



การกำจัดเหล็กในน้ำบาดาลด้วยขานอ้อยและถ่านกัมมันต์จากขานอ้อย

Removal of Fe in groundwater by sugarcane bagasse and  
sugarcane bagasse activated carbon

ประชาติ วัชรบัณฑิต

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสถาบันวิจัยและพัฒนา

มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

2560

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี ที่สนับสนุนและให้ทุนวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน พ.ศ. 2560

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมีที่ให้ความช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิจัย

ประชาติ วัชรบัณฑิต

ผู้วิจัย

มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

## บทคัดย่อภาษาไทย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการกำจัดเหล็กในน้ำบาดาลด้วยขานอ้อยและถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยในระบบกะ (batch process) ปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ เวลาที่เข้าสู่สมดุลและความเข้มข้นของสารละลาย ใช้ SEM-EDS และ FTIR เพื่อศึกษาคุณลักษณะของตัวดูดซับ จากข้อมูลการทดลองใช้ไอโซเทอร์มแลงเมียร์และฟรุนดลิชอธิบายผลการทดลองสามารถอธิบายได้ด้วยไอโซเทอร์มแลงเมียร์ทั้งขานอ้อยและถ่านกัมมันต์จากขานอ้อย โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 39.526 และ 131.579 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับขานอ้อยและถ่านกัมมันต์จากขานอ้อย จากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าขานอ้อยและถ่านกัมมันต์จากขานอ้อย เป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารละลายเหล็ก

คำสำคัญ: การกำจัด,เหล็ก, ขานอ้อย, ถ่านกัมมันต์จากขานอ้อย

มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

## Abstract

In this study, the removal of Iron in groundwater onto sugarcane bagasse and activated carbon from sugarcane bagasse was carried out in batch process. The effects of adsorption such as contact time and initial dye concentration were investigated. SEM-EDS and FTIR were used to study the characterization of adsorbents. The experimental data were analyzed by Langmuir and Freundlich isotherms. The adsorption data was fitted very well with Langmuir isotherm both sugarcane bagasse and activated carbon from sugarcane bagasse. The maximum adsorption capacity of Langmuir isotherm was 39.526 and 131.579 mg/g for sugarcane bagasse and activated carbon from sugarcane bagasse, respectively. The kinetics for the adsorption corresponded to the pseudo-second order model. Experimental results showed that the sugarcane bagasse and activated carbon from sugarcane bagasse was effective adsorbent for removing of iron in groundwater.

**Key words :** adsorption, Iron, sugarcane bagasse, activated carbon from sugarcane bagasse

มหาวิทยาลัยราชภัฏวชิราวุฒวิทยาลัย

	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	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 วัสดุที่ใช้ดูดซับ	4
2.2 เหล็กในน้ำ	4
2.3 ชานอ้อย	5
2.4 ถ่านกัมมันต์	6
2.5 การดูดซับ	6
2.6 จลนพลศาสตร์การดูดซับ	8
2.7 การกำจัดเหล็กในน้ำของตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ	9
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	12
3.1 การเตรียมสารละลายเหล็ก	12
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	12
3.2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	12
3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	12
3.2.3 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	13
3.3 วิธีดำเนินการวิจัย	13
3.3.1 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง	13
3.3.2 ศึกษาประสิทธิภาพและปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ	13
3.2.3 ศึกษาองค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของชานอ้อยและถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย	14
3.2.4 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดเหล็ก	14
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผลการทดลอง	16

4.1 การเตรียมตัวดูดซับ	16
4.1.1 การเตรียมขานอ้อย	16
4.1.2 การเตรียมถ่านกัมมันต์จากขานอ้อย	17
4.2 ศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของตัวดูดซับ	17
4.3 ผลของเวลาที่เข้าสู่สมดุล	21
4.4 ผลของปริมาณตัวดูดซับ	22
4.5 ผลของความเข้มข้นสารละลาย	23
4.6 ไอโซเทอร์มการดูดซับ	24
4.7 การกำจัดเหล็กในน้ำบาดาลจากชุมชน	29
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	30
5.1 สรุปผลการวิจัย	30
5.2 ข้อเสนอแนะ	30
เอกสารอ้างอิง	30
ภาคผนวก	33
ภาคผนวก ก.	34

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบพื้นฐานของชานอ้อย	5
2.2 ปัจจัยการแยกที่มีผลต่อรูปร่างของไอโซเทอร์มแลงเมียร์	7
4.1 ผลการคำนวณจากไอโซเทอร์มการกำจัดเหล็กด้วยชานอ้อย	24
4.2 ผลการคำนวณจากไอโซเทอร์มการกำจัดเหล็กด้วยถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย	25
4.3 พารามิเตอร์ของไอโซเทอร์มการกำจัดเหล็กของชานอ้อยและถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย	26
ก.1 ผลของเวลาในการกำจัดเหล็กในน้ำบาดาลด้วยชานอ้อยและถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย	34
ก.2 ผลของปริมาณตัวดูดซับในการกำจัดเหล็กในน้ำบาดาลด้วยชานอ้อยและถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย	34
ก.3 ผลของความเข้มข้นในการกำจัดเหล็กในน้ำบาดาลด้วยชานอ้อยและถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย	35

มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ไอโซเทอร์มการดูดซับพื้นฐาน 5 ชนิด	8
4.1 พื้นผิวของชานอ้อย (SEM)	16
4.2 พื้นผิวของถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย (SEM)	17
4.3 องค์ประกอบของชานอ้อยและถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย (SEM-EDS)	18
4.4 หมู่ฟังก์ชันของชานอ้อย	19
4.5 หมู่ฟังก์ชันของถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย	20
4.6 ผลของเวลาในการดูดซับด้วยชานอ้อยและถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย	21
4.7 ผลของปริมาณตัวดูดซับในการดูดซับด้วยชานอ้อย	22
4.8 ผลของปริมาณตัวดูดซับในการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย	22
4.9 ผลของความเข้มข้นสารละลายในการดูดซับด้วยชานอ้อยและถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย	23
4.10 ไอโซเทอร์มการดูดซับแลงเมียร์ของชานอ้อย	24
4.11 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟรุนดลิชของชานอ้อย	25
4.12 ไอโซเทอร์มการดูดซับแลงเมียร์ของถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย	25
4.13 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟรุนดลิชของถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย	26
4.14 ปัจจัยการแยกในการกำจัดเหล็กด้วยชานอ้อย	28
4.15 ปัจจัยการแยกในการกำจัดเหล็กด้วยถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย	28



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มา

สภาพปัญหาการแห้งแล้งในประเทศไทย ทำให้รัฐบาลมีการรณรงค์และส่งเสริมให้ประชาชนใช้น้ำให้ประหยัดและให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด และในสภาพปัจจุบันจึงมีการนำน้ำบาดาลมาใช้ทดแทนน้ำประปา จังหวัดลพบุรีมีจำนวนบ่อบาดาลเพื่อการเกษตรจำนวน 3,799 บ่อ เนื่องจากจังหวัดลพบุรีประชากรส่วนใหญ่ประกอบอาชีพเกษตรกรรมทำให้มีการปนเปื้อนของสารตกค้างไหลลงสู่แหล่งน้ำ ซึ่งเป็นน้ำที่ใช้เพื่อการอุปโภค-บริโภค โดยพบว่ามีบ่อน้ำบาดาลเพื่อการอุปโภค-บริโภคจำนวน 6,878 บ่อ (บทบาหน้าบาดาลในภาคเกษตรกรรมในพื้นที่ด้านเหนือของที่ราบภาคกลางตอนล่าง, 2553) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของคุณภาพของน้ำบาดาลที่ใช้ ซึ่งหน่วยปฏิบัติการวิจัยระบบการจัดการแหล่งน้ำจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้ทำการวิเคราะห์คุณภาพน้ำบาดาลในช่วงหน้าแล้งและหน้าฝน พบว่าในจังหวัดลพบุรีคุณภาพน้ำบาดาลโดยรวมสามารถใช้เพื่อการอุปโภค-บริโภคได้แต่ต้องทำการปรับปรุงคุณภาพน้ำก่อนนำไปใช้ เช่นชาวบ้านในบริเวณตำบลวังเพลิง อำเภอหนองช้างนอน จังหวัดลพบุรี เป็นอีกชุมชนหนึ่งที่ใช้น้ำบาดาลเกือบทุกครัวเรือน แต่เนื่องจากคุณภาพของน้ำบาดาลมีเหล็กปนเปื้อนอยู่ในน้ำบาดาล เนื่องจากบริเวณพื้นที่มีแร่เหล็กผ่านบริเวณใต้ดิน ซึ่งเหล็กที่พบอยู่ในน้ำบาดาลเป็นส่วนใหญ่ เมื่อสูบขึ้นมาใหม่ๆ จะมีลักษณะใสมาก แต่เมื่อทิ้งให้สัมผัสอากาศสักครู่สีน้ำนั้นจะปรากฏความขุ่นให้เห็น ปัญหาของเหล็กในน้ำนั้นทำให้ไม่เหมาะต่อการอุปโภคบริโภคเมื่อนำมาซักเสื้อผ้า จะทำให้เสื้อผ้าเป็นสีเหลือง และถ้าใช้ในการหุงข้าวทำให้ข้าวบูดเร็ว อีกทั้งทำให้สุขภาพเป็นสีเหลือง รวมทั้งอาจทำให้เกิดตะกอนขึ้นภายในหม้อน้ำได้ (<http://202.129.59.73/tn/March54/Ferum.htm>)

ประเทศไทยมีเป็นเมืองเกษตรกรรม ทำให้มีวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรจำนวนมาก ซึ่งอ้อยเป็นวัสดุทางเกษตรที่มีมากในจังหวัดลพบุรี แต่ละปีมีวัสดุเหลือทิ้งจากการผลิตน้ำตาลและน้ำอ้อย ซึ่งถ้านำกลับมาใช้ประโยชน์จะเป็นการเพิ่มมูลค่าได้ โดยในงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการนำวัสดุเหลือทิ้งมาเตรียมเป็นวัสดุดูดซับได้แก่ ถ่านกัมมันต์ เป็นจำนวนมาก เนื่องจากถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับที่ใช้งานมากในการกำจัดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ในน้ำเสีย เนื่องจากมีพื้นที่ผิวมากและโครงสร้างที่เป็นรูพรุนขนาดเล็ก แต่ข้อเสียของถ่านกัมมันต์คือมีราคาแพงและการฟื้นฟูสภาพ (regenerate) (Kandah et al., 2010)

จากเหตุผลข้างต้นผู้วิจัยมีความต้องการที่จะศึกษาถึงประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กในน้ำบาดาลด้วยขานอ้อยและถ่านกัมมันต์จากขานอ้อย ซึ่งนอกจากจะเป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งมาใช้ประโยชน์แล้ว ยังเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มในท้องถิ่นให้เกิดประโยชน์อย่างสูงสุด เพื่อให้ได้ข้อมูลในการออกแบบถึงบำบัดน้ำเสียสำหรับระบบปฏิบัติการจริงในการกำจัดเหล็กในน้ำบาดาลต่อไป

