



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การเพิ่มมูลค่าใบอ้อยในพื้นที่เกษตรกรรมเพื่อเตรียมเป็นถ่านกัมมันต์
และการประยุกต์ใช้ในการกำจัดความกระด้างของน้ำ

สุชาดา สวัสดิ์

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก
มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี
ปีงบประมาณ 2561

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี ที่สนับสนุนและ
ให้ทุนวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน พ.ศ. 2561
ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมีที่ให้ความช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์
ในการวิจัย

สุชาดา สวัสดิ์
ผู้วิจัย

มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

บทคัดย่อภาษาไทย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากใบอ้อยที่กระตุ้นกรดฟอสฟอริกและประยุกต์ใช้ในการกำจัดความกระด้างในน้ำบาดาล ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดได้แก่ เวลาที่เข้าสู่สมดุล (5–360 นาที) และปริมาณตัวดูดซับ (1–5 กรัม) วิเคราะห์คุณลักษณะตัวดูดซับด้วย FTIR ที่สมดุลการดูดซับใช้ไอโซเทอร์มแลงเมียร์และฟรุนดลิชอธิบาย ผลการทดลองสามารถอธิบายได้ด้วยไอโซเทอร์มแลงเมียร์ โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 9.708 มิลลิกรัมต่อกรัม จลนพลศาสตร์การดูดซับใช้ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งและสองอธิบายผลการทดลอง และพบว่าการทดลองสามารถอธิบายได้ด้วยปฏิกิริยาอันดับสอง จากผลการทดลองพบว่าถ่านกัมมันต์จากใบอ้อยเป็นตัวดูดซับราคาถูกที่ใช้ในการกำจัดความกระด้างได้

คำสำคัญ: การกำจัด, ความกระด้าง, ถ่านกัมมันต์จากใบอ้อย

มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

Abstract

In this research, sugarcane leaves were prepared as activated carbon by H_3PO_4 activation and it was applied for hardness removal in groundwater. The effects of adsorption such as pH, contact time (5–360 min) and adsorbent dose (1–5 g) at $30^\circ C$ were studied. In this study, the activated carbon was characterized by FTIR. The equilibrium experiment data were estimated using Langmuir and Freundlich isotherm. The experimental data were best described by Langmuir isotherm, and the maximum monolayer adsorption capacity of the adsorbent was found to be 9.708 mg/g. The adsorption kinetics were analyzed by pseudo–first order and pseudo–second order. The kinetic experimental data were described well by pseudo–second order model. Therefore, the results revealed that the activated carbon from sugarcane leaves can be utilized as a promising low–cost adsorbent for the hardness water removal of groundwater.

Keywords: sugarcane leave, activated carbon, water hardness, groundwater

มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก.
บทคัดย่อภาษาไทย	ข.
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค.
สารบัญ	ง.
สารบัญตาราง	ช.
สารบัญรูป	ซ.
บทที่ 1	1
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	1
1.4 กรอบแนวคิดของโครงการวิจัย	2
1.5 นิยามศัพท์	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 วัสดุที่ใช้ดูดซับ	4
2.2 ความกระด้างของน้ำ	4
2.3 ถ่านกัมมันต์	5
2.4 การดูดซับ	5
2.5 จลนพลศาสตร์การดูดซับ	7
2.6 การกำจัดความกระด้างในน้ำของตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ	8
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	11
3.1 สารละลาย	11
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย	11
3.2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	11
3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	11
3.2.3 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	11
3.3 วิธีดำเนินการวิจัย	12
3.3.1 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง	12
3.3.2 ศึกษาประสิทธิภาพและปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ	12
3.3.3 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้าง	12
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผลการทดลอง	16
4.1 การเตรียมตัวดูดซับ	15
4.1.1 การเตรียมถ่านกัมมันต์จากใบอ้อย	15

4.2 ศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของตัวดูดซับ	16
4.3 ผลของเวลาที่เข้าสู่สมดุล	18
4.4 ผลของปริมาณตัวดูดซับ	19
4.5 ไอโซเทอร์มการดูดซับ	19
4.6 จลนพลศาสตร์การดูดซับ	21
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	23
5.1 สรุปผลการวิจัย	23
5.2 ข้อเสนอแนะ	23
เอกสารอ้างอิง	24
ภาคผนวก	26
ภาคผนวก ก.	27

มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณภาพความกระต่างของน้ำ	4
2.2 ปัจจัยการแยกที่มีผลต่อรูปร่างของไอโซเทอร์มของแลงเมียร์	6
4.1 ผลการคำนวณจากไอโซเทอร์มการกำจัดความกระต่างด้วยถ่านกัมมันต์จากไบอ้อย	19
4.2 พารามิเตอร์ของไอโซเทอร์มการกำจัดความกระต่างด้วยถ่านกัมมันต์จากไบอ้อย	21
4.3 จลนพลศาสตร์การดูดซับของการกำจัดความกระต่างด้วยถ่านกัมมันต์จากไบอ้อย	22
ก.1 ผลของเวลาในการกำจัดกระต่างด้วยถ่านกัมมันต์จากไบอ้อย	27
ก.2 ผลของปริมาณตัวดูดซับในการกำจัดกระต่างด้วยถ่านกัมมันต์จากไบอ้อย	27

มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
4.1 ถ่านกัมมันต์จากไบอ้อย	15
4.2 พื้นผิวของถ่านกัมมันต์จากไบอ้อย	16
4.3 วิเคราะห์องค์ประกอบพื้นผิวของถ่านกัมมันต์จากไบอ้อย	16
4.4 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของถ่านกัมมันต์จากไบอ้อยก่อนและหลังการดูดซับ	17
4.5 ผลของเวลาในการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์จากไบอ้อย	18
4.6 ผลของปริมาณตัวดูดซับในการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์จากไบอ้อย	19
4.10 ไอโซเทอร์มการดูดซับแลงเมียร์	20
4.11 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟรุนดลิช	20
4.12 จลนพลศาสตร์การดูดซับของการกำจัดความกระด้างด้วยถ่านกัมมันต์จากไบอ้อย	22

มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

จังหวัดลพบุรี เป็นพื้นที่หนึ่งที่มีการทำไร่อ้อยเป็นจำนวนมาก หลังจากการตัดอ้อยแล้วยังคงเหลือเศษวัสดุได้แก่ ใบอ้อย เป็นจำนวนมากและยังไม่มีการนำไปใช้ประโยชน์และสร้างปัญหาให้เกษตรกรในการจัดการเศษวัสดุเหล่านี้ ซึ่งเกษตรกรจะนิยมเผาก่อนปัญหาหมอกควัน โดยเกษตรกรมีความเชื่อว่าการเผาจะเป็นการกำจัดเศษวัชพืชและเชื้อโรคในดินได้ ซึ่งการเตรียมพื้นที่ทำการเกษตรในปีถัดไปนั้น เป็นสิ่งที่มีความสำคัญที่สุด คือ การเตรียมดินเพาะปลูก ซึ่งจำเป็นที่ต้องมีการถางพื้นที่เพื่อกำจัดเศษวัชพืช โดยการเผาเป็นวิธีการที่เกษตรกรนิยมใช้กันมาก เนื่องจากเป็นวิธีการที่ง่าย สะดวก และประหยัด (คู่มือการเฝ้าระวังผลกระทบต่อสุขภาพจากปัญหาหมอกควัน สำหรับบุคลากรสาธารณสุข, 2558) ซึ่งจะทำให้ปัญหาต่อสุขภาพของประชาชนทั้งในเรื่องของฝุ่นแก๊สพิษ ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ออกไซด์ของไนโตรเจน ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และฝุ่นรวมอีกทั้งยังส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศอีกด้วย

คุณภาพน้ำบาดาลโดยรวมในจังหวัดลพบุรีสามารถใช้เพื่อการอุปโภค-บริโภคได้ แต่ต้องทำการปรับปรุงคุณภาพน้ำก่อนนำไปใช้ เช่นหมู่บ้านทุ่งทอง ต.สะแกกราบ อำเภอโคกสำโรง จังหวัดลพบุรี เป็นอีกชุมชนหนึ่งที่ใช้น้ำบาดาลเกือบทุกครัวเรือน แต่เนื่องจากคุณภาพของน้ำบาดาลมีความกระด้างสูง โดยได้ทำการทดลองในเบื้องต้นพบว่า มีค่าความกระด้างประมาณ 250 มิลลิกรัมต่อกรัม แม้ว่าความกระด้างจะไม่ส่งผลโดยตรงต่อสุขภาพ แต่ความกระด้างในน้ำส่วนใหญ่จะเป็นปัญหากับสุขภัณฑ์ทำให้เกิดคราบและเมื่อมีการใช้สบู่สำหรับทำความสะอาดร่างกาย ถ้าน้ำมีความกระด้างของแคลเซียมและแมกนีเซียมจะไม่เกิดฟองสบู่และเกิดการตกตะกอนผลึก (precipitation) เกาะติดอยู่บริเวณผิวทำให้มีความรู้สึกไม่สะอาดและกำจัดออกได้ยาก หยดน้ำที่อยู่บนผิวน้ำของสุขภัณฑ์เมื่อระเหยน้ำออกหมดจะพบธาตุแคลเซียม (Ca) และแมกนีเซียม (Mg) เหลืออยู่ ตะกอนที่เกิดขึ้นนี้ค่อนข้างเกาะติดแน่น ทำความสะอาดยาก อีกทั้งทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายจากการกำจัดคราบตะกอน

จากเหตุผลดังกล่าวผู้วิจัยความต้องการที่จะลดเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรได้แก่ ใบอ้อยทำการเตรียมถ่านกัมมันต์จากใบอ้อยโดยวิธีการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก และนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการกำจัดความกระด้างในน้ำ ซึ่งนอกจากจะเป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งมาใช้ประโยชน์แล้ว ยังเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มในเชิงพาณิชย์ให้กับท้องถิ่นอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เตรียมถ่านกัมมันต์จากใบอ้อยวิธีการกระตุ้นทางเคมี
2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างของน้ำด้วยถ่านกัมมันต์จากใบอ้อย

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ทำการสำรวจและเก็บตัวอย่างใบอ้อยจากพื้นที่เกษตรกรรมของอำเภอโคกเจริญ จังหวัดลพบุรี

2. เตรียมถ่านกัมมันต์จากไบอ้อยวิธีการกระตุ้นทางเคมีได้แก่กรดฟอสฟอริก ทำการเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง
3. น้ำกระด้าง เป็นตัวอย่างน้ำจากพื้นที่อำเภอโคกสำโรง จังหวัดลพบุรี
4. ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างของน้ำ ได้แก่ เวลาที่สัมผัสและปริมาณตัวดูดซับ และใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้แก่ ไอโซเทอร์มแลงเมียร์และฟรุนดลิชทำนายผลการทดลอง
5. ศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวดูดซับ ได้แก่ พีเอช พื้นที่ผิวด้วยวิธี Langmuir method และ วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วย FT-IR

1.4 กรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย



1.5 นิยามศัพท์

การดูดซับ คือ การถ่ายโอนองค์ประกอบจากของเหลว (liquid phase) ไปอยู่บนผิวของของแข็ง (solid phase) โมเลกุลที่จับอยู่กับผิวของแข็งเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ขณะที่ของแข็งที่จับตัวถูกดูดซับ เรียกว่า ตัวดูดซับ (adsorbent)

ไอโซเทอร์ม คือ ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับ (q_e) ต่อ 1 หน่วยมวลของตัวดูดซับกับความเข้มข้นสมดุล (C_e) และที่อุณหภูมิคงที่

จลนพลศาสตร์การดูดซับ คือ จลนพลศาสตร์การดูดซับ คือ การศึกษากลไกการดูดซับจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่อหนึ่งหน่วยเวลาหรือเรียกว่า อัตราเร็วของการดูดซับ (rate of reaction) ณ เวลาต่าง ๆ ก่อนการดูดซับเข้าสู่สภาวะสมดุล

บทที่ 2 เอกสารที่เกี่ยวข้อง

ประเทศไทย เป็นประเทศเกษตรกรรม ทำให้มีวัสดุชีวมวลจำนวนมาก ซึ่งวัสดุชีวมวลในปัจจุบันนิยมใช้ทำเป็นพลังงานทดแทน ได้แก่ ไฟฟ้าและเอทานอล เป็นต้น วัสดุชีวมวลมีการแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ เชื้อเพลิงชีวมวลเชิงพาณิชย์ (Commercialized Biomass) คือ เศษวัสดุเหลือใช้ที่ได้จาก อุตสาหกรรมการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตร และสามารถนำมาใช้ได้โดยไม่ต้องผ่านขั้นตอนการแปรรูป ซื่อ-ขาย ง่าย เช่น แกลบ ชานอ้อย เส้นใยปาล์ม กะลาปาล์ม ซึ่งส่วนใหญ่ถูกนำไปใช้ประโยชน์ อย่างแพร่หลายในเชิงพาณิชย์ และแทบจะไม่มีหลงเหลืออยู่เลย และเชื้อเพลิงชีวมวลไม่เชิงพาณิชย์ (Non-Commercialized Biomass) คือ เศษวัสดุเหลือใช้ที่กระจายในไร่ นา สวนเกษตร ในที่นี้ เช่น ฟางข้าว ยอดและใบอ้อย เหง้ามันสำปะหลัง ทางปาล์ม ต้น/ใบ/ซังข้าวโพดบนที่สูง ซึ่งยังเป็นชีวมวลที่คงเหลือ ยังไม่ถูกนำมาใช้งานในเชิงพาณิชย์ (วีรชัย อาจหาญ, 2554) ซึ่งลพบุรี เป็นจังหวัดในพื้นที่ภาคกลางที่มีการปลูกอ้อยจำนวนมาก ซึ่งในกระบวนการตัดอ้อยส่วนใหญ่จะใช้วิธีการเผาไร่อ้อยก่อนการตัดอ้อย ซึ่งทำให้สูญเสียโอกาสในการนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทน รวมทั้งยังสร้างปัญหาผลกระทบต่อด้านสังคมและสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก ผลกระทบที่เกิดจากหมอกควันอันมีสาเหตุมาจากการเผานั้นมีหลายเรื่องด้วยกัน เช่น กระทบต่อคุณภาพสิ่งแวดล้อม สุขภาพอนามัยของประชาชน ก่อให้เกิดความเดือดร้อนรำคาญ บดบังวิสัยการจราจรทั้งทางบกและทางอากาศ ส่งผลกระทบต่อการท่องเที่ยว ซึ่งเรื่องดังกล่าวเป็นที่ทราบกันดี อย่างไรก็ตาม นอกจากผลกระทบต่อที่กล่าวมาแล้ว ยังมีผลกระทบต่อทางด้านนิเวศสิ่งแวดล้อมที่น่าเป็นห่วงอีกมาก ซึ่งสามารถแบ่งเป็นหัวข้อต่างๆ ได้ดังนี้ (พงษ์เทพ, 2012)

1. ผลกระทบต่อสภาวะอากาศโลก (ปัญหาหมอกควัน ทำคนป่วยและโลกป่วย, 2012) ได้แก่ เกิดการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศอุณหภูมิสูงขึ้นทำให้มีผลต่อสภาวะโลกร้อน เกิดปรากฏการณ์ เรือนกระจก เกิดหมอกควันที่เกิดจากไฟป่าทำลายสุขภาพต่อระบบทางเดินหายใจ (มีผลกระทบต่อชาวบ้าน เด็กเล็ก ผู้สูงอายุในชุมชน) รวมทั้งสูญเสียสภาพความสวยงามของธรรมชาติ

2. ผลกระทบต่อน้ำ ได้แก่ สมดุลของน้ำเปลี่ยนแปลง เกิดอุทกภัย และภัยแล้ง และคุณภาพน้ำเสีย น้ำที่เต็มไปด้วยตะกอน ซี้เถ้า จะไหลลงสู่ลำห้วยลำธาร เกิดการทับถมในแม่น้ำ ลำน้ำต้นเขิน เมื่อฝนตกน้ำเอ่อล้น - เกิดอุทกภัย เกิดความเสียหายด้านเกษตร (การเพาะปลูก) อีกทั้งหน้าแล้ง ดินที่มีกรวดทราย ชั้นดินแน่นจากไฟป่า ไม่สามารถเก็บกักน้ำไว้ในฤดูฝนได้ จะเกิดสภาวะแห้งแล้ง ชุมชนขาดน้ำอุปโภค บริโภค รวมทั้งเกิดผลกระทบต่อการทำเกษตร การทำไร่ การเลี้ยงสัตว์

3. ผลกระทบต่อดิน ธรรมชาติ ป่าไม้ ได้แก่ การทำลายป่าไม้ ธรรมชาติ ป่าไม้ ทำให้ดินในป่าไม่สมบูรณ์ การอุ้มน้ำลดลง ไม่เก็บน้ำและธาตุอาหาร ทำลายหน้าดิน สิ่งปกคลุมดิน เมื่อฝนตกดินถูกกัดเซาะ พังทลาย พาดความสมบูรณ์ของดินไป และเกิดแผ่นดินถล่ม ซึ่งเกิดขึ้นบ่อยๆ ในภาคเหนือตอนฝนตกหนัก (ชาวบ้านในชุมชนจะได้รับผลกระทบโดยตรง)

2.1 วัสดุที่ใช้ดูดซับ

สารที่มีความสามารถในการดูดซับมีหลายชนิด อาจแบ่งได้เป็น 5 ประเภท (นิพนธ์และคณิตา, 2550) ได้แก่

1. สารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวชนิดต่าง ๆ แมกนีเซียมออกไซด์ และซิลิกาแกมมันต์ สีนแร่จำพวกอะลูมิเนียมซิลิเกต วัสดุดูดซับสารอนินทรีย์จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 50 –200 ตารางเมตรต่อกรัม และดูดซับโมเลกุลสารเพียงไม่กี่ชนิด
2. ถ่านกัมมันต์ มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 500–1,400 ตารางเมตรต่อกรัม เป็นวัสดุดูดซับที่มีประสิทธิภาพและมีการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง
3. สารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารแลกเปลี่ยนไอออน (เรซิน, resin) ชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อกำจัดสารอนินทรีย์ต่างๆ พื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300-500 ตารางเมตรต่อกรัม
4. วัสดุชีวภาพ (biomaterials) ส่วนใหญ่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น ชีลื้อยโคโตซาน กากกาแฟ ขาน้อย กากถั่วเหลือง ถั่วแกลบดำ เปลือกไม้ ฟางข้าว เป็นต้น
5. วัสดุดูดซับชีวภาพ (biosorbent) ได้แก่ เซลล์จุลินทรีย์ เช่น ยีสต์ หรือราสายพันธุ์ต่างๆ แบคทีเรีย และสาหร่าย

