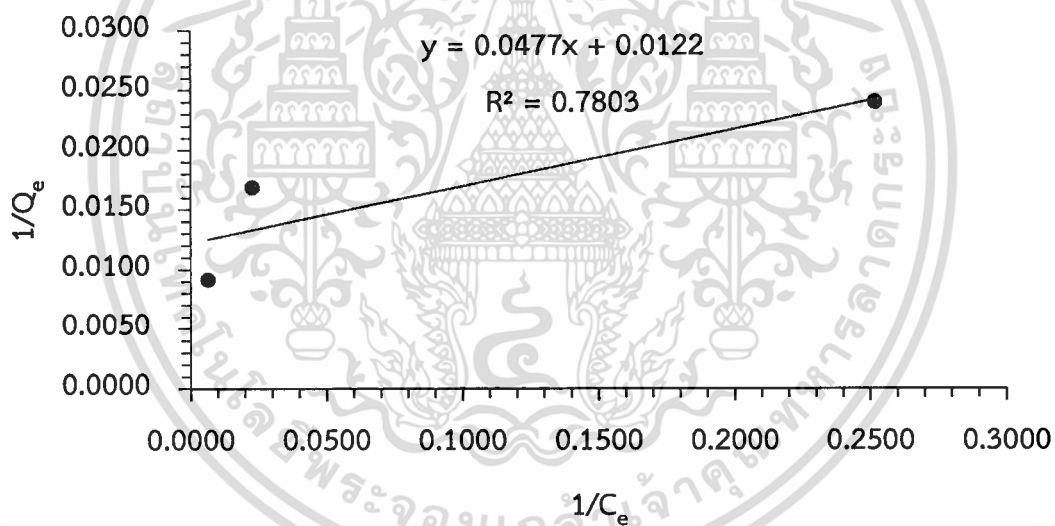


รูปที่ ข.3 กราฟเส้นตรงของ Methylene Blue Number ของขานอ้อยครั้งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

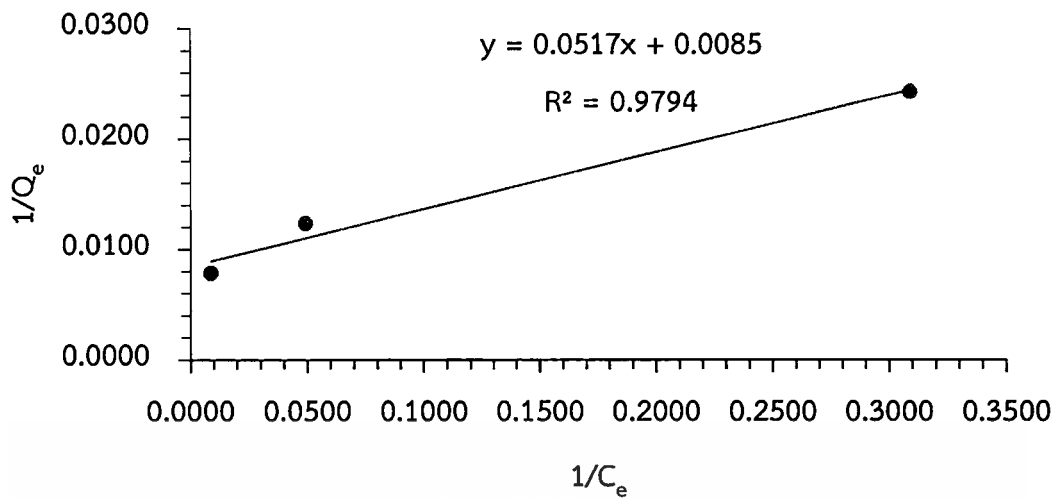


รูปที่ ข.4 กราฟเส้นตรงของ Methylene Blue Number ของถ่านไฮโดรครั้งที่ 1



รูปที่ ข.5 กราฟเส้นตรงของ Methylene Blue Number ของถ่านไฮโดรครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.6 กราฟเส้นตรงของ Methylene Blue Number ของถ่านไฮโดรครั้งที่ 3