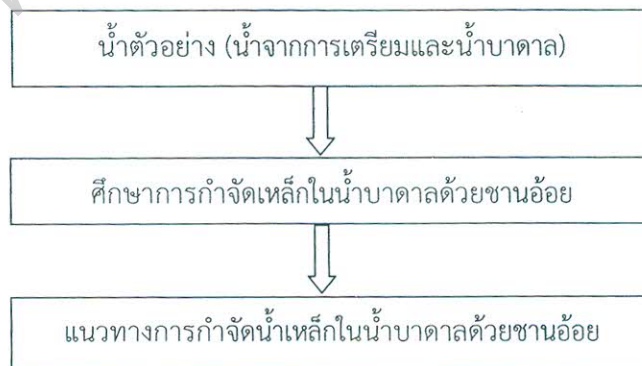
## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดเหล็กในน้ำบาดาลด้วยขานอ้อยและถ่านกัมมันต์จากขานอ้อย ได้แก่ เวลาที่สัมผัส และความเข้มข้นของสารละลาย
2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กในน้ำบาดาลด้วยขานอ้อยและถ่านกัมมันต์จากขานอ้อย
3. เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กในน้ำบาดาลด้วยขานอ้อยและถ่านกัมมันต์จากขานอ้อย

## 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. น้ำตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำบาดาลจำลองและน้ำบาดาลจริงจากชาวบ้าน อ.หนองช้างนอน จ.ลพบุรี
2. ตัวดูดซับที่ใช้ได้แก่ ขานอ้อยและถ่านกัมมันต์จากขานอ้อย (ทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กโดยการเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่เตรียมขึ้นเองจากขานอ้อย)
3. ศึกษาไอโซเทอร์มและจลนพลศาสตร์การกำจัดเหล็กในน้ำบาดาลด้วยขานอ้อยและถ่านกัมมันต์จากขานอ้อย เพื่อหาประสิทธิภาพและออกแบบถังบำบัด
4. ศึกษาองค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของขานอ้อยและถ่านกัมมันต์จากขานอ้อย ได้แก่
  - 4.1 วิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาและเทคนิคการวัดการกระจายพลังงานด้วย Scanning Electron Microscope equipped with Energy Dispersive Spectrometer (SEM-EDS) เพื่อศึกษาถึงพื้นผิวและการกระจายตัวของรูพรุน
  - 4.2 วิเคราะห์องค์ประกอบเคมีด้วย Scanning Electron Microscope equipped Energy Dispersive Spectrometer (SEM-EDS) เพื่อศึกษาถึงปริมาณซิลิกาและอลูมินา
  - 4.3 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วย Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) เพื่อศึกษาถึงหมู่ฟังก์ชัน

## 1.4 กรอบแนวความคิดของการวิจัย



### 1.5 นิยามศัพท์

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

ไอโซเทอรัม คือ ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับ ( $q_e$ ) ต่อ 1 หน่วยมวลของตัวดูดซับกับความเข้มข้นสมดุล ( $C_e$ ) และที่อุณหภูมิคงที่

หินภูเขาไฟ คือ (Volcanic rock) หรือ หินอัคนีพุ (Extrusive rock) คือ หินอัคนีที่เกิดจากการเย็นตัวและตกผลึกของหินหลอมเหลวที่ไหลขึ้นมาบนผิวโลก ที่เราเรียกกันว่า ลาวา (Lava) ที่ไหลขึ้นมาสู่บนผิวโลกหรือใกล้ผิวโลกจากระเบิดของภูเขาไฟ

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

## บทที่ 2

### เอกสารที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 วัสดุที่ใช้ดูดซับ

สารที่มีความสามารถในการดูดซับมีหลายชนิด อาจแบ่งได้เป็น 5 ประเภท (นิพนธ์และคณิตา, 2550) ได้แก่

1. สารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวชนิดต่าง ๆ แมกนีเซียมออกไซด์ และซิลิกาแกมมันต์ สินแร่จำพวกอะลูมิเนียมซิลิเกต 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 ชีลื้อยไคโตซาน กากกาแฟ ชานอ้อย กากถั่วเหลือง ถั่วกลีบดำ เปลือกไม้ ฟางข้าว เป็นต้น
5. วัสดุดูดซับชีวภาพ (biosorbent) ได้แก่ เซลล์จุลินทรีย์ เช่น ยีสต์ หรือราสายพันธุ์ต่างๆ แบคทีเรีย และสาหร่าย

#### 2.2 เหล็กในน้ำ

เหล็กมีปรากฏในธรรมชาติในสภาพอิสระเป็นปริมาณน้อย เหล็กที่มีปรากฏอยู่ในโลก ส่วนใหญ่ปรากฏรวมตัวอยู่กับธาตุอื่นเป็นสารประกอบ เช่น ในแร่แมกเนไตท์ ( $Fe_3O_4$ ) แร่เฮมาไตท์สีแดง ( $Fe_2O_3$ ) แร่ลิโมนไนท์ ( $Fe_2O_3 \cdot 3H_2O$ ) แร่ลิเตอไรท์ ( $FeCO_3$ ) แร่ไพไรท์ ( $FeS_2$ ) เป็นต้น สินแร่เหล็ก (Iron Ore) เหล่านี้มีอุดมสมบูรณ์และกระจายกันอยู่ตามที่ต่างๆทั่วโลก เช่น อยู่ตามชั้นหิน และชั้นดินต่างๆ เป็นต้น (เหล็กในน้ำบาดาลและการกำจัด, 2554)

#### เหล็กในน้ำบาดาล

เหล็กในน้ำบาดาลจะมีลักษณะต่างๆ เป็น 3 ลักษณะ คือ

1. เหล็กในน้ำบาดาลชนิดที่ตกตะกอนได้ทันทีภายหลังการเติมอากาศ
2. เหล็กในน้ำบาดาลชนิดที่ไม่ยอมตกตะกอนได้ง่ายๆภายหลังการเติมอากาศ ทั้งนี้เพราะน้ำบาดาลนั้นมีสภาพเป็นกรด
3. เหล็กในน้ำบาดาลชนิดที่บางส่วนตกตะกอนได้ แต่บางส่วนไม่ยอมตกตะกอนภายหลังการเติมอากาศ เหล็กในน้ำบาดาลชนิดนี้จะพบมากที่สุด

### ปัญหาของเหล็กในน้ำ

การมีเหล็กในน้ำทำให้เกิดปัญหาที่ยุ่งยากหลายอย่าง คือ

- ถ้ามีเหล็กในน้ำจะทำกระบวนการผลิตกระดาษ ผลิตกระดาษแล้วมีสีเหลือง หรืออาจเป็นจุดสีเหลือง หรือสีสนิมเหล็ก

- โรงงานผลิตเสื้อผ้าหรือพอกหน้า หากมีเหล็กจะทำให้เกิดจุดขึ้นบนเสื้อผ้าหรือหน้าได้
- โรงงานผลิตอาหารหากในน้ำมีเหล็ก จะทำให้อาหารมีรสชาติที่เปลี่ยนแปลงไป
- น้ำที่มีเหล็กก่อให้เกิดความขุ่น ทำให้ไม่เหมาะต่อการอุปโภคบริโภค
- น้ำที่มีเหล็กก่อให้เกิดการอุดตันในระบบท่อจ่ายน้ำประปาได้
- น้ำที่มีเหล็กเวลานำมาซักเสื้อผ้า จะทำให้เสื้อผ้าเป็นสีเหลือง หุงข้าวทำให้ข้าวบูดเร็ว
- น้ำที่มีเหล็กมาก มีโอกาสทำให้หมอน้ำเกิดตะกอนขึ้นภายในหมอน้ำได้

### 2.3 ชานอ้อย (Sugarcane bagasse)

อ้อยเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของไทย มีอัตราการปลูกแต่ละปีประมาณ 48 ล้านตันและมีชานอ้อยซึ่งเป็นวัสดุเส้นใยที่เหลือภายหลังบีบน้ำอ้อยจากอ้อยแล้วประมาณ 25% ของน้ำหนักอ้อยหรือประมาณ 12 ล้านตันของผลผลิต (Pattra et al., 2008)

#### องค์ประกอบของชานอ้อย

ชานอ้อย ประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนินและเถ้า มีองค์ประกอบแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบพื้นฐานของชานอ้อย

องค์ประกอบ (% โดยมวล)				อ้างอิง
เซลลูโลส	เฮมิเซลลูโลส	ลิกนิน	เถ้า	
37	28	21	-	Bon, 2007
26-47	19-33	14-23	1-5	Patranu, 1989
38	33	22	3	Trickett and Neytzell-de Wilde, 1982

#### ประโยชน์ของชานอ้อย

ผลิตเป็นเชื้อเพลิง ผลิตกระดาษ ผลิตเป็นอาหาร เฟอร์ฟรัล กล่องโฟม และสารเมทิลคาร์บอกซิลเซลลูโลส (CMC) เป็นต้น

## 2.4 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 และกระบวนการทางเคมี

ก. การกระตุ้นทางเคมี เป็นถ่านกัมมันต์ที่ใช้สารเคมีเป็นสารกระตุ้น สารที่ทำให้การกระตุ้นส่วนมากเป็นสารเคมีประเภทกรดแก่ เบสแก่ และเกลือ เช่น HCl H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> 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)

## 2.5 การดูดซับ

การดูดซับเป็นการแยกสารองค์ประกอบที่ต้องการออกจากสารละลายของเหลวหรือก๊าซโดยให้สารละลายหรือก๊าซผสมสัมผัสกับตัวดูดซับ องค์ประกอบแต่ละชนิดในสารละลายมีความสามารถในการกระจายบนผิวและเกิดแรงดึงดูดกับตัวดูดซับได้ต่างกัน การดูดซับขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของตัวดูดซับ คุณสมบัติทางเคมีของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ จำนวนชั้นของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ และขนาดของรูพรุนในตัวดูดซับ ดังนั้นในการแยกองค์ประกอบที่ต้องการจะต้องเลือกตัวดูดซับให้เหมาะสมกับองค์ประกอบนั้น

### สมมูลของการดูดซับ

การวิเคราะห์สมมูลของการดูดซับจะอาศัยความสัมพันธ์ที่สภาวะสมมูลของสมมูลของมวลสารเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในเฟสของเหลวกับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับบนเฟสของแข็ง ความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้จะถูกเขียนเป็นกราฟไอโซเทอร์มการดูดซับ (adsorption isotherm) ซึ่งอธิบายถึงการกระจายตัวของตัวถูกดูดซับระหว่างเฟสของเหลวและของแข็ง โดยอัตราการกระจายตัวนี้สามารถวัดได้ที่จุดสมมูลและจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับหรือคุณสมบัติของตัวถูกดูดซับ เมื่อเกิดการดูดซับโมเลกุลตัวถูกดูดซับจะเข้าครอบครองทุกตำแหน่งที่เกิดการดูดซับจนเต็มทุกตำแหน่ง และจะทำให้แรงดึงดูดของผิวตัวดูดซับนั้นอ่อนลง แต่