2.2 ความกระด้างของน้ำ (Water Hardness)

ความกระด้างของน้ำ คือ น้ำที่มีเกลือแมกนีเซียมและแคลเซียมหรือแคทไอออนประจุ (divalent ion) เช่น Sr^{2+} Fe^{2+} และ Mn^{2+} ในบางครั้งจะพิจารณาว่า Al^{3+} และ Fe^{3+} เป็นส่วนหนึ่งของความกระด้างด้วยเช่นกัน แต่เนื่องจากการละลายของไอออนทั้ง 2 มีค่าน้อยมาก ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างปกติของน้ำธรรมชาติจึงไม่พิจารณาความเข้มข้นของไอออนทั้งสอง ซึ่งความกระด้างของน้ำเกิดจากหินพวกหินตะกอน (sedimentary rock) เช่น หินปูน เกิดจากการสัมผัส เมื่อเกิดฝนตกทำให้เกิดเป็นกรดคาร์บอนิก ทำให้เกิดการละลายเนื่องจากหินปูนมีองค์ประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต และแมกนีเซียมคาร์บอเนต ความกระด้างของน้ำแสดงเป็นมิลลิกรัมของ CaCO_3 ที่สมมูลกับมิลลิโมลทั้งหมดของ Ca^{2+} และ Mg^{2+} ในสารละลายปริมาตรหนึ่งลิตร หน่วยเป็น mg/L หรือ ppm CaCO_3 สมาคมคุณภาพน้ำ (The Water Quality Association หรือ WQA) ได้กำหนดระดับความกระด้างของน้ำ ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณภาพความกระด้างของน้ำ

ชนิดของน้ำ	ความกระด้างของน้ำ (mg/L)
น้ำอ่อน (soft water)	<17
น้ำกระด้างเล็กน้อย	17-60
น้ำกระด้างปานกลาง	60-120
น้ำกระด้าง (hard water)	120-180
น้ำกระด้างมาก	> 180

2.3 ถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ หรือที่รู้จักว่า ถ่านชาร์ วัสดุที่ใช้ผลิตส่วนมากมาจากวัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ วัสดุที่นิยมใช้ผลิตได้แก่ ถ่านพีท ถ่านหิน ถ่านไม้และวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น ชานอ้อย แกลบ กะลามะพร้าว และเปลือกถั่ว เป็นต้น ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับที่ใช้กันมากในการกำจัดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ในน้ำเสีย เนื่องจากมีพื้นที่ผิวมาก โครงสร้างที่เป็นรูพรุนขนาดเล็ก และมีธรรมชาติของผิวถ่านกัมมันต์ แต่ข้อเสียของถ่านกัมมันต์คือมีราคาแพงและการฟื้นฟูสภาพ (regenerate) มีราคาสูง (Kandah et al., 2010)

กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ แบ่งได้ 2 วิธีได้แก่ กระบวนการทางกายภาพ และ กระบวนการทางเคมี

ก. การกระตุ้นทางเคมี เป็นถ่านกัมมันต์ที่ใช้สารเคมีเป็นสารกระตุ้น สารที่ทำการกระตุ้นส่วนมากเป็นสารเคมีประเภทกรดแก่ เบสแก่ และเกลือ เช่น HCl H₃PO₄ NaOH KOH และ NaCl เป็นต้น ถ่านพวกนี้มักจะมีรูพรุนขนาดใหญ่

ข. การกระตุ้นทางกายภาพ เป็นถ่านกัมมันต์ที่ใช้แก๊สออกซิไดซ์เป็นสารกระตุ้นเช่น ไอน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ ถ่านกัมมันต์ที่ได้จะมีรูพรุนขนาดเล็ก นิยมใช้ในการดูดแก๊ส และไอระเหย

การประยุกต์ใช้ของถ่านกัมมันต์

ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตแก๊ส แยกทองคำ สกัดโลหะ ทางการแพทย์ ระบบบำบัดน้ำเสีย การกรองอากาศ ทางเคมีเป็นเฟสคงที่ในการแยกคาร์โบไฮเดรต และใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น (activated carbon, 2010)

2.4 การดูดซับ

การดูดซับเป็นการแยกสารองค์ประกอบที่ต้องการออกจากสารละลายของเหลวหรือก๊าซโดยให้สารละลายหรือก๊าซผสมสัมผัสกับตัวดูดซับ องค์ประกอบแต่ละชนิดในสารละลายมีความสามารถในการกระจายบนผิวและเกิดแรงดึงดูดกับตัวดูดซับได้ต่างกัน การดูดซับขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของตัวดูดซับ คุณสมบัติทางเคมีของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ จำนวนชั้นของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ และขนาดของรูพรุนในตัวดูดซับ ดังนั้นในการแยกองค์ประกอบที่ต้องการจะต้องเลือกตัวดูดซับให้เหมาะสมกับองค์ประกอบนั้น

สมดุลของการดูดซับ

การวิเคราะห์สมดุลของการดูดซับจะอาศัยความสัมพันธ์ที่สภาวะสมดุลของสมดุลของมวลสารเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในเฟสของเหลวกับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับบนเฟสของแข็ง ความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้จะถูกเขียนเป็นกราฟไอโซเทอร์มการดูดซับ (adsorption isotherm) ซึ่งอธิบายถึงการกระจายตัวของตัวถูกดูดซับระหว่างเฟสของเหลวและของแข็ง โดยอัตราการกระจายตัวนี้สามารถวัดได้ที่จุดสมดุลและจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับหรือคุณสมบัติของตัวถูกดูดซับ เมื่อเกิดการดูดซับโมเลกุลตัวถูกดูดซับจะเข้าครอบครองทุกตำแหน่งที่เกิดการดูดซับจนเต็มทุกตำแหน่ง และจะทำให้แรงดึงดูดของผิวตัวดูดซับนั้นอ่อนลง แต่

อาจยังคงสามารถดูดซับโมเลกุลตัวถูกดูดซับต่อไปได้ก่อให้เกิดเป็นชั้นที่สอง สาม และสี่ต่อไปเรื่อยๆ ซึ่งในความเป็นจริงแล้วอาจจะมีการดูดซับชั้นที่สองก่อนที่ชั้นแรกจะเต็มและในบางตำแหน่งอาจจะดูดซับต่อหลายชั้นซ้อนสูงขึ้นไปรูปร่างของไอโซเทอร์มการดูดซับจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการดูดซับและปริมาณของสารถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับ ไอโซเทอร์มการดูดซับที่นิยมใช้ได้แก่

1. ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ เป็นการดูดซับชั้นเดียว (monolayer)

สมมุติฐานเบื้องต้นของไอโซเทอร์มแลงเมียร์

1. โมเลกุลจะถูกดูดซับในบริเวณที่แน่นอน
2. โมเลกุลของสารถูกดูดซับเกิดขึ้นโมเลกุลเดียว
3. บริเวณที่มีการดูดซับจะมีพลังงานเท่ากัน
4. ไม่เกิดปฏิกิริยาภายในระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับบริเวณพื้นที่ใกล้เคียง

ซึ่งจะเกิดขึ้นบนพื้นผิวและเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว จะเขียนได้ว่า

$$q_e = \frac{(q_m K_L C_e)}{1 + K_L C_e} \quad \dots\dots\dots(1)$$

โดยที่ C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

q_e = ปริมาณการดูดซับของตัวดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_m = ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

K_L = ค่าคงที่ของสมการแลงเมียร์

จากไอโซเทอร์มของแลงเมียร์สามารถอธิบายรูปร่างไอโซเทอร์มโดยใช้ปัจจัยการแยก R_L ดังสมการ และกำหนดไว้ ดังตารางที่ 1

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L C_0}$$

โดยที่ C_0 คือความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

ตารางที่ 2.2 ปัจจัยการแยกที่มีผลต่อรูปร่างของไอโซเทอร์มของแลงเมียร์

R_L	รูปร่างของไอโซเทอร์ม
$R_L > 1$	unfavorable
$R_L = 1$	linear
$0 < R_L < 1$	favorable
$R_L = 0$	irreversible

2. ไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิช (Freundlich Isotherm) ไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรุนดลิชเป็นที่นิยมใช้กันมากเนื่องจากมีความถูกต้องสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีการดูดซับที่ใช้กับสารละลายที่ค่อนข้างเจือจาง สมการแสดงดังนี้

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad \text{.....(2)}$$

โดยที่ q_e = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ หรือค่าการดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัมหรือมิลลิโมลต่อกรัม)

C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกละลาย (สารถูกดูดซับ) ในสารละลายที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตรหรือมิลลิโมลต่อลิตร)

K_F = ค่าคงที่ของฟรุนดลิช (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

$1/n$ = ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ

2.5 จลนพลศาสตร์การดูดซับ (Kinetic Model of Adsorption)