ตารางที่ ข.2 ค่าความเป็นกรด-ด่างที่ประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ของชานอ้อย

| pH _i | pH _f | pH _i -pH _f |
|-----------------|-----------------|----------------------------------|
| 3.00 | 2.74 | 0.26 |
| 4.00 | 3.89 | 0.11 |
| 5.00 | 4.16 | 0.84 |
| 6.01 | 4.09 | 1.92 |
| 6.99 | 4.35 | 2.64 |
| 8.01 | 4.23 | 3.78 |
| 9.00 | 4.39 | 4.61 |
| 10.00 | 5.75 | 4.25 |
| 11.00 | 8.90 | 2.10 |
| 12.00 | 11.96 | 0.04 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3 ค่าความเป็นกรด-ด่างที่ประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ของถ่านไฮโดร

| pH _i | pH _f | pH _i -pH _f |
|-----------------|-----------------|----------------------------------|
| 3.00 | 3.34 | -0.34 |
| 4.00 | 3.99 | 0.01 |
| 5.00 | 4.04 | 0.96 |
| 6.00 | 4.29 | 1.71 |
| 7.00 | 4.32 | 2.68 |
| 8.00 | 3.49 | 4.51 |
| 9.00 | 4.92 | 4.08 |
| 10.00 | 5.58 | 4.42 |
| 11.00 | 8.80 | 2.20 |
| 12.00 | 11.57 | 0.43 |

ตารางที่ ข.4 ค่าความเป็นกรด-ด่างที่ประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ของถ่านไฮโดรที่ตัดแปรด้วย Fe³⁺

| pH _i | pH _f | pH _i -pH _f |
|-----------------|-----------------|----------------------------------|
| 3.00 | 6.38 | -3.38 |
| 4.00 | 7.47 | -3.47 |
| 5.00 | 7.66 | -2.66 |
| 6.00 | 7.68 | -1.68 |
| 7.00 | 7.80 | -0.80 |
| 8.00 | 7.96 | 0.04 |
| 9.00 | 8.09 | 0.91 |
| 10.00 | 8.59 | 1.41 |
| 11.00 | 10.41 | 0.59 |
| 12.00 | 11.94 | 0.06 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 ค่าความเป็นกรด-ด่างที่ประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ของถ่านไฮโดรที่ดัดแปรด้วย Fe^{3+}/Fe^{2+}

| pH _i | pH _f | pH _i -pH _f |
|-----------------|-----------------|----------------------------------|
| 3.01 | 3.81 | -0.80 |
| 4.01 | 5.40 | -1.39 |
| 5.03 | 5.47 | -0.44 |
| 6.00 | 5.58 | 0.42 |
| 6.99 | 5.68 | 1.31 |
| 8.00 | 5.87 | 2.13 |
| 9.01 | 6.00 | 3.01 |
| 10.01 | 7.59 | 2.42 |
| 11.00 | 10.70 | 0.30 |
| 12.01 | 11.93 | 0.08 |