อาจยังคงสามารถดูดซับโมเลกุลตัวถูกดูดซับต่อไปได้อีกให้เกิดเป็นชั้นที่สอง สาม และสี่ต่อไปเรื่อยๆ ซึ่งในความเป็นจริงแล้วอาจจะมีการดูดซับชั้นที่สองก่อนที่ชั้นแรกจะเต็มและในบางตำแหน่งอาจจะดูดซับต่อหลายชั้นซ้อนสูงซึ่งรูปร่างของไอโซเทอร์มการดูดซับจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการดูดซับและปริมาณของสารถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับ ไอโซเทอร์มการดูดซับที่นิยมใช้ได้แก่

1. ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ เป็นการดูดซับชั้นเดียว (monolayer)

สมมติฐานเบื้องต้นของไอโซเทอร์มแลงเมียร์

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

ซึ่งจะเกิดขึ้นบนพื้นผิวและเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว จะเขียนได้ว่า

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

โดยที่  $C_e$  = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$q_c$  = 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. ไอโซเทอร์มแบบฟรอนด์ลิช (Freundlich Isotherm) ไอโซเทอร์มการฟรอนด์ลิชเป็นที่นิยมใช้กันมากเนื่องจากมีความถูกต้องสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีสารละลายที่ค่อนข้างเจือจาง สมการแสดงดังนี้

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

โดยที่  $q_e$  = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ หรือค่าการดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัมหรือมิลลิโมลต่อกรัม)

$C_e$  = ความเข้มข้นของตัวถูกละลาย (สารถูกดูดซับ) ในสารละลายที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตรหรือมิลลิโมลต่อลิตร)

$K_F$  = ค่าคงที่ของฟรอนด์ลิช ( $L \cdot mg^{-1}$ )

$n$  = ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ

### 2.6 จลนพลศาสตร์การดูดซับ (Kinetic Model of Adsorption)

การศึกษาเกี่ยวกับจลนพลศาสตร์การดูดซับนั้นมีความสำคัญต่อการบำบัดน้ำเสีย กล่าวคือจะให้ข้อมูลที่มีค่าต่อการเกิดปฏิกิริยารวมทั้งกลไกการดูดซับในการวิจัยนี้ได้ศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับของสีย้อมโดยทำการวิเคราะห์ด้วยสมการ Pseudo-First Order Equation ซึ่งเขียนเป็นความสัมพันธ์ว่า

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

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

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

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-นาที)

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

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

## 2.7 การกำจัดเหล็กในน้ำของตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ

รัตนา สนั่นเมือง (2008) การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กในน้ำบาดาลสังเคราะห์ ด้วยโคโตซานเมมเบรน ผลการศึกษาพบว่าโคโตซานเมมเบรนสามารถดูดซับที่อุณหภูมิห้อง (28 องศาเซลเซียส) และที่ 40 องศาเซลเซียส ได้ดีที่พีเอช 2.5-7.0 (75.21– 100.00 %) สำหรับสมมูลในการดูดซับนั้นเกิดขึ้นตั้งแต่ชั่วโมงแรกจนกระทั่งชั่วโมงที่ 16 โดยสามารถดูดซับเหล็กได้ 72.33-97.61 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายเหล็กนั้นพบว่าโคโตซานเมมเบรนมีความสามารถในการดูดซับเหล็กเพิ่มมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเหล็กสูงขึ้น โดยประสิทธิภาพของการดูดซับที่ดีจะอยู่ในช่วงความเข้มข้น 0.5–5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าการดูดซับอยู่ในช่วง 69.20-96.61 % ผลการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับพบว่าสอดคล้องกับสมการฟรุนดลิช ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเป็นการดูดซับแบบต่อเนื่อง โดยมีค่าคงที่  $K_f$  ในสมการฟรุนดลิช เท่ากับ 19.05 ซึ่งมีค่าสูง แสดงถึงความจุในการดูดซับ ของโคโตซานเมมเบรนส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสูงด้วย

วรรณฯ สายแก้ว (2559). ศึกษาการกำจัดเหล็กทั้งหมดด้วยถังกรองที่บรรจุทรายกับเปลือกส้มโอ ทรัพยากรน้ำบาดาล ขนาด 160 ลิตร โดยน้ำจะถูกป้อนผ่านระบบเติมอากาศด้วยตะแกรงฝักบัว เซนติเมตร ผ่านถังกรองทรายร่วมกับเปลือกส้มโอ ทุก ๆ 10 นาที เป็นเวลา 160 นาที เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัด ทั้งหมด เป็นดัชนีชี้วัด ผลการศึกษาพบว่าน้ำบาดาล ทั้งหมดที่เข้าสู่ระบบ มีค่าความเป็นกรดต่าง อยู่ในช่วง มีค่าอยู่ในช่วง 1-3, 2-5 และ 35-45 หน่วย ตามลำดับ 3.21-4.80 NTU ตามลำดับ และปริมาณเหล็กทั้งหมดมีค่าอยู่ในช่วง มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนน้ำออกจากระบบพบว่าค่าสี ที่ใช้บริโภคของกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ทั้งหมดไม่ผ่านเกณฑ์

มาตรฐานฯ สำหรับประสิทธิภาพในการบำบัดพบว่ามีประสิทธิภาพอยู่ในช่วง ร้อยละ 70.0-90.0 75.0-92.5 และ 87.5-97.5 และ 60.9-81.22 ตามลำดับ

ธัญญา พรหมศร. (2557). ศึกษาการสำรวจหาปริมาณเหล็กในน้ำบาดาลที่สูบขึ้นมาใช้ในตำบลเจริญธรรม อำเภอวิหารแดง จังหวัดสระบุรี พบว่าน้ำจากโรงเรียนบ้านราษฎร์เจริญมีปริมาณเหล็ก  $Fe^{2+}$  มากถึง  $4.96 \pm 0.03$  mg/L ดังนั้นจึงเตรียมสารละลายเหล็ก  $Fe^{2+}$  ให้มีความเข้มข้น 4.96 mg/L เท่ากันเพื่อใช้ในการทดลอง ระบบกำจัดเหล็กประกอบด้วยคอลัมน์แก้วขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.75 cm ความสูง 40 cm เชื่อมต่อทางด้านบนด้วยท่อพลาสติกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.1 cm ความสูง 40.5 cm บรรจุแคลเซียมไฮดรอกไซด์ 10 g ลงในคอลัมน์ ให้น้ำไหลเข้าทางด้านปลายของคอลัมน์และไหลย้อนขึ้นไปทางท่อพลาสติกที่อยู่ทางด้านบน อัตราการไหลเฉลี่ยของน้ำเท่ากับ 0.4 mL/s แบ่งการทดลองออกเป็น 2 treatment คือ treatment ที่ 1 กำหนดให้น้ำไหลผ่านอย่างต่อเนื่องวันละ 5 L และ treatment ที่ 2 กำหนดให้น้ำไหลผ่านอย่างต่อเนื่องวันละ 20 L หยุดการทดลองเมื่อระบบมีประสิทธิภาพของระบบต่ำกว่าร้อยละ 50 จากการทดลองพบว่า Treatment ที่ 1 มีประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็ก  $Fe^{2+}$  สูงสุดได้ถึงร้อยละ 95.77 ต่ำสุดเท่ากับร้อยละ 42.74 และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 80.22 หยุดการทดลองเมื่อน้ำไหลผ่านระบบได้ 55 L คิดเป็นปริมาณเหล็ก  $Fe^{2+}$  ที่ถูกกำจัดได้เท่ากับ 21.88 mg ต่อ 1 g ของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ Treatment ที่ 2 มีประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็ก  $Fe^{2+}$  สูงสุดได้ถึงร้อยละ 98.39 ต่ำสุดเท่ากับร้อยละ 46.98 และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 85.18 หยุดการทดลองเมื่อน้ำไหลผ่านระบบได้ 48 L คิดเป็นปริมาณเหล็ก  $Fe^{2+}$  ที่ถูกกำจัดได้เท่ากับ 20.28 mg ต่อ 1 g ของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็ก  $Fe^{2+}$  ของทั้ง 2 treatment ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01 และระบบการกำจัดเหล็กมีความสามารถในการกำจัดเหล็ก  $Fe^{2+}$  ในน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

กุลลดา บรรลือวงศ์. (2544). ศึกษาวิธีการกำจัดเหล็กออกจากน้ำสำหรับใช้ในการเลี้ยงกุ้งกุลาดำ ด้วยวิธีออกซิเดชันร่วมกับการตกตะกอนโดยใช้ออกซิโดจินเจนท์จำนวน 4 ชนิดคือ โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต, ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์, แคลเซียมไฮโปคลอไรต์ และอากาศ และใช้สารส้มและโพลีออลูมิเนียมคลอไรด์เป็นสารช่วยให้ตะกอนรวมตัว หลังจากการออกซิเดชัน โซเดียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ถูกใช้ในการปรับพีเอชของน้ำให้อยู่ในช่วง 6 ถึง 9 เพื่อให้เกิดตะกอนเหล็กเหล็กสามารถถูกออกซิไดส์ได้อย่างรวดเร็วด้วย โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต, ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และแคลเซียมไฮโปคลอไรต์สามารถออกซิไดส์ด้วยอากาศนั้นต้องการเวลาอย่างเพียงพอเพื่อให้เกิดการออกซิไดส์อย่างสมบูรณ์ ในกรณีที่ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ให้ผลในการกำจัดเหล็กดีกว่าแคลเซียมไฮดรอกไซด์ แต่เมื่อใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับสารส้มจะทำให้การรวมตัวของตะกอนเกิดขึ้นได้เร็วกว่าการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับสารส้ม สภาวะที่เลือกใช้สำหรับกำจัดเหล็กออกจากน้ำสำหรับเลี้ยงกุ้งกุลาดำ คือ การออกซิไดส์ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ปรับพีเอชของน้ำให้มีค่าประมาณ 8 ด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และใช้สารส้มเป็นสารช่วยให้ตะกอนรวมตัว น้ำหลังการทดสอบจะมีค่าพีเอชและค่าความเป็นด่างอยู่ในช่วงที่เหมาะสมและเหลือเหล็กอยู่ในน้ำไม่เกิน 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามเกณฑ์คุณภาพน้ำที่ยอมรับได้