การศึกษาเกี่ยวกับจลนพลศาสตร์การดูดซับนั้นมีความสำคัญต่อการบำบัดน้ำเสีย กล่าวคือจะให้ข้อมูลที่มีค่าต่อการเกิดปฏิกิริยารวมทั้งกลไกการดูดซับในการวิจัยนี้ได้ศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับของสีย้อมโดยทำการวิเคราะห์ด้วยสมการ Pseudo-First Order Equation ซึ่งเขียนเป็นความสัมพันธ์ว่า

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1 (q_e - q_t) \quad \text{.....(3)}$$

โดยที่ q_e = ความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_t = ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

k_1 = ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง (ต่อนาที)

t = เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)

เมื่อ integrate จากขอบเขต $t = 0$ ถึง $t = t$ และ $q_t = 0$ ถึง $q_t = q_t$ จะได้สมการเป็น

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1 t}{2.303} \quad \text{.....(4)}$$

สำหรับสมการ Pseudo-Second Order Equation จะเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ว่า

$$\frac{dq_2}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \quad \text{.....(5)}$$

โดยที่ k_2 = ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่สอง (กรัมต่อมิลลิกรัม-นาที่)

เมื่อ integrate จากขอบเขต $t = 0$ ถึง $t = t$ และ $q_t = 0$ ถึง $q_t = q_t$ จะได้สมการเป็น

$$\frac{1}{q_e - q_t} = \frac{1}{q_e} + k_2 t \quad \text{.....(6)}$$

ซึ่งเขียนเป็นสมการเส้นตรงได้ว่า

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad \text{.....(7)}$$

2.6 การกำจัดความกระด้างในน้ำของตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ

รัชฎาพรและกมลชนก (2555). ได้ศึกษาเพื่อวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักและปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาลโดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ปรับปรุงพื้นผิวทางเคมี เพื่อใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมและการอุปโภคในเขตตำบลหนองบัวศาลาและตำบลหนองระเวียง จังหวัดนครราชสีมา ได้ทำการปรับปรุงพื้นผิวทางเคมีของถ่านกัมมันต์ด้วยกรดไนตริก และทำการวิเคราะห์ปริมาณเหล็ก แมงกานีส ทองแดง และสังกะสีในน้ำบาดาลในฤดูร้อนและฤดูฝน โดยทำการวิเคราะห์ทั้งก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยถ่านกัมมันต์ ผลการวิเคราะห์พบว่า น้ำบาดาลในฤดูร้อนของทั้ง 2 ตำบล มีปริมาณ เหล็กเกินค่ามาตรฐานน้ำบาดาลที่ใช้สำหรับอุปโภค และเมื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาลโดยใช้ถ่านกัมมันต์ จะทำให้มีปริมาณ Fe ลดลงและมีค่าไม่เกินค่ามาตรฐานน้ำบาดาล และนอกจากนี้ยังพบว่าน้ำบาดาลที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยถ่านกัมมันต์ที่ปรับปรุงพื้นผิวทางเคมีแล้ว มีปริมาณ เหล็ก แมงกานีส ทองแดง และสังกะสีเฉลี่ยไม่เกินค่ามาตรฐานน้ำบาดาลที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรมและหม้อไอน้ำ

รัตน์าและคณะ (2008). ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กในน้ำบาดาลสังเคราะห์ด้วยโคโตซานเมมเบรน ผลการศึกษาพบว่าโคโตซานเมมเบรนสามารถดูดซับที่อุณหภูมิห้อง (28 องศาเซลเซียส) และที่ 40 องศาเซลเซียส ได้ดีที่พีเอช 2.5-7.0 (75.21-100.00 %) สำหรับสมมูลในการดูดซับนั้นเกิดขึ้นตั้งแต่ชั่วโมงแรกจนกระทั่งชั่วโมงที่ 16 โดยสามารถดูดซับเหล็กได้ 72.33-97.61 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้น ของสารละลายเหล็กนั้น พบว่าโคโตซานเมมเบรนมีความสามารถในการดูดซับเหล็กเพิ่มมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเหล็กสูงขึ้นโดยประสิทธิภาพของการดูดซับที่ดีจะอยู่ในช่วงความเข้มข้น 0.5-5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าการดูดซับอยู่ในช่วง 69.20-96.61 % ผลการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับพบว่าสอดคล้องกับสมการฟรุนดลิช ซึ่งแสดง

ให้เห็นว่าเป็นการดูดซับแบบต่อเนื่อง โดยมีค่าคงที่ K_f ในสมการพรุนดลิตซ์เท่ากับ 19.05 ซึ่งมีค่าสูง แสดงถึงความจุในการดูดซับของไคโตซานเมมเบรน ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสูงด้วย

ดวงพรและอัจฉรา (2550). ศึกษาการดูดซับฟลูออไรด์โดยใช้เม็ดดินเหนียวที่ปรับสภาพด้วยเถ้าแกลบดำ โดยทำการศึกษาสัดส่วนการผสมระหว่างดินเหนียวกับเถ้าแกลบดำ ปัจจัยในการดูดซับฟลูออไรด์โดยวิธีแบบที่ละเท ประสิทธิภาพการดูดซับฟลูออไรด์และการฟื้นฟูสภาพเม็ดดูดซับโดยวิธีไหลลงแบบต่อเนื่อง จากผลการศึกษา พบว่า สัดส่วนการผสมระหว่างดินเหนียวกับเถ้าแกลบดำเพื่อนำมาใช้เป็นสารดูดซับ คือ 3:1 ค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับของฟลูออไรด์ โดยใช้ดินเหนียวที่ปรับคุณภาพด้วยเถ้าแกลบดำคือ 6-7 เวลาสัมผัสจนถึงจุดสมดุลคือ 3 ชั่วโมง เมื่อนำมาทดลองกับน้ำบาดาลโดยการเดินระบบต่อเนื่องที่อัตราการกรอง 0.1 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ความเข้มข้นฟลูออไรด์ในน้ำบาดาลเริ่มต้น 13.81 มก./ล. พบว่าดินเหนียวที่ปรับสภาพด้วยเถ้าแกลบดำมีอายุการใช้งานนาน 19 ชั่วโมง จึงหมดประสิทธิภาพ ผลการฟื้นฟูดินเหนียวที่ปรับสภาพด้วยเถ้าแกลบดำที่หมดสภาพแล้ว โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่าสามารถนำกลับมาใช้งานใหม่ได้ ซึ่งสามารถลดปริมาณฟลูออไรด์ในน้ำบาดาลจนได้ค่ามาตรฐาน แต่อายุการใช้งานลดลงจากเดิม

Ingallinella et al., (2004). กำจัดอาร์เซนิกและฟลูออไรด์ในน้ำบาดาลด้วยวิธีการโคแอกกูเลชันและการกรองสองครั้ง ใช้ polyaluminum chloride เป็นสารโคแอกกูแลนต์ ทำการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการและโรงงานต้นแบบ (pilot plant) ทำการทดลองแบบกรองเร็วและทิศทางไหลของน้ำแบบ up-flow ศึกษาหาค่าความเป็นกรด-ด่างสูงสุดและปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ที่ใช้ ผลการทดลองที่โรงงานต้นแบบพบว่ากระบวนการนี้สามารถอาร์เซนิกและฟลูออไรด์ในน้ำบาดาลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Kambale et al., (2009). ศึกษาการใช้ coarse sand (CS) gravel (G) และ pebble (P) ในการกรองน้ำบาดาล ทำการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ (laboratory scale) ที่อัตราส่วนต่าง ๆ คือ 1 : 1.5 : 3, 1.5 : 1 : 3, 3 : 1 : 1.5, 3 : 1.5 : 1, 1 : 1 : 1 (CS : G : P) ผลการทดลองพบว่าอัตราส่วน 1.5 : 1 : 3 สามารถกรองน้ำบาดาลได้ดีที่สุด

Valentukevičiene (2008). กำจัดเหล็กและอะลูมิเนียมจากน้ำบาดาลด้วยทรายจากธรรมชาติ ทำการทดลองโดยใช้ทรายหยาบขนาด 0.7-2.0 มิลลิเมตร ที่ความสูง 750 มิลลิเมตร ทำการล้างและทำการอบทรายที่อุณหภูมิ 105 องศา ใช้ น้ำบาดาลจำนวน 500 ลิตรผ่านชั้นการกรองทราย ผลการทดลองพบว่าทรายซิลิกาสามารถกำจัดได้ดีที่สุดที่ความสูง 1 เมตร ทรายหยาบมีประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กได้ถึง 95% และทรายหยาบขนาด 0.7-2.0 มิลลิเมตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดอะลูมิเนียมได้ถึง 94%

Lakdawala and Lakdawala (2012) ศึกษาการกำจัดซีโอติจากน้ำเสียในโรงงานน้ำตาลด้วยถ่านกัมมันต์แบบผง (PAC) และแบบเกล็ด (GAC) ผลการทดลองพบว่าในการกำจัดซีโอติของ PAC พบว่าใช้ปริมาณตัวดูดซับ 20 กรัมต่อลิตร สามารถกำจัดซีโอติได้ 62.26% ส่วน GAC พบว่าใช้ปริมาณตัวดูดซับ 30 กรัมต่อลิตร สามารถกำจัดซีโอติได้ 66.04% และสามารถอธิบายการดูดซับโดยใช้สมการฟรุนดลิชและแลงเมียร์ โดยที่อัตราการดูดซับจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อขนาดอนุภาคของตัวดูดซับเล็กลง

Garg et al. (2015) ศึกษาการกำจัดโครเมียมและซีโอติในน้ำเสียโรงงานซูโหลหะด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากขี้ข้าวโพด ทำการวิเคราะห์พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนด้วยวิธี BET มีค่าเท่ากับ $399.006 \text{ m}^2/\text{g}$ และ $0.23 \text{ cm}^3/\text{g}$ ตามลำดับ ปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ อุณหภูมิ, ปริมาณตัวดูดซับ, ความเป็นกรด-ด่าง และเวลา ผลการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการดูดซับที่ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 3 ปริมาณถ่านกัมมันต์ $15 \text{ Kg}/\text{m}^3$ ที่ขนาดอนุภาค $450\text{-}850 \text{ }\mu\text{m}$ ข้อมูลการทดลองสอดคล้องกับสมการฟรุนดลิชสำหรับการกำจัดโครเมียม ส่วนรีดิซ-ปีเตอร์สันสามารถอธิบายได้สำหรับการกำจัดซีโอติ ส่วนจลนพลศาสตร์การดูดซับสอดคล้องกับอันดับสองทั้งโครเมียมและซีโอติ

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 สารละลาย

สารละลายที่ใช้เป็นน้ำตัวอย่างจริงจากอำเภอลำลูกกา จังหวัดลพบุรี

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

3.2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. ตู้อบความร้อน (hot air oven) บริษัท Memmert GmbH
2. โถดูดความชื้น (dessicator)
3. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (analytical balance) บริษัท Mettler-Toledo
4. เครื่องเขย่าควบคุมอุณหภูมิ (shaker bath) บริษัท Forma Scientific
5. เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter)
6. เครื่องกวนสาร (stirrer vertical)
7. เครื่องคนอัตโนมัติ (magnetic stirrer)
8. เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-Vis spectrophotometer)

3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. ชุดกรองสุญญากาศ (vacuum)
2. บีกเกอร์ (beaker)
3. ขวดปริมาตร (volumetric flask)
4. ขวดรูปชมพู่ (erlenmeyer flask)
5. แท่งแก้ว (stirrer)
6. แท่งกวน (magnetic stirrer)
7. กรวยกรอง (funnel)
8. ขวดน้ำกลั่น (washing bottle)
9. ปิเปต (pipet)
10. หลอดหยด (dropper)
11. ช้อนตักสาร (spatular)
12. กระจกนาฬิกา (watch glass)
13. กระดาษกรองเบอร์ 42 (filter paper whatman No.42)

3.2.3 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) ชนิด commercial grade
2. แอมโมเนีย (NH_3) ชนิด AR grade จากบริษัท APS Ajax Finechem

ประเทศออสเตรเลีย

4. แอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl) ชนิด AR grade จากบริษัท APS Ajax Finechem ประเทศออสเตรเลีย

5. อีรีโอโครมแบคที ชนิด AR grade จากบริษัท Merck ประเทศเยอรมัน

3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.3.1. ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

น้ำตัวอย่าง เป็นน้ำตัวอย่างที่เตรียมขึ้นและน้ำตัวอย่างจริงจากหมู่บ้านทุ่งทอง ตำบลสะแกราบ อำเภอโคกสำโรง จังหวัดลพบุรี

ตัวดูดซับ คือ ถ่านกัมมันต์จากไบอ้อย

3.3.2. ศึกษาประสิทธิภาพและปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

3.3.2.1 การเตรียมถ่านกัมมันต์จากไบอ้อย มีขั้นตอนการเตรียมดังนี้

1. นำไบอ้อยมาล้างน้ำให้สะอาด ตากแดดให้แห้ง และตัดให้มีขนาด 1-2 นิ้ว
2. นำไบอ้อยจากข้อ 1 มาแช่ในกรดฟอสฟอริกความเข้มข้น 1.0 โมลต่อลิตร อัตราส่วนไบอ้อยต่อกรดฟอสฟอริก 1:20 เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง

3. ล้างถ่านกัมมันต์จากข้อ 2 ด้วยน้ำกลั่นจนเป็นกลาง และอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

4. นำถ่านกัมมันต์มาคัดขนาดอนุภาค 50-100 เมช เก็บในโถดูดความชื้น

3.3.2.2 ศึกษาองค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของถ่านกัมมันต์จากไบอ้อย ได้แก่

1. วิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาและเทคนิคการวัดการกระจายพลังงานด้วย Scanning Electron Microscope equipped with Energy Dispersive Spectrometer (SEM-EDS) เพื่อศึกษาถึงพื้นผิวและการกระจายตัวของรูพรุน

2. วิเคราะห์องค์ประกอบเคมีด้วย Scanning Electron Microscope equipped Energy Dispersive Spectrometer (SEM-EDS) เพื่อศึกษาถึงปริมาณซิลิกาและอลูมินา

3. วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วย Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) เพื่อศึกษาถึงหมู่ฟังก์ชัน

3.3.3 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้าง

ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างที่ปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ เวลาที่สัมผัส และ ปริมาณตัวดูดซับ มีขั้นตอนการทดลองมีดังนี้

3.3.3.1 ศึกษาเวลาที่เข้าสู่สมดุล

1. ชั่งถ่านกัมมันต์ปริมาณที่เหมาะสม ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร

2. บีบน้ำบาดาล ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่

3. นำไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เก็บตัวอย่างที่เวลาต่าง ๆ

จนถึงสมดุล ที่อุณหภูมิ 30°C

4. นำสารละลายที่ได้ไปไทเทรตกับสารละลาย EDTA และนำไปวิเคราะห์ความกระด้างที่เหลือด้วยวิธี Complexometric Titration [EDTA Method] (Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 1997)

5. ทำการทดลองซ้ำ 3 ซ้ำ

3.3.3.2 ศึกษาผลของปริมาณถ่านกัมมันต์

1. ชั่งถ่านกัมมันต์ปริมาณที่เหมาะสม จำนวน 5 ค่า ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร

2. นำไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที ตามเวลาที่ได้จากข้อ 1.

ที่อุณหภูมิ 30°C

3. นำสารละลายที่ได้ไปไทเทรตกับสารละลาย EDTA และนำไปวิเคราะห์ความกระด้างที่เหลือด้วยวิธี Complexometric Titration [EDTA Method] (Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 1997)

4. ทำการทดลองซ้ำ 3 ซ้ำ

ศึกษาไอโซเทอร์มการกำจัดความกระด้างในน้ำบาดาล

เพื่อศึกษาถึงความสามารถในการกำจัดความกระด้างในน้ำบาดาล โดยพิจารณาจากค่าความสามารถในการดูดซับโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายผลการทดลอง

ศึกษาจลนพลศาสตร์การกำจัดความกระด้างในน้ำบาดาล

เพื่อศึกษาถึงอัตราของเวลาในการกำจัดความกระด้างในน้ำบาดาล เพื่อใช้ในการออกแบบการสำหรับปฏิบัติการจริง

จากผลการทดลองที่ได้นำมาคำนวณหาร้อยละการกำจัด ดังสมการ

$$\% \text{ ดูดซับ} = \frac{(C_0 - C_t)}{C_0} \times 100$$

และคำนวณความสามารถในการกำจัด (adsorption capacity) ดังสมการ

$$q = \frac{V(C_0 - C_t)}{W}$$

โดยที่ = ความสามารถในการดูดซับสารละลาย (มิลลิกรัมต่อกรัม) = ความเข้มข้นเริ่มต้นของ
 สารละลาย(มิลลิกรัมต่อลิตร) = ความเข้มข้นที่เหลืออยู่ที่เวลาหนึ่ง ๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร) V =
 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ (มิลลิลิตร) และ W = ปริมาณตัวดูดซับ (กรัม)

มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการทดลอง

ในการทดลองนี้ แบ่งการทดลองดังบทที่ 3 ที่มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

ตอนที่ 1 การเตรียมถ่านกัมมันต์จากใบอ้อย

ตอนที่ 2 ศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของตัวดูดซับ ได้แก่

1. วิเคราะห์พื้นผิวด้วย Scanning Electron Microscope (SEM)
2. วิเคราะห์องค์ประกอบด้วย Scanning Electron Microscope (SEM-EDS)
3. วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วย Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR)

ตอนที่ 3 ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้าง โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่

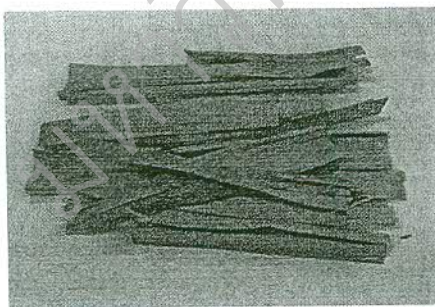
1. เวลาที่เข้าสู่สมดุล
2. ปริมาณตัวดูดซับ

ตอนที่ 4 จากผลการทดลองใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์แบบไอโซเทอร์มและจลนพลศาสตร์การดูดซับ โดยผลการทดลองมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

4.1 การเตรียมตัวดูดซับ

4.1.1 การเตรียมถ่านกัมมันต์จากใบอ้อย

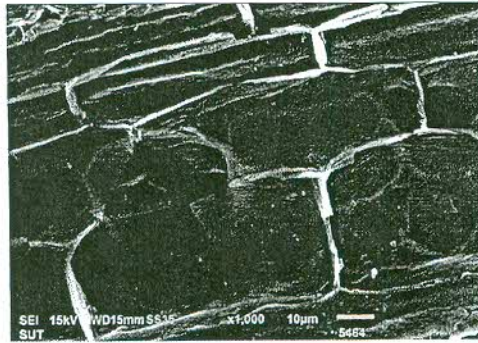
เตรียมถ่านกัมมันต์จากใบอ้อย ที่กระตุ้นด้วย 1.0 M H_3PO_4 อัตราส่วน 1:10 เวลา 24 นำไปเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง จะได้ถ่านกัมมันต์ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ถ่านกัมมันต์จากใบอ้อย

4.2 ศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของตัวดูดซับ

วิเคราะห์พื้นผิวของถ่านกัมมันต์จากใบอ้อยด้วย Scanning Electron Microscope (SEM) ที่กำลังขยาย 1000 และ 2000 เท่า ดังรูปที่ 4.2 พบว่าพื้นผิวถ่านกัมมันต์จากใบอ้อยมีรูพรุนทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่



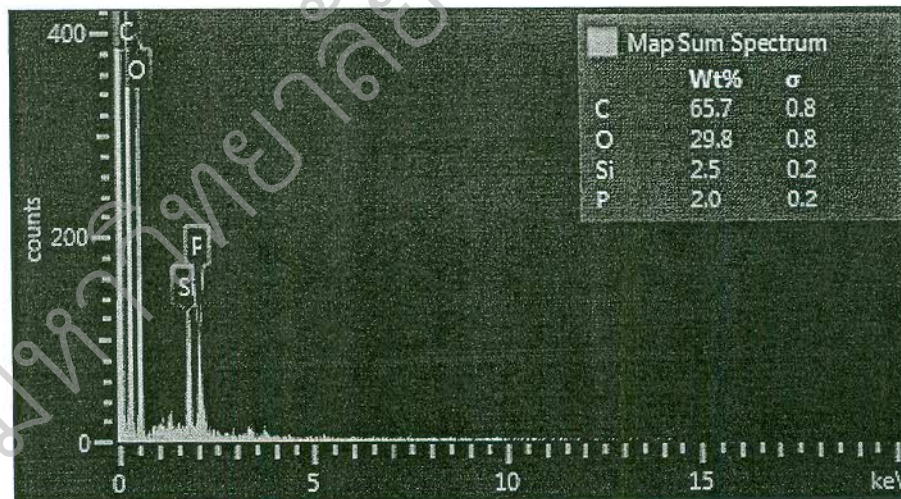
1000 เท่า



2000 เท่า

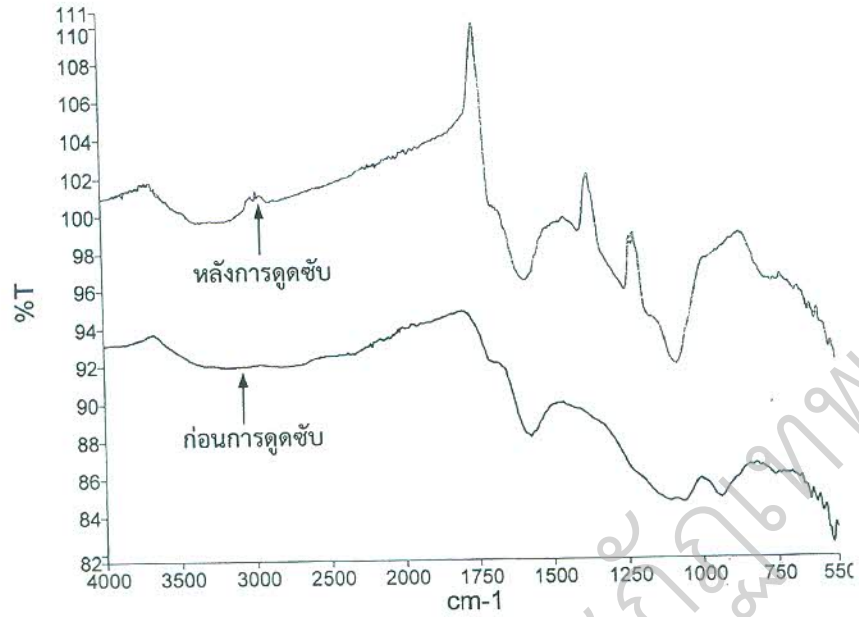
รูปที่ 4.2 พื้นผิวของถ่านกัมมันต์จากใบอ้อย

วิเคราะห์องค์ประกอบพื้นผิวของถ่านกัมมันต์จากใบอ้อยด้วย Scanning Electron Microscope (SEM-EDS) ดังรูปที่ 4.3 พบว่าถ่านกัมมันต์จากใบอ้อยมีธาตุคาร์บอน ออกซิเจน ซิลิกาและฟอสฟอรัส



รูปที่ 4.3 วิเคราะห์องค์ประกอบพื้นผิวของถ่านกัมมันต์จากใบอ้อย

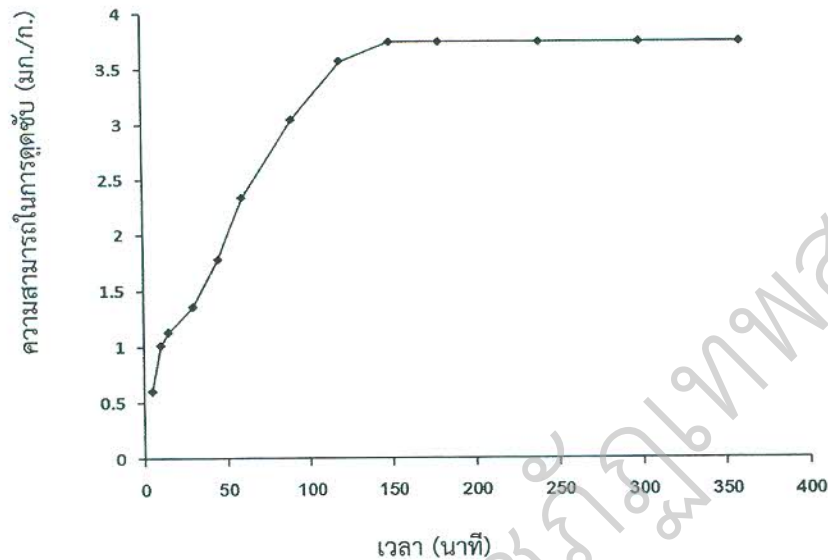
วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของถ่านกัมมันต์จากใบอ้อยก่อนและหลังการดูดซับด้วย FTIR ดังรูปที่ 4.4 พบว่าถ่านกัมมันต์จากใบอ้อยมีหมู่ฟังก์ชันที่เกิดการเปลี่ยนแปลงหลังการดูดซับ



รูปที่ 4.4 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของถ่านกัมมันต์จากใบอ้อยก่อนและหลังการดูดซับ

4.3 ผลของเวลาที่เข้าสู่สมดุล

ทำการทดลองการดูดซับที่เวลาสมดุล 5 10 15 30 45 60 90 120 150 180 210 240 300 และ 360 นาที โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับ 5 กรัม ที่ความเข้มข้นสารละลาย 252.15 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.5



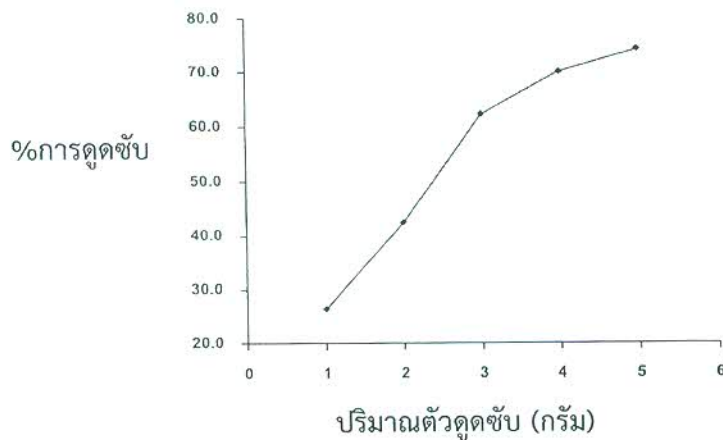
รูปที่ 4.5 ผลของเวลาในการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์จากใบอ้อย

รูปที่ 4.5 แสดงผลของเวลาที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างด้วยถ่านกัมมันต์จากใบอ้อย โดยมีค่าความกระด้างของน้ำเท่ากับ 252.15 มิลลิกรัมต่อลิตร และใช้ปริมาณตัวดูดซับ 3.0 กรัม ผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วที่เวลา 15 นาที มีความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 1.34 มิลลิกรัมต่อกรัม และการกำจัดเริ่มลดลงจนกระทั่งเข้าสู่สมดุลที่เวลา 150 นาที มีความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 3.73 มิลลิกรัมต่อกรัม

จากรูปที่ 4.5 ศึกษาผลของเวลาช่วง 5-360 นาที พบว่ามีความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 0.34-3.73 มิลลิกรัมต่อกรัม โดยที่เมื่อเวลามากขึ้นทำให้มีค่าความสามารถในการดูดซับมากขึ้น เนื่องจากบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับยังว่างอยู่ในช่วงการดูดซับเริ่มต้น และเมื่อเวลาดำเนินไปทำให้พื้นผิวตัวดูดซับเริ่มลดลงซึ่งเป็นผลจากแรงผลักระหว่างโมเลกุลที่อยู่บนพื้นผิวตัวดูดซับและสารที่อยู่ในน้ำตัวอย่าง (Ashtaputrey and Ashtaputrey, 2016).

4.4 ผลของปริมาณตัวดูดซับ

ทำการทดลองการดูดซับที่ความเข้มข้น 252.15 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับ 1.0 2.0 3.0 4.0 และ 5.0 กรัม ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ผลของปริมาณตัวดูดซับในการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์จากใบอ้อย

จากรูปที่ 4.6 ผลของปริมาณตัวดูดซับในการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์จากใบอ้อย ที่ความเข้มข้นสารละลาย 252.15 มิลลิกรัมต่อลิตร และปริมาณตัวดูดซับ (1.0–5.0 กรัม) ผลการทดลองว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณตัวดูดซับมากขึ้น โดยมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับเท่ากับ 26.40–74.12 ปริมาณตัวดูดซับ 1.0–5.0 กรัม

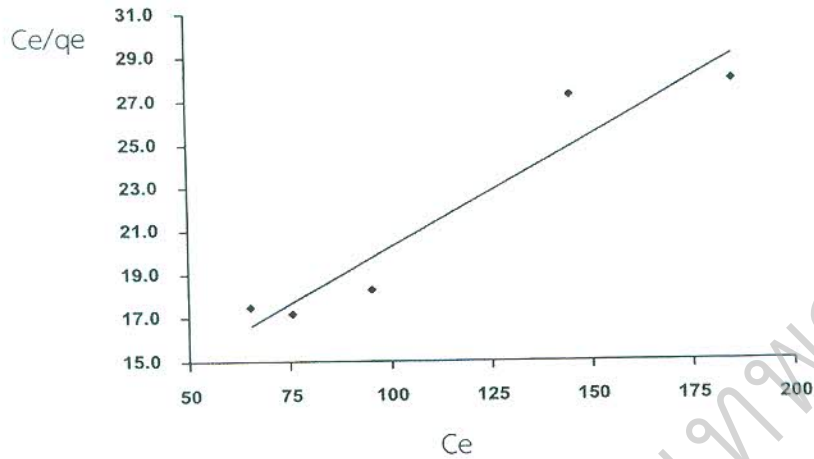
4.5 ไอโซเทอร์มการดูดซับ

ไอโซเทอร์มของการกำจัดความกระด้างด้วยถ่านกัมมันต์จากใบอ้อย ผลการทดลองและค่าความสัมพันธ์ตามสมการไอโซเทอร์มจะเป็นดังตารางที่ 4.1

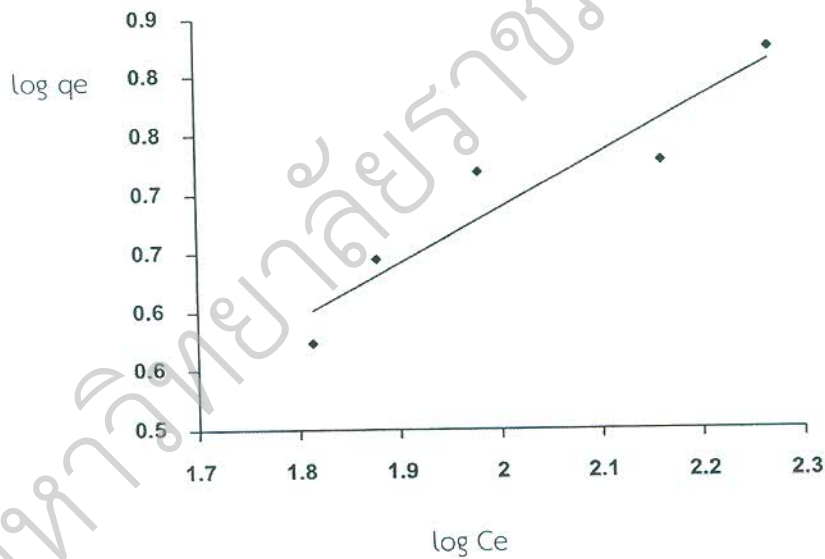
ตารางที่ 4.1 ผลการคำนวณจากไอโซเทอร์มการกำจัดความกระด้างด้วยถ่านกัมมันต์จากใบอ้อย

ปริมาณตัวดูดซับ (กรัม)	Ce (mg/L)	qe (mg/g)	Ce/qe	log Ce	log qe
1	185.580	6.657	27.877	2.269	0.823
2	145.350	5.340	27.219	2.162	0.728
3	95.450	5.223	18.274	1.980	0.718
4	75.650	4.413	17.144	1.879	0.645
5	65.250	3.738	17.456	1.815	0.573

จากข้อมูลในตารางที่ 4.1 เมื่อนำมาเขียนกราฟแบบสมการเส้นตรง (linear equation) จะได้กราฟเส้นตรงของไอโซเทอร์มแลงเมียร์กับฟรอนตลิกของถ่านกัมมันต์จากใบอ้อย ดังรูป 4.10-4.11



รูปที่ 4.10 ไอโซเทอร์มการดูดซับแลงเมียร์



รูปที่ 4.11 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟรอนตลิก

จากการวิเคราะห์ผลโดยใช้สมการเส้นตรงไอโซเทอร์มแลงเมียร์และฟรอนตลิกในการทำนายผลการทดลองการกำจัดความกระด้างด้วยถ่านกัมมันต์จากใบอ้อย จะได้พารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังตารางที่ 4.3

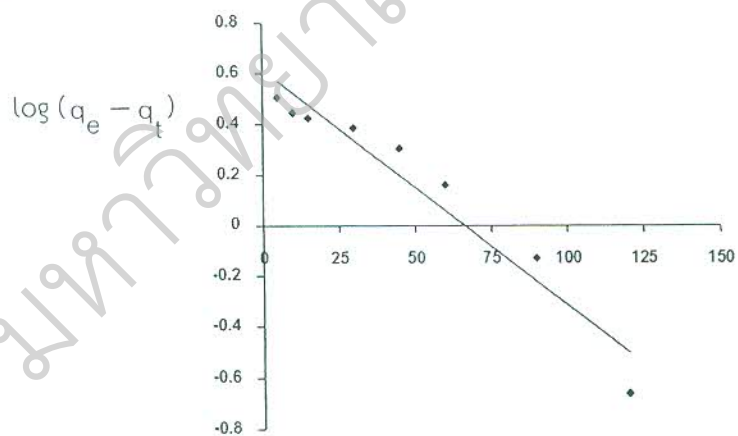
ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ของไอโซเทอร์มการกำจัดความกระด้างด้วยถ่านกัมมันต์จากใบอ้อย

ไอโซเทอร์มแลงเมียร์	พารามิเตอร์
q_{max} (mg/g)	9.708
K_L (L/mg)	0.010
R^2	0.9166
ไอโซเทอร์มฟรุนดลิช	
$1/n$	0.465
K_F (mg/g)	1.749
R^2	0.888

ตารางที่ 4.2 ไอโซเทอร์มการกำจัดความกระด้างด้วยถ่านกัมมันต์จากใบอ้อย ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีความใกล้เคียง 1 มากที่สุด ผลการทดลองพบว่าวิธีการกำจัดความกระด้างด้วยถ่านกัมมันต์จากใบอ้อย สอดคล้องกับสมการแลงเมียร์มากกว่าสมการฟรุนดลิชอธิบายได้ว่าเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว โดยมีค่าความสามารถสูงสุด (maximum adsorption capacity, q_{max}) เท่ากับ 9.708 มิลลิกรัมต่อ

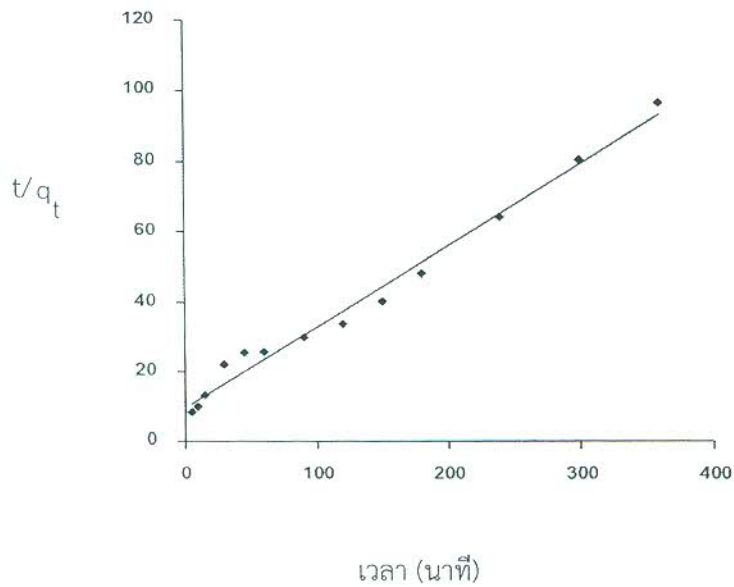
4.6 จลนพลศาสตร์การดูดซับ

จลนพลศาสตร์การดูดซับของการกำจัดความกระด้างด้วยถ่านกัมมันต์จากใบอ้อย ดังรูปที่ 4.12



เวลา (นาที)

ปฏิบัติการอันดับหนึ่ง



ปฏิกิริยาอันดับสอง

รูปที่ 4.12 จลนพลศาสตร์การดูดซับของการกำจัดความกระด้างด้วยถ่านกัมมันต์จากไบอ้อย

ตารางที่ 4.3 จลนพลศาสตร์การดูดซับของการกำจัดความกระด้างด้วยถ่านกัมมันต์จากไบอ้อย

q _e (exp) (mg/g)	Pseudo—first order			Pseudo—second order		
	q _e (cal) (mg/g)	k ₁ (min ⁻¹)	R ²	q _e (cal) (mg/g)	k ₂ (g.mg ⁻¹ .min ⁻¹)	R ²
3.783	1.150	0.020	0.902	4.320	0.005	0.985

จากตารางที่ 3 พบว่าจลนพลศาสตร์การดูดซับของการกำจัดความกระด้างด้วยถ่านกัมมันต์จากไบอ้อย เมื่อพิจารณาค่า R² พบว่าสอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับสอง (0.985) เนื่องจากมีค่า R² มากกว่าปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (0.902) บ่งบอกว่าปฏิกิริยาที่เกิดเป็นการดูดซับแบบเคมี

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ทำการศึกษาการกำจัดความกระด้างในน้ำบาดาลด้วยถ่านกัมมันต์จากใบอ้อย โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ ผลของเวลาที่เข้าสู่สมดุล และปริมาณตัวดูดซับ สรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. ทำการเตรียมถ่านกัมมันต์จากใบอ้อย โดยการกระตุ้นด้วย 1.0 M H_3PO_4 และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง และเมื่อวิเคราะห์ด้วย FTIR พบว่ามีฟังก์ชันในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 3334.33, 1,690, 1,580 และ 1,147.33 cm^{-1}
2. ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างในน้ำบาดาลด้วยถ่านกัมมันต์จากใบอ้อย ที่ความเข้มข้นน้ำบาดาล 252.15 มิลลิกรัมต่อลิตร และปริมาตร 100 มิลลิลิตร ผลการทดลองมีดังนี้
 - 2.1 ผลของเวลาที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัด ที่เวลา 5-360 นาที พบว่าการดูดซับเกิดขึ้นที่เวลา 150 นาที และมีค่าความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 3.738 มิลลิกรัมต่อกรัม
 - 2.2 ผลของปริมาณตัวดูดซับในการกำจัด โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับ 1.0-5.0 กรัม พบว่ามีร้อยละการดูดซับเท่ากับ 26.40-87.45 ตามลำดับ
3. การกำจัดความกระด้างในน้ำบาดาลด้วยถ่านกัมมันต์จากใบอ้อย สอดคล้องกับสมการแลงเมียร์และมีค่าความสามารถสูงสุด (maximum adsorption capacity, q_{max}) เท่ากับ 9.708 มิลลิกรัมต่อกรัม
4. จากข้อมูลการทดลองสรุปได้ว่าถ่านกัมมันต์จากใบอ้อย มีประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างในน้ำบาดาลได้ดี

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ทำการเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือทิ้งทางเกษตรในท้องถิ่นอื่น ๆ เช่น แกลบและเปลือกข้าวโพด และใบอ้อย เป็นต้น
2. นำมาประยุกต์ใช้ในการกำจัดสารอนินทรีย์ และอนินทรีย์ ในน้ำทิ้งจากแหล่งต่าง ๆ

เอกสารอ้างอิง

- กุลลดา บรรลือวงศ์. (2544). กำจัดเหล็กออกจากน้ำสำหรับใช้ในการเลี้ยงกุ้งกุลาดำ ด้วยวิธีออกซิเดชันร่วมกับการตกตะกอน. วิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม (สหสาขาวิชา) วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- จักรกฤษณ์ ชัยว่อง. (2555). การเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กในน้ำใต้ดินโดยใช้พืช. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยพะเยา.
- ธัญญา พรหมศร (2557). การกำจัดเหล็กในน้ำด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์อะพาไทต์. รายงานวิจัย มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต.
- รัตนา สนั่นเมือง, ยุทธพงษ์ อุดแน่น และวิภารัตน์ เชื้อชวด (2008). การกำจัดเหล็กในน้ำบาดาลสังเคราะห์ด้วยโคโคซานเมมเบรน. NU Science Journal : 5(2): 200 – 209
- วรรณมา สายแก้ว (2559). การกำจัดเหล็กทั้งหมดด้วยถังกรองที่บรรจุทรายร่วมกับเปลือกส้มโอ. วารสารเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี. 6(1) : มกราคม-มิถุนายน : 135-146.
- เหล็กในน้ำบาดาลและการกำจัด. (2554). ออนไลน์ เข้าถึงได้จาก <http://202.129.59.73/tn/March54/Ferum.htm>
- “Activated carbon” [Online] Available http://en.wikipedia.org/wiki/Activated_carbon, 2010.
- Akl, M.A., Yousef, A.M. and AbdElnasser, S. (2013). Removal of Iron and Manganese in Water Samples Using Activated Carbon Derived from Local Agro-Residues. Chemical Engineering & Process Technology. 4(4) :1-10.
- Benaisa, S., Mail, R. El and Jbari, N. (2016). Biosorption of Fe (III) from aqueous solution using brown algae Sargassum Vulgare. J. Mater. Environ. Sci. 7 (5) : 1461-1468.
- Bon, E.P.S. 2007. Ethanol production via enzymatic hydrolysis of sugarcane bagasse and straw. Paper presented at the food and Agricultural Organisation Symposium. “The role of agricultural biotechnologies for production of bio-energy in energy in developing countries.”
- Chen, Cui-Xia., Huang, B., Li, T. and Wu, Jeng-Feng. (2012). Preparation of phosphoric acid activated carbon from sugarcane bagasse mechanochemical processing. Bioresources. 7(4) : 5109-5116.
- Maneechakr, P. and Karnjanakom, S. (2017). Adsorption behaviour of Fe(II) and Cr(VI) on activated carbon: Surface chemistry, isotherm, kinetic and thermodynamic studies. J. Chem. Thermodynamics 106 : 104–112.
- Patranu, J.M. 1989. “By-products of the Cane Sugar Industry.” 3rd ed. Elsevier, Amsterdam, Netherlands.

- Ossmana, M.E., Fataha, M.A. and Taha, N.A (2014). Fe(III) removal by activated carbon produced from Egyptian rice straw by chemical activation. *Desalination and Water Treatment*. 52 : 3159–3168.
- O'ztaş, N.A., Karabakan, A. and Topal, O. (2008). Removal of Fe(III) ion from aqueous solution by adsorption on raw and treated clinoptilolite samples. *Microporous and Mesoporous Materials*. 111 : 200–205.
- Sharma, P and Kaur, H. Sugarcane bagasse for the removal of erythrosin B and methylene blue from aqueous waste. *Appl Water Sci* (2011) 1:135–145.
- Sheibani, A., Shishehbor, M.R and Alaei, H. 2012. Removal of Fe(III) ions from aqueous solution by hazelnut hull as an adsorbent. *International Journal of Industrial*. 3, 4.
- VASU, A, E. (2008). Adsorption of Ni(II), Cu(II) and Fe(III) from Aqueous Solutions Using Activated Carbon. *E-Journal of Chemistry*. <http://www.e-journals.net> Vol. 5, No. 1, pp. 1-9, January 2008
- Venkat, S., Mane, Mall, I.D and Srivastava, V.D. (2007). Kinetic and equilibrium isotherm studies for the adsorptive removal of Brilliant Green dye from aqueous solution by rice husk ash. *Journal of Environmental Management* 84 (2007) 390–400.
- Trickett, R.C. and Neytzell-de Wilde, F.G. Bagasse hemicellulose acid hydrolysis and residue treatment prior to enzymatic hydrolysis of cellulose. "*South Africa Food Review*" April/May (1982) : 95-101.

ภาคผนวก

มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก.1 ผลของเวลาในการกำจัดความกระด้างในน้ำบาดาลด้วยถ่านกัมมันต์จากใบอ้อย

เวลา (นาทีก)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
5	0.601
10	1.010
15	1.135
30	1.358
45	1.779
60	2.338
90	3.040
120	3.564
150	3.738
180	3.738
240	3.738
300	3.738
360	3.738

ตารางที่ ก.2 ผลของปริมาณตัวดูดซับการกำจัดความกระด้างในน้ำบาดาลด้วยถ่านกัมมันต์จากใบอ้อย

ถ่านกัมมันต์จากใบอ้อย (กรัม)	ร้อยละการกำจัด
1	26.401
2	42.356
3	62.146
4	69.998
5	74.123

ตารางที่ ก.3 ผลของความเข้มข้นในกำจัดเหล็กในน้ำบาดาลด้วยชานอ้อยและถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย

ความเข้มข้นสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)	
	ชานอ้อย	ถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย
50	23.109	27.139
100	28.653	46.845
150	29.311	62.999
200	35.569	77.571
250	36.892	84.249