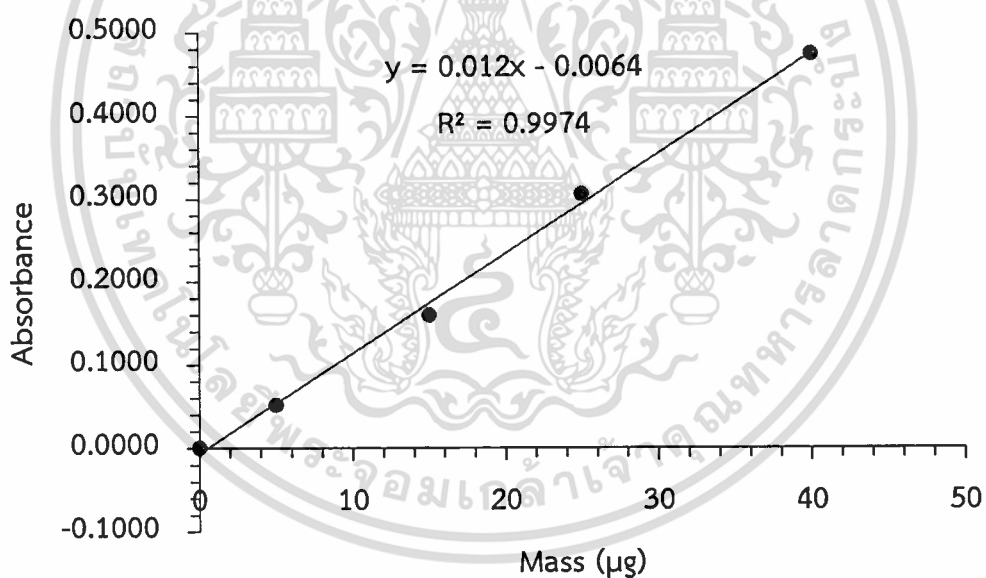
ตารางที่ ข.6 ค่าความเป็นกรด-ด่างที่ประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ของถ่านไฮโดรที่ดัดแปรด้วย Mg^{2+}

| pH _i | pH _f | pH _i -pH _f |
|-----------------|-----------------|----------------------------------|
| 3.00 | 6.95 | -3.95 |
| 4.01 | 7.09 | -3.08 |
| 5.03 | 7.12 | -2.09 |
| 6.01 | 7.14 | -1.13 |
| 7.00 | 7.15 | -0.15 |
| 7.99 | 7.15 | 0.84 |
| 9.01 | 7.26 | 1.75 |
| 10.03 | 7.75 | 2.28 |
| 11.01 | 10.66 | 0.35 |
| 12.00 | 11.97 | 0.03 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

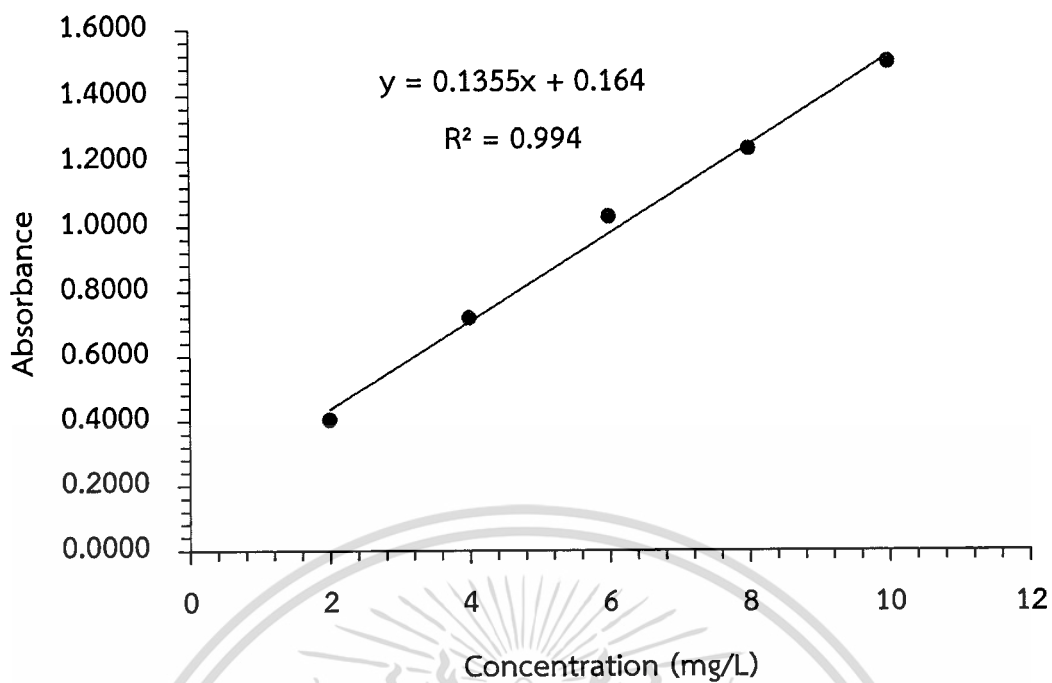
ตารางที่ ข.7 ค่าความเป็นกรด-ด่างที่ประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ของถ่านไฮโดรที่ดัดแปรด้วย Ca^{2+}

| pH_i | pH_f | $\text{pH}_i - \text{pH}_f$ |
|---------------|---------------|-----------------------------|
| 3.00 | 3.94 | -0.94 |
| 4.00 | 7.19 | -3.19 |
| 4.99 | 7.21 | -2.22 |
| 5.99 | 7.26 | -1.27 |
| 7.00 | 7.23 | -0.23 |
| 8.01 | 7.36 | 0.65 |
| 8.99 | 7.35 | 1.64 |
| 10.00 | 7.99 | 2.01 |
| 11.01 | 9.65 | 1.36 |
| 12.00 | 11.91 | 0.09 |



รูปที่ ข.7 กราฟมาตรฐานฟอสเฟต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.8 กราฟมาตรฐานเมทิลีนบลู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.8 ผลการทดสอบการแปรผันระยะเวลาสัมผัสในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำ

| ชนิดตัวดูดซับ | ระยะเวลา (ชั่วโมง) | น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม) | | | ฟังก์ชันสมการเส้นตรง | ค่าการดูดกลืนแสงก่อนเขย่า | | | ค่าการดูดกลืนแสงหลังเขย่า | | |
|---------------|-----------------------|------------------------|----------|----------|-----------------------|---------------------------|----------|----------|---------------------------|----------|----------|
| | | ครั้งที่ | ครั้งที่ | ครั้งที่ | | ครั้งที่ | ครั้งที่ | ครั้งที่ | ครั้งที่ | ครั้งที่ | ครั้งที่ |
| | | 1 | 2 | 3 | | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| ชานอ้อย | 1 | 0.1002 | 0.1001 | 0.1012 | $y = 0.012x - 0.0064$ | 0.1441 | 0.1439 | 0.1439 | 0.1413 | 0.1406 | 0.1410 |
| | 3 | 0.1001 | 0.1007 | 0.1022 | | 0.1447 | 0.1444 | 0.1445 | 0.1388 | 0.1376 | 0.1380 |
| | 6 | 0.1001 | 0.1002 | 0.1003 | | 0.1448 | 0.1445 | 0.1446 | 0.1334 | 0.1329 | 0.1328 |
| | 12 | 0.1012 | 0.1000 | 0.1004 | | 0.1442 | 0.1440 | 0.1441 | 0.1315 | 0.1311 | 0.1312 |
| | 24 | 0.1009 | 0.1003 | 0.1004 | | 0.1438 | 0.1436 | 0.1438 | 0.1304 | 0.1298 | 0.1301 |

ทำการเจือจาง 100 เท่า

ตารางที่ ข.8 ผลการทดสอบการแปรผันระยะเวลาสัมผัสในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำ (ต่อ)

| ชนิดตัวดูดซับ | ระยะเวลา (ชั่วโมง) | น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม) | | | ฟังก์ชันสมการเส้นตรง | ค่าการดูดกลืนแสงก่อนเขย่า | | | ค่าการดูดกลืนแสงหลังเขย่า | | |
|---------------|-----------------------|------------------------|---------------|---------------|-----------------------|---------------------------|---------------|---------------|---------------------------|---------------|---------------|
| | | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 |
| ถ่านไฮโดร | 1 | 0.1005 | 0.1000 | 0.1012 | $y = 0.012x - 0.0064$ | 0.1441 | 0.1439 | 0.1439 | 0.1296 | 0.1293 | 0.1295 |
| | 3 | 0.1002 | 0.1005 | 0.1003 | | 0.1447 | 0.1444 | 0.1445 | 0.1280 | 0.1274 | 0.1275 |
| | 6 | 0.1003 | 0.1010 | 0.1008 | | 0.1448 | 0.1445 | 0.1446 | 0.1269 | 0.1263 | 0.1265 |
| | 12 | 0.1001 | 0.1004 | 0.1016 | | 0.1442 | 0.1440 | 0.1441 | 0.1258 | 0.1253 | 0.1255 |
| | 24 | 0.1004 | 0.1007 | 0.1005 | | 0.1438 | 0.1436 | 0.1438 | 0.1246 | 0.1240 | 0.1242 |

ทำการเจือจาง 100 เท่า

ตารางที่ ข.8 ผลการทดสอบการแปรผันระยะเวลาสัมผัสในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำ (ต่อ)

| ชนิดตัวดูดซับ | ระยะเวลา (ชั่วโมง) | น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม) | | | ฟังก์ชันสมการเส้นตรง | ค่าการดูดกลืนแสงก่อนเขย่า | | | ค่าการดูดกลืนแสงหลังเขย่า | | |
|---|-----------------------|------------------------|---------------|---------------|-----------------------|---------------------------|---------------|---------------|---------------------------|---------------|---------------|
| | | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 |
| ถ่านไฮโดรที่ดัดแปร ด้วย Fe ³⁺ | 1 | 0.0103 | 0.1004 | 0.1009 | $y = 0.012x - 0.0064$ | 0.1441 | 0.1439 | 0.1439 | 0.1061 | 0.1055 | 0.1057 |
| | 3 | 0.1005 | 0.1003 | 0.1009 | | 0.1447 | 0.1444 | 0.1445 | 0.0970 | 0.0961 | 0.0966 |
| | 6 | 0.1001 | 0.1005 | 0.1000 | | 0.1448 | 0.1445 | 0.1446 | 0.0896 | 0.0891 | 0.0894 |
| | 12 | 0.1000 | 0.1000 | 0.1015 | | 0.1442 | 0.1440 | 0.1441 | 0.0842 | 0.0839 | 0.0843 |
| | 24 | 0.1003 | 0.1000 | 0.1030 | | 0.1438 | 0.1436 | 0.1438 | 0.0818 | 0.0811 | 0.0815 |

ทำการเจือจาง 100 เท่า

ตารางที่ ข.8 ผลการทดสอบการแปรผันระยะเวลาสัมผัสในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำ (ต่อ)

| ชนิดตัวดูดซับ | ระยะเวลา (ชั่วโมง) | น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม) | | | ฟังก์ชันสมการเส้นตรง | ค่าการดูดกลืนแสงก่อนเขย่า | | | ค่าการดูดกลืนแสงหลังเขย่า | | |
|---|-----------------------|------------------------|----------|----------|-----------------------|---------------------------|----------|----------|---------------------------|----------|----------|
| | | ครั้งที่ | ครั้งที่ | ครั้งที่ | | ครั้งที่ | ครั้งที่ | ครั้งที่ | ครั้งที่ | ครั้งที่ | ครั้งที่ |
| | | 1 | 2 | 3 | | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| ถ่านไฮโดรที่ดัดแปร ด้วย Fe ³⁺ /Fe ²⁺ | 1 | 0.1033 | 0.1001 | 0.1010 | $y = 0.012x - 0.0064$ | 0.1441 | 0.1439 | 0.1439 | 0.1155 | 0.1150 | 0.1152 |
| | 3 | 0.1000 | 0.1009 | 0.1011 | | 0.1447 | 0.1444 | 0.1445 | 0.114 | 0.1130 | 0.1133 |
| | 6 | 0.1006 | 0.1001 | 0.1045 | | 0.1448 | 0.1445 | 0.1446 | 0.111 | 0.1109 | 0.1115 |
| | 12 | 0.1009 | 0.1008 | 0.1010 | | 0.1442 | 0.1440 | 0.1441 | 0.107 | 0.1069 | 0.1071 |
| | 24 | 0.1006 | 0.1000 | 0.1014 | | 0.1438 | 0.1436 | 0.1438 | 0.098 | 0.0978 | 0.0983 |

ทำการเจือจาง 100 เท่า

ตารางที่ ข.8 ผลการทดสอบการแปรผันระยะเวลาสัมผัสในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำ (ต่อ)

| ชนิดตัวดูดซับ | ระยะเวลา (ชั่วโมง) | น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม) | | | ฟังก์ชันสมการเส้นตรง | ค่าการดูดกลืนแสงก่อนเขย่า | | | ค่าการดูดกลืนแสงหลังเขย่า | | |
|---|--------------------|------------------------|------------|------------|-----------------------|---------------------------|------------|------------|---------------------------|------------|------------|
| | | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 |
| ถ่านไฮโดรที่ตัดแปรด้วย Mg ²⁺ | 1 | 0.1002 | 0.1003 | 0.1013 | $y = 0.012x - 0.0064$ | 0.1441 | 0.1439 | 0.1439 | 0.1237 | 0.1236 | 0.1235 |
| | 3 | 0.1004 | 0.1000 | 0.1024 | | 0.1447 | 0.1444 | 0.1445 | 0.1231 | 0.1228 | 0.1232 |
| | 6 | 0.1006 | 0.1005 | 0.1003 | | 0.1448 | 0.1445 | 0.1446 | 0.1218 | 0.1215 | 0.1217 |
| | 12 | 0.1015 | 0.1000 | 0.1020 | | 0.1442 | 0.1440 | 0.1441 | 0.1208 | 0.1204 | 0.1206 |
| | 24 | 0.1008 | 0.1004 | 0.1001 | | 0.1438 | 0.1436 | 0.1438 | 0.1199 | 0.1195 | 0.1194 |

ทำการเจือจาง 100 เท่า

ตารางที่ ข.8 ผลการทดสอบการแปรผันระยะเวลาสัมผัสในการดูดซับออร์โทฟอสเฟตในน้ำ (ต่อ)

| ชนิดตัวดูดซับ | ระยะเวลา (ชั่วโมง) | น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม) | | | ฟังก์ชันสมการเส้นตรง | ค่าการดูดกลืนแสงก่อนเขย่า | | | ค่าการดูดกลืนแสงหลังเขย่า | | |
|---|--------------------|------------------------|------------|------------|-----------------------|---------------------------|------------|------------|---------------------------|------------|------------|
| | | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 |
| ถ่านไฮโดรที่ตัดแปรด้วย Ca ²⁺ | 1 | 0.1011 | 0.1006 | 0.1008 | $y = 0.012x - 0.0064$ | 0.1441 | 0.1439 | 0.1439 | 0.1192 | 0.1189 | 0.1188 |
| | 3 | 0.1003 | 0.1002 | 0.1007 | | 0.1447 | 0.1444 | 0.1445 | 0.1181 | 0.1177 | 0.1179 |
| | 6 | 0.1005 | 0.1001 | 0.1005 | | 0.1448 | 0.1445 | 0.1446 | 0.1163 | 0.1157 | 0.1159 |
| | 12 | 0.1003 | 0.1001 | 0.1000 | | 0.1442 | 0.1440 | 0.1441 | 0.1148 | 0.1144 | 0.1149 |
| | 24 | 0.1010 | 0.1000 | 0.1051 | | 0.1438 | 0.1436 | 0.1438 | 0.1140 | 0.1137 | 0.1138 |

ทำการเจือจาง 100 เท่า