จักรกฤษณ์ ชัยว่อง. (2555). ระบบผลิตน้ำประปาขนาดเล็กส่วนใหญ่ใช้น้ำใต้ดินเป็นน้ำดิบในการผลิตและมักพบปัญหาการปนเปื้อนของเหล็กละลายน้ำในปริมาณมาก ในการศึกษาครั้งนี้เป็นแนวทางการเพิ่ม ประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กในน้ำใต้ดินโดยใช้ประโยชน์จากกลไกของพืช การศึกษาใช้แบบจำลองความจุ 150 ลิตร ภายในบรรจุกรวดแม่น้ำและปลูกต้นกรรขีนิ (Cyperus involucratu Rottb.) และมีแบบจำลองควบคุมที่ไม่ปลูกพืชเพื่อเปรียบเทียบการลดปริมาณเหล็กละลายน้ำ แบบจำลองทั้งสองควบคุมให้น้ำไหลในแนวตั้งในอัตราไหล 120 ลิตร/ชั่วโมง น้ำใต้ดินที่ใช้ในการศึกษามีปริมาณเหล็กละลายน้ำเฉลี่ย 57 มก./ล. เมื่อผ่านการเติม อากาศด้วยถาดเติมอากาศแล้วค่าเหล็กละลายน้ำลดลงเหลือ 47 มก./ล. ประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กละลายน้ำของแบบจำลองที่ปลูกพืชสูงกว่าแบบจำลองที่ไม่ได้ปลูกพืชโดยกำจัดได้ ร้อยละ 93 และร้อยละ 87 ตามลำดับ แสดงว่าพืชมีส่วนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กละลายน้ำได้เป็นอย่างดี เนื่องจากพืชสามารถส่งผ่านออกซิเจนไปยังส่วนรากพืชได้ ทำให้เหล็กที่ละลายน้ำนั้นได้สัมผัสกับออกซิเจนจากรากพืชเพิ่มขึ้นและเปลี่ยนรูปกลายเป็นตะกอนเหล็ก นอกจากนี้กรวดที่บรรจุในแบบจำลองยังมีส่วนช่วยให้เกิดการดูดติดผิวของเหล็กเพิ่มมากขึ้น และการไหลผ่านชั้นกรวดในแนวตั้งยังชะลอการไหลของน้ำในระบบเพื่อให้น้ำได้มีเวลาสัมผัสกับอากาศได้มากขึ้น

Oztas et al (2008). การกำจัดเหล็ก (3+) ในสารละลายด้วย clinoptilolite และ clinoptilolite ที่ปรับสภาพ ปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ พีเอช เวลาที่สมดุลและความเข้มข้นของสารละลาย ผลการทดลองสอดคล้องกับสมการแลงเมียร์และฟรุนดลิช ความสามารถในการดูดซับของ clinoptilolite และ clinoptilolite ที่ปรับสภาพด้วย  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$  ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส , 70 องศาเซลเซียส และ  $\text{HNO}_3$  ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสไม่แตกต่างกัน แต่ clinoptilolite ที่ปรับสภาพด้วย  $\text{HNO}_3$  ที่ 70 องศาเซลเซียส แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนความสามารถในการกำจัดเหล็ก (3+) ด้วย clinoptilolite ที่ปรับสภาพด้วย  $\text{HNO}_3$  พบว่ามีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้น และจากข้อมูลการทดลองจลนพลศาสตร์การดูดซับสามารถอธิบายได้ด้วยปฏิกิริยาสองเทียม

Sheibani et al (2012). ศึกษาการกำจัดเหล็ก (3+) ด้วยเปลือกปาล์ม ปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ ความเข้มข้นสารละลาย พีเอช อุณหภูมิ เวลาที่สัมผัสและปริมาณตัวดูดซับ สภาวะที่ดูดซับสูงสุดได้แก่ พีเอชเท่ากับ 3 ปริมาณตัวดูดซับ 0.6 กรัม อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เวลาที่สมดุลเท่ากับ 70 นาที โดยมีร้อยละในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 83.5%. ผลการทดลองใช้สมการแลงเมียร์และฟรุนดลิชอธิบายผลการทดลอง และมีค่าความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 13.59 มิลลิกรัมต่อกรัม

Ossman et al (2014). ศึกษาการกำจัดเหล็ก (3+) ด้วยถ่านกัมมันต์จากฟางข้าวในระบบแบบห่อ ผลการทดลองพบว่าการดูดซับเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งเข้าสู่สมดุลที่เวลา 50 นาที โดยมีร้อยละการกำจัดเท่ากับ 80 และที่พีเอชเท่ากับ 5 มีค่าการดูดซับมากที่สุด จากผลการทดลองสามารถอธิบายได้ด้วยสมการฟรุนดลิชและจากการทดลองพบว่าถ่านกัมมันต์จากฟางข้าวมีประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กได้ดีเนื่องจากมีค่า  $1/n$  น้อยกว่า 1

### บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 การเตรียมสารละลายเหล็ก

สารละลายเหล็กที่ใช้ได้แก่  $\text{FeSO}_4(\text{NH}_4)\text{SO}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  ทำการเตรียมให้สารละลายมีความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร

#### 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. กรดไฮโดรคลอริก (HCl) ชนิด AR grade จากบริษัท Merck ประเทศเยอรมัน
2. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ชนิด AR grade จากบริษัท APS Ajax Finechem ประเทศออสเตรเลีย
3. แอมโมเนียมเฟอรัสซัลเฟต ( $\text{FeSO}_4(\text{NH}_4)\text{SO}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) ชนิด AR grade จากบริษัท APS Ajax Finechem ประเทศออสเตรเลีย
4. แอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ) ชนิด AR grade จากบริษัท APS Ajax Finechem ประเทศออสเตรเลีย
5. แอมโมเนียมคลอไรด์ ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ) ชนิด AR grade จากบริษัท APS Ajax Finechem ประเทศออสเตรเลีย
6. ออร์โทฟีนาลโทลีน ( $\text{C}_{12}\text{H}_8\text{N}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) ชนิด AR grade จากบริษัท Merck ประเทศเยอรมัน
7. ไฮดรอกซิลามีน แอมโมเนียมคลอไรด์ ( $\text{HONH}_2 \cdot \text{HCl}$ ) ชนิด AR grade จากบริษัท APS Ajax Finechem ประเทศออสเตรเลีย

### 3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย

#### 3.3.1. ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

น้ำตัวอย่าง เป็นน้ำตัวอย่างที่เตรียมขึ้นและน้ำตัวอย่างจริง ตัวดูดซับ คือ ชานอ้อยและถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย

#### 3.3.2. ศึกษาประสิทธิภาพและปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

##### 3.3.2.1 การเตรียมตัวดูดซับ

1. ชานอ้อยมาล้างน้ำแล้วตัดให้มี 1-2 เซนติเมตร และนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส
2. นำชานอ้อยไปแช่ด้วย 0.1 M HCl อัตราส่วน 1:10 ล้างด้วยน้ำกลั่นจนสารละลายเป็นกลาง และอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และนำมาคัดขนาดให้ได้อนุภาค 50-100 เมช เก็บในโถดูดความชื้น

##### 3.3.2.2 การเตรียมถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย

1. ชานอ้อยมาล้างน้ำแล้วตัดให้มี 1-2 เซนติเมตรและนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส
2. นำชานอ้อยไปแช่ด้วย 1.0 M  $\text{H}_3\text{PO}_4$  อัตราส่วน 1:10 เวลา 24 ชั่วโมง อบอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จนแห้ง และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง
3. นำถ่านกัมมันต์มาล้างด้วยน้ำกลั่นจนสารละลายเป็นกลาง และอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และนำมาคัดขนาดให้ได้อนุภาค 50-100 เมช เก็บในโถดูดความชื้น

3.2.3 ศึกษาองค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของขานอ้อยและถ่านกัมมันต์จากขานอ้อย 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

### 3.2.4 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดเหล็ก

ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กที่ปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ เวลาที่สัมผัส และความเข้มข้นของสารละลาย มีขั้นตอนการทดลองมีดังนี้

#### 3.2.4.1 ศึกษาเวลาที่เข้าสู่สมดุล

1. ชั่งตัวดูดซับขานอ้อยปริมาณที่เหมาะสม ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. บีบน้ำตัวอย่าง ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ในข้อ 1
3. นำตัวอย่างมาเขย่าที่ช่วงเวลาต่าง ๆ ที่ความเร็ว 220 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 30°C
4. นำสารละลายที่เวลาต่างๆไปกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 และวัดปริมาณเหล็ก (3+) ที่เหลือด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 508 นาโนเมตร
5. ทำการทดลองซ้ำ 3 ซ้ำ แล้วนำค่าปริมาณการดูดซับที่เวลาต่างๆไปเขียนกราฟ เพื่อหาเวลาที่เข้าสู่สมดุล
6. เปลี่ยนตัวดูดซับเป็นถ่านกัมมันต์จากขานอ้อย

#### 3.2.1.2 ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลาย

1. ชั่งขานอ้อยปริมาณที่เหมาะสม ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. บีบน้ำตัวอย่างที่ความเข้มข้นต่าง ๆ (จำนวน 5 ค่า) ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ ในข้อ 1
3. นำตัวอย่างมาเขย่าที่ช่วงเวลาเข้าสู่สมดุลจากข้อ 2.2 ที่ความเร็ว 220 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 30°C
4. นำสารละลายที่ได้ไปกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 และวัดปริมาณเหล็ก (3+) ที่เหลือด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 508 นาโนเมตร
5. ทำการทดลองซ้ำ 3 ซ้ำ แล้วเขียนกราฟระหว่างค่าปริมาณการดูดซับกับปริมาณตัวดูดซับ

## 6. เปลี่ยนตัวดูดซับเป็นถ่านกัมมันต์จากขานอ้อย

### 3.2.1.3 นำตัวดูดซับได้แก่ ขานอ้อยและถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยไปทดสอบกับน้ำตัวอย่างจริงจากชุมชน

จากผลการทดลองที่ได้นำมาคำนวณหาร้อยละการกำจัด ดังสมการ 6

$$\% \text{ การกำจัด} = \frac{(C_0 - C_t)}{C_0} \times 100 \quad \dots\dots\dots(6)$$

และคำนวณความสามารถในการกำจัด (adsorption capacity) ดังสมการ 7

$$q = \frac{V(C_0 - C_t)}{W} \quad \dots\dots\dots(7)$$

โดยที่  $q$  = ความสามารถในการกำจัด (มิลลิกรัมต่อกรัม)  $C_0$  = ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำตัวอย่าง (มิลลิกรัมต่อลิตร)  $C_t$  = ความเข้มข้นที่เหลืออยู่ตลอดเวลาหนึ่ง ๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร)  $V$  = ปริมาตรน้ำเสียที่ใช้ (ลิตร) และ  $W$  = ปริมาณตัวดูดซับ (กรัม)

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและอภิปรายผลการทดลอง

ในการทดลองนี้ แบ่งการทดลองดังบทที่ 3 ที่มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

#### ตอนที่ 1 การเตรียมตัวดูดซับ

1. ชานอ้อย
2. ถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย

#### 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 ประสิทธิภาพการดูดซับ โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่

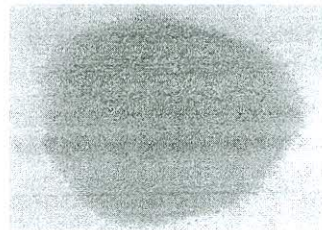
1. เวลาที่เข้าสู่สมดุล
2. ความเข้มข้นของสารละลาย

ตอนที่ 4 จากผลการทดลองใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์แบบไอโซเทอร์มและจลนพลศาสตร์การดูดซับ โดยผลการทดลองมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

#### 4.1 การเตรียมตัวดูดซับ

##### 4.1.1 การเตรียมชานอ้อย

1. ชานอ้อยมาล้างน้ำแล้วตัดให้มี 1-2 เซนติเมตร และนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส
2. นำชานอ้อยไปแช่ด้วย 0.1 M HCl อัตราส่วน 1:10 เวลา 3 ชั่วโมง ล้างด้วยน้ำกลั่นจนสารละลายเป็นกลาง และอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และนำมาคัดขนาดให้ได้อนุภาค 50-100 ไมโครเมตร เก็บในโถดูดความชื้น



รูปที่ 4.1 ชานอ้อย



#### 4.1.2 การเตรียมถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย

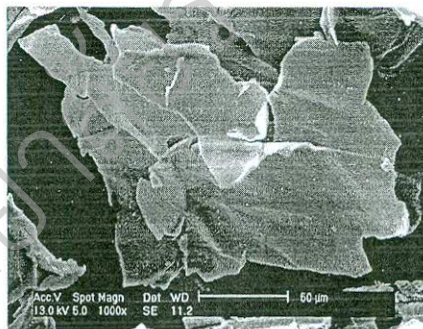
1. ชานอ้อยมาล้างน้ำแล้วตัดให้มี 1-2 เซนติเมตรและนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส
2. นำชานอ้อยไปแช่ด้วย 1.0 M  $H_3PO_4$  อัตราส่วน 1:10 เวลา 24 ชั่วโมง อบอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จนแห้ง และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง
3. นำถ่านกัมมันต์มาล้างด้วยน้ำกลั่นจนสารละลายเป็นกลาง และอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และนำมาคัดขนาดให้ได้อนุภาค 50-100 ไมโครเมตร เก็บในโถดูดความชื้น



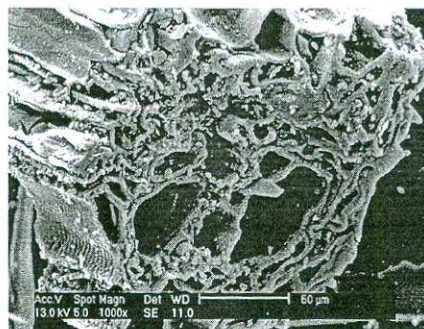
รูปที่ 4.2 ถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย

#### 4.2 ศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของตัวดูดซับ

- 4.2.1 วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับได้แก่ ชานอ้อยและถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย ดังรูปที่ 4.2 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



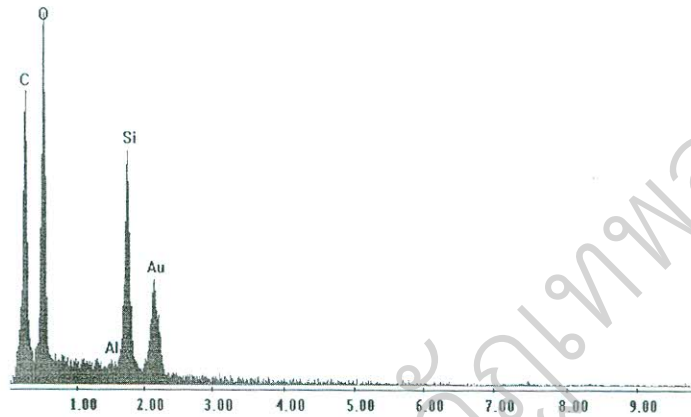
(ก) พื้นผิวของชานอ้อย



(ข) พื้นผิวของถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย

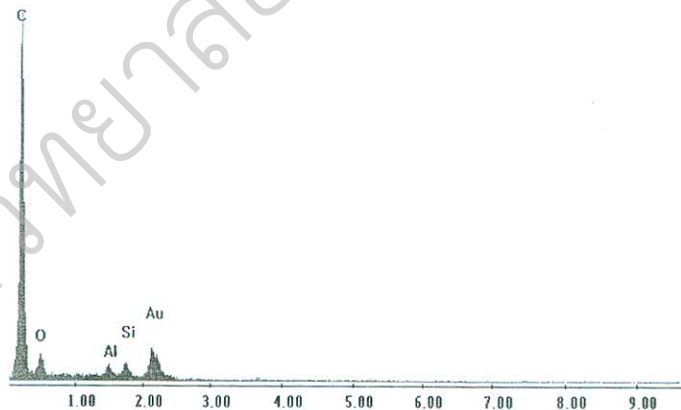
จากรูปที่ 4.2 (ก) พื้นผิวของชานอ้อยมีลักษณะพื้นผิวเรียบและมีรูพรุน ส่วนรูป (ข) พื้นผิวของถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย พบว่าถ่านกัมมันต์มีลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระ มีรูพรุนทั้งขนาดเล็กและใหญ่จำนวนมาก

4.2.2 วิเคราะห์องค์ประกอบด้วย Scanning Electron Microscope (SEM-EDS) ของตัวดูดซับได้แก่ ชานอ้อยและถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย ดังรูปที่ 4.3 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 (ก) องค์ประกอบเคมีของชานอ้อย

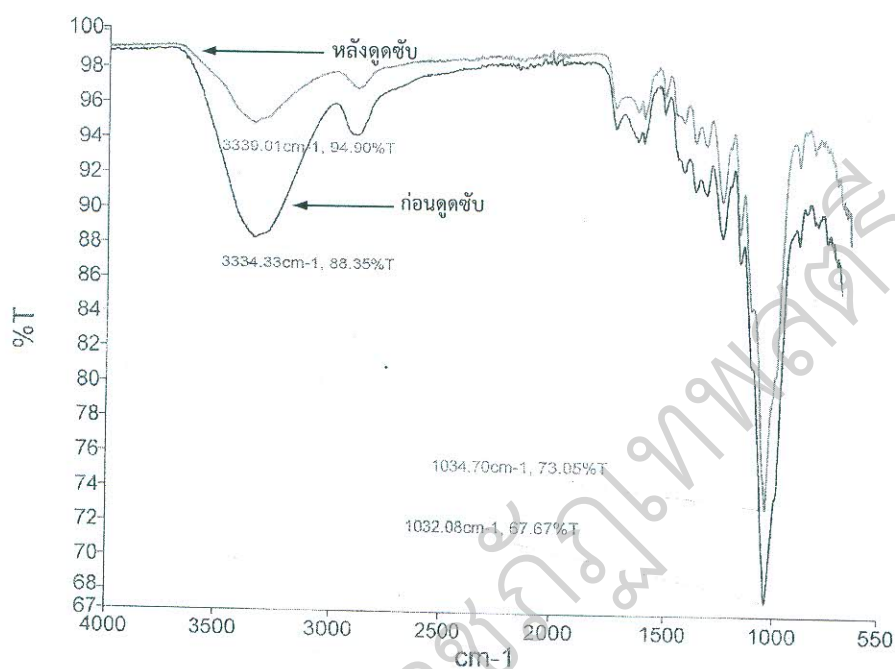
จากรูปที่ 4.3 (ก) องค์ประกอบเคมีของชานอ้อย พบว่าชานอ้อยมีคาร์บอนและซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลัก



รูป 4.3 (ข) องค์ประกอบเคมีของถ่านกัมมันต์ชานอ้อย

จากรูปที่ 4.3 (ข) องค์ประกอบเคมีของถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย พบว่าถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก

4.1.3 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วย Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) ของตัวดูดซับ ได้แก่ ขานอ้อยและถ่านกัมมันต์จากขานอ้อย ดังรูปที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ

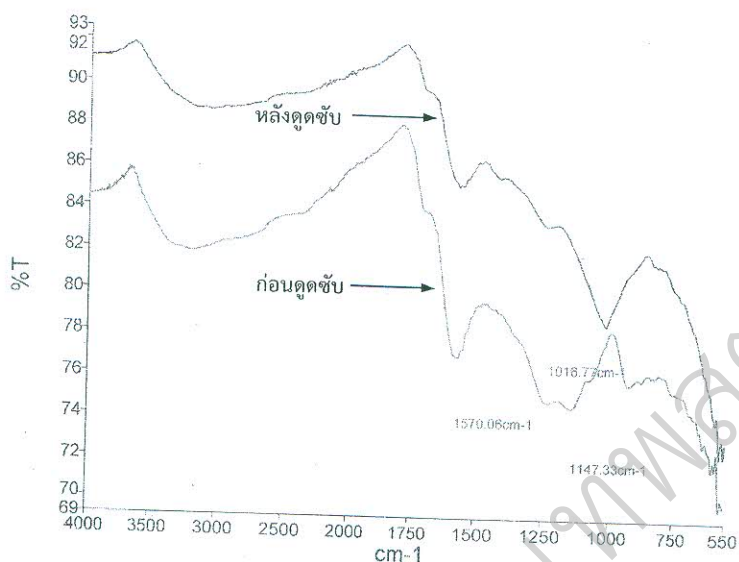


รูป 4.4 หมู่ฟังก์ชันของขานอ้อย

จากรูปที่ 4.4 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับก่อนดูดซับและหลังดูดซับที่ความยาวคลื่น  $4000-750\text{ cm}^{-1}$  พบว่า

ก่อนดูดซับ พบพีกในช่วงความยาวคลื่นประมาณ  $3334.33\text{ cm}^{-1}$  บ่งบอกถึงหมู่ไฮดรอกซิล (OH) พีกช่วงความยาวคลื่น  $1,600-1,590\text{ cm}^{-1}$  บ่งบอกว่าเกิดการสั่นแบบ skeletal ของวงแหวนเบนซีน พีกช่วงความยาวคลื่น  $1,420-1,300\text{ cm}^{-1}$  บ่งบอกว่าเกิดการสั่นแบบงอในระนาบ C = C-H ของเซลลูโลสและไซโตส (C = C-H in plane bending) พีกเกิดการสั่นช่วงความยาวคลื่นประมาณ  $1,356\text{ cm}^{-1}$  บ่งบอกว่าเกิดการสั่นแบบกระดิกและการบิด  $\text{CH}_2$  ของสารเชิงซ้อนน้ำตาลดีออกซี (deoxysugars complex) พีกช่วงความยาวคลื่นประมาณ  $1,121\text{ cm}^{-1}$  บ่งบอกว่าเกิดการสั่น C-O-C ของโพลีแซคคาไรด์ (Sharma and Kaur, 2011)

หลังการดูดซับ พบว่าพีกเกิดการเคลื่อน (shift) ทุกพีกหลังการดูดซับ เช่นในช่วงความยาวคลื่นประมาณ  $3334.33\text{ cm}^{-1}$  เกิดการเคลื่อนไปเป็น  $3339.01\text{ cm}^{-1}$



รูป 4.5 หมู่ฟังก์ชันของถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย

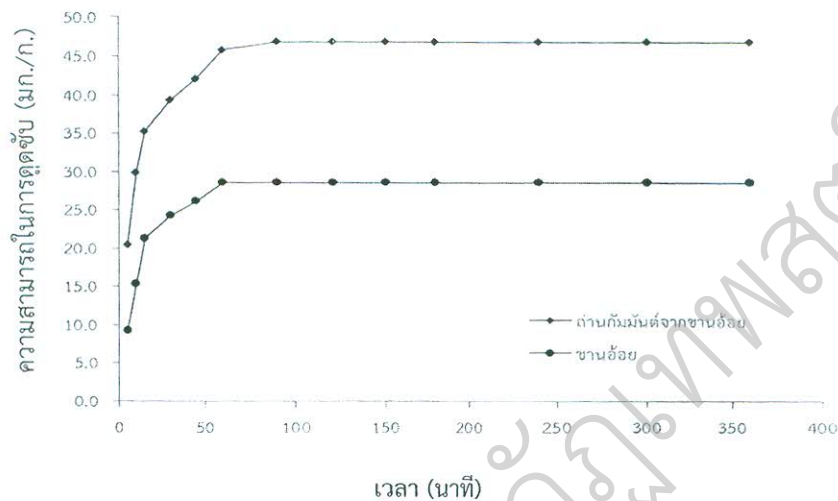
จากรูปที่ 4.5 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับก่อนดูดซับและหลังดูดซับที่ความยาวคลื่น 4000–750  $\text{cm}^{-1}$  พบว่า

ก่อนดูดซับ พบพีกในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 3334.33  $\text{cm}^{-1}$  บ่งบอกถึงหมู่ไฮดรอกซิล (OH) พีกช่วงความยาวคลื่น 1,690  $\text{cm}^{-1}$  บ่งบอกว่าเกิดการสั่นของ C = C พีกช่วงความยาวคลื่นประมาณ 1,580  $\text{cm}^{-1}$  บ่งบอกว่าเกิดการสั่นของอะโรมาติก (aromatic skeletal) และพีกช่วงความยาวคลื่นประมาณ 1,147.33  $\text{cm}^{-1}$  บ่งบอกว่าเกิดการสั่น C–C (Chen et al., 2012)

หลังการดูดซับ พบว่าพีกเกิดการเคลื่อน (shift) ทุกพีกหลังการดูดซับ และเกิดพีกใหม่ที่ความยาวคลื่น 1016.77  $\text{cm}^{-1}$

#### 4.3 ผลของเวลาที่เข้าสู่สมดุล

ทำการทดลองการดูดซับที่เวลาสมดุล 5 10 15 30 45 60 90 120 150 180 210 240 300 และ 360 นาที โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับ 0.2 กรัมสำหรับชานอ้อยและ 0.1 กรัมสำหรับถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย ที่ความเข้มข้นสารละลายเหล็ก 100 มิลลิกรัมต่อลิตร (ที่ pH=3) ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.6



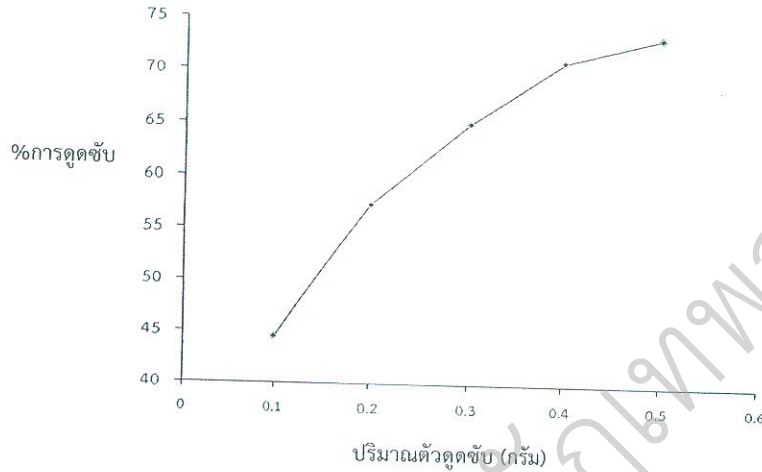
รูปที่ 4.6 ผลของเวลาในการดูดซับด้วยชานอ้อยและถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย

ผลของเวลาที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับเหล็กด้วยชานอ้อยและถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย ดังรูปที่ 4.6 ผลการทดลองการดูดซับเหล็กที่เวลา 5-360 นาที พบว่าการดูดซับอย่างรวดเร็วในช่วงเวลา 5 นาที ของทั้ง 2 ตัวดูดซับ มีความสามารถในการดูดซับ ( $q_t$ ) เท่ากับ 9.278 และ 20.441 มิลลิกรัมต่อกรัมของชานอ้อยและถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย ตามลำดับ การดูดซับดำเนินไปเรื่อย ๆ และการดูดซับเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งดูดซับช้าลงและเข้าสู่สมดุลที่เวลา 60 นาที และ 90 นาที โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับที่สมดุลเท่ากับ 28.635 และ 46.845 มิลลิกรัมต่อกรัมของชานอ้อยและถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย ตามลำดับ

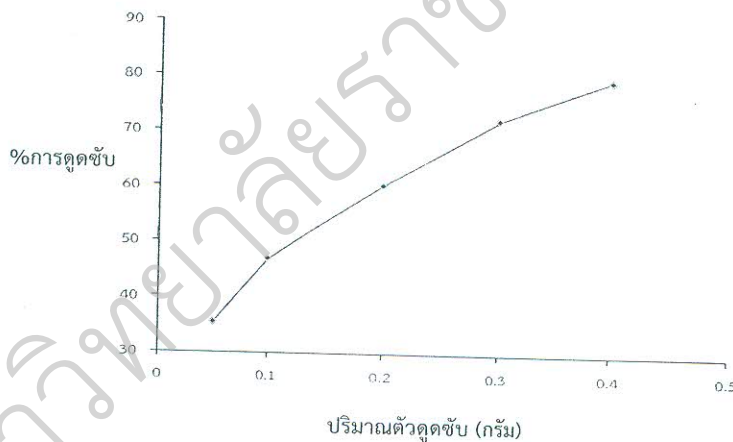
สอดคล้องกับงานวิจัยของ Sheibaniet al (2012) ที่ศึกษาการกำจัดเหล็กด้วยเปลือกเกาลัด (hazelnut hull) ในความเข้มข้นสารละลาย 50 มิลลิกรัมต่อลิตร (pH =3.5) ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปริมาณเกาลัด 0.5 กรัม ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่าการดูดซับเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเวลา 40-60 นาที และเข้าสู่สมดุลการดูดซับที่เวลา 70 นาที โดยมีความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 8.235 มิลลิกรัมต่อกรัมและสอดคล้องกับงานวิจัยของ Arivoli et al (2014) ศึกษาการกำจัดเหล็กด้วยถ่านกัมมันต์จากใบจอก (*Pistia Stratiotes Leaves*) ในความเข้มข้นสารละลาย 50 มิลลิกรัมต่อลิตร (pH =3.5) ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ปริมาณถ่านกัมมันต์ 0.025 กรัม ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่าการดูดซับเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเวลา 40 นาที และเข้าสู่สมดุลการดูดซับที่เวลา 60 นาที โดยมีความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 9.790 มิลลิกรัมต่อกรัม

#### 4.4 ผลของปริมาณตัวดูดซับ

ทำการทดลองการดูดซับที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร (ที่ pH = 3) โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับ 0.1 0.2 0.3 0.4 และ 0.5 กรัมสำหรับชานอ้อย และ 0.05 0.1 0.2 0.3 และ 0.4 กรัมสำหรับถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.7-4.8



รูปที่ 4.7 ผลของปริมาณตัวดูดซับในการดูดซับด้วยชานอ้อย

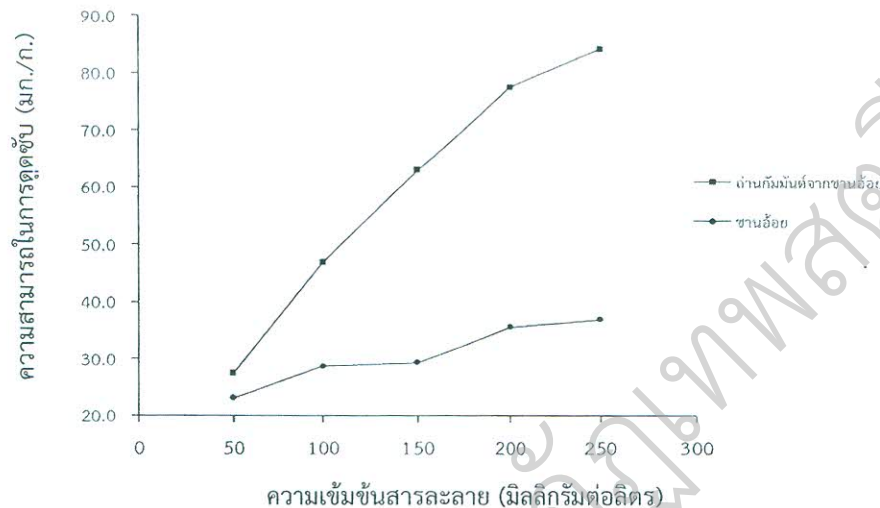


รูปที่ 4.8 ผลของปริมาณตัวดูดซับในการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย

จากรูป 4.7 และ 4.8 ผลของปริมาณตัวดูดซับในการดูดซับเหล็กด้วยชานอ้อยและถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย พบว่าเมื่อปริมาณตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้นจะทำให้มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับมากขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ 44.46 57.30 65.11 70.94 และ 73.33 สำหรับชานอ้อยและ 35.46 46.85 60.28 72.23 และ 79.544 สำหรับถ่านกัมมันต์ ตามลำดับ

#### 4.5 ผลของความเข้มข้นสารละลาย

ทำการทดลองการดูดซับที่ความเข้มข้นสารละลาย 50 100 150 200 และ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร (ที่ pH = 3) โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับ 0.2 กรัมสำหรับชานอ้อยและ 0.1 กรัมสำหรับถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ผลของความเข้มข้นสารละลายในการดูดซับด้วยชานอ้อยและถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย

ผลของความเข้มข้นสารละลายในการดูดซับด้วยชานอ้อยและถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย ที่ความเข้มข้นสารละลาย 50-250 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการทดลองพบว่าเมื่อความเข้มข้นสารละลายมากขึ้นทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับมากขึ้น โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 23.109 28.653 29.311 35.569 และ 36.892 มิลลิกรัมต่อกรัมสำหรับชานอ้อย และ 27.521 46.845 62.999 77.571 และ 84.249 มิลลิกรัมต่อกรัมสำหรับถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย

ซึ่ง Mane et al. (2007) กล่าวว่าเป็นการที่ความเข้มข้นมากขึ้นทำให้ความสามารถในการดูดซับมากขึ้นนั้น เป็นผลจากแรงขับ (driving force) ของการถ่ายเทมวลระหว่างสารละลาย (adsorbate) และตัวดูดซับ (adsorbent) คือ เมื่อความเข้มข้นของตัวถูกละลายมากขึ้น ทำให้ผลต่างระหว่างความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายกับความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ผิวตัวดูดซับมากขึ้น ทำให้มีแรงขับมากขึ้น หรือเมื่อโมเลกุลตัวถูกละลายมากขึ้นโอกาสการดูดติดมีมากขึ้น แต่ในที่สุดจะเกิดการอิ่มตัวของ การดูดติดเส้นกราฟที่ความเข้มข้นสูงขึ้นจะเปลี่ยนแปลงน้อยลงและคงที่ในแนวระนาบ หรือเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้นจะเกิดอันตรกิริยาระหว่างสารละลายและตัวดูดซับ โดยที่ความเข้มข้นของสารละลายต่ำ ๆ โมเลกุลของสารละลายจะเข้าไปดูดติดได้น้อย

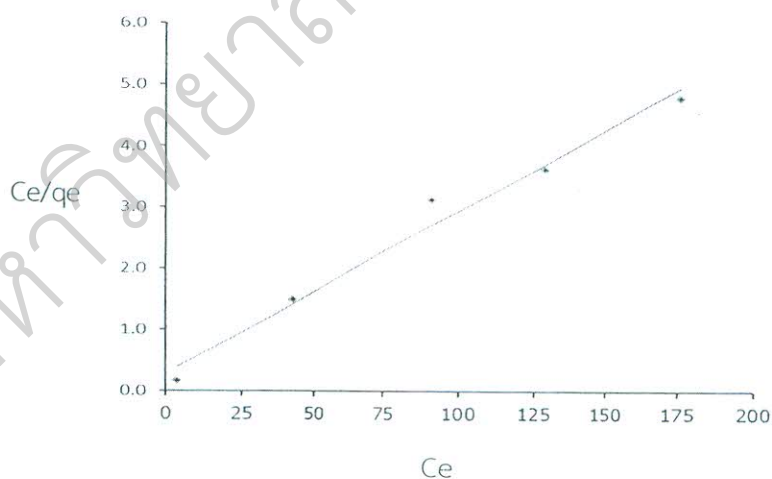
#### 4.6 ไอโซเทอร์มการดูดซับ

ไอโซเทอร์มของการกำจัดเหล็กด้วยชานอ้อยและถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารละลายเหล็กที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของชานอ้อยและถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย กับความเข้มข้นของสารละลายเหล็กที่เหลืออยู่ที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิที่คงที่เพื่อหาไอโซเทอร์มที่เหมาะสม และใช้อธิบายลักษณะการดูดซับผลการทดลองและค่าความสัมพันธ์ตามสมการไอโซเทอร์มจะเป็นดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการคำนวณจากไอโซเทอร์มการกำจัดเหล็กด้วยชานอ้อย

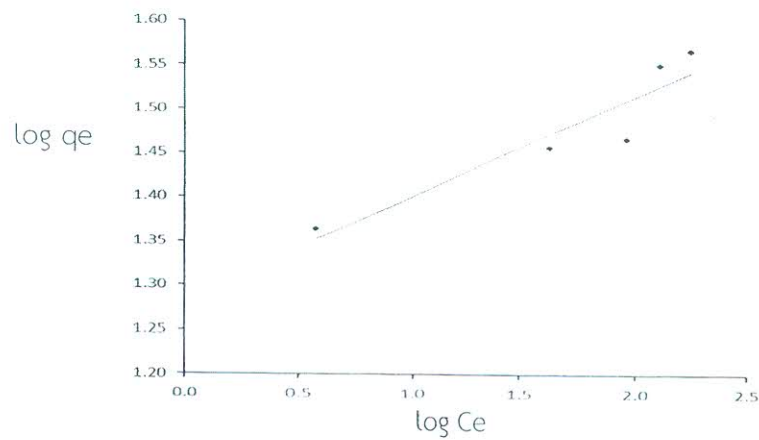
ความเข้มข้น สารละลาย (มก/ล)	Ce (mg/L)	qe (mg/g)	Ce/qe	log Ce	log qe
50	3.782	23.109	0.164	0.578	1.364
100	42.695	28.653	1.490	1.630	1.457
150	91.377	29.311	3.117	1.961	1.467
200	128.862	35.569	3.623	2.110	1.551
250	176.217	36.892	4.777	2.246	1.567

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



รูปที่ 4.10 ไอโซเทอร์มการดูดซับแลงเมียร์ของชานอ้อย



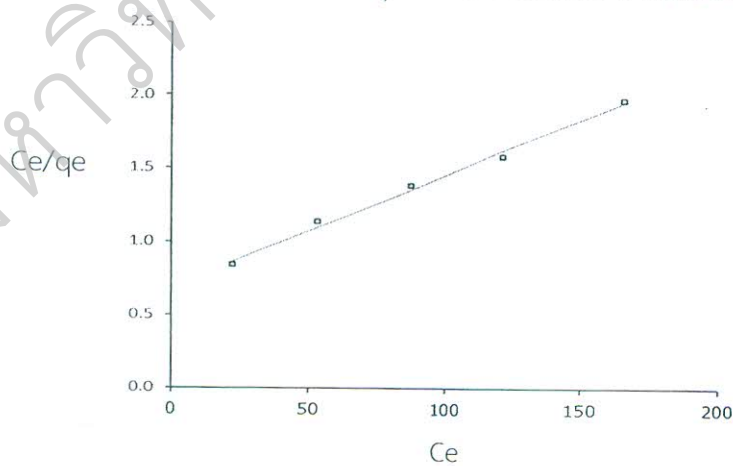


รูปที่ 4.11 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟรอนตลิซของชานอ้อย

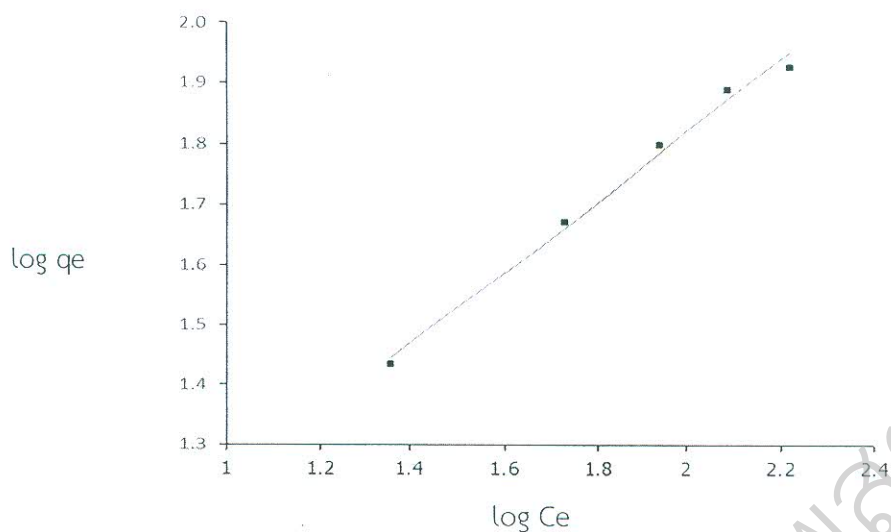
ตารางที่ 4.2 ผลการคำนวณจากไอโซเทอร์มการกำจัดเหล็กด้วยถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย

ความเข้มข้น สารละลาย (มก/ล)	Ce (mg/L)	qe (mg/g)	Ce/qe	log Ce	log qe
50	22.861	27.139	0.842	1.359	1.434
100	53.155	46.845	1.135	1.726	1.671
150	87.001	62.999	1.381	1.940	1.799
200	122.429	77.571	1.578	2.088	1.890
250	165.751	84.249	1.967	2.219	1.926

จากข้อมูลในตารางที่ 4.2 นำมาเขียนกราฟแบบสมการเส้นตรง (linear equation) จะได้กราฟเส้นตรงของไอโซเทอร์มแลงเมียร์กับฟรอนตลิซของถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย ดังรูป 4.12-4.13



รูปที่ 4.12 ไอโซเทอร์มการดูดซับแลงเมียร์ของถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย



รูปที่ 4.13 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟรอนตลิซของถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย

จากการวิเคราะห์ผลโดยใช้สมการเส้นตรงไอโซเทอร์มแลงเมียร์และฟรอนตลิซในการทำนายผลการทดลองการกำจัดเหล็กด้วยชานอ้อยและถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย จะได้พารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 พารามิเตอร์ของไอโซเทอร์มการกำจัดเหล็กของชานอ้อยและถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย

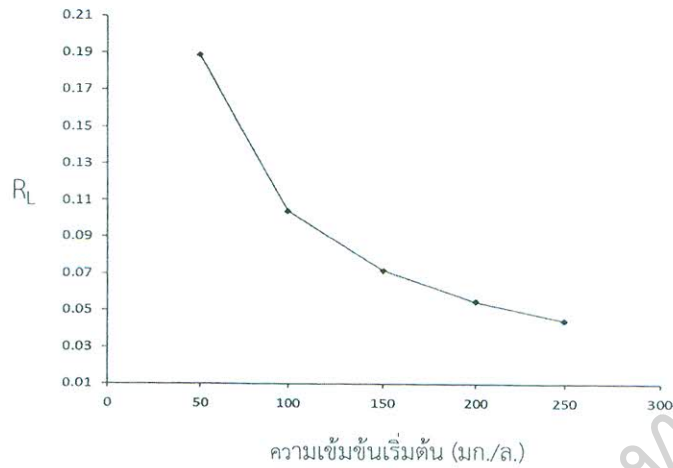
ไอโซเทอร์มแลงเมียร์	พารามิเตอร์	
	ชานอ้อย	ถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย
$q_{max}$ (mg/g)	39.526	131.579
$K_L$ (L/mg)	0.086	0.011
$R_L$	0.188-0.044	0.645-0.267
$R^2$	0.980	0.993
ไอโซเทอร์มฟรอนตลิซ		
$1/n$	0.114	0.587
$K_F$ (mg/g)	19.349	4.432
$R^2$	0.873	0.992

ไอโซเทอร์มการกำจัดเหล็กด้วยชานอ้อยและถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย ใช้สมการแลงเมียร์และฟรอนตลิซอธิบายผลการทดลอง แสดงดังรูปที่ 4.9-4.10 และ 4.11-4.12 ส่วนค่าคงที่ของสมการแลงเมียร์และฟรอนตลิซ แสดงในตารางที่ 4.3 และเมื่อพิจารณาความสอดคล้องของไอโซเทอร์มจากการดูดซับพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีความใกล้เคียง 1 มากที่สุด ผลการทดลองพบว่า

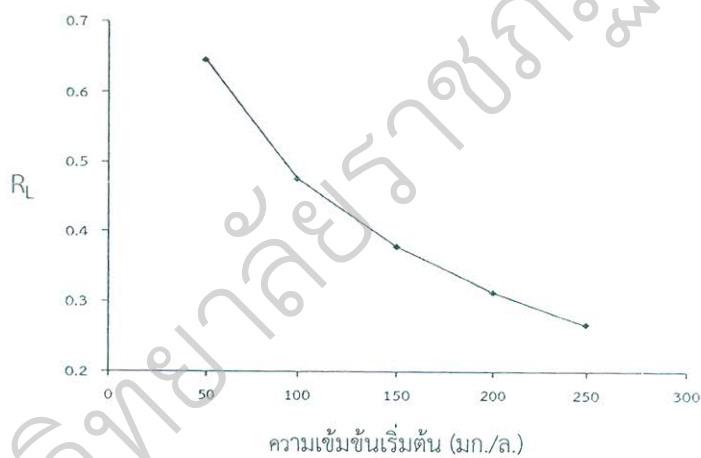
การดูดซับเหล็กด้วยชายอ้อยสอดคล้องกับสมการแลงเมียร์มากกว่าสมการฟรุนดลิชอธิบายได้ว่าเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว โดยมีค่าความสามารถสูงสุด (maximum adsorption capacity,  $q_{max}$ ) เท่ากับ 39.526 มิลลิกรัมต่อกรัม : สอดคล้องกับงานวิจัยของ Benaisa et al (2016) ที่ศึกษาการกำจัดเหล็กด้วยสาหร่ายทะเลสีน้ำตาล (brown algae *Sargassum Vulgare*) ผลการทดลองพบว่า สอดคล้องกับสมการแลงเมียร์ และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sheibaniet al (2012) ที่ศึกษาการกำจัดเหล็กด้วยเปลือกเกาลัด (hazelnut hull) ผลการทดลองพบว่าสอดคล้องกับสมการแลงเมียร์ และฟรุนดลิช โดยมีค่าความสามารถสูงสุด (maximum adsorption capacity,  $q_{max}$ ) เท่ากับ 13.59 มิลลิกรัมต่อกรัม

ส่วนถ่านกัมมันต์จากขานอ้อย ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องทั้งสมการแลงเมียร์และฟรุนดลิช แต่สอดคล้องกับสมการแลงเมียร์มากกว่าอธิบายได้ว่าเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว โดยมีค่าความสามารถสูงสุด (maximum adsorption capacity,  $q_{max}$ ) เท่ากับ 131.579 มิลลิกรัมต่อกรัม สอดคล้องกับงานวิจัยของ Akl et al (2013) ที่ศึกษาการดูดซับเหล็ก (3+) และแมงกานีส (2+) ด้วยถ่านกัมมันต์จากลูกมะกอก (olive stone) ที่ทำการกระตุ้นด้วยกรด  $HNO_3$  และ ammonium persulphate ผลการทดลองสามารถอธิบายได้ด้วยสมการแลงเมียร์มากกว่าฟรุนดลิชทั้งสองโลหะหนัก : สอดคล้องกับงานวิจัยของ Maneechakr and Karnjanakom (2017) ที่ศึกษาการดูดซับเหล็ก (+2)โครเมียม (+6) ด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากต้นสะแกนา (*Combretum quadrangulare* Kurz.) ผลการทดลองเมื่อพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ สามารถอธิบายได้ด้วยสมการแลงเมียร์มากกว่าสมการฟรุนดลิชของทั้งสองโลหะหนัก : สอดคล้องกับงานวิจัยของ Thuan et al (2017) ที่ศึกษาการดูดซับ  $Cu^{2+}$  และ  $Ni^{2+}$  ด้วยถ่านกัมมันต์จากเปลือกกล้วยที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ผลการทดลองที่ได้สามารถอธิบายได้ด้วยสมการแลงเมียร์มากกว่าสมการฟรุนดลิชของทั้งสองโลหะหนัก และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Abdel-Ghani et al (2015) ที่ศึกษาการดูดซับ  $Al(3+)$  และ  $Fe(3+)$  ด้วยถ่านกัมมันต์จากฟางข้าวที่กระตุ้นด้วย NaOH ผลการทดลองพบว่าการดูดซับ  $Al(3+)$  และ  $Fe(3+)$  สามารถอธิบายได้ด้วยสมการแลงเมียร์ทั้งสองโลหะหนัก โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 34.48 มิลลิกรัมต่อกรัมของ  $Al(3+)$  และ 45.45 มิลลิกรัมต่อกรัมของ  $Fe(3+)$  ตามลำดับ

จากไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ในการกำจัดเหล็กด้วยชานอ้อยและถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย สามารถอธิบายในทอมปัจจัยการแยก (separation factor) ได้ดังรูปที่ 4.14 และ 4.15



รูปที่ 4.14 ปัจจัยการแยกในการกำจัดเหล็กด้วยชานอ้อย



รูปที่ 4.15 ปัจจัยการแยกในการกำจัดเหล็กด้วยถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย

จากรูป 4.14 และ 4.15 ค่าปัจจัยการแยกในการกำจัดเหล็กด้วยชานอ้อยและถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย พบว่าในการดูดซับมีค่าปัจจัยการแยกเท่ากับ 0.188-0.044 และ 0.645-0.267 ซึ่งบ่งบอกว่าเป็นการดูดซับที่ดี เนื่องจากมีค่า  $0 < R_L < 1$

#### 4.7 การกำจัดเหล็กในน้ำบาดาลจากชุมชน

ทำการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กในน้ำบาดาลด้วยชานอ้อยและถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย ทำการเก็บตัวอย่างน้ำบาดาลจากชาวบ้านในพื้นที่ จ.ลพบุรี มาทำการวิเคราะห์ปริมาณความกระด้างเริ่มต้น พบว่ามีปริมาณเหล็กเท่ากับ 35.125 มิลลิกรัมต่อกรัม และนำมาทำการกำจัดความกระด้างด้วย พบว่าชานอ้อยมีร้อยละการดูดซับเท่ากับ 18.24 และถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยมีร้อยละการดูดซับเท่ากับ 62.36

มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

## บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ทำการศึกษากำจัดเหล็กในน้ำบาดาลด้วยขานอ้อยและถ่านกัมมันต์จากขานอ้อย โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ ผลของเวลาที่เข้าสู่สมดุล ปริมาณตัวดูดซับและความเข้มข้นของสารละลาย สรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. ทำการเตรียมถ่านกัมมันต์จากขานอ้อย โดยการกระตุ้นด้วย 1.0 M  $H_3PO_4$  และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง และเมื่อวิเคราะห์ด้วย FTIR พบว่ามีพีคในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 3334.33, 1,690, 1,580 และ 1,147.33  $cm^{-1}$

2. ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดเหล็ก ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และปริมาตร 100 มิลลิตร (ที่ pH = 3) ผลการทดลองมีดังนี้

1.1 ผลของเวลาที่ต่อประสิทธิภาพการกำจัด ที่เวลา 5-360 นาที พบว่าการดูดซับเกิดขึ้นที่เวลา 60 และ 90 นาที และมีค่าความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 28.635 และ 46.845 มิลลิกรัมต่อกรัม ของขานอ้อยและถ่านกัมมันต์จากขานอ้อย ตามลำดับ

1.2 ผลของปริมาณตัวดูดซับในการกำจัด โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับ 0.1-0.5 กรัมสำหรับขานอ้อย และ 0.05-0.4 กรัมสำหรับถ่านกัมมันต์จากขานอ้อย พบว่าขานอ้อยมีร้อยละการดูดซับเท่ากับ 44.46-73.33 และถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยมีร้อยละการดูดซับเท่ากับ 35.46-79.544 ตามลำดับ

1.3 ผลของความเข้มข้นสารละลายในการกำจัด ที่ความเข้มข้นสารละลาย 50-250 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการทดลองพบว่าขานอ้อย มีค่าความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 23.109-36.892 มิลลิกรัมต่อกรัม และถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยมีค่าความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 27.521-84.249 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

3. การกำจัดเหล็กด้วยขานอ้อยและถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยสอดคล้องกับสมการแลงเมียร์ และมีค่าความสามารถสูงสุด (maximum adsorption capacity,  $q_{max}$ ) เท่ากับ 39.526 และ 131.579 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

4. ค่าปัจจัยการแยกการกำจัดเหล็กด้วยขานอ้อยและถ่านกัมมันต์จากขานอ้อย พบว่ามีค่าปัจจัยการแยกเท่ากับ 0.188-0.044 และ 0.645-0.267

5. จากข้อมูลการทดลองสรุปได้ว่าขานอ้อยและถ่านกัมมันต์จากขานอ้อย มีประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กในน้ำได้ดี

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ทำการเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือทิ้งทางเกษตรในท้องถิ่นอื่น ๆ เช่น แกลบและเปลือกข้าวโพด และใบอ้อย เป็นต้น

2. นำมาประยุกต์ใช้ในการกำจัดสารอนินทรีย์ และอนินทรีย์ ในน้ำทิ้งจากแหล่งต่าง ๆ

## เอกสารอ้างอิง

- กุลลดา บรรลือวงศ์. (2544). กำจัดเหล็กออกจากน้ำสำหรับใช้ในการเลี้ยงกุ้งกุลาดำ ด้วยวิธีออกซิเดชันร่วมกับการตกตะกอน. วิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม (สหสาขาวิชา) วิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- จักรกฤษณ์ ชัยว่อง. (2555). การเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กในน้ำใต้ดินโดยใช้พีช. วิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยพะเยา.
- ธัญญา พรหมศร (2557). การกำจัดเหล็กในน้ำด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์อะพาไทต์. รายงานวิจัย มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต.
- รัตนา สนั่นเมือง, ยุทธพงษ์ อุดแน่น และวิภารัตน์ เชื้อชวด (2008). การกำจัดเหล็กในน้ำบาดาลสังเคราะห์ด้วยโคโคซานเมมเบรน. NU Science Journal : 5(2): 200 – 209
- วรรณณา 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](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.
- Benaïsa, 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.” 3<sup>rd</sup> 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.
- Oztaş, 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 ผลของเวลาในการกำจัดเหล็กในน้ำบาดาลด้วยชานอ้อยและถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย

เวลา (นาที)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)	
	ชานอ้อย	ถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย
5	9.278	20.441
10	15.361	29.865
15	21.325	35.254
30	24.266	39.320
45	26.128	42.136
60	28.635	45.781
90	28.635	46.844
120	28.635	46.844
150	28.635	46.844
180	28.635	46.844
240	28.635	46.844
300	28.635	46.844
360	28.635	46.844

ตารางที่ ก.2 ผลของปริมาณตัวดูดซับในกำจัดเหล็กในน้ำบาดาลด้วยชานอ้อยและถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย

ชานอ้อย (กรัม)	ร้อยละการกำจัด	ถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย (กรัม)	ร้อยละการกำจัด
0.1	44.468	0.05	35.465
0.2	57.305	0.1	46.845
0.3	65.110	0.2	60.278
0.4	70.947	0.3	72.239
0.5	73.332	0.4	79.544

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

มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี