

การดูดซับตะกั่วและสังกะสีที่เป็นพิษ

ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ฟางข้าวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดซิตริก

ADSORPTION OF LEAD AND ZINC CONTAMINATED IN SYNTHETIC  
WASTEWATER USING RICE STRAW MODIFIED WITH CITRIC ACID

นางสาวรัตนา ศรีจันทร์พจนันท์

นางสาววิภาณี จันทระประเสริฐ

นางสาวศุภนทร์ ทองหนองบัว

โครงการพิเศษ ๒๕ เป็นส่วนหนึ่งของงานศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม

คณะวิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา ๒๕๕๖

การดูดซับตะกั่วและสังกะสีที่ปนเปื้อน  
ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ฟางข้าวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดซิตริก

**ADSORPTION OF LEAD AND ZINC CONTAMINATED IN  
SYNTHETIC WASTEWATER USING RICE STRAW MODIFIED  
WITH CITRIC ACID**

นางสาวรัตนา ศรีจันทร์พิทักษ์  
นางสาววิภาณี จันทร์ประเสริฐ  
นางสาวสุนทรี ทองหนองบัว

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม  
คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2556

**ADSORPTION OF LEAD AND ZINC CONTAMINATED IN  
SYNTHETIC WASTEWATER USING RICE STRAW MODIFIED  
WITH CITRIC ACID**

**MISS RATTANA      SRIJANPITAK**  
**MISS WIPANEE      JUNPRASERT**  
**MISS SOONTAREE      TONGNONGBUA**

**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULLMENT  
OF THE REQUIRMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE  
DEPARTMENT OF CHEMISTRY  
FACULTY OF SCIENCE  
KING MINGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2013**

โครงการพิเศษ การดูดซับตะกั่วและสังกะสีที่ปนเปื้อนในน้ำเสียสังเคราะห์โดยฟางข้าวที่  
ทำการปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดซิตริก

ADSORPTION OF LEAD AND ZINC CONTAMINATED IN  
SYNTHET WASTEWATER USING RICE STRAW MODIFIED  
WITH CITRIC

ชื่อนักศึกษา นางสาวรัตนา ศรีจันทร์พิทักษ์ รหัส 53051244

นางสาววิภาณี จันทร์ประเสริฐ รหัส 53051261

นางสาวสุนทรี ทองหนองบัว รหัส 53051284

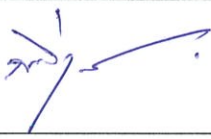


ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต

สาขาวิชา เคมีสิ่งแวดล้อม

ปีการศึกษา 2556

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. ชมพูนุท ไชยรักษ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้  
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมี  
สิ่งแวดล้อม ประจำปีการศึกษา 2556

| คณะกรรมการสอบ              | ลายมือชื่อ   |
|----------------------------|--|
| อ. กลิ่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์ |  |
| อ. ปัทมา สิพหาวงศ์         |  |
| ผศ.ดร. ชมพูนุท ไชยรักษ์    |  |

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

|                           |  |
|---------------------------|--|
| <b>หัวข้อโครงการพิเศษ</b> | การดูดซับตะกั่วและสังกะสีที่ปนเปื้อนในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ฟางข้าวที่ปรับปรุงด้วยกรดซิตริก |
| <b>ชื่อนักศึกษา</b>       | นางสาวรัตนา ศรีจันทร์พิทักษ์<br>นางสาววิภาณี จันทรประเสริฐ<br>นางสาวสุนทรี ทองหนองบัว        |
| <b>ปริญญา</b>             | วิทยาศาสตรบัณฑิต   |
| <b>สาขาวิชา</b>           | เคมีสิ่งแวดล้อม  |
| <b>ปีการศึกษา</b>         | 2556   |
| <b>อาจารย์ที่ปรึกษา</b>   | ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์   |

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ได้นำฟางข้าวซึ่งเป็นวัสดุที่เหลือทิ้งทางการเกษตรมาทดลองการศึกษาดูดซับตะกั่วและสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยนำฟางข้าวมาทำการสกัดด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 โมลาร์และทำการปรับปรุงด้วยกรดซิตริกเข้มข้น 0.4 โมลาร์ ทำการศึกษาลักษณะสัณฐานของฟางข้าวที่ไม่ปรับปรุงและปรับปรุงด้วยกรดซิตริกโดยใช้ SEM และวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วย FTIR โดยปัจจัยการดูดซับที่ทำการศึกษาประกอบด้วย ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ระยะเวลาสัมผัส ปริมาณตัวดูดซับ ความเข้มข้นของตะกั่วและสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ จากการศึกษาพบว่าฟางข้าวที่ปรับปรุงด้วยกรดซิตริกจะมีพื้นที่ผิวมากกว่าฟางข้าวที่ไม่ปรับปรุงทำให้สามารถดูดซับตะกั่วและสังกะสีได้ดี สภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับตะกั่วและสังกะสีโดยใช้ฟางข้าว และฟางข้าวที่ผ่านการปรับปรุงด้วยกรดซิตริกสำหรับการดูดซับไอออนของตะกั่วคือ pH เท่ากับ 4 ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที และการดูดซับสังกะสี คือ pH เท่ากับ 5 ระยะเวลาสัมผัส 80 นาที เมื่อปริมาณของฟางข้าวเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการดูดซับจะสูงขึ้นถ้าความเข้มข้นของตะกั่วและสังกะสีเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการดูดซับจะลดลง ความสามารถในการดูดซับตะกั่วของฟางข้าวที่ไม่ปรับปรุงและฟางข้าวที่ปรับปรุงด้วยกรดซิตริกเท่ากับร้อยละ 42.78 และ 91.92 ส่วนการดูดซับสังกะสีเท่ากับร้อยละ 39.57 และ 72.33 ตามลำดับ เมื่อศึกษาการคายซับของฟางข้าวที่ไม่ปรับปรุงสามารถดูดซับตะกั่วและสังกะสีเท่ากับร้อยละ 34.75 และ 28.47 ส่วนการคายซับของฟางข้าวที่ปรับปรุงด้วยกรดซิตริกสามารถดูดซับตะกั่วและสังกะสีได้เท่ากับร้อยละ 68.71 และ 54.16 ตามลำดับ นอกจากนี้การดูดซับของตะกั่วและสังกะสีโดยใช้ฟางข้าวสอดคล้องกับสมการการดูดซับของฟรุนดลิช

คำสำคัญ: การดูดซับ ตะกั่ว สังกะสี ฟางข้าว และการปรับปรุงฟางข้าว

|                              |   |
|------------------------------|---|
| <b>Special Project Title</b> | Adsorption of Zinc and Lead Contaminated in Synthetic Wastewater Using Rice Straw Modified with Citric Acid |
| <b>Name</b>                  | Miss Rattana Srijanpitak<br>Miss Wipanee Junprasert<br>Miss Soontaree Tongnongbua                           |
| <b>Degree</b>                | Bachelor of Science   |
| <b>Major Program</b>         | Environmental Chemistry   |
| <b>Academic Year</b>         | 2013  |
| <b>Advisor</b>               | Asst.Prof.Dr.Chompoonut Chaiyaraksa   |

## **ABSTRACT**

The aim of this special project is to study the adsorption of lead and zinc in synthetic wastewater using the modified rice straw, an agricultural waste, as an adsorbent. The material was extracted with 5.0 M Sodium hydroxide and modified with 0.4 M citric acid. The morphology and functional analysis of both rice straw and modified rice straw were investigated by SEM and FTIR, respectively. The effect of various adsorption factors such as pH, contact time, weight of biosorbent and concentration of metal ion in the solution were also studied. The results indicated that the modified rice straw has more surface area and portion site than the unmodified rice straw. The optimum pH was 4.0 and 5.0 with 30 minutes and 80 minutes for lead and zinc adsorption, respectively. Freundlich isotherm was best to explain the adsorption. All experiments were carried in batch technique. The higher the amount of rice straw, the higher the adsorption efficiency. While concentration of lead and zinc were increased, the adsorption efficiencies were decreased. Moreover, the adsorption efficiency of rice straw and modified rice straw were 42.78% and 91.92% for lead adsorption, and 39.57% and 72.33% for zinc adsorption. The desorption efficiency of rice straw and modified rice straw were for lead, 34.75% and 68.71% and 28.47% and 54.16% for zinc. It could be assumed that after modification process, the rice straw's surface properties were improved and were suitable for lead and zinc adsorption.

Keyword: Adsorption, Lead, Zinc, Rice straw and Modification of rice straw

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สามารถลุล่วงไปได้ด้วยดีในครั้งนี้ สืบเนื่องจากความช่วยเหลือและความกรุณาของทุก ๆ ท่าน ทั้งอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์ ที่กรุณาติดตามตรวจสอบดูแลเอาใจใส่อย่างใกล้ชิด และให้คำปรึกษาตลอดเวลาดิฉันจนผลงานสำเร็จลุล่วงได้ในที่สุด

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ปัทมา ลีพิทวงศ์ และอาจารย์กลิ่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์ เป็นอย่างสูงที่กรุณาเป็นกรรมการในการสอบโครงการพิเศษ ตลอดจนให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการพิเศษนี้

ขอขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาเคมีทุกท่าน อีกทั้งเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมีและเจ้าหน้าที่ธุรการภาคเคมีทุกท่าน ที่ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการทำโครงการพิเศษนี้ ทั้งแม่บ้านภาควิชาเคมี ที่ให้ความช่วยเหลือในทุกด้านอย่างเต็มที่

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และบุคคลในครอบครัว ที่ให้ความรัก ความเข้าใจและเป็นกำลังใจตลอดจนให้ผลงานสำเร็จลุล่วงด้วยดี รวมทั้งเพื่อน ๆ ในสาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อมทุกคน ที่คอยให้กำลังใจและให้คำปรึกษาที่ดีตลอดการทำโครงการพิเศษฉบับนี้

คณะผู้จัดทำสำนึกในพระคุณทุกท่าน และถือโอกาสนี้กราบขอบพระคุณทุก ๆ ท่าน ที่ให้ความกรุณา ให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา คำแนะนำที่ดี และอดทนกับโครงการพิเศษมาโดยตลอด ขอขอบพระคุณ ณ โอกาสนี้ด้วย

รัตนา ศรีจันทร์พิทักษ์

วิภาณี จันประเสริฐ

สุนทรี ทองหนองบัว

# สารบัญ

|  | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย  | I    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ   | II   |
| กิตติกรรมประกาศ  | III  |
| สารบัญ   | IV   |
| สารบัญตาราง  | VI   |
| สารบัญรูป  | VII  |
| คำย่อและสัญลักษณ์  | IX   |
| บทที่ 1 บทนำ   | 1    |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ   | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย  | 2    |
| 1.3 ขอบเขตงานวิจัย   | 2    |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ  | 3    |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง  | 4    |
| 2.1 โลหะหนัก   | 4    |
| 2.2 กรรมวิธีบำบัดโลหะหนักในน้ำเสีย   | 9    |
| 2.3 การดูดซับ (Absorption)   | 12   |
| 2.4 ฟางข้าว (Rice Straw)   | 17   |
| 2.5 การปรับสภาพฟางข้าว   | 22   |
| 2.6 การวิเคราะห์โลหะหนักในน้ำเสียโดยใช้เครื่อง<br>AAS (Atomic Absorption Spectrometer) | 25   |
| 2.7 Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR)                                | 33   |
| 2.8 Scanning Electron Microscope (SME)   | 39   |
| 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง  | 44   |
| บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย   | 47   |
| 3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง  | 47   |
| 3.2 การเตรียมฟางข้าว   | 48   |
| 3.3 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร                     | 48   |
| 3.4 วิธีการทดลอง   | 49   |

## สารบัญ (ต่อ)

|   | หน้า |
|---|------|
| บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล  | 53   |
| 4.1 การศึกษาการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสารองค์ประกอบในฟางข้าวที่ปรับปรุงและไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดซिटริกโดย FTIR (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer) | 53   |
| 4.2 การศึกษาลักษณะพื้นที่ผิวของฟางข้าวที่ปรับปรุงและไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดซिटริกโดย SME (Scanning Electron Microscope)   | 55   |
| 4.3 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับตะกั่วและสังกะสีของฟางข้าวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดซिटริก  | 56   |
| 4.4 การศึกษาอิทธิพลความเข้มข้นของตะกั่วและสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีผลต่อการดูดซับ   | 59   |
| 4.5 การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับตะกั่วและสังกะสีของฟางข้าวที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดซिटริก  | 60   |
| 4.6 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับของฟางข้าวที่ไม่ปรับปรุงและปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดซिटริกในน้ำเสียสังเคราะห์สองชนิด  | 65   |
| 4.7 การศึกษาประสิทธิภาพการนำฟางข้าวที่คายซับแล้วกลับมาใช้ใหม่   | 66   |
| บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ   | 69   |
| เอกสารอ้างอิง   | 71   |
| ภาคผนวก   |      |
| ภาคผนวก ก   | 73   |
| ภาคผนวก ข   | 78   |
| ภาคผนวก ค   | 95   |

# สารบัญตาราง

| ตารางที่  | หน้า |
|---|------|
| 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของข้อลำต้น แผ่นใบและกาบใบของฟางข้าว | 17   |
| 2.2 สมบัติและองค์ประกอบต่างๆ ที่พบในพืช                   | 22   |
| 4.1 ผลการศึกษาไอโซเทอร์มของตะกั่ว                         | 62   |
| 4.2 ผลการศึกษาไอโซเทอร์มของสังกะสี                        | 63   |

# สารบัญรูป

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 2.1 กลไกการดูดซับทั้ง 4 ขั้นตอน  | 15   |
| 2.2 โครงสร้างหลักของฟางข้าว  | 17   |
| 2.3 โครงสร้างของเซลลูโลส   | 18   |
| 2.4 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส   | 20   |
| 2.5 โครงสร้างของลิกนิน   | 21   |
| 2.6 โครงสร้างกรดซिटริก   | 24   |
| 2.7 การเกิดปฏิกิริยาระหว่างเซลลูโลสและกรดซिटริกในกระบวนการปรับสภาพฟางข้าว                      | 25   |
| 2.8 ส่วนประกอบของเครื่อง Atomic Absorption Spectrometer  | 26   |
| 2.9 Flame Atomization process  | 31   |
| 2.10 แผนผังแสดงส่วนประกอบของ Dispersive Infrared Spectrometer                                  | 36   |
| 2.11 แผนผังแสดงส่วนประกอบของ Fourier Transform Infrared Spectrometer                           | 37   |
| 2.12 Michelson Interrometer  | 39   |
| 2.13 ส่วนประกอบต่างๆรวมทั้งระบบภายใน column (A) และ console unit (B) ของ SEM                   | 41   |
| 2.14 แผนภาพแสดงให้เห็นส่วนประกอบที่สำคัญของ SEM ที่ เป็นจุดกำเนิดของภาพ                        | 41   |
| 4.1 IR สเปกตรัมของฟางข้าว  | 54   |
| 4.2 ภาพภายใต้กล้อง SEM ของฟางข้าว  | 55   |
| 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง pH กับร้อยละการดูดซับ ไอออนตะกั่ว ( $Pb^{2+}$ )                | 56   |
| 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง pH กับร้อยละการดูดซับ ไอออนสังกะสี ( $Zn^{2+}$ )               | 57   |
| 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการดูดซับ กับร้อยละการดูดซับ ไอออนตะกั่ว ( $Pb^{2+}$ )  | 58   |
| 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการดูดซับ กับร้อยละการดูดซับ ไอออนสังกะสี ( $Zn^{2+}$ ) | 58   |
| 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตะกั่วกับประสิทธิภาพการดูดซับ                     | 59   |
| 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสังกะสีกับประสิทธิภาพการดูดซับ                    | 60   |

## สารบัญรูป(ต่อ)

|   | หน้า |
|---|------|
| <b>รูปที่</b>   |      |
| 4.9 ผลการใช้ฟางข้าวที่มีน้ำหนักต่างกันในการดูดซับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์  | 61   |
| 4.10 ผลการใช้ฟางข้าวที่มีน้ำหนักต่างกันในการดูดซับสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์  | 61   |
| 4.11 ผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับตะกั่วของฟางข้าวแบบ Langmuir Isotherm   | 62   |
| 4.12 ผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับตะกั่วของฟางข้าวแบบ Freundlich Isotherm   | 63   |
| 4.13 ผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับสังกะสีของฟางข้าวแบบ Langmuir Isotherm  | 64   |
| 4.14 ผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับสังกะสีของฟางข้าวแบบ Freundlich Isotherm  | 64   |
| 4.15 ร้อยละการดูดซับไอออนตะกั่ว ( $Pb^{2+}$ ) ของฟางข้าวที่ไม่ปรับปรุง<br>และปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดซิตริก                          | 65   |
| 4.16 ร้อยละการดูดซับไอออนสังกะสี ( $Zn^{2+}$ ) ของฟางข้าวที่ไม่ปรับปรุง<br>และปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดซิตริก                         | 66   |
| 4.17 ประสิทธิภาพการนำวัสดุดูดซับกลับมาใช้ใหม่ระหว่างวัสดุที่เป็นฟางข้าวที่ไม่ปรับปรุง<br>และฟางข้าวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดซิตริก | 67   |
| 4.18 ประสิทธิภาพการนำวัสดุดูดซับกลับมาใช้ใหม่ระหว่างวัสดุที่เป็นฟางข้าวที่ไม่ปรับปรุง<br>และฟางข้าวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดซิตริก | 68   |

## คำย่อและสัญลักษณ์

|                  |  |
|------------------|--|
| AAS              | Atomic Absorption Spectrophotometer        |
| ASTM             | American Society for Testing and Materials |
| cm <sup>-1</sup> | หนึ่งต่อเซนติเมตร                          |
| FTIR             | Fourier Transform Infrared Spectroscopy    |
| mesh             | เมช  |
| mg/L             | มิลลิกรัมต่อลิตร                           |
| mol/L            | โมลต่อลิตร                                 |
| N                | นอร์มัล                                    |
| pm               | พิโคเมตร                                   |
| RPE              | Rate of Perceived Exertion                 |
| SEM              | Scanning Electron Microscope               |
| R <sup>2</sup>   | ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์                |
| µg/mL            | ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร                      |
| µg/L             | ไมโครกรัมต่อลิตร                           |

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

การเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจทำให้มีการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรมเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้มีการปล่อยของเสียออกสู่สิ่งแวดล้อมจนเกิดเป็นปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อม ปัญหาที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากการปล่อยของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมได้แก่ปัญหาทางดิน ทางน้ำ และทางอากาศ ปัญหาเหล่านี้จะก่อให้เกิดความเสียหายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมยากที่จะแก้ไข หนึ่งในปัญหาเหล่านั้นคือการปนเปื้อนของโลหะหนักในแหล่งน้ำที่ส่งผลกระทบต่อกับระบบนิเวศน์ต่างๆ การปนเปื้อนของโลหะหนักสู่สิ่งแวดล้อมมีได้หลายทาง แหล่งที่มาของโลหะหนักส่วนใหญ่ ได้แก่ โรงงานอุตสาหกรรม การทำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ การทำเหมืองแร่ เป็นต้น โดยอุตสาหกรรมเหล่านี้เมื่อปล่อยของเสียจะมีตะกั่วและสังกะสีที่เป็นโลหะหนักปนเปื้อนออกมา ซึ่งตะกั่วเป็นโลหะหนักมีสีเทาเงิน หรือแกมน้ำเงินเกิดขึ้นตามธรรมชาติปัจจุบันมีการใช้ตะกั่วเป็นวัตถุดิบจำนวนมาก ซึ่งทำให้เกิดการปลดปล่อยตะกั่วและสารประกอบของตะกั่วในรูปของสารมลพิษออกสู่สภาวะแวดล้อม ทำให้มีการมีการปนเปื้อนของตะกั่วทั้งในดิน น้ำ และอากาศ ตะกั่วสามารถเข้าสู่ร่างกายได้ 3 ทางคือ ทางอาหาร การหายใจ และทางผิวหนัง เมื่อสารตะกั่วเข้าสู่ร่างกายส่วนใหญ่มักจะจับยึดอยู่กับเม็ดเลือดแดงซึ่งจะไปลดการสร้าง heme ที่เป็นองค์ประกอบสำคัญของเม็ดเลือดแดง ตะกั่วยังมีผลต่อดับ หัวใจและเส้นเลือด ภาวะเจริญพันธ์ โครโมโซม ก่อให้เกิดโรคมะเร็ง และความพิการแต่กำเนิดด้วย สังกะสีส่วนใหญ่จะพบอยู่ในรูปของ ZnO, ZnS และ ZnSO<sub>4</sub> จากอุตสาหกรรมเหมืองแร่ เช่น การบัด ย่อยแร่ หรือวัสดุอื่นที่ใช้สังกะสีเป็นโลหะผสม นอกจากนี้ยังเกิดจากสารประกอบของสังกะสีที่นำมาทำยาฆ่าเชื้อรา เช่น zinc dimethyl dithiocarbamate ผลที่เกิดต่อมนุษย์ ทำให้เกิดอาการอ่อนเพลีย วิงเวียนศีรษะ และอาการท้องร่วง ถ้าได้รับไอฝุ่นของสังกะสี เข้าสู่ร่างกายมากๆ จะเกิดอาการไข้ที่เรียกว่า Zinc chills ซึ่งมีอาการจับไข้ หนาวสั่น ปวดกล้ามเนื้อ อาเจียน (มหาวิทยาลัยมหิดล, 2550) ดังนั้นจึงต้องกำจัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย ซึ่งวิธีการกำจัดมีหลายวิธี เช่น การตกตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation) การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) กระบวนการกรองผ่านเมมเบรน (Membrane separation) การตกตะกอนด้วยวิธีทางเคมี (Precipitation) แต่วิธีการดังกล่าวไม่สามารถกำจัดโลหะหนักออกได้อย่างสมบูรณ์ (มหาวิทยาลัยมหิดล, 2550) จึงมีการใช้วิธีทางชีวภาพเป็นทางเลือก ได้แก่ เทคโนโลยีดูดซับทางชีวภาพโดยใช้มวลชีวภาพธรรมชาติในการดูดซับเป็นกระบวนการกำจัดโลหะหนักที่

ประหยัด และเป็นมิตรกับระบบนิเวศน์ ซึ่งใช้ฟางข้าวเป็นวัสดุธรรมชาติที่ใช้ในการดูดซับ

ฟางข้าว (Rice straw) เป็นผลพลอยได้หรือของเหลือทิ้งจากภาคอุตสาหกรรมการเกษตรที่มีปริมาณมาก เนื่องจากองค์ประกอบของฟางข้าวที่ประกอบไปด้วย ลิกนิน เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส จากลักษณะของฟางข้าวที่มีรูพรุนและเส้นใยสามารถดูดซับ โลหะหนักและการแลกเปลี่ยนไอออนกับโลหะหนักที่อยู่ในรูปสารละลายได้ (นพวรรณ, 2548)

อย่างไรก็ตามความสามารถในการดูดซับไอออนของโลหะหนักยังมีอยู่ในระดับต่ำ จึงมีการปรับปรุงตัดแปลงทางเคมีเพื่อให้ความสามารถในการดูดซับได้มากขึ้น ซึ่งทำการปรับปรุงตัดแปลงด้วยกรดซัลฟริกที่มีราคาถูกลงและใช้ในอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง (E.Pehlivan.,2010) การปรับสภาพฟางข้าวด้วยกรดซัลฟริกเป็นการปรับปรุงโครงสร้างของฟางข้าวเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนัก โดยกรดซัลฟริกจะเข้าไปเติมหมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl Group:-COOH) ให้กับโครงสร้างของฟางข้าวซึ่งทำให้ฟางข้าวมีประสิทธิภาพในการดักจับไอออนของโลหะหนักได้มากขึ้น (R.Gong.,2006)

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อต้องการกำจัดตะกั่วและสังกะสีซึ่งเป็นโลหะหนักที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียโดยใช้ฟางข้าวที่เป็นวัสดุธรรมชาติเป็นตัวดูดซับ มีการใช้กรดซัลฟริกเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของตัวดูดซับให้มากขึ้นและยังเป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดอีกด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาลักษณะของฟางข้าวที่ไม่ปรับปรุงและฟางข้าวที่ปรับปรุงคุณภาพโดยใช้ FTIR และ SEM
2. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับของฟางข้าวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยสารเคมี
3. เพื่อศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของตะกั่วและสังกะสีที่มีผลต่อการดูดซับ
4. เพื่อศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของฟางข้าวที่ปรับปรุงคุณภาพ
5. เพื่อเปรียบเทียบการดูดซับระหว่างฟางข้าวที่ไม่ปรับปรุงกับฟางข้าวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยสารเคมี
6. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการนำฟางข้าวที่คายซับแล้วนำกลับมาใช้ใหม่

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. เตรียมฟางข้าวและปรับปรุงคุณภาพของฟางข้าวด้วยกรดซัลฟริก
2. สังเคราะห์น้ำเสียที่ปนเปื้อนตะกั่วและสังกะสี

3. วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสารองค์ประกอบในฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับปรุงกับฟางข้าวที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดซิดริกโดยใช้ FTIR

4. ศึกษาลักษณะสัณฐานของฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับปรุงกับฟางข้าวที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดซิดริกโดยใช้ SEM

5. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับตะกั่วและสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยฟางข้าวที่ปรับปรุงคุณภาพแล้ว

5.1 ศึกษาค่า pH ที่เหมาะสม โดยแปรค่า pH ดังนี้คือ 3, 4, 5, 6, 7 และ 8

5.2 ศึกษาระยะเวลาการสัมผัสของตัวดูดซับ โดยแปรค่าเวลาดังนี้ 0, 10, 30, 60, 80 และ 120 นาที

6. ศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของตะกั่วและสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีผลต่อการดูดซับโดยการแปรค่าความเข้มข้นเป็น 0, 50, 100, 200, 400 และ 600 mg/L ตามลำดับ สภาวะที่ทำการดูดซับคือใช้ pH และระยะเวลาการดูดซับที่เหมาะสมที่สุด ที่ได้จากการทำการทดลองในข้อ 5

7. ศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับของตะกั่วและสังกะสีของฟางข้าวที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยแปรผันปริมาณของฟางข้าวเป็น 0.0, 0.3, 0.5, 0.7 และ 0.9 กรัม ทำการดูดซับในสภาวะที่มี pH และระยะเวลาการดูดซับที่เหมาะสมที่สุด

8. เปรียบเทียบผลของการดูดซับโลหะตะกั่วและสังกะสีโดยใช้ฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับปรุงและผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดซิดริก

9. ทำการคายซับฟางข้าวที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ หลังจากนำไปดูดซับโลหะในสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการคายซับจะใช้กรดไฮโดรคลอริก หลังจากคายซับแล้วจะนำวัสดุดังกล่าวไปดูดซับอีกครั้งโดยใช้สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับ

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นการลดมลพิษทางอากาศที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ฟางข้าว
2. สามารถนำวัสดุทางธรรมชาติที่มีราคาถูก หาง่าย นำกลับมาใช้ใหม่ เพื่อประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด
3. เป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการปนเปื้อนของตะกั่วและสังกะสี
4. เป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้สำหรับศึกษาการดูดซับน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนักชนิดอื่นต่อไป

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 โลหะหนัก

#### นิยามและความหมาย

โลหะหนัก (Heavy metal) หมายถึงธาตุที่มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5.0 ขึ้นไปโดยไม่รวมโลหะที่เป็นโลหะแอลคาไลน์ (Alkali) และโลหะแอลคาไลน์เอิร์ท (Alkaline earth) ซึ่งโดยทั่วไปเป็นธาตุในตารางธาตุที่มีเลขอะตอม (Atomic number) อยู่ในช่วง 23 ถึง 92 อยู่ในคาบที่ 4 ถึง 7 ของตารางธาตุ (สุคเขต, 2555)

#### 2.1.1 ตะกั่ว (Pb)

##### 2.1.1.1 สมบัติของตะกั่ว

ตะกั่วเป็นโลหะหนัก มีเลขอะตอม 82 โดยเป็นธาตุที่ 5 ของหมู่ 5A ในตารางธาตุ น้ำหนักอะตอมเท่ากับ 207.19 จุดหลอมเหลว 327.5 องศาเซลเซียส จุดเดือด 1740 องศาเซลเซียส ความถ่วงจำเพาะ 11.34 ตะกั่วมีเลขออกซิเดชัน 3 ค่า คือ 0, +2 และ +4

ตะกั่วบริสุทธิ์มีลักษณะเป็นของแข็ง สีเทาปนขาวสามารถแปรรูปได้โดยการทุบ รีด หล่อ หลอมได้ง่ายสามารถผสมเข้ากับโลหะต่างๆ ได้ดีรวมทั้งการทำปฏิกิริยาเกิดเป็นเกลือของตะกั่วต่างๆ (ณรงค์ศักดิ์และคณะ, 2557)

#### แหล่งของแร่ตะกั่วมีกำเนิดทั้งแบบปฐมภูมิและทุติยภูมิ

แหล่งแร่ปฐมภูมิ ซึ่งให้สินแร่ที่เป็นสารประกอบซัลไฟด์ เช่น แร่ตะกั่ว-กาไลนา แหล่งแร่ปฐมภูมิ ได้แก่ แหล่งแร่สะสมตัวในชั้นหินอุมแมร์ (stratabound-massive sulfide deposit) เช่น แหล่งแร่ตะกั่ว-สังกะสี บ้านสองท่อ อำเภอทองผาภูมิจังหวัดกาญจนบุรี แหล่งแร่แบบสการ์น (skarn deposit) ซึ่งเกิดจากกระบวนการแปรสภาพโดยการแทนที่ ระหว่างหินอัคนีแทรกซ้อน เช่น หินไดออไรต์พอฟีรี กับหินคาร์บอนเนต เช่น หินปูน ตัวอย่างแหล่งแร่แบบนี้ คือ ที่แหล่งตะกั่ว-สังกะสีซัลไฟด์ ภูขุม บ้านโคกมน อำเภอเมือง จังหวัดเลย ที่บ้านเมืองกีดอำเภอแม่แตงจังหวัดเชียงใหม่ และที่เขาค้อท่าลุ่ม อำเภอบ้านนิงส์ตารจังหวัดยะลา แหล่งแร่แบบสายแร่ (vein-type deposit) ส่วนใหญ่เป็นแร่ตะกั่ว-สังกะสีซัลไฟด์ ซึ่งเกิดในสายแร่ที่น้ำแร่แยกตัวออกจากหินอัคนี เช่น ที่ภูซำ บ้านโคกใหญ่ อำเภอท่าลี่ จังหวัดเลย ที่บ้านแม่กะโน บ้านดงหลวง อำเภอแม่สะเรียงจังหวัดแม่ฮ่องสอน แหล่งแร่ทุติยภูมิ เป็นแหล่งแร่ที่เกิดจากกระบวนการแปรสภาพของแร่ปฐมภูมิซึ่งส่วนใหญ่เป็นแร่ซัลไฟด์ เป็นแร่ที่เป็นสารประกอบของออกไซด์คาร์บอนเนตและซลิเกตเช่น แหล่งแร่ตะกั่วคาร์บอนเนต-

เซรัส ไซต์ ที่บ้านบ่องาม อำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี และแหล่งแร่สังกะสีชิลิกเกต-เฮมิมอร์ไฟต์ สังกะสีออกไซด์ซิงค์ไลต์ และสังกะสีคาร์บอนเนต-สมิทซอไนต์ ที่คอยผาแดงอำเภอแม่สอด จังหวัดตาก (วิกิพีเดีย, 2556)

### การนำตะกั่วมาใช้ประโยชน์

โลหะตะกั่วเป็นวัตถุดิบสำคัญในอุตสาหกรรมแบตเตอรี่ อุตสาหกรรมโลหะบัดกรี ซึ่งเป็นโลหะผสมระหว่างดีบุกกับตะกั่วในอัตราส่วนต่างๆกัน โลหะบัดกรีใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เครื่องใช้ไฟฟ้า หม้อน้ำรถยนต์ ส่วนประกอบของคอมพิวเตอร์และแผงวงจรไฟฟ้า นอกจากนี้ยังใช้โลหะตะกั่วในโรงชุบเคลือบเหล็กด้วยสังกะสี ลูกเหล็กอวนที่ใช้ในอุตสาหกรรมประมง ใช้ในการทำกระดาษตะกั่ว ท่อน้ำ แผ่นตะกั่ว ตัวพิมพ์ กระสุนปืน สะพานไฟฟ้า ทำผนังกันรังสีในเครื่องหรือห้องปฏิบัติการเกี่ยวกับปฏิกิริยาปรมาณู ใช้ตะกั่วในการทำสี และทำผงตะกั่วแดง ตะกั่วเหลือง สำหรับเคลือบภาชนะต่างๆ

โลหะและโลหะผสมสังกะสี ใช้ในอุตสาหกรรมเหล็กชุบ โดยการใส่โลหะสังกะสีเป็นตัวเคลือบชุบเหล็กกล้า เช่น อุตสาหกรรมแผ่นเหล็กชุบสังกะสี ข้อต่อท่อเหล็กชุบสังกะสี ลวดเหล็กชุบสังกะสี เป็นต้น ใช้ในอุตสาหกรรมทองเหลืองซึ่งเป็นโลหะผสมระหว่างทองแดงกับสังกะสี เป็นโลหะที่มีความแข็งแรงทนต่อการผุกร่อน ใช้ขึ้นรูปหรือหล่อผลิตภัณฑ์ต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการทำอุปกรณ์ตกแต่งบ้าน ภาชนะและเครื่องประดับต่างๆ ใช้ในอุตสาหกรรมโลหะสังกะสีผสม เช่น ผสมอะลูมิเนียมและแมกนีเซียม ทำให้มีความแข็งแรงและทนต่อการผุกร่อนได้ดี นำมาหล่อเป็นรูปต่างๆได้ง่ายและคงขนาดแม่นยำจึงใช้มากในอุตสาหกรรมหล่อผลิตภัณฑ์เช่นคาร์บูเรเตอร์ มือจับประตู บานพับประตู ของเด็กเล่น เป็นต้น ใช้ในอุตสาหกรรมสังกะสีออกไซด์ซึ่งเป็นสารประกอบของสังกะสีที่มีสภาพเป็นแข็งหรือผงใช้ในอุตสาหกรรมยาง สีเซรามิก ยา เครื่องสำอาง และอาหารสัตว์ และใช้ในอุตสาหกรรมถ่านไฟฉาย (วิกิพีเดีย, 2556)

#### 2.1.1.2 การเข้าสู่ร่างกายและการสะสมของตะกั่ว

การดูดซึมจากระบบทางเดินอาหารแหล่งสำคัญ คือ การปนเปื้อนของตะกั่วในอาหารน้ำ เครื่องดื่ม ยาสมุนไพรแผนโบราณและภาชนะเครื่องใช้ที่มีตะกั่วปนเปื้อนพบว่าร้อยละ 70-85 ของตะกั่วที่เข้าสู่ร่างกายคนปกติได้จากอาหาร โดยเฉลี่ยผู้ใหญ่สามารถดูดซึมตะกั่วจากอาหารได้ประมาณร้อยละ 10 ของปริมาณตะกั่วในอาหารและเด็กสามารถดูดซึมได้มากถึงร้อยละ 40-50 ของปริมาณตะกั่วในอาหารตะกั่วที่เข้าไปกับอาหารจะดูดซึมเข้าสู่กระแสเลือดที่ลำไส้เล็กส่วนต้นจากลำไส้เล็กจะเข้าสู่ตับโดยผ่านทางเส้นเลือดดำใหญ่เข้าสู่กระแสเลือดการดูดซึมตะกั่วในทางเดินอาหารนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างเช่น อายุและภาวะโภชนาการ โดยในภาวะที่ท้องว่างหรือได้รับ

อาหารที่ขาดธาตุแคลเซียมเหล็ก และทองแดงหรือมีสารฟอสเฟตต่ำจะทำให้ตะกั่วถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายได้ดีขึ้น

การดูดซึมจากระบบทางเดินหายใจการหายใจเอาควันหรือฝุ่นของตะกั่วที่หลอมเหลวเข้าไป เช่น จากการหลอมตะกั่ว หรือเชื่อมโลหะซึ่งเป็นทางเข้าสู่ร่างกายอันดับแรกของผู้ประกอบอาชีพที่สัมผัสตะกั่ว เช่นคนงานในโรงงานหลอมตะกั่ว แบตเตอรี่ โรงงานผลิตสีฯตะกั่วสามารถดูดซึมผ่านถุงลมปอดเข้าสู่กระแสเลือดได้โดยการดูดซึมจะเร็วมากแต่ถ้าหายใจเอาอนุภาคของตะกั่วที่มีขนาดเล็กกว่า 0.75 ไมครอน เข้าไป เช่นจากสีเก่าที่หลุดออกมา การดูดซึมเข้าสู่ร่างกายจะช้ากว่าโดยทั่วไปร้อยละ 35-50ของตะกั่ว จะดูดซึมเข้าสู่กระแสเลือดโดยวิธีฟาโกไซโตซิส (Phagocytosis: คือกระบวนการทำลายสิ่งแปลกปลอมโดยเม็ดเลือดขาว) อาการที่เกิดขึ้นมักจะรวดเร็วและรุนแรงการหายใจเอาอากาศที่มีไอหรืออนุภาคตะกั่วปริมาณ 1 ไมครอนต่อลูกบาศก์เมตรของอากาศจะเพิ่มปริมาณตะกั่วในเลือดได้ 1-2 มิลลิกรัมต่อปริมาณเลือด 100 มิลลิตร ได้มีการกำหนดความเข้มข้นของตะกั่วที่ให้มีได้ในอากาศโดยไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อร่างกายคือ ในบริเวณทำงานไม่ควรเกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตรของอากาศสำหรับผู้ที่ทำงาน 8 ชั่วโมงต่อวัน หรือ 40-42 ชั่วโมงต่อสัปดาห์นอกจากนี้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณสูงๆ ในอากาศจะช่วยให้การดูดซึมของตะกั่วในปอดเข้าสู่ร่างกายเพิ่มขึ้น

**การดูดซึมทางผิวหนัง**เกิดเฉพาะตะกั่วอินทรีย์เท่านั้นผู้ที่มีโอกาสได้รับตะกั่วทางผิวหนังได้แก่ คนงานที่ทำงานในปั้มน้ำมันช่างซ่อมเครื่องยนต์ เนื่องจากในอุตสาหกรรมน้ำมันมีการเติม tetraethyl lead หรือ tetramethyl lead ผสมในน้ำมันเบนซิน ดังนั้นเมื่อคนงานถูกน้ำมันหกรดผิวหนังหรือใช้น้ำมันเบนซินล้างมือ tetraethyl lead สามารถละลายชั้นไขมันของผิวหนังได้ตะกั่วจึงสามารถซึมผ่านผิวหนังและเข้าสู่ระบบไหลเวียนเลือดของร่างกายไปสู่ตับและจะเปลี่ยนเป็น triethyllead ได้ช้ามาก โดยมีค่าครึ่งชีวิตเท่ากับ 200-350 วัน ตะกั่วจึงสามารถสะสมอยู่ในร่างกายได้เป็นเวลานาน

#### การสะสมของตะกั่วในร่างกาย

1. ในกระแสเลือดโดยกว่าร้อยละ 90 จะรวมตัวกับเม็ดเลือดแดง และส่วนที่เหลือจะอยู่ในน้ำเลือดค่าครึ่งชีวิตของตะกั่วในเลือดประมาณ 2-4 สัปดาห์
2. ในเนื้อเยื่ออ่อนที่สำคัญ คือ ตับและไตมีค่าครึ่งชีวิตประมาณ 4 สัปดาห์
3. ในกระดูกโดยร้อยละ 90 ของตะกั่วที่สะสมอยู่ในร่างกายจะอยู่ในกระดูก ซึ่งค่อนข้างมีเสถียรภาพและมีค่าครึ่งชีวิตประมาณ 16-20 ปียกเว้นในเด็ก ซึ่งประมาณร้อยละ 70 เท่านั้นที่สะสมอยู่ในกระดูก (ณรงค์ศักดิ์และคณะ, 2557 )

### 2.1.1.3 ความเป็นพิษของตะกั่ว

ตะกั่วเป็นแร่ธาตุประเภทโลหะหนัก เป็นสารพิษที่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต สารตะกั่วที่แพร่กระจายเข้าสู่อากาศกลายเป็นสารมลพิษทางอากาศเกิดจากกิจกรรมอุตสาหกรรม ที่ใช้สารตะกั่วในขบวนการผลิต เช่น โรงงานถลุงและหลอมตะกั่ว โรงงานทำแบตเตอรี่

ตะกั่วเป็นพิษในสถานะที่พบได้เป็นครั้งคราวทั้งในเด็กและผู้ใหญ่ในบ้านเราอาจพบการรับพิษสารตะกั่วจากแหล่งต่างๆ เช่น

1. โรงงานทำแบตเตอรี่หรือถ่านไฟฉาย ร้านอัดแบตเตอรี่หรือขายแบตเตอรี่ ร้านเจียรไนเพชรพลอย (ซึ่งมีเครื่องมือที่มีตะกั่วเป็นส่วนประกอบ) โรงพิมพ์ที่ใช้ตัวพิมพ์ทำจากสารตะกั่ว ร้านเชื่อมโลหะ เป็นต้น

2. ใช้เปลือกแบตเตอรี่ที่ทิ้งแล้วมาเป็นเชื้อเพลิงหรือมาปูลาดเป็นทางเดิน

3. ดื่มน้ำที่มีสารตะกั่วเจือปน เช่น น้ำจากบ่อที่ปนเปื้อนสารตะกั่วหรือน้ำจากท่อที่มีส่วนผสมของตะกั่วมากเกินไป

4. สีทาบ้าน และสีที่ใช้ทาของเล่นที่มีสารตะกั่วเจือปน เด็กอาจหยิบกินโดยรู้เท่าไม่ถึงการณ์ บางครั้งอาจเป็นกันทั้งครอบครัวหรือทั้งหมู่บ้าน ถ้าหากมีการรับสารตะกั่วจากแหล่งเดียวกัน เช่น ดื่มน้ำจากบ่อเดียวกัน

5. แป้งทาเด็กที่มีสารตะกั่วเจือปน (เช่น ร้านขายยานำแป้งที่ใช้ผสมสีทาบ้านมาขายเป็นแป้งทาแก้มผ่นกัน) ผู้ปกครองซื้อมาทาเด็ก โดยรู้เท่าไม่ถึงการณ์ จนเกิดพิษตะกั่วเรื้อรัง (สำนักงานกองทุนสนับสนุนการสร้างเสริมสุขภาพ, 2551)

## 2.1.2 สังกะสี (Zn)

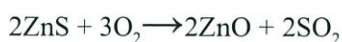
### 2.1.2.1 สมบัติของสังกะสี

สังกะสีเป็นธาตุแรกของหมู่ IIB จัดเป็นธาตุโลหะมีเลขอะตอม 30 น้ำหนักอะตอม 65.37 จุดหลอมเหลว 419.5 องศาเซลเซียส จุดเดือด 907 องศาเซลเซียส ความหนาแน่น 7.133 g/cc ที่ 25 องศาเซลเซียส เลขออกซิเดชันสามัญ +2

สังกะสีเป็นโลหะที่มีความสำคัญเป็นลำดับ 4 รองจากเหล็กกล้า อะลูมิเนียม และทองแดง เนื่องจากสังกะสีมีเลขออกซิเดชันเพียงค่าเดียวคือ +2 และขาดคุณสมบัติทั่วไปของธาตุทรานซิชัน จึงไม่จัดเป็นโลหะสังกะสีอยู่ในกลุ่มโลหะทรานซิชัน แต่เรียกว่าเป็นธาตุหลังทรานซิชัน (post transition element)

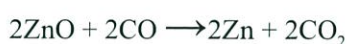
กระบวนการผลิตสังกะสี ด้วยวิธีการสกัดทางโลหะหลังจากบดแร่สังกะสีแล้วจะถูกส่งผ่านไปยังส่วนคัดแยก froth flotation ซึ่งอาศัยคุณสมบัติการละลายได้ที่แตกต่างกันหลังจากผ่าน

กระบวนการนี้แล้วจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสังกะสีความเข้มข้นประมาณ 50% ซัลเฟอร์ 32% เหล็ก 13% และซิลิกา 5% โดยนำส่วนที่ผ่านการแยกเบื้องต้นแล้วเข้าสู่กระบวนการต่อไป กระบวนการย่างแร่ (Roasting) จะเปลี่ยนจาก  $ZnS_2$  เป็น  $ZnO$  ดังสมการ



ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $SO_2$ ) ที่เกิดขึ้นจะนำไปผลิตกรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) ต่อไป

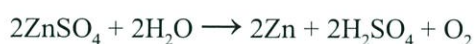
ขั้นตอนต่อไปเป็นการรีดิวซ์  $ZnO$  ให้เป็น  $Zn$  โดยใช้กระบวนการ pyrometallurgy หรือ electrowinning Pyrometallurgy เป็นกระบวนการรีดิวซ์  $ZnO$  ด้วยคาร์บอน (C) ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส



Electrowinning เป็นการใช้กระบวนการแยกสลายด้วยไฟฟ้า (electrolysis) ทำได้โดยการเปลี่ยนรูป  $ZnO$  ให้เป็น  $ZnSO_4$  โดยทำปฏิกิริยากับ  $H_2SO_4$



หลังจากนั้นจึงใช้กระบวนการแยกสลายด้วยไฟฟ้า ก็จะได้สังกะสีบริสุทธิ์



$H_2SO_4$  ที่เกิดขึ้นก็นำกลับมาใช้ในกระบวนการข้างต้นได้ (glasswarechemical, 2557)

### 2.1.2.2 การนำสังกะสีมาใช้ประโยชน์

สังกะสีเป็นโลหะที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ มีความเหนียวน้อยหรือเปราะ เพราะมีระบบผลึกเป็นรูปหกเหลี่ยม อัตราการยึดตัวน้อยและมีคุณสมบัติด้านทานการกัดกร่อนได้ดี นอกจากนี้ยังสามารถก่อให้เกิดพิษได้เนื่องจากรวมตัวกับออกซิเจนเป็นสังกะสีออกไซด์ได้ง่าย ซึ่งเป็นควันทีขาวที่มีอันตราย สังกะสีถูกนำไปใช้ประโยชน์หลายด้าน ตามคุณสมบัติที่มีมากมาย โดยอาจแบ่งการใช้ประโยชน์ตามลักษณะการนำไปใช้ได้ดังนี้

1. ใช้เคลือบผิวเหล็กเพื่อป้องกันการเกิดสนิมและการผุกร่อนโดยสังกะสีจะทำหน้าที่ป้องกัน 2 ขั้นตอน คือ ขั้นแรกจะทำหน้าที่ป้องกันผิวเหล็กไม่ให้สัมผัสกับอากาศหรือสารอย่างอื่น และหากเกิดรอยขีดข่วนหรือผุกร่อนจนถึงผิวเหล็กแล้ว สังกะสีจะทำหน้าที่ในขั้นตอนต่อไปในรูปแบบของ Galvanic action คือโลหะสังกะสีซึ่งมีคุณสมบัติทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical activity) สูงกว่าเหล็กจะทำตัวเป็นขั้วบวกและดึงออกซิเจนมาทำปฏิกิริยาเกิดเป็นสนิมแทนเหล็ก ทำให้ผิวเหล็กไม่ผุกร่อนแม้ผิวเหล็กจะสัมผัสถูกอากาศการใช้งานด้านนี้มีสัดส่วนมากที่สุด โดยคิดเป็นร้อยละประมาณ 45-50 ของการบริโภคสังกะสีทั้งหมด

2. ใช้ทำทองเหลืองผสมกับโลหะทองแดง และอาจมีโลหะอื่นๆผสมเพิ่มคุณสมบัติเป็นการเฉพาะต่อการใช้งาน เช่น ตะกั่ว อะลูมิเนียม ดีบุก พลวง แมงกานีส เป็นต้น

3. สังกะสีออกไซด์ในอุตสาหกรรมยาง เซรามิก ยา สีสะท้อนแสง สังกะสี ซัลเฟตใช้ในการผลิตสารทำใยสังเคราะห์เรยอนและสังกะสีออกไซด์ใช้ทำน้ำยาดับกลิ่นปาก ยามาเชื้อ และยารักษาเนื้อไม้ไม่ให้ผุและติดไฟง่าย

4. สังกะสีฝุ่น (Zinc dust) ใช้ในการผลิตสารเคมีที่ใช้ในการพิมพ์และการย้อมผ้า ใช้ผสมกับอะลูมิเนียมผงเพื่อแก่น้ำกระด้าง ใช้เป็นสารผลิตก๊าซในคอนกรีตทำให้ได้รูปทรง ใช้เป็นสารเร่งในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม ช่วยให้เกิดการคายไฮโดรเจนในการทำสบู่จากซีฟู้ดพาราฟิน นอกจากนี้ยังใช้ทำดอกไม้ไฟ อุตสาหกรรมน้ำตาล และกระดาษ

5. ใช้ทำโลหะผสมสำหรับงานหล่อ (Die casting) เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวต่ำจึงให้คุณสมบัติที่ดี คือ ง่ายต่อการขึ้นรูป นอกจากนี้ยังคงทน กลึงไสตกแต่งง่าย และมีสีต้นสวยงาม โลหะผสมที่สำคัญได้แก่ อะลูมิเนียม แมกนีเซียม และทองแดง เป็นต้น สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ทำด้วยโลหะสังกะสีผสมมีมากมาย (ศูนย์การเรียนรู้อุตสาหกรรมเหมืองแร่,2557)

### 2.1.2.3 ความเป็นพิษของสังกะสี

ฝุ่นหรือควันของซิงค์ออกไซด์สามารถก่อความระคายเคืองต่อทางเดินหายใจ การสัมผัสกับผิวหนังเป็นเวลานานสามารถทำให้เกิดผิวหนังอักเสบอย่างรุนแรงซึ่งเรียกว่า โรครอกออกไซด์พอกซ์ (Oxide pox) การได้รับฝุ่นหรือควันปริมาณมากสามารถทำให้เกิดการรับรสโลหะกระหายน้ำอย่างชัดเจนการไอล่าอ่อนแอปวดกล้ามเนื้อและอาการคลื่นไส้ ตามด้วยไข้และอาการหนาวสั่น การได้รับสารนี้อย่างมากอาจทำให้เกิดอาการหลอดลมอักเสบหรือปอดบวม โดยผิวหนังเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินการได้รับสารเป็นเวลานานสามารถก่อให้เกิดความผิดปกติของเอ็นไซม์ในตับแบบชั่วคราว อาจเกิดอาการท้องร่วงแผลในกระเพาะอาหารและเลือดออกในทางเดินอาหารด้วย (วลัยพร, 2549)

## 2.2 กรรมวิธีการบำบัดโลหะหนักในน้ำเสีย

การบำบัดน้ำเสีย หมายถึง การแยกหรือทำลายสิ่งสกปรกต่างๆ ที่อยู่ในน้ำทิ้งให้มีปริมาณลดลงจนอยู่ในระดับที่ไม่ก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำการบำบัดน้ำเสียนั้นจะมีกระบวนการหรือขั้นตอนรวมทั้งระบบที่ใช้ในการบำบัดหลายระบบและหลายขั้นตอน (ศศิธร, 2551)

กระบวนการที่ใช้ในการบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียจะเลือกวิธีใดนั้นขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในแง่ต่างๆดังนี้คือคุณสมบัติของน้ำเสียก่อนการบำบัดคุณภาพของน้ำที่ต้องการพื้นที่ที่ต้องการใช้ในการทำโรงบำบัดค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียและความเป็นไปได้ในการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่ซึ่งสามารถสรุปวิธีการบำบัดได้ดังนี้ (หฤทัย,2547)

### 2.2.1 การตกตะกอนทางเคมี (Chemical Precipitation)

วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมานานแล้ว โดยทำการเติมสารเคมีลงไปลงในน้ำเสียเพื่อทำปฏิกิริยากับโลหะหนักที่ละลายอยู่เกิดการตกตะกอนแยกออกจากน้ำเสียได้ซึ่งการตกตะกอนด้วยสารเคมีมีหลายวิธีแต่วิธีที่นิยมใช้กันทั่วไปในการตกตะกอนโลหะหนักมี 2 แบบคือการตกตะกอนไฮดรอกไซด์ (Hydroxide Precipitation) และการตกตะกอนซัลไฟด์ (Sulfide Precipitation)

#### 1. การตกตะกอนไฮดรอกไซด์ (Hydroxide Precipitation)

การตกตะกอนไฮดรอกไซด์จัดเป็นการตกตะกอนแบบดั้งเดิมโดยเติมสารเคมีคือปูนขาวหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์โซเดียมไฮดรอกไซด์เกิดปฏิกิริยาตามสมการดังนี้



โดยที่  $M^{2+}$  คือโลหะไอออน

การตกตะกอนไฮดรอกไซด์สามารถใช้กับน้ำเสียได้หลายประเภทด้วยกันแต่มีข้อจำกัดคือโลหะไฮดรอกไซด์จะมีคุณสมบัติ Amphoteric คือ ไม่สามารถตกตะกอนที่ pH ใด pH หนึ่งแต่จะตกตะกอนในช่วง pH กว้างๆ โดยทั่วไปโลหะส่วนใหญ่จะตกตะกอนได้ดีที่ pH 8-11 และโลหะไฮดรอกไซด์นี้จะสามารถละลายกลับมาได้อีกถ้าค่า pH เปลี่ยนแปลงไปจากค่า pH ที่ใช้ในการตกตะกอน

#### 2. การตกตะกอนซัลไฟด์ (Sulfide Precipitation)

การตกตะกอนซัลไฟด์สารเคมีที่นิยมใช้ในการตกตะกอนคือ โซเดียมซัลไฟด์ ( $Na_2S$ ) โซเดียมไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $NaHS$ ) และเฟอร์รัสซัลไฟด์ ( $FeS$ ) ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาดังสมการ



โดยที่  $M^{2+}$  คือโลหะไอออน

ข้อดีของการตกตะกอนซัลไฟด์คือการละลายของโลหะซัลไฟด์เกิดขึ้นน้อยมากเมื่อเทียบกับโลหะไฮดรอกไซด์แต่การตกตะกอนซัลไฟด์มีข้อจำกัดคือ เรื่องของกลิ่นแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen Sulfide) ซึ่งเกิดจากไอออนของซัลไฟด์ที่มากเกินไปจึงต้องมีการป้องกันแก๊สที่เกิดขึ้นโดยบำบัดน้ำเอาซัลไฟด์ออกก่อนที่จะระบายน้ำทิ้ง

### 2.2.2 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange)

กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน สามารถแยกโลหะหนักออกจากสารละลายได้โดยอาศัยหลักการที่ไอออนแต่ละชนิดจะมีความชอบหรือดูดซับโดยเรซิน (Resin) ไม่เท่ากัน ซึ่งสารแลกเปลี่ยนไอออนนี้จะมีทั้งแบบที่ได้จากธรรมชาติและชนิดสังเคราะห์ เรซินมีหมู่ฟังก์ชันของไอออนติดอยู่และถูกทำให้สมดุลด้วยไอออนที่มีประจุตรงกันข้าม ซึ่งไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามเป็นไอออนที่จะเกิดการแลกเปลี่ยนกับไอออนที่มีอยู่ในสารละลาย ถ้าการแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุบวกจะเรียกว่าแคตไอออนเอกเชนเจอร์ (Cation Exchange) ถ้าเป็นการแลกเปลี่ยนไอออนที่มี

ประจุลบ เรียกว่า แอนไอออนเอกเชนเจอร์ (Anion Exchange) วิธีการนี้จะเหมาะสำหรับการกำจัด โลหะหนักที่มีปริมาณน้อยและให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูง ถ้ามีสารปนเปื้อนชนิดอื่นอยู่จะต้อง ถูกกำจัดออกก่อนที่จะผ่านเข้าเรซินเพื่อจะทำให้การกำจัดมีประสิทธิภาพสูงสุด

### 2.2.3 ออกซิเดชันและรีดักชัน (Oxidation and Reduction)

เป็นวิธีการทางเคมีที่นิยมใช้กันมากในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะ ซึ่งมี สารประกอบของโลหะต่างๆ เจือปนอยู่ในการกำจัดต้องเติมสารเคมีลงไปเพื่อให้ทำปฏิกิริยา ออกซิเดชันหรือรีดักชันกับสารประกอบที่ต้องการกำจัด ทำให้สารประกอบนั้นเปลี่ยนรูปไปเป็น สารประกอบอื่นที่ไม่เป็นพิษหรือตกตะกอนได้ สารเคมีที่ใช้เป็นตัวทำให้เกิดออกซิเดชัน ได้แก่ ออกซิเจน โอโซน คลอรีน ไฮโปคลอไรต์เปอร์แมงกานेट โครเมตและไนเตรต ส่วนสารเคมีที่ทำให้ เกิดรีดักชัน ได้แก่เฟอร์ริกซัลเฟต โซเดียมเมตาไบซัลเฟตและซัลเฟอร์ไดออกไซด์

### 2.2.4 รีเวิร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis)

เป็นการแยกโลหะหนักออกจากน้ำเสียโดยใช้หลักการความแตกต่างของแรงดันผ่านเมมเบรนที่ทำด้วยสารเซลลูโลสอะซีเตตและโพลีเอมีนซึ่งจะให้เฉพาะสารบางชนิดผ่าน (Semipermeable Membrane) เพื่อแยกสารที่ต้องการออกและทำให้เข้มข้นขึ้น วิธีนี้ต้องใช้แรงดันสูง โดยอาจสูงกว่า 100 บรรยากาศ ดังนั้นแผ่นเมมเบรนที่ใช้ต้องทนต่อแรงดันสูงและต้องบำบัดขจัดดิน โดยการปรับค่า pH แยกสารที่เป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงออกและกรองสารแขวนลอยออกก่อน เพื่อ ป้องกันการอุดตันของเมมเบรน วิธีการนี้เหมาะสำหรับอุตสาหกรรมการชุบโลหะด้วยกระแสไฟฟ้า และน้ำเสียจากการล้างภาพ

### 2.2.5 การระเหย (Evaporation)

เป็นวิธีง่ายๆ ที่ทำให้สารเคมีมีความเข้มข้นสูงขึ้น การระเหยทั้งที่บรรยากาศธรรมดา (Atmospheric Evaporation) และการระเหยภายใต้สุญญากาศ (Vacuum Evaporation) วิธีการบำบัด แบบนี้จะได้ผลดีกับน้ำเสียที่มีปริมาณ โลหะหนักสูงเท่านั้น แต่ต้องใช้ต้นทุนในการดำเนินงานสูง

### 2.2.6 อิเล็กโตรไดอะไลซิส (Electrodialysis)

วิธีการนี้เป็นการแยกไอออนออกจากสารละลาย ด้วยกระแสไฟฟ้าตรงร่วมกับการใช้เมมเบรนที่เลือกเฉพาะสำหรับไอออนแต่ละชนิด (Ion Selective Membrane) กลไกของกระบวนการนี้ เป็นการแลกเปลี่ยนไอออนกับการสกัดตัวทำละลาย และน้ำเสียจะต้องผ่านการกรองก่อนเพื่อ

ป้องกันแผ่นเมมเบรนอุดตัน ซึ่งวิธีการนี้ต้นทุนก่อสร้างและค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานสูง แต่สามารถกำหนดไอออนที่ต้องการได้

### 2.2.7 การแยกกลับคืนด้วยไฟฟ้า (Electrolytic Recovery)

เป็นกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าซึ่งจะลดปริมาณไอออนของโลหะที่อยู่ในสารละลายให้อยู่ในรูปของธาตุที่ขั้วแคโทดและเกิดแก๊สออกซิเจนในขั้วแอโนดตลอดเวลาวิธีการนี้เหมาะสำหรับสารละลายที่มีความเข้มข้นของโลหะสูงแต่วิธีนี้มักไม่เป็นที่นิยมเพราะเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าสูงมาก (พอดา, 2547)

โดยทั่วไปวิธีทางกายภาพและวิธีทางเคมีมีข้อเสีย คือ ไม่สามารถกำจัดโลหะหนักออกได้อย่างสมบูรณ์ จึงมีการใช้วิธีทางชีวภาพเป็นทางเลือก ได้แก่ เทคโนโลยีดูดซับทางชีวภาพโดยใช้มวลชีวภาพในการดูดซับ ทำให้เป็นมิตรกับระบบนิเวศน์ (อัญชลี, 2545)

### 2.2.8 กระบวนการทางชีววิทยา (Biological Process)

กระบวนการทางชีววิทยาเป็นการบำบัดน้ำเสียโดยอาศัยปฏิกิริยาของการย่อยสลายสิ่งสกปรกที่อยู่ในน้ำด้วยจุลินทรีย์ โดยปกติแล้วในน้ำตามธรรมชาติหรือน้ำเสียจะมีจุลินทรีย์ประเภทต่างๆ อาศัยอยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งจุลินทรีย์ต่างๆ เหล่านี้สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้โดยอาศัยอาหารจากแหล่งน้ำหรือน้ำเสีย สิ่งสกปรกที่มีอยู่ในน้ำเสียโดยเฉพาะที่อยู่ในรูปสารอินทรีย์จะกลายเป็นอาหารและถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ซึ่งส่วนมากเป็นพวกแบคทีเรีย การบำบัดน้ำเสียวิธีนี้ค่อนข้างเป็นที่นิยม ตัวอย่างของกระบวนการในกลุ่มนี้คือ การบำบัดน้ำทิ้งแบบตะกอนเร่ง (Activated Sludge) (ศศิธร, 2551)

## 2.3 การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับ (Adsorption) เป็นความสามารถของสารดูดซับในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในของเหลวหรือแก๊สมาเกาะติดบนพื้นผิวการดูดซับเป็นปรากฏการณ์ของกระบวนการทางกายภาพชีวภาพและเคมีซึ่งเกี่ยวข้องกับกระแสน้ำของสารหรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิวหรือระหว่างพื้นผิว (Interface) กระบวนการนี้สามารถเกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวของ 2 วัสดุภาค เช่นของเหลวกับของเหลวแก๊สกับของเหลวแก๊สกับน้ำเสีย

กระบวนการดูดซับแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือการดูดซับทางกายภาพ (Physisorption) และการดูดซับทางเคมี (Chemisorptions) ของแข็งหรือของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ถูกดูดซับเรียกว่าตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของสารถูกดูดซับ

เรียกว่า สารดูดซับ (Adsorbent) การดูดซับบนของแข็ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งบนถ่านกัมมันต์ถูกนำไปใช้กันอย่างแพร่หลายในการบำบัดทั้งน้ำดื่มและน้ำเสีย

### 1. การดูดซับทางกายภาพ (Physisorption)

การดูดซับทางกายภาพที่เกิดขึ้นมีผลมาจากความแตกต่างของพลังงานหรือแรงดึงดูดทางไฟฟ้า(แรงแวนเดอร์วาลส์) ซึ่งมีค่าน้อยโมเลกุลของสารถูกดูดซับจะถูกยึดติดแบบกายภาพกับโมเลกุลของสารดูดซับการดูดซับแบบนี้เป็นแบบหลายชั้น (Multilayers) แต่ละชั้นของโมเลกุลจะติดอยู่กับชั้นโมเลกุลที่ถูกดูดซับก่อนหน้าโดยจำนวนของชั้นเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของโมเลกุลสารถูกดูดซับหรือตัวถูกละลายจำนวนชั้นของโมเลกุลจะเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลายการดูดซับแบบกายภาพโดยทั่วไปจะเกิดที่อุณหภูมิต่ำซึ่งการดูดซับมีพลังงานต่ำการย้อนกลับของกระบวนการดูดซับทางกายภาพขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแรงดึงดูดระหว่างสารดูดซับและสารถูกดูดซับ ถ้าแรงดึงดูดมีค่าน้อยการหลุดของสารถูกดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้ง่าย (พอลา, 2547)

แรงที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับทางกายภาพมักเป็นแรงอ่อนๆ ที่เกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าของตัวดูดซับมีหลายชนิดดังนี้

#### 1. แรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Wall's Force)

อะตอมที่อยู่อย่างอิสระหรือโมเลกุลที่อยู่ในสภาพไม่มีขั้วสามารถเกิดแรงดึงดูดอ่อนๆได้ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอย่างไม่เป็นระเบียบในอะตอมหรือโมเลกุลนั้น ทำให้มีความหนาแน่นของกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนในแต่ละบริเวณภายในอะตอมหรือโมเลกุลไม่เท่ากัน มีผลให้เกิดสภาพมีขั้วขึ้นและสามารถดูดซับตัวถูกดูดซับด้วยตัวดูดซับได้ การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานในการดูดซับต่ำ จึงเป็นการเกาะจับกันด้วยแรงอ่อนๆ ดังนั้นการคายการดูดซับจะสามารถกระทำได้ง่าย ซึ่งเป็นข้อดีเพราะสามารถทำการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่ายแรงแวนเดอร์วาลส์จะมีแรงที่เกี่ยวข้อง 2 ชนิดดังนี้

##### 1.1 แรงลอนดอน (London Force)

แรงลอนดอนเป็นแรงยึดเหนี่ยวชนิดหนึ่งที่เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว แรงนี้จะมีสภาพขั้วเกิดขึ้นชั่วคราวเนื่องจากอิเล็กตรอนในอะตอมไม่อยู่นิ่ง ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนรอบๆ นิวเคลียสเปลี่ยนแปลงได้ ทำให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนไม่สม่ำเสมอจึงเกิดเป็นขั้วขึ้นและโมเลกุลที่อยู่ข้างเคียงถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขั้วขึ้นเช่นกัน แล้วโมเลกุลเหล่านั้นก็จะเกิดแรงดึงดูดต่อกัน เรียกว่า “แรงลอนดอน” แรงลอนดอนจะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับมวลโมเลกุล จำนวนอิเล็กตรอน ขนาดและรูปร่าง

##### 1.2 แรงทางไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Force)

แรงทางไฟฟ้าสถิตเป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วเข้าด้วยกันหรือระหว่างสารที่ไม่มีขั้ว ซึ่งการเกาะจับกันของโมเลกุลชนิดต่างๆ เกิดได้ 3 รูปแบบ คือ

1.2.1 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้ว (Polar-Polar Molecule) ซึ่งเกิดจากผลของการจัดเรียงโมเลกุล (Orientation Effect) ที่มีขั้วสองโมเลกุลคือขั้วลบของโมเลกุลหนึ่งกับขั้วบวกของอีกโมเลกุลหนึ่ง ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีประจุตรงกันข้าม

1.2.2 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว (Non-Polar Molecule) เกิดจากการกระจายตัว (Dispersion Effect) ซึ่งเป็นผลจากโมเลกุลไม่มีขั้วสามารถเปลี่ยนเป็นไดโพลโมเลกุลได้เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปอยู่ด้านใดด้านหนึ่งมากและเมื่อมีโมเลกุลที่ไม่มีขั้วที่มีลักษณะเดียวกันเข้ามาจะเกิดแรงดึงดูดซึ่งกันและกันและมักเป็นแรงที่อ่อน เช่น อินทรีย์สารและถ่านกัมมันต์ ทั้งนี้เนื่องจากอินทรีย์สารส่วนใหญ่เป็นโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว

1.2.3 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วกับโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว (Polar-Nonpolar Molecule) เป็นผลเนื่องมาจากการเหนี่ยวนำ (Induction Effect) โดยโมเลกุลที่มีขั้วเข้ามาอยู่ใกล้โมเลกุลที่ไม่มีขั้วแล้วเหนี่ยวนำให้เกิดประจุที่ตรงข้าม ซึ่งจะทำให้เกิดการดึงดูดซึ่งกันและกัน

## 2. พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen Bond)

พันธะไฮโดรเจนเป็นพันธะที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมของธาตุไฮโดรเจนกับอะตอมของธาตุอื่นที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี (Electronegativity: EN) สูงๆ และมีขนาดเล็ก เช่น ออกซิเจน (O) ไนโตรเจน (N) และฟลูออรีน (F) โดยปกติแล้วไฮโดรเจนจะสร้างพันธะเพียง 1 พันธะแต่เมื่อไฮโดรเจนอยู่ใกล้กับสารทั้งสามข้างต้นแล้วจะเกิดพันธะกับสารดังกล่าว ซึ่งพันธะที่เกิดขึ้นจะมีขั้วมากจนทำให้ไฮโดรเจนมีความเป็นบวกเด่นชัด จึงดึงดูดอิเล็กตรอนที่ไม่สร้างพันธะ (Nonbonded Electron) ของอะตอมในอีกโมเลกุลหนึ่ง จึงดูเหมือนว่าไฮโดรเจนสามารถสร้างพันธะได้ 2 พันธะคือ พันธะโควาเลนต์ 1 พันธะและพันธะไฮโดรเจนอีก 1 พันธะ ถึงแม้ว่าพันธะไฮโดรเจนจะมีความแรงของพันธะเพียงร้อยละ 5 ถึง 10 ของพันธะโควาเลนต์ แต่เมื่อเกิดพันธะไฮโดรเจนขึ้นจะมีผลต่อคุณสมบัติทั้งทางด้านฟิสิกส์และทางด้านเคมีของโมเลกุลของสารที่เกิดขึ้น (ศศิธร, 2551)

## 2. การดูดซับทางเคมี (Chemisorptions)

เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลของสารดูดซับกับสารถูกดูดซับเกิดเป็นสารประกอบทางเคมีซึ่งแตกต่างจากการดูดซับแบบกายภาพกระบวนการนี้จะมีความหนาแน่นของโมเลกุลเพียงชั้นเดียวและไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับได้เองเนื่องจากการจับตัวทางเคมีสร้างสารประกอบใหม่ที่ผิวของสารดูดซับการดูดซับทางเคมีที่อุณหภูมิสูงจะเกิดเร็วกว่าอุณหภูมิต่ำเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีจะเกิดอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูง

### 2.3.1 ประเภทสารดูดซับ

สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่

1. ประเภทสารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ และแอคทีเวเต็ดซีทีกา สารธรรมชาติเหล่านี้มักมีพื้นที่ผิวประมาณ 50 ถึง 200 ตารางเมตรต่อกรัม แต่การสังเคราะห์อาจมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมากอย่างไรก็ตามมีข้อเสียคือมีความสามารถในการดูดซับโมเลกุลหรือคอลลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิดทำให้การใช้ประโยชน์จากสารดูดซับประเภทสารอนินทรีย์มีจำกัดมาก
2. ถ่านกัมมันต์เป็นสารดูดซับที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 600 ถึง 1000 ตารางเมตรต่อกรัม
3. ประเภทสารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารแลกเปลี่ยนไอออนชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ เช่น เรซินแลกเปลี่ยนประจุสารเรซินมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300-500 ตารางเมตรต่อกรัม

### 2.3.2 กลไกการดูดซับ

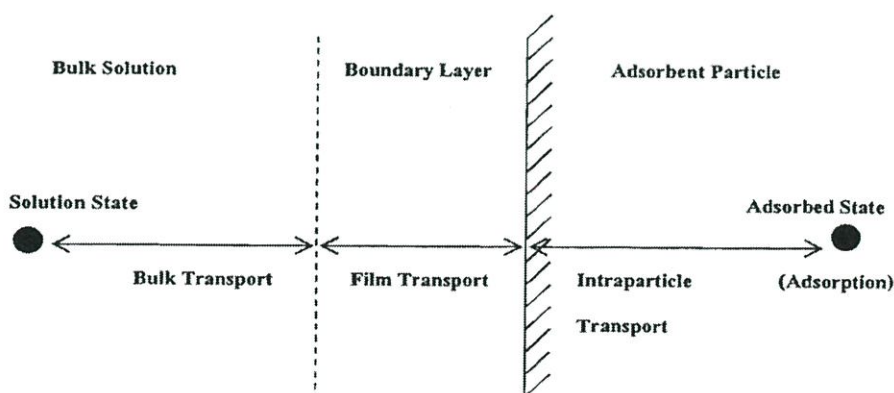
การดูดซับเป็นการเคลื่อนย้ายสารจากของเหลวและของแข็งหรือแก๊ส และการดูดซับของแข็งจะแสดงดังรูปที่ 2.1 ซึ่งมีขั้นตอนการเกิดขึ้น 4 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การเคลื่อนที่ผ่านสารละลาย (Bulk Solution Transport) ตัวถูกดูดซับจะเคลื่อนที่จากสารละลายสู่ขอบด้านนอกของน้ำที่ล้อมรอบตัวดูดซับ การเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นโดยการแพร่

ขั้นตอนที่ 2 การเคลื่อนที่ผ่านชั้นฟิล์ม (Film Diffusion Transport) ตัวถูกดูดซับจะแพร่ผ่านชั้นน้ำ (Hydrodynamic Boundary Layer) ที่อยู่ล้อมรอบตัวดูดซับไปยังผิวตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 3 การเคลื่อนที่ผ่านรูพรุน (Pore Transport and Intraparticle Transport) ตัวถูกดูดซับจะเคลื่อนที่ผ่านช่องที่อยู่ภายในตัวดูดซับไปสู่บริเวณที่จะมีการดูดซับ

ขั้นตอนที่ 4 การดูดซับ (Adsorption) เป็นการดูดซับระหว่างตัวถูกดูดซับกับ Active site บนผิวตัวดูดซับ เกิดขึ้นเร็วมากและอาจดูดติดด้วยแรงทางกายภาพและทางเคมีหรือทั้งสองแรงพร้อมกัน



รูปที่ 2.1 กลไกการดูดซับทั้ง 4 ขั้นตอน (ศศิธร, 2551)

### 2.3.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

#### 1. ความปั่นป่วน

อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับ Film Diffusion และ Pore Diffusion ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบถ้ามีความปั่นป่วนต่ำฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนาแน่นมากเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาสารดูดซับทำให้ Film Diffusion เป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้ามีความปั่นป่วนสูงทำให้ Pore Diffusion เป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

#### 2. ขนาดของสารดูดซับ

อัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของสารดูดซับการลดขนาดของสารดูดซับให้เล็กลงทำให้อัตราเร็วในการดูดซับเร็วขึ้นกว่าสารดูดซับที่มีขนาดใหญ่

#### 3. พื้นที่ผิวของสารดูดซับ

พื้นที่ผิวของสารดูดซับสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ (Adsorption Capacity) ยกเว้นกรณีที่มีโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับมีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนสารดูดซับ

#### 4. ความสามารถในการละลายน้ำของสารดูดซับ

เมื่อเกิดการดูดซับ โมเลกุลจะถูกดึงออกจากน้ำและเกาะติดบนผิวของของแข็งสารที่ละลายน้ำได้หรือแตกตัวเป็นไอออนได้จะมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำสูงจึงเป็นสารที่ยากในการดูดซับดังนั้นสารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้น้อยจะสามารถเกาะติดบนผิวสารดูดซับได้ดี

#### 5. ขนาดของสารที่ถูกดูดซับ

ขนาดของสารหรือโมเลกุลมีความสำคัญมากต่อการดูดซับ โดยเฉพาะการดูดซับที่เกิดขึ้นภายในรูพรุนของสารดูดซับ

#### 6. ค่า pH

ค่า pH ของสารละลายเป็นปัจจัยที่สำคัญของการดูดซับเนื่องมาจากค่า pH มีอิทธิพลต่อการแตกตัวเป็นไอออนและการละลายน้ำของสารต่างๆจึงมีผลกระทบต่อ การดูดซับมาก

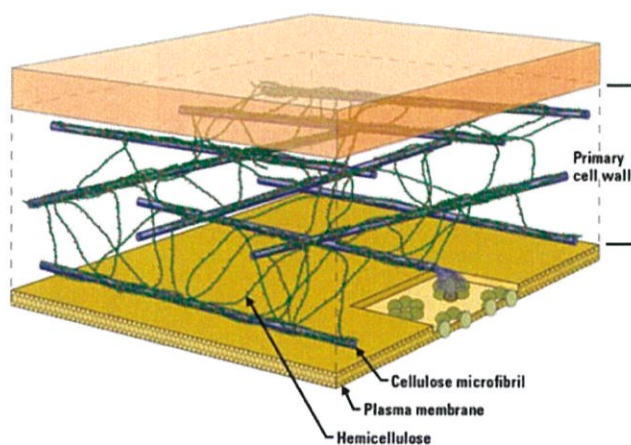
#### 7. อุณหภูมิ

ในกรณีการดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนพบว่า เมื่ออุณหภูมิลดลงความสามารถในการดูดซับจะสูงขึ้นแต่อัตราเร็วในการดูดซับจะลดลงในทางตรงกันข้ามถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นความสามารถในการดูดซับจะลดลงแต่อัตราเร็วในการดูดซับจะสูงขึ้นเนื่องจากความร้อนช่วยให้ความหนาของฟิล์มน้ำลดลงการเคลื่อนย้ายสารถูกดูดซับจากสารละลายภายนอก (Bulk Solution) เคลื่อนที่เข้าหาสารดูดซับได้เร็วขึ้น (ศศิธร, 2551)

## 2.4 ฟางข้าว (Rice Straw)

ฟางข้าวเป็นหนึ่งในจำนวนมากของวัสดุพืชและถูกผลิตทุกๆ ปีในปริมาณมากในประเทศที่พัฒนาแล้ว เส้นใยที่เหลือจากการเพาะปลูกจะถูกนำไปใช้ประโยชน์ในด้านเป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตกระดาษหรือเป็นอาหารสัตว์ (พัชรลักษณ์, 2551)

ฟางข้าวจัดเป็นวัสดุลิกโนเซลลูโลส (lignocellulosic material) ชนิดหนึ่งซึ่งมีส่วนประกอบหลักได้แก่ เซลลูโลส (cellulose) เฮมิเซลลูโลส (hemicelluloses) และลิกนิน (lignin) ในปริมาณที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับสายพันธุ์และสถานะที่เจริญเติบโตของต้นข้าว การนำเอาส่วนประกอบในฟางข้าวมาใช้ประโยชน์ จำเป็นต้องทราบถึงลักษณะโครงสร้างและปริมาณส่วนประกอบเหล่านั้น เพื่อพิจารณาเลือกวิธีการผลิตที่เหมาะสม (นพวรรณ, 2548)



รูปที่ 2.2 โครงสร้างหลักของฟางข้าว(toongpang,2012)

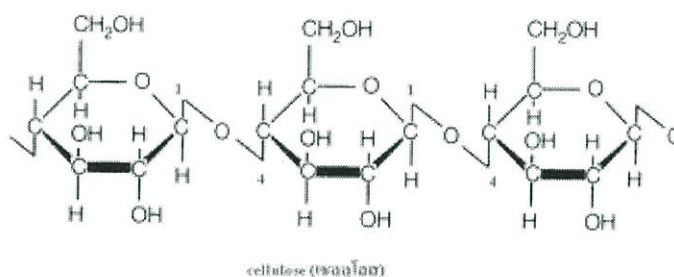
ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของข้อลำต้น แผ่นใบและกาบใบของฟางข้าว(จรัญ,2551)

| component<br>(%w/w) | internodes |         | leaf sheaths |         | leaf blades |         |
|---------------------|------------|---------|--------------|---------|-------------|---------|
|                     | mean       | range   | mean         | range   | mean        | range   |
| crude protein       | 2.7        | 1.7-6.4 | 3.5          | 2.0-6.9 | 4.6         | 3.2-8.6 |
| total ash           | 15         | 11-20   | 20           | 14-25   | 18          | 12-25   |
| residual ash        | 8          | 6-13    | 14           | 6-20    | 14          | 8-20    |
| hemicellulose       | 21         | 13-28   | 25           | 21-31   | 25          | 20-29   |
| cellulose           | 47         | 38-51   | 39           | 33-49   | 31          | 27-35   |
| lignin              | 5          | 4-6     | 4            | 4-6     | 6           | 4-8     |
| IVOMD               | 42         | 34-54   | 45           | 39-55   | 44          | 31-59   |

## 2.4.1 เซลลูโลส

### ความหมายของเซลลูโลส

เซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์สายยาวและมีมวลโมเลกุลสูง ประกอบด้วยกลูโคสเชื่อมต่อกันเป็นสายยาวด้วยพันธะเบตา (1,4) ( $\beta$ -(1,4) glucosidic linkage) ประมาณ 10,000 หน่วย พบทั่วไปในธรรมชาติเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของผนังเซลล์พืชและมีการเรียงตัวอยู่ในรูปของผล



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของเซลลูโลส (อังกฤษ, 2552)

### โครงสร้างของเซลลูโลส

เซลลูโลสมีโครงสร้างเส้นใยเล็กๆ ที่เรียกว่าไฟบริล (fibril) ซึ่งมีลักษณะเป็นมัดยาวรวมกันอยู่อย่างแข็งแรงด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล การจัดเรียงตัวของโมเลกุลไฟบริลทำให้เซลลูโลสมีโครงสร้างหลายรูปแบบ โครงสร้างทางเคมีและกายภาพของเซลลูโลสเกิดจากไฟบริลหรือโปรโตไฟบริลที่มีการเรียงตัวขนานและจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรง ซึ่งเมื่อตรวจสอบโดยกล้องจุลทรรศน์จะเห็นเป็นแผ่นบางๆ และเมื่อตัดขวางแผ่นบางๆ เหล่านี้ จะพบส่วนที่เป็นโครงสร้างผลึกที่มีการจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจนเรียงตัวขนานกันไป โดยบางส่วนอาจเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ ซึ่งบริเวณนี้ทำให้เซลลูโลสสลายตัวและแยกออกจากกันได้โดยการเข้าทำปฏิกิริยาของของเหลว เช่น กรดแก่ นอกจากนี้ยังอาจเกิดเป็นรูปร่างที่เปลี่ยนแปลงได้ง่ายด้วยแรงกลเนื่องจากความไม่เป็นระเบียบและขีดจำกัดของความยืดหยุ่นของไมโครไฟบริล(อังกฤษ, 2552)

### สมบัติทางเคมีของเซลลูโลส

เมื่อเซลลูโลสทำปฏิกิริยากับสารละลายบางชนิดจะเกิดปฏิกิริยา ดังนี้

1. ปฏิกิริยาที่ทำให้เซลลูโลสพองตัวและกระจายตัวออกโดยไม่ทำให้เซลลูโลสยาวขึ้นหรือเปลี่ยนโครงสร้างของเซลลูโลสในเส้นใย
2. ปฏิกิริยาที่ทำให้หมู่ไฮดรอกซิล ( $\text{OH}^-$ ) เปลี่ยนเป็นหมู่ฟังก์ชันอื่นๆ ได้ง่าย จึงทำให้ออนุพันธ์ของเซลลูโลสต่างๆ เช่น วิสโคส (Viscose) เรยอน (Rayon) เซลโลเฟน (Cellophane)

เซลลูโลสอะซิเตต (Cellulose Acetate)เซลลูโลสโพรพิโอเนต (Cellulose Propionate)เซลลูโลสไนเตรต (Cellulose Nitrate)เซลลูโลสอีเทอร์ (Cellulose Ether)เอทิลเซลลูโลส (Ethyl Cellulose)และไซยาโนเอทิลเซลลูโลส (Cianoethylated Cellulose) เป็นต้น

3. ปฏิกริยาที่ทำให้สายโซ่ของเซลลูโลสเปลี่ยนแปลงไปเพราะเสื่อมสภาพ ปฏิกริยาทั้งสามชนิดดังกล่าวข้างต้นมักเกิดการกัดกร่อนร่วมกันเสมอ นอกจากนี้คุณสมบัติทั่วไปของเซลลูโลสก็แตกต่างกันแต่ไม่ทนต่อกรดเข้มข้น เผาไหม้ในอากาศโดยไม่มีกลิ่นและเซลลูโลสมีหมู่ไฮดรอกซิล 3 หมู่ ทำให้สามารถแลกเปลี่ยนไอออนบวกกับไฮโดรเจนไอออนได้ดี

### สมบัติทางกายภาพของเซลลูโลส

เซลลูโลสมีจุดหลอมเหลวเท่ากับ 260 ถึง 270 °C (สลายตัว) และสามารถสลายได้ในกรดแก่ เช่น กรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 65 ถึง 67 โดยน้ำหนักกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นมากกว่าร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก กรดฟอสฟอริกเข้มข้นร้อยละ 83 โดยน้ำหนัก

**ความเป็นผลึกของเซลลูโลส**เซลลูโลสมีลักษณะการเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุล 2 แบบ คือ

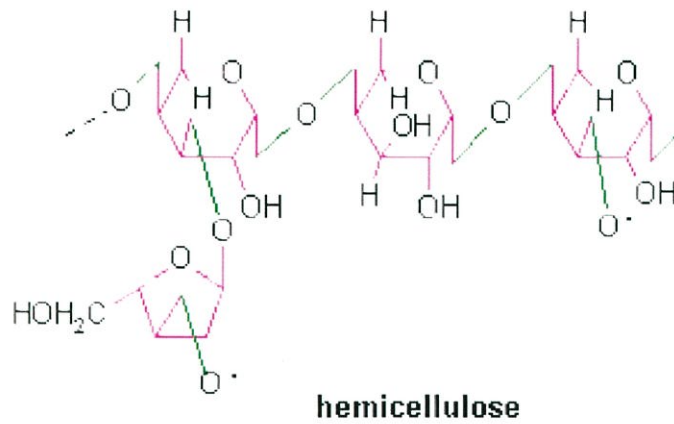
1. ลักษณะผลึก (Crytalline)มีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ โซ่โมเลกุลอยู่รวมกันเป็นสายยาวขนานไปตามความยาวของเส้นใย

2. ลักษณะกึ่งผลึก (Semi Crytalline) โมเลกุลบางตอนเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบแต่บางตอนเปิดเป็นช่องว่างพันกันไปมาไม่เป็นระเบียบ เรียกว่า รูปร่างอสัณฐาน (Amorphous) การเรียงตัวเป็นสายโซ่ของโมเลกุลเซลลูโลส (ศศิธร, 2551)

### 2.4.2 เฮมิเซลลูโลส

#### ความหมายของเฮมิเซลลูโลส

เฮมิเซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์ที่มีมวลโมเลกุลต่ำและมีปริมาณการเกิดเป็นพอลิเมอร์ (degree of polymerization, DP) ประมาณ 200 โดยมีน้ำตาลเป็นองค์ประกอบในเฮมิเซลลูโลสหลายชนิด กล่าวคือ มีไซโลสมากที่สุดถึง 85 ถึง 90% และส่วนที่เหลือเป็นน้ำตาลที่มีคาร์บอน 5 และ 6 อะตอม กรดแมนนูโรนิก (mannuronic acid) และกรดกาแลคตูโรนิก (galacturonic acid) เป็นองค์ประกอบ เฮมิเซลลูโลสจะถูกย่อยสลายได้ง่ายด้วยกรดหรือเบสเจือจางหรือเอนไซม์ เนื่องจากเฮมิเซลลูโลสไม่มีรูปร่างแน่นอน ไม่เป็นเส้นตรงและมีลำดับของหน่วยย่อยน้ำตาลที่เรียงตัวแบบสุ่มจึงทำให้พันธะที่เชื่อมระหว่างเซลลูโลสถูกทำลายด้วยกรดหรือเอนไซม์ได้ง่าย



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส (อังคณา,2552)

### โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส

พืชประกอบด้วยเฮมิเซลลูโลสประมาณ 1 ใน 3 ของน้ำหนักแห้ง โดยอยู่ร่วมกับเซลลูโลส และลิกนิน ทำให้เกิดเป็นผนังเซลล์พืชที่แข็งแรง เฮมิเซลลูโลสมีทั้งโครงสร้างที่เป็นสายโซ่ตรงและโซ่กิ่งของน้ำตาลที่มีคาร์บอน 5 อะตอม ได้แก่ ไซโลสและอะราบิโนส และน้ำตาลที่มีคาร์บอน 6 อะตอม ได้แก่ กลูโคส แมนโนสและกาแลคโตส องค์ประกอบส่วนใหญ่ในเฮมิเซลลูโลสเป็นไซโลสที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะเบตา (1,4) และพบในไม้เนื้อแข็งมากกว่าไม้เนื้ออ่อน ทั้งนี้ไม่ค่อยพบเฮมิเซลลูโลสที่มีไซโลสเพียงชนิดเดียวในธรรมชาติ จึงมักพบอยู่ร่วมกับน้ำตาลชนิดอื่นๆและมีส่วนของลิกนินจับตัวกันอยู่อย่างหนาแน่นด้วยพันธะโควาเลนต์โดยทั่วไปเฮมิเซลลูโลสจะมีความเป็นกรดเนื่องจากมีหมู่ 4-เมทิล-แอลฟา-ดี-กลูโคส (4-methyl- $\alpha$ -D-glucose) จับอยู่กับออกซิเจนตำแหน่งที่ 2 ซึ่งการมีหมู่แทนที่ในตำแหน่งที่ 2 และ 3 ส่งผลให้สามารถสกัดเฮมิเซลลูโลสออกได้ง่ายด้วยสารละลายเบส แต่ขั้นตอนของการสกัดเฮมิเซลลูโลสออกนั้นอาจต้องมีการกำจัดลิกนิน (delignification) ร่วมด้วย

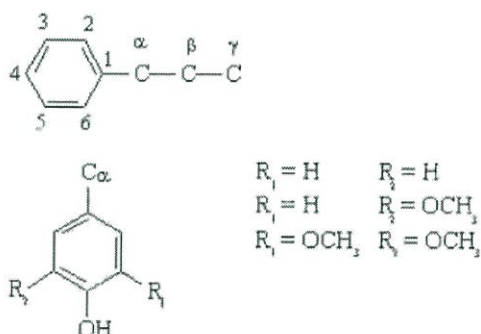
### สมบัติของเฮมิเซลลูโลส

ส่วนใหญ่จะพบเฮมิเซลลูโลสในผนังเซลล์ชั้นนอกสุดและพบส่วนน้อยในผนังเซลล์ชั้นที่ 2 โดยจะถูกย่อยสลายและสกัดออกจากผนังเซลล์พืชได้ในภาวะที่ไม่รุนแรง เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลมีโซ่กิ่งเป็นจำนวนมากคล้ายกับโครงสร้างของเพกติน โมเลกุลของเฮมิเซลลูโลสจะชอบน้ำทำให้เกิดการรวมตัวกับน้ำเกิดเป็นเจลได้ ขณะที่เมื่อเป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์จะไม่สามารถสกัดออกได้ด้วยน้ำ แต่สามารถละลายได้ในเบส

### 2.4.3 ลิกนิน

#### ความหมายของลิกนิน

ลิกนินเป็นพอลิเมอร์ที่พบในผนังเซลล์พืชที่มีความสัมพันธ์เชิงโครงสร้างร่วมกับเซลลูโลส และพอลิแซ็กคาไรด์ชนิดอื่นๆ ลิกนินประกอบด้วยโมเลกุลที่เป็นวงแหวนที่ต่อกันแบบสุ่มเป็นโครงสร้าง 3 มิติ โดยภายในโครงสร้างจะเชื่อมกันด้วยพันธะอีเทอร์หรือคาร์บอนระหว่าง 2 โมเลกุล ทำให้ลิกนินทนทานต่อการย่อยสลายด้วยสารเคมีและเอนไซม์มากกว่าพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ ดังนั้นจึงต้องอาศัยสารเคมีในการแยกลิกนินออกจากพอลิแซ็กคาไรด์



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของลิกนิน (อังคณา,2552)

#### โครงสร้างของลิกนิน

ลิกนินมีโครงสร้างที่เกิดจากหน่วยที่เหมือนกันซ้ำๆ ประกอบเป็น โมเลกุลที่ใหญ่มีการเชื่อมต่อกันของหน่วยย่อยคือ ฟีนิลโพรพานอยด์ (phenyl propanoid) ที่มีหมู่เมทิลอยู่บนโมเลกุล ลิกนินจากไม้เนื้ออ่อน หนุ้าและไม้เนื้อแข็งมีองค์ประกอบของหมู่แทนที่พวกเมทอกซี (methoxy) และการเกิดพันธะระหว่างหมู่ฟีนิลที่แตกต่างกัน

#### สมบัติของลิกนิน

ลิกนินมีสมบัติที่สำคัญคือ การละลายในตัวทำละลาย โดยปกติลิกนินจะไม่ละลายน้ำและตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นจึงสามารถสกัดลิกนินได้ด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ที่มีขั้วสูงขณะที่บางส่วนในกลุ่มของอัลคาไลน์ลิกนิน(alkaline lignin) สามารถละลายได้ในตัวทำละลายพวก ไดออกเซน (dioxane), ไพริดีน (pyridine)และสารละลายเบสเจือจางได้ นอกจากนี้เมื่อมีการเติมหมู่เมทิล (methylation)และหมู่อะซีทิล (acetylation) แทนที่ตำแหน่งต่างๆ บนวงแหวนเบนซีนในโครงสร้างของลิกนิน ทำให้ลิกนินสามารถดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ตได้ที่มีความยาวคลื่นสูงสุด 280 นาโนเมตร ทั้งนี้การเติมไฮดรอกซิลหรือไฮดรอกซีลก็เป็นกรเพิ่มหมู่ไฮดรอกซิลให้แก่โครงสร้างของลิกนิน ทำให้ลิกนินสามารถดูดกลืนแสงได้ด้วยการที่ลิกนินอยู่ร่วมกับเซลลูโลสในเนื้อไม้ ทำให้

โครงสร้างของพืชมีความแข็งแรงได้ตามธรรมชาติ รวมทั้งยังทำให้จุลินทรีย์และเอนไซม์ไม่สามารถทำลายโครงสร้างพืชได้ง่าย โดยโครงสร้างที่ลิกนินอยู่ร่วมกับเซลลูโลสจะมีพันธะ โควาเลนต์เชื่อมระหว่างลิกนินและเฮมิเซลลูโลสดังนั้นเพื่อให้การใช้ประโยชน์จากวัสดุกลุ่ม ลิกโนเซลลูโลสมีมากขึ้น จึงต้องใช้ในการปรับสภาพวัสดุเหล่านี้ก่อนและป้องกันผลเสียที่เกิดจากลิกนินรวมทั้งให้เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสอยู่ในสภาพที่เหมาะสมต่อการใช้ประโยชน์ต่อไป(อังคณา,2552)

ตารางที่ 2.2 สมบัติและองค์ประกอบต่างๆ ที่พบในพืช (หญ้าย,2547)

| องค์ประกอบ    | หน่วยย่อย  | พันธะ                     | แหล่งที่พบ  | คุณสมบัติ  |
|---------------|--|---------------------------|---|--|
| เซลลูโลส      | กลูโคส   | เบตา (1-4)                | ผนังเซลล์ชั้นแรก  | ไม่ละลายในน้ำ, แข็งแรง   |
| เฮมิ-เซลลูโลส | ไซโลส, กลูโคส, แมนโนส, กาแลคโตส                          | เบตา (1-4)                | ผนังเซลล์ชั้นแรก<br>ผนังเซลล์ชั้นสอง                                      | ละลายในน้ำ   |
| เพกทิน        | กรดกาแลคทูโรนิค  | แอลฟา (1-4)               | มิดเดิลลามেলা   | เกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันกับกรดได้, ละลายน้ำ, ดูดซับประจุบวกได้ |
| ลิกนิน        | สารอะโรมาติกที่มีหมู่เมทอกซิล, ไฮดรอกซิล และ ฟีนอลโพรเพน | แอลฟา (1-4)<br>เบตา (1-4) | ผนังเซลล์ชั้นแรก<br>มิดเดิลลามেলা<br>ผนังเซลล์ชั้นสอง<br>ผนังเซลล์ชั้นสาม | ไม่ละลายในกรดและน้ำ  |

## 2.5 การปรับสภาพฟางข้าว

### 2.5.1 การปรับสภาพเบื้องต้น (pretreatment)

กระบวนการปรับสภาพเบื้องต้น (pretreatment) เป็นกระบวนการกำจัดสารประกอบจำพวกลิกนินที่ห่อหุ้มเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสออกไป เนื่องจากสารประกอบเหล่านี้จะทำให้มีผลต่อขั้นตอนกระบวนการย่อยสลาย ซึ่งถ้าไม่ทำการกำจัดลิกนินออกก็จะทำให้การย่อยสลายทำได้ยากหรืออาจทำให้เกิดสารอนุพันธ์ที่อาจมีผลต่อกระบวนการผลิตได้ โดยวิธีการปรับสภาพเบื้องต้นนั้นสามารถแบ่งออกเป็น 4 วิธี ดังนี้

#### 1. การปรับสภาพด้วยวิธีทางกายภาพ (physical pretreatment)

เป็นการลดขนาดของวัตถุดิบและทำให้เส้นใยเซลลูโลสแตกออกเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาให้มากขึ้น เช่น การบดและการใช้ความร้อน เป็นต้น

#### 2. การปรับสภาพด้วยวิธีทางเคมี (Chemical pretreatment)

จะใช้สารละลายกรดเพื่อเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายเฮมิเซลลูโลส เพราะเฮมิเซลลูโลสสามารถย่อยสลายในสารละลายกรดได้ดีกว่าเซลลูโลสหรือใช้สารละลายเบสเพื่อเพิ่มปริมาณการละลายของเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน

### 3. การปรับสภาพด้วยวิธีทางเคมี-ฟิสิกส์ (physico-chemical pretreatment)

เป็นการใช้วิธีทางกายภาพร่วมกับการใช้สารเคมี เช่น การใช้สารละลายเบสเจือจางและความร้อนภายใต้ความดันสูงในการปรับสภาพ ซึ่งประสิทธิภาพการย่อยสลายนั้น ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายเบสและความร้อนที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แต่เมื่อใช้ความร้อนภายใต้สภาวะความดันสูงเพียงอย่างเดียว พบว่า อัตราการย่อยสลายลดลงเมื่อความร้อนเพิ่มขึ้น เนื่องจากการแตกตัวของน้ำตาลที่เกิดขึ้น เปลี่ยนเป็นสารประเภทเฟอร์ฟูรัลฟอร์มัลดีไฮด์หรือกรดฟอร์มิก เป็นต้น ซึ่งเป็นตัวขัดขวางขั้นตอนการย่อยสลาย

#### 2.5.2 ชนิดของสารละลายเบสเจือจางที่นิยมใช้กัน

1. โซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นสารเคมีที่นิยมใช้มากที่สุดสามารถกำจัดลิกนินได้ดี เนื่องจากโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นเบสแก่ ในบางครั้งโซเดียมไฮดรอกไซด์ไม่ได้กำจัดลิกนินออกไปเพียงอย่างเดียว แต่จะทำลายเฮมิเซลลูโลสบางส่วนออกไปด้วย ดังนั้นการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์จึงจำเป็นต้องใช้อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมกับพืชชนิดนั้นๆ ผลผลิตที่ได้จึงจะมีประสิทธิภาพมากที่สุด

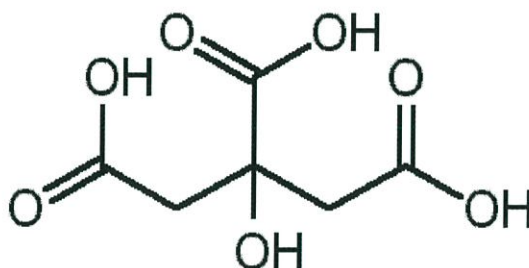
2. แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ เป็นสารเคมีที่นิยมใช้ไม่น้อยกว่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ แต่เนื่องจากแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เป็นเบสอ่อน จึงต้องใช้เวลาในการกำจัดลิกนินนานกว่าเล็กน้อย แต่ปัญหาที่พบจากการใช้แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์คือ กำจัดลิกนินออกไม่หมดและอาจมีกลิ่นของแก๊สแอมโมเนียที่เกิดจากกระบวนการย่อยสลากลิกนิน

3. โซเดียมซัลไฟด์เป็นสารเคมีที่นิยมใช้น้อยที่สุด แต่เป็นสารที่กำจัดลิกนินได้ดีที่สุด โดยโซเดียมซัลไฟด์จะมีความจำเพาะเจาะจงกับลิกนินเท่านั้น โดยจะไม่มีผลต่อเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลส เหตุผลที่นิยมใช้โซเดียมซัลไฟด์ค่อนข้างน้อย ก็อาจเนื่องจากกลิ่นของแก๊สไข่เน่าที่เกิดจากกระบวนการย่อยสลากลิกนินแต่อย่างไรก็ตามโซเดียมซัลไฟด์ยังคงใช้ในระดับอุตสาหกรรมที่จำเป็นต้องกำจัดลิกนินออกเท่านั้น เช่น อุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษในหลายบริษัท เป็นต้น

อย่างไรก็ตามการเลือกใช้สารเคมีดังกล่าวข้างต้น ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของพืชแต่ละชนิดที่นำมาใช้ โดยปัจจัยในการเลือกใช้สารเคมีอาจจะเลือกจากความแข็งของเนื้อไม้และคุณภาพในการแยกลิกนินดังนั้นกระบวนการปรับสภาพตัวอย่างจึงเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในการผลิตเซลลูโลสชีวเอทานอลทั้งในด้านคุณภาพวิเคราะห์และปริมาณวิเคราะห์

### 2.5.3 กรดซิตริก

กรดซิตริกหรือกรดน้ำส้มมีชื่อทางเคมีทั่วไปว่า Citric acid monohydrate มีสูตรโมเลกุล  $C_6H_{10}O_8$  เป็นกรดอินทรีย์ มีลักษณะเป็นผง สีขาว ไม่มีกลิ่น มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 210.14g/mol มีจุดเดือดเท่ากับ 135-153 และมีสูตรโครงสร้างตามรูป ดังนี้

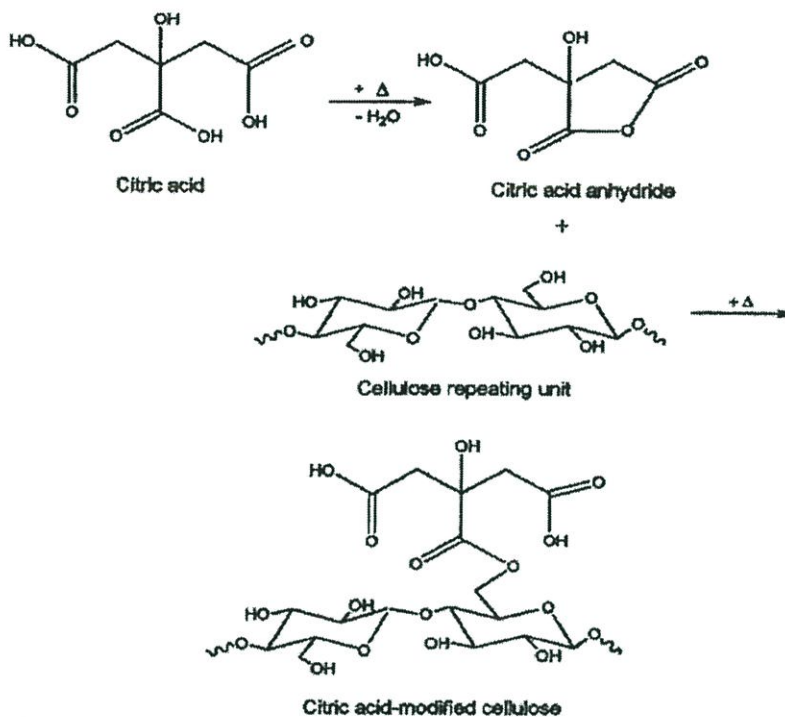


รูปที่ 2.6 โครงสร้างกรดซิตริก(วิกิพีเดีย,2001)

Citrate ion ซึ่งมีสมบัติเป็นเกลือประเภทหนึ่งเรียกว่า citrates ซึ่งซีเตรตสามารถจับกับไอออนของโลหะเกิดเป็นสารประกอบโลหะได้จึงทำให้มีการนำ citrate มาใช้เป็นสารกันบูดในอาหารและใช้ลดความกระด้างของน้ำได้ (วิกิพีเดีย,2001)

### 2.5.4 การปรับสภาพฟางข้าวด้วยกรดซิตริก

การปรับสภาพฟางข้าวด้วยกรดซิตริกเป็นการปรับปรุง โครงสร้างของฟางข้าวเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนัก โดยการเติมหมู่ฟังก์ชันที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนโลหะหนักกับโครงสร้างของฟางข้าวในที่นี้คือหมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl Group:  $-COOH$ ) หมู่ฟังก์ชันนี้ จะถูกเติมให้กับโครงสร้างฟางข้าวแล้วถูกสกัดด้วยเบสคือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ เพื่อกำจัดสารประกอบที่อยู่ในโครงสร้างของฟางข้าวที่จะขัดขวางการทำปฏิกิริยาระหว่างเซลล์โลสและกรดซิตริก (ศศิธร, 2551)



รูปที่ 2.7 การเกิดปฏิกิริยาระหว่างเซลลูโลสและกรดซิตริกในกระบวนการปรับสภาพฟางข้าว  
(ศศิธร, 2551)

## 2.6 การวิเคราะห์โลหะหนักในน้ำเสียโดยใช้เครื่อง AAS

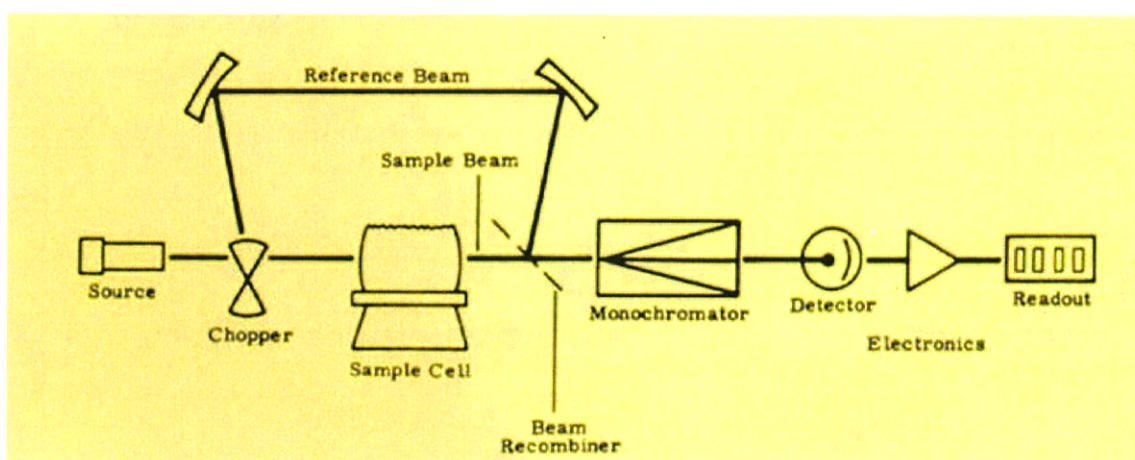
### (Atomic Absorption Spectrometer)

การวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียโดยใช้เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุอย่างหนึ่ง ซึ่งสามารถทำได้ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณวิเคราะห์ที่ได้รับความนิยมมากวิธีหนึ่ง เพราะเป็นเทคนิคที่สะดวก รวดเร็ว มีความเที่ยงความแม่นยำ มีสภาพไวสูงและเป็นเทคนิคที่เฉพาะดีมาก สามารถวิเคราะห์หาปริมาณธาตุโลหะหนักที่มีจำนวนน้อยๆ ในน้ำเสียได้และไม่ต้องผ่านกรรมวิธีหลายขั้นตอนในการเตรียมตัวอย่างน้ำก่อนการวิเคราะห์ประกอบกับค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์ไม่สูงมากนัก ดังนั้นห้องปฏิบัติการวิเคราะห์โดยทั่วไปมักนิยมใช้เทคนิคนี้กันมาก ความสามารถของเทคนิคนี้สูงมาก เพราะสามารถใช้วิเคราะห์ธาตุต่างๆ ได้ถึง 67 ธาตุ ทำให้การใช้งานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

### 2.6.1 หลักการ

นำน้ำตัวอย่างที่เตรียมในรูปของสารละลายมาดูด (Aspirate) เข้าไปในเปลวไฟ Air-Acetylene ของเครื่อง Atomic Absorption Spectrometer พลังงานความร้อนจากเปลวไฟจะทำให้สารละลายตัวอย่างเกิดกระบวนการแตกตัว (dissociation) หรือเปลี่ยนให้เป็นไอ (Vaporization) หรืออาจแตกตัวเป็นอะตอม (Atomization) อยู่ที่สถานะพื้น อะตอมที่สถานะพื้นจะเปลี่ยนสถานะไปสู่สถานะกระตุ้นโดยการดูดกลืนแสงที่ผ่านมาจากแหล่งกำเนิดภายนอก (Hollow Cathode Lamp) ที่ความยาวคลื่นที่เฉพาะเจาะจง ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของธาตุ ธาตุแต่ละชนิดจะมีระดับของพลังงานแตกต่างกันจึงมีการดูดกลืนพลังงานแตกต่างกัน ซึ่งธาตุแต่ละตัวจะดูดกลืนแสงได้ดีในช่วงความยาวคลื่นต่างกัน

สำหรับการวัดตัวอย่างการดูดกลืนแสงจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของธาตุที่มีอยู่ในสารละลายตัวอย่าง ซึ่งความเข้มข้นของธาตุในสารละลายตัวอย่าง จะหาได้โดยการวัดเทียบกับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน (สำนักวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมโรงงาน)



รูปที่ 2.8 ส่วนประกอบของเครื่อง Atomic Absorption Spectrometer (พันธ์ทิพย์, 2555)

### 2.6.2 องค์ประกอบและคุณสมบัติ

เครื่องวัดการดูดกลืนแสงของอะตอม มีองค์ประกอบหลักคือ มีหลอดไฟกำเนิดแสง (light source) มีเปลวไฟซึ่งทำหน้าที่เหมือนคิวเวทท์ มีตัวแยกแสง (monochromator) มีภาชนะขยายสัญญาณและภาคแสดงผล แต่เพื่อให้การวัดปริมาณธาตุมีความถูกต้องสูง จึงจำเป็นต้องมีระบบไมโครโพรเซสเซอร์ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบการวิเคราะห์ตัวอย่าง เช่น ระบบควบคุมอัตราการขยายสัญญาณอัตโนมัติ (automatic gain control) ระบบแก้การรบกวนจากพื้นหลัง (background correction) และ โปรแกรมคำนวณต่างๆ

1. หลอดไฟกำเนิดแสง เพื่อให้การวัดมีความไว (sensitivity) มากที่สุด หลอดไฟกำเนิดแสงที่ดีควรปล่อยคลื่นแสงจำเพาะที่มีความเข้มและแคบมากออกมาอย่างสม่ำเสมอ หลอดไฟกำเนิดแสงที่มีคุณสมบัติดังกล่าวและนิยมใช้ทั่วไปคือ

1.1 หลอดฮอลโลว์แคโทด (hollow cathode lamp) ซึ่งประกอบด้วย ขั้วบวก (anode) ที่ทำจากหลอดทั้งสแตนเลสและขั้วลบ (cathode) ซึ่งประกอบด้วยธาตุเดี่ยวหรือธาตุผสม (เมื่อต้องการใช้หลอด 1 อันสำหรับวิเคราะห์หลายๆ ธาตุ) ชนิดเดียวกับธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ขั้วทั้งสองบรรจุอยู่ในกระบอกแก้วปิดที่มีแก๊สเฉื่อยซึ่งอาจเป็นแก๊สนีออน แก๊สอาร์กอนหรือแก๊สฮีเลียมมีความดันประมาณ 1 ถึง 5 ทอร์เมื่อขั้วทั้งสองได้รับความต่างศักย์ประมาณ 200 ถึง 400 โวลต์ แก๊สเฉื่อยจะแตกตัวเป็นไอออน (ionization) และเกิดกระแสอิเล็กตรอนระหว่างขั้วทั้งสองประมาณ 5 ถึง 10 มิลลิแอมแปร์ ความต่างศักย์ที่สูงจะทำให้อะตอมของแก๊สที่มีประจุบวก (gaseous cation) วิ่งชนแคโทดทำให้เกิดกลุ่มอะตอม (atomic cloud) ในสถานะกระตุ้น (excited state) เมื่อพลังงานลดลงจะปล่อยคลื่นแสงที่มีความจำเพาะสำหรับแต่ละธาตุออกมา อะตอมส่วนใหญ่จะกลับไปเกาะที่แคโทดและส่วนน้อยเกาะที่ผิวแก้ว อายุการใช้งานของหลอดอยู่ในช่วง 100 ถึง 300 ชั่วโมง หลอดที่ขั้วลบทำด้วยธาตุที่ระเหยง่ายตัวอย่างเช่น Na, As, Sb, Bi, Mg, Pb มีอายุการใช้งานสั้นกว่าธาตุที่ระเหยยาก การเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วหลอดจะทำให้แสงที่ปล่อยออกมามีความเข้มขึ้น แต่ถ้าเพิ่มมากเกินไปจะเกิดอะตอมอิสระพลังงานต่ำมากขึ้น ทำให้ดูดกลืนแสงที่ปล่อยออกมาจากอะตอมพลังงานสูงไว้เอง (self absorption) เป็นผลให้ความเข้มของแสงจากหลอดไฟกำเนิดแสงลดลง หลอดฮอลโลว์แคโทดแบ่งเป็น 2 ชนิดตามชนิดของแคโทด คือ

1.1.1 หลอดชนิดธาตุเดี่ยว (single element lamp) เป็นหลอดชนิดที่ขั้วลบประกอบด้วยธาตุที่เหมือนกับธาตุที่ต้องการวิเคราะห์เพียงธาตุเดียว

1.1.2 หลอดชนิดหลายธาตุ (multiple element lamp) เป็นหลอดชนิดที่สามารถใช้วิเคราะห์ธาตุได้มากกว่า 1 ชนิด เนื่องจากขั้วลบมีธาตุเป็นองค์ประกอบมากกว่า 1 ชนิด ตัวอย่างเช่นประกอบด้วย Ca/Mg, Na/K, Cu/Pb/Zn หรือ Co/Cr/Cu/Fe/Mn ซึ่งมีข้อดีที่ราคาของหลอดถูกกว่าการซื้อหลอดชนิดธาตุเดี่ยวหลายๆหลอด แต่มีข้อเสียตรงที่อายุการใช้งานจริงของแต่ละธาตุที่เป็นองค์ประกอบของขั้วลบจะน้อยกว่าหลอดชนิดธาตุเดี่ยว เพราะมีการเสื่อมสลายตลอดเวลาที่ใช้วิเคราะห์ธาตุอื่น ใช้เวลาอุ่นหลอด (warm-up time) นานกว่าและให้แสงที่เข้มน้อยกว่าหลอดชนิดธาตุเดี่ยวและยังอาจมีการรบกวนทางแสงจากธาตุอื่นๆ ที่เป็นองค์ประกอบของขั้วลบ

1.2 หลอดอิเล็กโทรดเลสดีสชาร์จ (electrodeless discharge lamp, EDL) ภายในหลอดแก้วบรรจุไว้ด้วยเกลือของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์และขดลวดเหนี่ยวนำ (RF coil) ซึ่งพันอยู่บนแท่งเซรามิกเมื่อขดลวดได้รับกระแสไฟฟ้าจะเหนี่ยวนำจะทำให้เกลือของธาตุกลายเป็นไอและแตกตัวเป็นไอออน ขณะที่พลังงานลดลงจะปล่อยแสงที่สว่างและมีความยาวคลื่นจำเพาะสำหรับแต่

ลวดออกมากลางจากนั้นความต่างศักย์จะลดลงอยู่ในระดับที่เพียงพอต่อการรักษาความคงที่ของการแตกตัวของไอของธาตุและความเข้มของแสง ความต่างศักย์ที่สูงขึ้นจะทำให้แสงเข้มขึ้น แต่ความกว้างของความยาวคลื่นแสงที่ปล่อยออกมาจะกว้างขึ้นเป็นผลให้ความไวในการวิเคราะห์ลดลง

2. หลอดไฟกำเนิดแสงอ้างอิง (Reference light source) นิยมใช้หลอดไฮโดรเจน (hydrogen lamp) ซึ่งปล่อยแสงช่วงความยาวคลื่น 190 ถึง 280 นาโนเมตรหรือใช้หลอดดิวเทอเรียม (deuterium lamp) ที่ปล่อยแสงช่วงความยาวคลื่น 190 ถึง 325 นาโนเมตร สำหรับเป็นลำแสงอ้างอิงสำหรับการวิเคราะห์ในช่วงความยาวคลื่นแสงอัลตราไวโอเล็ตและใช้หลอดทังสเตนฮาโลเจนเป็นลำแสงอ้างอิงสำหรับการวิเคราะห์ในช่วงคลื่นแสงที่ตามองเห็น (visible light) สัญญาณของลำแสงที่ผ่านอะตอมอิสระออกมากจะถูกเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิงอยู่ตลอดเวลาที่วัด

3. ตัวสร้างอะตอม (atomizer) เป็นอุปกรณ์ที่ทำให้ธาตุแตกตัวเป็นอะตอมอิสระ (free atom) โดยใช้พลังงานความร้อนจากเปลวไฟหรือใช้กระแสไฟฟ้า

4. ช่องแสง (slit) ใช้สำหรับปรับความกว้างของลำแสง (band width) ที่ตกกระทบตัวไวแสง การวิเคราะห์โดยทั่วไปนิยมใช้ช่องแสงกว้าง (slit width) 0.7 นาโนเมตร การใช้ช่องแสงที่แคบลงจะช่วยลดการรบกวนจากความยาวคลื่นแสงข้างเคียงอื่นๆ ได้ แต่ความเข้มของแสงน้อยลงเป็นผลให้มีการตอบสนองของตัวไวแสงไม่ดีเท่าที่ควร แต่ถ้าใช้ช่องแสงกว้างมากเกินไปการรบกวนจากคลื่นแสงข้างเคียงจะมีมากขึ้นและขีดจำกัดการวิเคราะห์ช่วงต่ำลดลง

5. ตัวแยกแสง (monochromator) นิยมใช้เกรตติงแยกแสงหลายความยาวคลื่นที่ผ่านออกมาจากเปลวไฟให้กลายเป็นลำแสงสีเดียว (monochromatic light) ที่มีความยาวคลื่นที่ต้องการ

6. ตัวไวแสง (photo sensor) เป็นหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ทิวบ์ เนื่องจากมีอัตราขยายสูง สามารถวัดความเข้มของแสงปริมาณน้อยๆ ได้ดี

7. ภาคขยายสัญญาณ (amplifier circuit) อาจประกอบด้วยวงจรขยายแบบล็อก (log amplifier) เพื่อเปลี่ยนสัญญาณจาก %T ให้เป็น A และวงจรขยายความแตกต่างของสัญญาณ (differential amplifier) และวงจรขยายแบบเส้นตรง (linear amplifier)

8. ภาคแสดงผล (read out device) อาจประกอบด้วยตัวเลขแสดงผล (digital display) เครื่องพิมพ์ผล (printer) จอภาพ (monitor) และเครื่องบันทึกผล (recorder)

9. แผงควบคุม อาจประกอบด้วยปุ่มและสวิตช์ควบคุมต่างๆ

### 2.6.3 ชนิดของเครื่องวัดการดูดกลืนแสงของอะตอม

เครื่องวัดการดูดกลืนแสงของอะตอมสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดตามหลักการวัด คือ

1. ชนิดลำแสงเดี่ยว (single beam type) ประกอบด้วย หลอดไฟกำเนิดแสง หลอดไฟกำเนิดแสงอ้างอิง ตัวเผา ช่องแสง ตัวแยกแสง ตัวไวแสง ภาคขยายสัญญาณและภาคแสดงผลโดยมีข้อดีและข้อเสียเช่นเดียวกับเครื่องวัดการดูดกลืนแสงชนิดลำแสงเดี่ยวลำแสงอ้างอิง (reference beam) จากหลอดควิที่เริ่มจะตกกระทบตัวไวแสงสลับกับลำแสงวัด (measurement beam) จากหลอดฮอลโลว์แคโทด โดยการทำงานของตัวตัดแสง (chopper) การเปรียบเทียบสัญญาณทั้งสอง จะแก้ความไม่คงที่ของการดูดกลืนแสงที่ไม่จำเพาะของเปลวไฟได้ แต่ไม่สามารถแก้ความไม่คงที่ของความเข้มของแสงจากหลอดฮอลโลว์แคโทดได้

2. ชนิดลำแสงคู่ (double beam type) สร้างขึ้นมาเพื่อแก้ความไม่คงที่ของหลอดไฟกำเนิดแสง โดยการแยกแสงจากหลอดไฟกำเนิดแสงออกเป็น 2 ลำแสงด้วยตัวตัดแสง (chopper) ที่มีกระจกเงาคอยอยู่ ลำแสงหนึ่งจะไปตกกระทบตัวไวแสงโดยไม่ผ่านเปลวไฟ ส่วนอีกลำแสงหนึ่งผ่านเปลวไฟก่อนตกกระทบตัวไวแสง สัญญาณไฟฟ้าที่เกิดจากแสงที่ผ่านเปลวไฟถูกขยายเปรียบเทียบกับสัญญาณไฟฟ้าที่เกิดจากลำแสงอ้างอิงตลอดเวลา ดังนั้นจึงสามารถแก้ความผิดพลาดอันเนื่องมาจากความไม่คงที่ของหลอดไฟกำเนิดแสงได้และอาจเพิ่มหลอดไฟกำเนิดแสงอ้างอิงได้เช่นเดียวกับชนิดลำแสงเดี่ยวเพื่อช่วยแก้การดูดกลืนที่ไม่จำเพาะของเปลวไฟ (ชูชาติ, 2554)

#### 2.6.4 เทคนิคต่างๆที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธี AAS

เทคนิคต่างๆที่ใช้ในการวิเคราะห์ธาตุนั้นสามารถทำได้หลายวิธี คือ

1. ใช้ Flame Atomization Technique เทคนิคนี้ใช้กระบวนการทำให้สารตัวอย่างแตกตัวเป็นอะตอมด้วยเปลวไฟ (flame) ที่เหมาะสมแบ่งเป็น 5 ขั้นตอน ได้แก่ Nebulization, Droplet precipitation, Mixing, Desolvation, Compound decomposition

2. ใช้ Flameless Technique หรือ Non-flame Atomization Technique เทคนิคนี้ใช้กระบวนการทำให้สารตัวอย่างสลายตัวเป็นอะตอมได้ด้วยความร้อนจากกระแสไฟฟ้า (electrothermal atomizer หรือ graphite furnace) โดยสามารถตั้งโปรแกรมให้อุณหภูมิของการเผา มีค่าต่างๆกันและใช้เวลาต่างๆกันได้

3. ใช้ Hydride Generation Technique เนื่องจากมีธาตุบางชนิดจะเปลี่ยนให้เป็นอะตอมโดยตรงด้วยเทคนิค Flame Atomization Technique และ Flameless Technique ไม่ได้จำเป็นต้องใช้วิธีทำให้แตกตัวในบรรยากาศที่ปราศจากออกซิเจน เพื่อป้องกันการรวมตัวกับออกซิเจนของธาตุเหล่านี้ ดังนั้นจึงต้องใช้วิธีทำให้ธาตุเหล่านี้กลายเป็นไอได้ง่ายๆ ที่อุณหภูมิห้องด้วยการรีดิวซ์ให้เป็นไฮไดรด์แล้วให้ไฮไดรด์นั้นผ่านเข้าไปในเปลวไฟไฮโดรเจน ความร้อนจากเปลวไฟไฮโดรเจนทำให้ธาตุกลายเป็นอะตอมเสรีได้ เทคนิคนี้ใช้ในการวิเคราะห์ธาตุ As, Se, Te, Ge, Bi, Sb

4. ใช้ Cold Vapor Generation Technique สำหรับเทคนิคนี้เหมาะที่จะใช้ป็นวิธีวิเคราะห์ธาตุบางชนิดที่สามารถเปลี่ยนให้เป็นไอได้ง่ายๆ ซึ่งได้แก่ การวิเคราะห์ปรอทที่มีปริมาณน้อย โดยเฉพาะองค์ประกอบที่สำคัญต่างๆของเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ประกอบด้วยส่วนต่างๆที่สำคัญ 5 ส่วน

1. แหล่งกำเนิดแสง (Light source) ส่วนใหญ่เป็น hallow cathode lamp (HCL) และ electrodeless discharge lamp (EDL) ซึ่งมีใช้เฉพาะบางธาตุเท่านั้น

2. ส่วนที่ทำให้เกิดอะตอมอิสระ (Atomizer unit) เป็นส่วนที่ทำให้ธาตุแตกตัวเป็นอะตอมอิสระด้วยเปลวไฟหรือไฟฟ้า เป็นต้น

3. ส่วนแยกแสง (monochromator) เป็นส่วนที่ใช้แยกแสงให้ได้ความยาวคลื่นที่ต้องการ อาจเป็นแผ่นกรองแสง (filter) เกรตติง (grating) หรือปริซึม (prism)

4. ส่วนวัดสัญญาณ (detector) ส่วนใหญ่เป็นหลอดโฟโตมัลติพลีเออร์ (photomultiplier tube) ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณที่ได้จากการวิเคราะห์ในรูปของพลังงานแสงไปเป็นพลังงานไฟฟ้า

5. ส่วนประมวลผลและอ่านผล (data system and readout unit) ทำหน้าที่แปลสัญญาณที่ได้รับจากส่วนวัดสัญญาณให้เป็นข้อมูลสื่อให้ผู้ใ้เข้าใจ

#### 2.6.5 กระบวนการทำให้ธาตุแตกตัวเป็นอะตอมเสรีด้วยเปลวไฟ (Flame Atomization)

กระบวนการนี้สารตัวอย่างจะต้องเป็นสารละลายที่เข้ากันเป็นเนื้อเดียวกันไม่มีสารแขวนลอยอยู่ ตัวทำละลายจะเป็นน้ำหรือสารอินทรีย์ก็ได้กระบวนการ Atomization มี 5 ขั้นตอนคือ

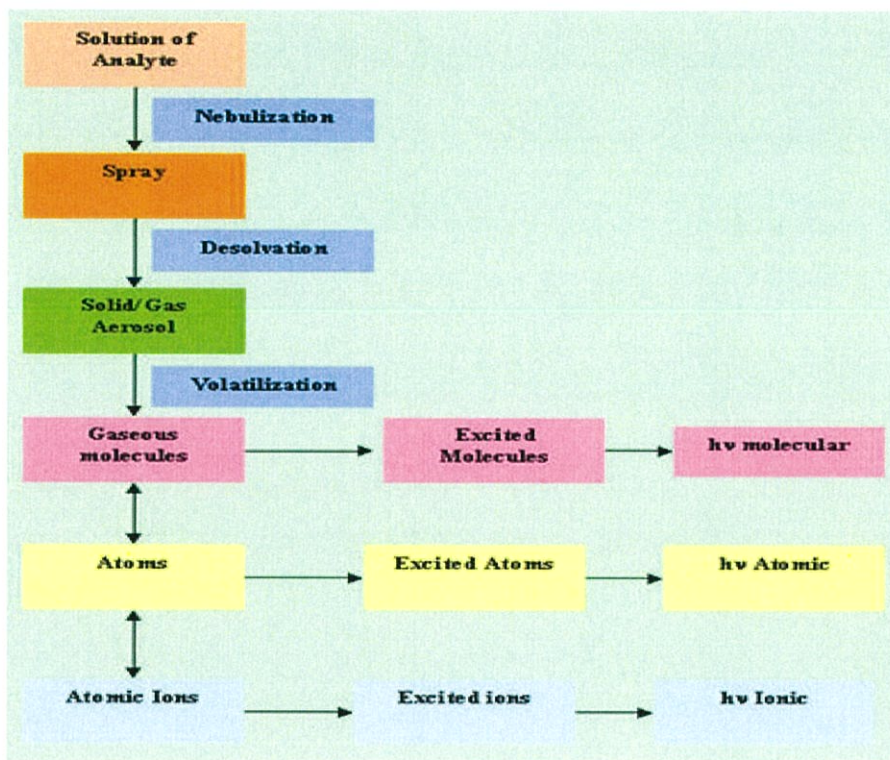
1. Nebulization เป็นกระบวนการที่เปลี่ยนของเหลวให้เป็นละอองเล็กๆ (mist) ด้วยเครื่องเรียกว่า nebulizer

2. Droplet precipitation เป็นกระบวนการที่ละอองเล็กๆของสารละลายรวมกันเป็นหยดสารละลายโดยไม่สามารถจะลอยอยู่ในอากาศได้ จึงตกลงมาแล้วออกไปทางท่อน้ำทิ้ง (drain)

3. Mixing เป็นกระบวนการที่ละอองเล็กๆของสารละลายเกิดผสมกับแก๊สเชื้อเพลิง (fuel) และออกซิเจนใน spray chamber ของ nebulizer

4. Desolvation เป็นกระบวนการที่ตัวทำละลายที่อยู่ในละอองเล็กนั้นถูกกำจัดไปทำให้เกิดเป็นอนุภาคเล็กๆ ของสารประกอบ กระบวนการนี้จะเกิดขึ้นตอนล่างของเปลวไฟ

5. Compound decomposition เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในเปลวไฟ โดยที่พลังงานความร้อนจากเปลวไฟจะไปทำให้สารประกอบเกิดการแตกตัวเป็นออกไซด์เป็นโมเลกุลและเป็นอะตอมเสรีบางครั้งอาจเกิดการกระเด็นหรือเกิดการไอออไนเซชันต่อไปได้



รูปที่ 2.9 Flame Atomization process (พันธ์ทิพย์,2555)

### 2.6.6 ขั้นตอนของการทำวิเคราะห์ด้วยเทคนิค AAS

1. เตรียมสารตัวอย่างให้อยู่ในรูปสารละลายที่เหมาะสมและพร้อมที่จะใช้กับเครื่อง AAS
2. พิจารณาว่าจะทำการวิเคราะห์เพื่อหาอะไรและเลือกวิธีการให้เหมาะสมทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณวิเคราะห์
3. จัดเครื่องมือให้พร้อมที่จะทำงานได้ เช่น คอมพิวเตอร์ ไมโครโพรเซสเซอร์ควบคุม มี software ที่เก็บข้อมูลของธาตุแต่ละชนิดไว้แล้ว เป็นเสมือน cook book ให้ผู้วิเคราะห์สามารถเลือกให้ได้ ซึ่งมี

ก.เลือก HCL ของธาตุที่จะทำการวิเคราะห์ใส่เข้าไปในเครื่องและเลือกกระแสไฟฟ้าที่ต้องใช้

ข.จัดเครื่องให้มีสภาพที่เหมาะสมกับเทคนิคที่ใช้ เช่น ใช้ Flame หรือ flameless atomization การปรับอัตราการใช้ของออกซิเจนที่ อากาศและเชื้อเพลิง เป็นต้น

ค.จัดความกว้างของช่องแสงเข้าออกจากโมโนโครเมเตอร์ (slit width) ให้เหมาะสม

4. เลือกโปรแกรมการวัดผล การคำนวณ ตลอดจนการรายงานผลวิเคราะห์

## 2.6.7 ผลกระทบของสิ่งรบกวนต่อการวิเคราะห์ (Interference Effects)

ถึงแม้ว่าเป็นเทคนิคที่ค่อนข้างเฉพาะมาก ทั้งแหล่งกำเนิดและการดูดกลืนแสง แต่ก็มีโอกาสที่สเปกตรัมของธาตุอื่นที่ปนอยู่มารบกวนได้ทำให้ค่า absorbance วัดได้มากหรือน้อยกว่าปกติ สิ่งเหล่านี้ล้วนเป็นสาเหตุที่ทำให้ผลวิเคราะห์ผิดพลาดได้ ดังนั้นผู้วิเคราะห์ควรศึกษาก่อนว่า สารตัวอย่างเป็นอะไร จะละลายด้วยอะไร มีองค์ประกอบอะไรบ้างและจะวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอะไร สิ่งเหล่านี้จะช่วยทำให้ผลการวิเคราะห์ผิดพลาดน้อยที่สุด สิ่งรบกวนสามารถจำแนกได้ ดังนี้

1. Physical effects เป็นผลเนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพของสารละลายที่จะวิเคราะห์ซึ่งไปเกี่ยวข้องกับอัตราการไหลของสารละลายเข้าไปใน nebulizer ขนาดของหยดสารละลาย (drop size) ได้แก่ volatility ของตัวสารละลาย surface tension, viscosity ซึ่งสามารถแก้ไขได้คือทำให้สารละลายเจือจางลง หรือเติม organic solvents หรือเตรียมสารละลายให้มี matrix อย่างเดียวกับสารตัวอย่าง

2. Chemical effects ได้แก่ แอนไอออน เช่น ฟอสเฟต ซัลเฟตอะลูมิเนียม ซิลิเกตหรือแอนไอออนที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบบางตัวทำให้ผลการหาปริมาณของพวก alkaline earth metals ได้น้อยกว่าปกติ เมื่อใช้ air-CH flame หรือ flame temperature ต่ำ เพราะมีการเกิดสารประกอบที่อยู่ตัวบางชนิดเรียกว่า refractory compound จึงทำให้การแตกตัวเป็นอะตอมของธาตุที่จะวิเคราะห์น้อยกว่าที่ควรจะเป็น

## 2.6.8 การเลือกใช้เทคนิคที่เหมาะสมในการวิเคราะห์

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค AAS นั้นอาจทำได้หลายวิธี แต่ละเทคนิคมีข้อดีข้อเสียและการทำงานแตกต่างกันและอาจกล่าวได้ว่ากระบวนการทำให้สารเกิด atomization ไม่มีวิธีไหนเลยที่จัดว่าดีที่สุด ดังนั้นห้องปฏิบัติการวิเคราะห์ต้องเลือกให้เหมาะสมกับความต้องการ โดยคำนึงถึงองค์ประกอบหลายๆ อย่างเช่นความเร็วของการวิเคราะห์ ความยากง่าย ความเข้มข้น สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของสารที่จะวิเคราะห์ ตลอดจนทั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ที่สามารถอำนวยความสะดวกให้แต่ละเทคนิคมีหลักการทั่วไปดังนี้

### 1. Flame Techniques

เทคนิคนี้ใช้ Flame ทำให้เกิด atomization โดยทั่วไปแล้วเป็นเทคนิคที่ใช้กันอย่างกว้างขวางสารตัวอย่างควรจะต้องมีลักษณะดังต่อไปนี้

#### 1.1 สารตัวอย่างต้องเป็นสารละลายหรือของเหลว

1.2 สารตัวอย่างควรมีสารที่เป็นของแข็งละลายอยู่ไม่เกิน 5% มิฉะนั้นจะมีผลต่อการเกิด atomization

1.3 สารตัวอย่างควรจะสลายตัวได้ดีด้วยความร้อน

1.4 ควรมีความเข้มข้นอยู่ในช่วงที่เหมาะสม

1.5 สารละลายตัวอย่างจะต้องมีอย่างน้อย 1 ml

เทคนิคนี้ผู้วิเคราะห์ไม่จำเป็นต้องมีความชำนาญมากนัก ค่าใช้จ่ายส่วนใหญ่อยู่ที่การเตรียมสารตัวอย่างให้เป็นสารละลาย มีความแม่นยำในการวิเคราะห์สูง

## 2. Graphite Furnace

สารตัวอย่างที่จะใช้เทคนิคนี้ในการวิเคราะห์ควรมีลักษณะดังนี้

2.1 สารตัวอย่างอาจเป็นของแข็งหรือของเหลวหรือของแข็งละลายในของเหลวซึ่งถ้าละลายเป็นเนื้อเดียวกันก็ยิ่งดี

2.2 สารตัวอย่างต้องสลายตัวด้วยความร้อนและทำให้สารเจือปนกับสารที่จะวิเคราะห์แยกออกจากกันได้

2.3 ควรจะต้องมีช่วงความเข้มข้นที่เหมาะสม

2.4 สารตัวอย่างและสารมาตรฐานควรจะเปรียบเทียบกันได้

2.5 ปริมาตรของสารตัวอย่างที่ต้องใช้อาจเป็น 0.5 ไมโครลิตร

2.6 วิธีนี้ให้ความแม่นยำและ sensitivity ในการวิเคราะห์ดี แต่ผู้วิเคราะห์จำเป็นต้องมีประสบการณ์และความชำนาญพอสมควร อัตราค่าวิเคราะห์ขึ้นอยู่กับสารเคมีที่ต้องใช้ graphite tube และเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์

## 3. Vapor Generation Techniques

สำหรับเทคนิคนี้จำเป็นต้องทำสารตัวอย่างให้มีลักษณะ ดังต่อไปนี้

3.1 สารตัวอย่างจำเป็นต้องย่อยให้อยู่ในสภาพที่เป็นกรดและมี oxidation state ที่เหมาะสม

3.2 ใช้วิเคราะห์ได้เฉพาะบางธาตุเท่านั้น

3.3 ควรจะต้องปราศจากสิ่งรบกวนทางเคมี

3.4 ช่วงความเข้มข้นจะต้องพอเหมาะ

3.5 เป็นเทคนิคที่ให้ sensitivity สูงสำหรับธาตุที่สามารถวิเคราะห์ได้

3.6 ค่าใช้จ่ายขึ้นอยู่กับสารเคมีและเวลาที่ใช้ (สำนักวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมโรงงาน)

## 2.7 Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR)

Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) เป็นหนึ่งในเทคนิคทางด้าน Infrared Spectroscopic ที่มีประสิทธิภาพในการจำแนกประเภทของสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์และพันธะเคมี โมเลกุลรวมถึงสามารถบอกถึงปริมาณองค์ประกอบที่มีอยู่ในโมเลกุลของสารผสมตัวอย่างที่ไม่ทราบชนิดเทคนิค FTIR นี้มีความไวใช้ระยะเวลาในการตรวจสอบน้อยกว่าเทคนิคอื่น Infrared Spectroscopy (IR) เป็นหนึ่งในเทคนิค Spectroscopic ทั่วไปที่ใช้ในทางเคมีอินทรีย์และเคมีอนินทรีย์โดยทำการตรวจวัดการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของตัวอย่างที่มีความถี่ต่างๆซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของแต่ละพันธะหรืออาจเรียกได้ว่าเป็นลายพิมพ์โมเลกุล

### 2.7.1 การดูดกลืนรังสีอินฟราเรด

ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิศูนย์องศาสมบูรณ์อะตอมทุกตัวใน โมเลกุลจะมีการสั่นอยู่ตลอดเวลาเมื่อความถี่ของการสั่นมีค่าเท่ากับความถี่ของรังสีอินฟราเรดที่ฉายมายัง โมเลกุล โมเลกุลก็จะดูดกลืนรังสีจำนวนแถบการดูดกลืนทั้งหมดที่สังเกตได้จะมีค่าไม่เท่ากับการสั่นมูลฐานของ โมเลกุลทั้งหมดโดยจะมีค่าลดลงทั้งนี้เพราะจะมีบางแถบพลังงานที่ไม่มีการตอบสนองต่อพลังงานในช่วงรังสีอินฟราเรด

IR Spectroscopy สามารถแยกเป็น 2 ประเภท คือ Dispersive Infrared Spectroscopy และ Fourier Transform Infrared Spectroscopy โดยในบทความนี้ผู้เขียนจะเน้นหนักไปทาง FTIR เพราะเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพมากกว่าแบบแรกแต่ก็จะแนะนำเครื่องมือในแบบแรกอย่างไม่เจาะลึกมากนัก

### 2.7.2 การเลือกใช้เทคนิคที่เหมาะสมในการวิเคราะห์

#### 2.7.1.2 Dispersive Infrared Spectroscopy

อย่างที่กล่าวไว้ในส่วนของบทนำแล้วว่า IR Spectroscopy นั้นสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ แบบ Dispersive หรือแบบกระจายแสง และแบบ FTIR

เครื่องมือที่ใช้เทคนิค Dispersive Infrared Spectroscopy หรือที่เรียกว่า Dispersive Infrared Spectrometer นั้นได้มีการนำมาใช้งานในกลางทศวรรษ 1940 และหลังจากนั้นเป็นต้นมาเครื่องมือนี้ก็ได้นำไปใช้อย่างแพร่หลาย

**1. ส่วนประกอบ** Dispersive Infrared Spectrometer มีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน คือ แหล่งกำเนิดรังสีโมโนโครเมเตอร์และเครื่องตรวจวัด

โดยทั่วไปแหล่งกำเนิดรังสีของ IR Spectrometer คือสารเฉื่อยที่ถูกทำให้ร้อนจนมีอุณหภูมิ 1,000-1,800 องศาเซลเซียสสารที่นิยมใช้ได้แก่ เนินสต์โกลเวอร์ (Nernst Glower) ซึ่งทำ

ด้วยออกไซด์ของพวกธาตุ แรร์เอิร์ท (rare earth oxides) โกลบาร์ (Globar) เป็นแท่งซิลิกอน คาร์ไบด์ และขดลวดนิโครม (Nichrome Coil) ซึ่งสารทั้งสามจะให้รังสีที่ต่อเนื่องแต่มีพลังงานที่แตกต่างกัน

โมโนโครเมเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการกระจายสเปกตรัมของรังสีและควบคุมแถบพลังงานในช่วงความยาวคลื่นหรือความถี่ที่ต้องการมีความต่อเนื่องปริซึมหรือเกรตติงถูกนำมาใช้ร่วมกับ slit แบบต่างๆกระจกและฟิลเตอร์ เช่นเกรตติงจะถูกหมุนเพื่อให้รังสีลงบน slit ซึ่ง slit ที่แคบจะทำให้เครื่องมือสามารถแยกแยะค่าความถี่ต่างๆที่ใกล้เคียงกันได้ดี ในขณะที่ slit ที่มีความกว้างกว่าจะทำให้รังสีสามารถผ่านไปยังเครื่องตรวจวัดได้มากกว่าเป็นต้น

เครื่องตรวจวัดที่ใช้โดยส่วนใหญ่จะมี 2 ประเภท คือ Thermal detector และ Photon detector โดย Thermal detector ได้แก่ Thermocouple, Thermistor และ Pneumatic device (Golay) อุปกรณ์เหล่านี้จะอาศัยสมบัติการเปลี่ยนแปลงความร้อนของสารเมื่อได้รับรังสีอินฟราเรดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างจะถูกตรวจวัดในเชิงปริมาณ เช่นการกระจายตัวของแก๊สที่ไม่ดูดกลืนรังสี (Golay) ความต้านทานไฟฟ้า (Thermistor) หรือศักย์บริเวณรอยต่อของโลหะต่างชนิด (Thermocouple) เป็นต้น ส่วน Photon detector นั้นจะขึ้นกับอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างรังสีอินฟราเรดและสารกึ่งตัวนำอิเล็กทรอนิกส์ที่ไม่นำกระแสจะถูกกระตุ้นจนกระทั่งเกิดกระแสหรือศักย์เล็กๆขึ้น Thermal detector จะให้การตอบสนองความถี่หลายๆ ค่าในช่วงกว้างแต่จะใช้เวลาในการตอบสนองและมีความไวน้อยกว่า Photondetector

2. การทำงานโดยทั่วไปรังสีจากแหล่งกำเนิดจะผ่านตัวอย่างและถูกกระจายออกในช่วงความถี่ต่างๆด้วยโมโนโครเมเตอร์หลังจากนั้นลำรังสีจะตกลงบนเครื่องตรวจวัดซึ่งจะทำให้เกิดเป็นสัญญาณไฟฟ้าแล้วทำการบันทึกผลสัญญาณนั้น IR Spectrometer แบบนี้จะมีทั้งชนิดลำแสงเดี่ยว (single beam) และลำแสงคู่ (double beam) แต่โดยส่วนมากที่พบเห็นจะเป็นแบบลำแสงคู่ เพราะ background ที่เกิดจากแก๊สในบรรยากาศ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ จะหาคำปัญหาไปการทำงานของเครื่องแบบนี้ลำแสงสองลำจะผ่านไปยังตัวอย่างและ chamber อ่างอิงจากนั้นใช้ตัวตัดแสง เช่น sector mirror แยกลำรังสีอ้างอิงและรังสีจากตัวอย่างให้ตกลงบนเครื่องตรวจวัด

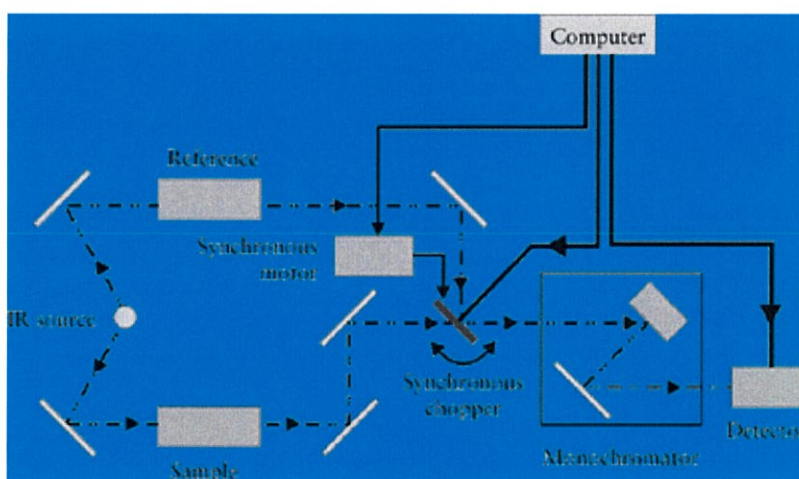
### 2.7.2.2 Fourier Transform Infrared Spectroscopy

Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) มีประโยชน์มากสำหรับการจำแนกประเภทของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ทั้งที่เป็นของแข็ง ของเหลว และแก๊ส FTIR ได้เข้ามาแทนที่ Dispersive Infrared Spectrometer เมื่อไม่นานมานี้ เพื่อใช้ในงานที่ต้องการความรวดเร็วและความไวสูงนอกจากนี้ยังช่วยให้สามารถวิเคราะห์สารในช่วงที่ Dispersive วิเคราะห์ได้ยากหรือเกือบจะเป็นไปไม่ได้

## 1. ส่วนประกอบ

ในระบบ FTIR มีส่วนประกอบหลักด้วยกัน 3 ส่วน คือ แหล่งกำเนิดรังสี Interferometer และเครื่องตรวจวัด FTIR จะใช้แหล่งกำเนิดรังสีชนิดเดียวกับแบบ Dispersive อย่างไรก็ดี แหล่งกำเนิดรังสีที่มีระบบระบายความร้อนด้วยน้ำจะให้กำลังและความเสถียรมากกว่าแหล่งกำเนิดทั่วไป

แต่สำหรับตัวแยกรังสีของ FTIR จะเป็น Interferometer แทนที่โมโนโครเมเตอร์ใน Dispersive โดย Interferometer จะแยกรังสีออกทำให้เกิด Path difference ระหว่างลำแสง แล้วทำการรวมสัญญาณการแทรกสอดซึ่งเป็นฟังก์ชันกับ Path difference โดยเครื่องตรวจวัดที่นิยมใช้มากที่สุดสำหรับ FTIR คือ Deuterated Triglycine Sulfate (DTGS) และ Mercury Cadmium Telluride (MCT) เวลาในการตอบสนองของเครื่องตรวจวัดโดยส่วนใหญ่ที่ใช้ใน Dispersive Infrared Spectrometer เช่น Thermocouple หรือ Thermistor จะช้ากว่าเวลาที่ Interferometer ทำการสแกนมาก DTGS เป็นเครื่องตรวจวัดประเภท Pyroelectric ที่สามารถส่งสัญญาณการตอบสนองได้อย่างรวดเร็วเพราะอุปกรณ์ตัวนี้ทำการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ สำหรับ MCT เป็นเครื่องตรวจวัดโฟตอนซึ่งขึ้นกับ quantum nature ของรังสีและให้ผลการตอบสนองที่รวดเร็วมากขณะที่ DTGS ทำงานที่อุณหภูมิห้อง แต่ที่อุณหภูมิของไนโตรเจนเหลว (77 เคลวิน) MCT จะทำงานได้ดีโดยทั่วไป MCT จะเร็วกว่าและมีความไวมากกว่า DTGS

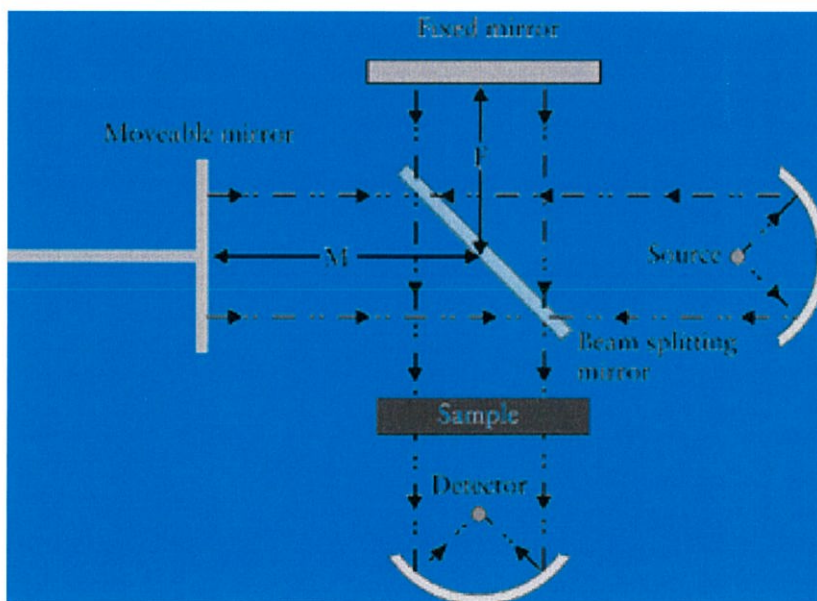


รูปที่ 2.10 แผนผังแสดงส่วนประกอบของ Dispersive Infrared Spectrometer (อมร,2539)

### 1. การทำงาน

เครื่องมือหลักๆจะถูกออกแบบมาอย่างง่ายารังสีอินฟราเรดจากแหล่งกำเนิดจะถูกฉายไปยัง Interferometer ซึ่งตัวที่นิยมใช้คือ Michelson Interferometer ซึ่งประกอบด้วยกระจกที่สามารถเคลื่อนที่ได้ที่กระจกที่ตรึงอยู่กับที่ โดยทั้งสองตั้งฉากซึ่งกันและกันและตัวแยกรังสีซึ่งเป็นอุปกรณ์กึ่ง

สะท้อนแสงโดยส่วนใหญ่ทำมาจากการนำฟิล์มบางของเจอร์มาเนียมวางลงบน KBr ที่ตัวแยกแสง ลำรังสีครึ่งหนึ่งจะทะลุผ่านไปยังกระจกที่ตรงอยู่กับที่และอีกครึ่งหนึ่งจะสะท้อนไปยังกระจกที่สามารถเคลื่อนที่ได้หลังจากนั้นลำรังสีก็จะสะท้อนจากกระจกกลับมารวมกันที่ตัวแยกแสง เกิดการแทรกสอดขึ้นหลังจากนั้นลำรังสีก็จะผ่านไปยังตัวอย่างและในที่สุดก็จะตกลงบนเครื่องตรวจวัด Path difference ระหว่างลำรังสีที่ถูกแยกออกเกิดขึ้นจากระยะทางสัมพัทธ์ระหว่างกระจกทั้งสองถ้าแขนยึดกระจกทั้งสองข้างของ Interferometer ยาวเท่ากันลำรังสีทั้งสองก็จะเดินทางด้วยระยะทางที่เท่ากัน มีเฟสตรงกันทำให้สัญญาณที่ไปถึงเครื่องตรวจวัดมีค่ามากที่สุด เมื่อกระจกเคลื่อนที่เป็นระยะทาง  $\lambda/4$  ระยะทางเดินของรังสีจะเปลี่ยนเป็น  $\lambda/2$  รังสีทั้งสองมีเฟสต่างกัน 180 องศาการแทรกสอดจะอยู่ในตำแหน่งหักล้าง เมื่อเคลื่อนกระจกเป็นระยะทางอีก  $\lambda/4$  ระยะทางเดินของรังสีจะเปลี่ยนเป็น  $\lambda$  รังสีทั้งสองลำจะกลับมามีเฟสตรงกันเมื่อกระจกเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ความเข้มของสัญญาณที่เครื่องตรวจวัดวัดได้จะมีลักษณะของ Interferogram เป็นรูปคลื่น sine โดยกราฟจะพล็อตระหว่างการตอบสนองที่เครื่องตรวจวัดบันทึกได้และเวลาที่กระจกมีการเคลื่อนที่ถ้าตัวอย่างเกิดการดูดกลืนรังสีที่ค่าความถี่นี้ขนาดของแอมพลิจูดจะลดลงโดยสัมพันธ์กับปริมาณของตัวอย่าง หลังจากนั้นใช้ Fourier Transform ซึ่งเป็นฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ในการแปลงผลที่ได้ (ขึ้นกับเวลา) ให้กลายเป็นค่าความเข้มกับความถี่



รูปที่ 2.11 แผนผังแสดงส่วนประกอบของ Fourier Transform Infrared Spectrometer

(อมร,2539)

## 2. การเตรียมตัวอย่าง

ตัวอย่างหลายๆชนิดสามารถให้สเปกตรัมในช่วงอินฟราเรด ไม่ว่าจะเป็นของแข็ง ของเหลว หรือแก๊สแต่อย่างไรก็ตามวัสดุอีกหลายชนิดที่ไม่ยินยอมให้รังสีอินฟราเรดทะลุผ่านจึงต้องทำการละลายในสารที่ยินยอมให้รังสีทะลุผ่านนอกจากนี้อาจใช้วิธีการตรวจวัดการสะท้อนหรือการแผ่ของสเปกตรัมจากตัวอย่างเหล่านี้ได้โดยตรง

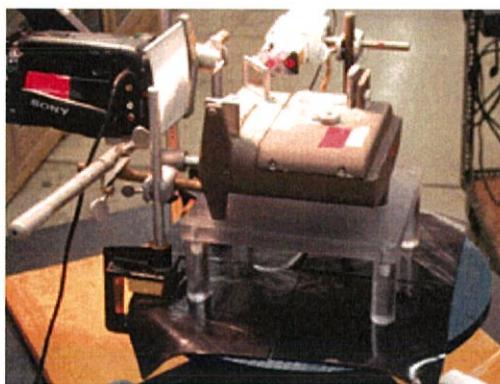
เซลล์สำหรับใส่ของเหลวได้ถูกนำมาใส่สารละลายตัวอย่างที่เป็นของแข็งซึ่งถูกละลายด้วยตัวทำละลายที่ยินยอมให้รังสีอินฟราเรดทะลุผ่านโดยตัวทำละลายที่นิยมใช้ได้แก่ คาร์บอนเตตระคลอไรด์ซึ่งอยู่ในช่วงระหว่าง  $4000-1330\text{ cm}^{-1}$  และคาร์บอนไดซัลไฟด์ซึ่งอยู่ในช่วง  $1330-625\text{ cm}^{-1}$  สารทั้งสองนี้มีความเป็นพิษสูง ดังนั้นจึงต้องใช้อย่างระมัดระวังหรืออาจใช้เตตระคลอโรเอทิลีนหรือเมทิลีนคลอไรด์ซึ่งมีความเป็นพิษน้อยกว่ามาแทนที่คาร์บอนเตตระคลอไรด์และแทนที่คาร์บอนไดซัลไฟด์ด้วย n-hexane หรือ n-heptane ส่วนสารที่มีขี้ เช่น น้ำหรือแอลกอฮอล์จะไม่นิยมนำมาใช้เป็นตัวทำละลายเพราะจะดูดกลืนรังสีอินฟราเรดในช่วงความยาวคลื่นกลางอย่างรุนแรงและมีปฏิกิริยากับ alkali-metal halides เช่น โซเดียมคลอไรด์ ซึ่งมักจะใช้ทำเซลล์และ window ดังนั้นตัวอย่างที่มีน้ำเป็นตัวทำละลายจึงต้องใช้เซลล์ชนิดพิเศษ เช่น  $\text{BaF}_2$ ,  $\text{AgCl}$  หรือ KRS-5 (สารผสมระหว่างแคลเซียมโบรไมด์และแคลเซียมไอโอไดด์) และตรวจวัดด้วย attenuated total reflectance accessories (ATR)

โดยทั่วไปการวิเคราะห์สารละลายที่มีความเข้มข้นประมาณ 0.05-10 เปอร์เซ็นต์จะใช้เซลล์ที่มีความหนา 0.1-1 มิลลิเมตรถ้าเป็นสารบริสุทธิ์มักจะใช้เซลล์ที่มีความหนา 0.01-0.025 มิลลิเมตร แผ่นเกลือที่อยู่บนวัสดุที่ยินยอมให้อินฟราเรดทะลุผ่านถูกนำมาใช้กับตัวอย่างที่เป็นของเหลวทั้งระเหยหรือไม่ระเหยโดยแผ่นของโซเดียมคลอไรด์ จะเป็นตัวที่นิยมใช้มากที่สุด โดยเฉพาะสำหรับของเหลวที่ไม่ละลายน้ำ ในขณะที่แผ่นซิลเวอร์คลอไรด์หรือแบเรียมฟลูออไรด์จะนิยมใช้สำหรับสารละลายหรือตัวอย่างที่มีปฏิกิริยากับโซเดียมคลอไรด์ ตัวอย่างจะถูกหยดลงระหว่างแผ่นเกลือสองแผ่นจนเกิดเป็นฟิล์มที่มีความหนาประมาณ 0.01 มิลลิเมตร แผ่นเกลือทั้งสองจะติดกันด้วยแรงแคปิลารีหรือถูกหนีบไว้ด้วย screw-tightened holder หรือยึดไว้ด้วย o-ring supported holder หรืออาจใช้วิธีหลอมด้วยอุณหภูมิที่เป็นจุดหลอมเหลวของของแข็งที่มีจุดหลอมเหลวต่ำแล้วหยดลงบนแผ่นเกลือ

การอัดตัวอย่างเหมาะสำหรับตัวอย่างของแข็งที่หลอมเหลวหรือละลายได้ยากตัวอย่างปริมาณเล็กน้อย (0.5-1.0 มิลลิกรัม) ผสมกับผงโพแทสเซียมโบรไมด์แห้งหรือ alkali halide ชนิดอื่นๆประมาณ 100 มิลลิกรัม สารผสมจะถูกอัดลงบนแผ่น transparent disk ที่ความดันสูงเพื่อไม่ให้เกิดผลจากการกระเจิงรังสีตัวอย่างจะต้องมีขนาดไม่เกิน 2 ไมครอนสเปกตรัมที่ได้จากเทคนิคนี้จะอยู่ในช่วงระหว่าง  $3450-1640\text{ cm}^{-1}$

การบดเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับตัวอย่างที่เป็นของแข็ง ตัวอย่างประมาณ 1–5 มิลลิกรัม จะถูกบดแล้วทำการหยด mineral oil หรือที่เรียก Nujol หรือสารอื่นๆ เช่น Fluorolube, hexachlorobutadiene ลงไป 1-2 หยด แล้วทำการบดต่อจนเป็นเนื้อเดียวกันเพื่อที่จะให้ได้แถบสเปกตรัมทั้งหมดจึงต้องใช้สารต่างๆเหล่านี้หลายชนิดเพราะสารแต่ละตัวจะดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่ความยาวคลื่นต่างๆกัน

เซลล์สำหรับใส่แก๊สจะใช้กับตัวอย่างที่เป็นแก๊สหรือของเหลวที่มีจุดเดือดต่ำเซลล์ประเภทนี้สามารถเพิ่มระยะทางเดินของรังสีจากเพียงไม่กี่เซนติเมตรไปจนถึง 120 เมตร ได้โดยการสะท้อนรังสีอินฟราเรดด้วยกระจกที่ติดอยู่ตรงปลายของเซลล์เข้าไปซ้ำมาเพื่อให้ได้สเปกตรัมที่เหมาะสม ความดันของแก๊สจะขึ้นกับการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของตัวอย่างและระยะทางเดินของรังสี โดยทั่วไปค่าความดันจะอยู่ที่ 50 ทอร์ ที่ระยะทาง 10 เซนติเมตร



รูปที่ 2.12 Michelson Interferometer (อมร, 2539)

### 2.7.3 ข้อดี-ข้อจำกัด

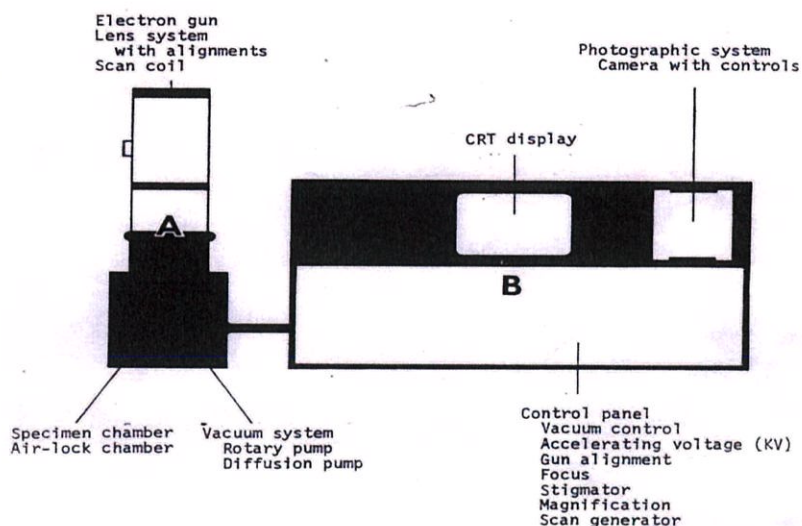
FTIR ให้ผลการวิเคราะห์ที่รวดเร็วและมีความไวสูง (โดยส่วนใหญ่จะใช้เวลาในการวิเคราะห์ประมาณ 1-5 นาที) โดยมีอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (signal-to-noise; S/N) ต่ำ อัตรา S/N จะแปรผันกับรากที่สองของปริมาณสัญญาณที่ตรวจวัดได้ทั้งหมดความไวของเครื่องตรวจวัดสามารถเพิ่มขึ้นได้ด้วยการเพิ่ม S/N ร่วมกับการเพิ่มจำนวนรอบของแอสแกน มีการใช้ circular optical aperture แทนที่ entrance slit ทำให้ลำรังสีมีขนาดมากกว่าแบบ Dispersive ถึง 75-100 เท่ามีกำลังแสงสูงขึ้น เหมาะสำหรับตัวอย่างหรือเทคนิคบางเทคนิคที่มีข้อจำกัดของกำลังแสง นอกจากนี้ FTIR ยังให้ประสิทธิภาพในการแยกสูงรวมทั้งมีความถูกต้องไม่ต่ำกว่า  $0.01 \text{ cm}^{-1}$  มีกลไกการทำงานที่ง่ายแต่ FTIR มีข้อจำกัดในการเตรียมตัวอย่างบางเทคนิคที่ต้องใช้สารละลายที่ยินยอมให้รังสีทะลุผ่านและตัวอย่างจะต้อง active ในช่วงอินฟราเรด นอกจากนี้เครื่องมือที่ใช้มีราคาค่อนข้างสูงและมีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาสูง (อมร, 2539)

## 2.8 Scanning Electron Microscope (SEM)

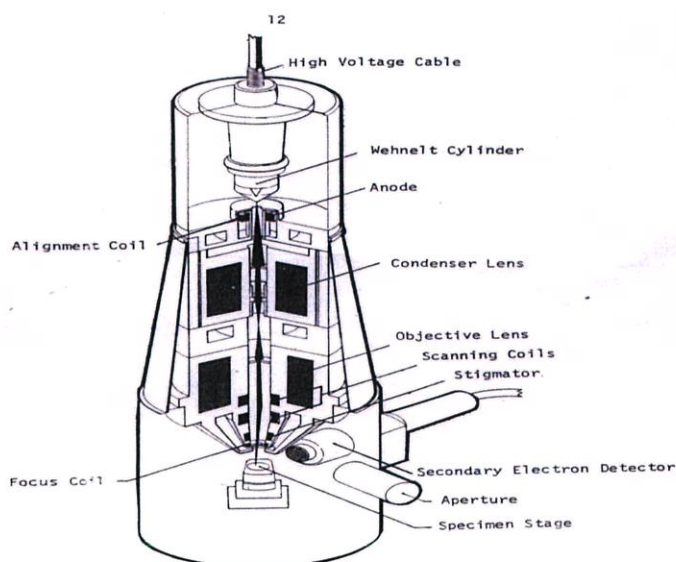
Scanning Electron Microscope (SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายไม่สูงเท่ากับเครื่อง TEM (เครื่อง SEM มีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร) การเตรียมตัวอย่างเพื่อที่จะดูด้วยเครื่อง SEM นี้ไม่จำเป็นต้องที่ตัวอย่างจะต้องมีขนาดบางเท่ากับเมื่อดูด้วยเครื่อง TEM ก็ได้ (เพราะไม่ได้ตรวจวัดจากการที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ทะลุผ่านตัวอย่าง) การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของ ตัวอย่างที่ทำการสำรวจซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM นี้จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ ดังนั้นเครื่อง SEM จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์หน้าตัดของโลหะและวัสดุ เป็นต้น (วิทยาลัยนาโน พระจอมเกล้าลาดกระบัง, 2556)

### 2.8.1 ส่วนประกอบต่างๆของเครื่อง SEM

SEM ทั่วไปประกอบด้วยโครงสร้างที่คล้ายคลึงกัน โครงสร้างง่ายๆที่เห็นได้ชัดแบ่งได้เป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ (รูปที่1-4) คือส่วนที่มีลักษณะคล้ายปล่องภายในกลวงเรียกว่า colum และส่วนที่เป็นตู้ควบคุมระบบไฟฟ้าทั้งหมดเรียกว่า consoleunit ทั้งส่วนนี้สามารถเห็นได้ชัดเพราะเป็นลักษณะภายนอกทั่วไปของSEM จะขาดอย่างใดอย่างหนึ่งเสียมิได้ เพราะ colum ยังประกอบด้วยส่วนประกอบพื้นฐานที่ให้กำเนิดอิเล็กตรอนแล้วรวบรวมให้ส่องไปยังผิวของตัวอย่างที่วางอยู่ภายในช่องตัวอย่างซึ่งอยู่บริเวณฐานของ colum อุปกรณ์ซึ่งรับสัญญาณที่เกิดขึ้นภายหลังอิเล็กตรอนกระทบตัวอย่างถูก จัดวางไว้อย่างเหมาะสมในบริเวณนี้เช่นกันภายใน consoleunit ซึ่งแผงควบคุมระบบควบคุมไฟฟ้าระบบสุญญากาศและระบบถ่ายภาพนั้นประกอบด้วยชิ้นส่วนของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่จัดไว้เป็นระบบเช่นการควบคุมลำแสงอิเล็กตรอนภายใน colum จำเป็นต้องใช้ปุ่มบังคับที่อยู่บนแผงควบคุมของ consoleunit นอกเหนือจากcolum และ consoleunit ซึ่งเป็นส่วนที่จำเป็นสำหรับยิง SEM แล้ว SEM ยังมีส่วนประกอบที่จำเป็นเช่นเดียวกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบTEMคือระบบทำสุญญากาศ (vacuumsystem) ระบบทำไฟฟ้าแรงสูง (highvoltagegenerator) และระบบทำความเย็นโดยการหมุนเวียนน้ำเย็น (watercoolingsystem)ซึ่งระบบต่างๆเหล่านี้สามารถหารายละเอียดได้จากตำราหรือหนังสือที่เกี่ยวกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ทั่วไปเพื่อจะให้เข้าใจถึงระบบการทำงาน SEM รวมทั้งการใช้และการบำรุง SEM ได้อย่างถูกต้องผู้ใช้หรือผู้ที่สนใจSEM จำต้องศึกษาส่วนประกอบพื้นฐานต่างๆของ SEM ในรายละเอียดเพื่อให้ได้ทราบถึงทฤษฎีหรือการและเหตุผลของแต่ละส่วน ที่จำเป็นสำหรับการใช้ SEM ให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น



รูปที่ 2.13 ส่วนประกอบต่างๆ รวมทั้งระบบภายใน column (A) และ console unit (B) ของ SEM (วิทยาลัยนาโน พระจอมเกล้าลาดกระบัง, 2556)



รูปที่ 2.14 แผนภาพแสดงให้เห็นส่วนประกอบที่สำคัญของ SEM ที่เป็นจุดกำเนิดของภาพ (วิทยาลัยนาโน พระจอมเกล้าลาดกระบัง, 2556)

1. แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron gun) อยู่ด้านบนสุดของ Column ซึ่งต่อกับสายไฟฟ้าแรงสูงที่ต่อจากถังแปลงไฟฟ้าแรงสูงซึ่งแปลงจาก 110 volts หรือ 220 volts เป็นไฟฟ้าที่มีความดันไฟฟ้าสูงคือระหว่าง 1-30 Kilovolts ซึ่งเพียงพอสำหรับ SEM แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนประกอบด้วยลวดโลหะ Tungsten ที่บิดเป็นรูปตัววีเรียกว่า filament และล้อมด้วยโลหะรูปกรวย (Wehneltcylinder) มีรูอยู่ปลายกรวยเมื่อกระแสไฟฟ้าตั้งแต่ 1000volts จะไปเข้ามาสู่ filament ลวดตัววีดังกล่าวก็จะมีความร้อนสูงประจุอิเล็กตรอนก็จะกระจายออกมาในสภาวะสุญญากาศภายใน

column ประจุอิเล็กตรอนซึ่งเป็นประจุลบจะถูกดึงดูดด้วยแผ่นขั้วบวก (anodeplate) ที่อยู่ด้านล่างของ electrongun ประจุอิเล็กตรอนส่วนใหญ่จะถูกดึงผ่านรูของกรวยไปยังทิศทางที่กำหนดคือลงสู่สนามแม่เหล็กที่สามารถรวบรวมประจุอิเล็กตรอนที่มีอยู่ให้เป็นลำแสงอิเล็กตรอนที่มีความหนาแน่นเพียงพอสำหรับฉายลงบนตัวอย่าง electrongun ซึ่งมีfilament และ Wehnelt cylinder อยู่ในสามารถทำให้ขยับเขยื้อนได้ด้วยสกรูที่อยู่รอบๆด้านนอก electrongun ทั้งนี้เพื่อปรับให้ electrongun อยู่ในแนวตรงได้ ศูนย์กลางหรือตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กของเลนส์สนามแม่เหล็กภายในcolumnใน SEM สมัยใหม่นอกจากจะมีปุ่มหรือสกรูที่ช่วยปรับ electrongun ให้ได้ศูนย์แล้วยังมีขดลวดที่มีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าบริเวณแผ่น anode เพื่อจะช่วยให้ลำแสงอิเล็กตรอนให้อยู่ศูนย์กลางของสนามแม่เหล็กในเลนส์ชุดแรกขดลวดดังกล่าวเรียกว่า alignmentcoil ซึ่งสามารถควบคุมและปรับได้ตามต้องการโดยหมุนและปรับปุ่ม (alignmentknobs) บนแผงของ consoleunit เหตุที่ต้องปรับ electrongun ก็เพื่อให้ลำแสงอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นมีความสมบูรณ์เป็นรูปทรงกระบอกที่ไม่บิดเบี้ยวหรือเขวออกไปจากศูนย์กลางหากมีการบิดของลำแสงอิเล็กตรอนออกนอกทิศทางอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (primaryelectron) บางส่วนจะถูกกั้นออกไปซึ่งมีผลกระทบต่อปริมาณของอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondaryelectron)

2. เลนส์ควบคุมลำแสงอิเล็กตรอน (Electromagnetic lens) และขดลวดควบคุมการเคลื่อนของลำแสงอิเล็กตรอน (Scan coil) เป็นชุดอุปกรณ์ที่ทำงานร่วมกันทำหน้าที่รวบรวมอิเล็กตรอนปฐมภูมิให้เป็นลำแสงรูปกรวยที่เล็กที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ลำแสงดังกล่าวไปตกกระทบบนผิวตัวอย่างและจะใช้สนามแม่เหล็กขับหรือผลักให้ลำแสงอิเล็กตรอนปฐมภูมิเคลื่อนไปบนผิวตัวอย่างในแนวที่ต้องการเป็นบริเวณรูปลี่เหลี่ยมจัตุรัสเลนส์แต่ละชุดมี aperture ซึ่งเป็นโลหะประเภททองขาวทองเหลืองมีรูปร่างต่าง ๆ กัน (50um-400um) และสามารถ เปลี่ยนได้ตามขนาดที่ต้องการ aperture ดังกล่าวมักจะจัดไว้ในเลนส์แต่ละชุดภายในบริเวณที่ไร้สนามแม่เหล็กของเลนส์ aperture เหล่านี้ทำหน้าที่กำหนดให้ลำแสงอิเล็กตรอนที่ผ่านสนามแม่เหล็กของเลนส์แต่ละชุดให้มีรูปกรวยที่สมมาตร aperture ของเลนส์ชุดสุดท้ายก่อนที่ลำแสงอิเล็กตรอนจะสัมผัสกับตัวอย่างเป็น aperture พิเศษเรียกว่า objectiveaperture มีไว้เพื่อกั้นกรองลำแสงอิเล็กตรอนให้เป็นรูปกรวยขนาดเล็กที่มีความสมมาตรที่สุดและกำหนดขนาดและปริมาณของอิเล็กตรอนให้กระทบจุดต่างๆบนผิวตัวอย่าง เพื่อให้ภาพที่มีความลึกมากกว่าปกติขดลวดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ขับเคลื่อนลำแสงอิเล็กตรอนปฐมภูมิให้กราดไปบนผิวของตัวอย่างชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์ นี้เรียกว่า scancoils ซึ่งควบคุมโดยระบบไฟฟ้าและยังควบคุมการกราดของลำแสงที่เป็นเส้นในจอรับภาพ (crt) ให้เคลื่อนที่ไปในทิศทางและเวลาเดียวกันกับลำแสงอิเล็กตรอน

3. ช่องตัวอย่าง (Specimen Chamber) ของ SEM เป็นช่องว่างใต้เลนส์สุดท้ายส่วนที่สำคัญของช่องใส่ตัวอย่างคือฐานวางตัวอย่างและปุ่มควบคุมโดยใช้เฟืองขนาดต่างๆเพื่อเลื่อนฐานนี้ให้

เลื่อนไปมาภายในช่องตัวอย่างได้อย่างน้อย 6 ทิศทางฐานวางตัวอย่างที่มีส่วนประกอบและคุณสมบัติเหล่านี้เรียกว่า goniometerstage

4. อุปกรณ์รวบรวมสัญญาณ (Collector & scintillator) เป็นแท่งแก้วใสมีปลายมลทำด้วยพลาสติกฉาบผิวด้วยอลูมิเนียมและส่วนปลายของแท่งนี้ล้อมด้วยตาข่ายโลหะที่ต่อกับวงจรไฟฟ้าประจุ + ขนาด 30-250 โวลต์เพื่อดึงดูดประจุอิเล็กตรอนทุติยภูมิอันเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างประจุอิเล็กตรอนปฐมภูมิกระทบกับผิวของตัวอย่าง

5. อุปกรณ์สร้างภาพและถ่ายภาพ (Imaging photographic devices) ทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงสัญญาณที่ได้รับเป็นภาพและภาพที่ปรากฏบนจอ CRT ก็พร้อมที่จะทำการบันทึกอุปกรณ์สร้างภาพประกอบด้วยท่อนำแสงและเครื่องขยายและเปลี่ยนสัญญาณอิเล็กตรอน ให้เป็นแสงไฟฟ้าการสร้างภาพเริ่มจากประจุอิเล็กตรอนทุติยภูมิซึ่งประจุอิเล็กตรอนชุดนี้จะถูกจับและรวบรวมไว้แล้วนำสู่แท่งแก้วใสประเภทท่อนำแสงในลักษณะของแสงแสงที่ผ่านท่อแท่งแก้วนี้จะเคลื่อนไปสู่เครื่องขยายแสง (photomultiplier) ซึ่งจะเปลี่ยนแสงชนิด photons นี้ไป อิเล็กตรอนอีกครั้งหนึ่งอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะผ่านเครื่องขยายให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าให้ปรากฏในจอภาพ (crt) ที่ติดตั้งไว้บน consoleunit

## 2.8.2 การทำงาน SEM

ส่วนประกอบและหลักการการทำงานโดยสังเขปของ SEM แสดงในภาพที่ 1 ส่วนบนสุด เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนที่เรียกว่า ปืนอิเล็กตรอน (electron gun) อิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ลงมาตามคอลัมน์ซึ่งมีสภาพสุญญากาศ ด้วยความต่างศักย์เร่ง (Accelerating Voltage) ในช่วง 0-30 KV (บางเครื่องอาจทำได้สูงถึง 50 KV) โดยทิศทางการเคลื่อนที่จะถูกควบคุมด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic lens) 2 ชุด หรือมากกว่าและปริมาณของอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดยแอฟเพอร์เจอร์ (aperture) หรือช่องเปิดซึ่งมีขนาดต่างๆกัน ตามลักษณะการใช้งาน

เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าชุดแรก ที่เรียกว่า เลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser lens) นับว่าเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญที่สุดต่อการควบคุมทัศนศาสตร์อิเล็กตรอน (electron optics) เพราะเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่บีบอิเล็กตรอนที่วิ่งลงมาจกแหล่งกำเนิดให้เป็นลำที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเล็กลง ส่วนเลนส์วัตถุ (Objective lens) ซึ่งเป็นเลนส์ชุดสุดท้าย จะทำหน้าที่โฟกัสลำอิเล็กตรอน (electron beam) ให้ไปตกบนผิวของตัวอย่าง โดยมีสแกนคอยล์ (scan coil) ทำหน้าที่กราดลำอิเล็กตรอนให้ไปบนผิวของตัวอย่างภายในกรอบพื้นที่สี่เหลี่ยมเล็กๆซึ่งพื้นที่ผิวของตัวอย่างบริเวณที่ถูกยิงด้วยลำอิเล็กตรอนนี้จะเกิดสัญญาณ (signal) ต่างๆขึ้นหลายชนิดในเวลาเดียวกัน และ SEMจะมีอุปกรณ์

สำหรับตรวจจับสัญญาณ (Detector) ชนิดต่างๆเหล่านั้น แล้วส่งไปประมวลผลเป็นภาพแสดงบนจอภาพต่อไป ตัวอย่างสัญญาณที่เกิดขึ้นนั้น ได้แก่

อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron, SE) สัญญาณชนิดนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างเป็นสัญญาณที่ถูกนำมาใช้ในการสร้างภาพมากที่สุดภาพที่ได้จากสัญญาณชนิดนี้เรียกว่า ภาพอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron Image, SEI)

อิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Back Scattered Electron, BSE) ให้ข้อมูลเกี่ยวกับส่วนประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของตัวอย่าง และแสดงให้เห็นลักษณะความสูงต่ำของพื้นผิว

นอกเหนือจากสัญญาณเหล่านี้แล้ว ยังมีสัญญาณอีกหลายชนิดที่เกิดขึ้น เช่น เอ็กซ์เรย์ (X-Ray), คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic wave), โอลิโกอิเล็กตรอน (Auger electron) เป็นต้น ซึ่งสัญญาณแต่ละชนิดจะให้ข้อมูลของตัวอย่างแตกต่างกันไป (คณัย, 2547)

## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

**Thevannan (2012)** เปรียบเทียบการดูดซับโลหะนิกเกิลในน้ำเสียโดยใช้ฟางข้าวและเปลือกหอยปู ทำการปรับ pH ให้เหมาะสมด้วยกรดซัลฟูริก 0.1 M และโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 M ทำการเขย่าที่ความเร็ว 130 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้องนำไปวิเคราะห์การดูดซับด้วยเครื่องอะตอมมิคสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (AAS) คำนวณค่านิกเกิลก่อนและหลังจากใส่ตัวดูดซับทั้งสองชนิด ค่าการดูดซับนิกเกิลของฟางข้าวบาร์เลย์และเปลือกหอยปูนั้นฟางข้าวบาร์เลย์สามารถลดนิกเกิลในน้ำเสียได้ 0.61 mmol/g ในขณะที่เปลือกหอยปูลดนิกเกิลในน้ำเสียได้เพียง 0.04 mmol/g แสดงให้เห็นว่าฟางข้าวบาร์เลย์มีประสิทธิภาพการดูดซับที่ดีกว่าเปลือกหอยปูจากนั้นนำนิกเกิลที่อยู่บนฟางข้าวบาร์เลย์มาทำการคายซับทำโดยเติมสารละลายกรดซัลฟูริกทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงที่ pH เหมาะสม พบว่า 63% ของนิกเกิลถูกชะออกมาจากฟางข้าวบาร์เลย์ โดยสมการ Langmuir เป็นไอโซเทอร์มการดูดซับที่ดีของนิกเกิล

**E.Pehlivan (2009)** ศึกษาการกำจัดทองแดงและตะกั่วออกจากน้ำเสียโดยนำฟางข้าวบาร์เลย์มาทดสอบการดูดซับ โดยที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไอออนของทองแดงและตะกั่วมีค่าเท่ากับ 1.0 mM ความสามารถในการดูดซับโลหะทั้งสองชนิดจะเพิ่มขึ้นเมื่อ pH ของสารละลายเพิ่มขึ้นจาก 2-9 แต่พบว่าค่า pH ที่มีค่าการดูดซับสูงที่สุดอยู่ที่ pH 6 ระยะเวลาในการสัมผัสพบว่าสมมูลการดูดซับของทองแดงมีค่าอยู่ระหว่าง 15 และ 50 นาที ค่าความจุในการดูดซับจะมีความอิ่มตัวที่เวลา 90 นาที สมมูลการดูดซับของตะกั่วมีค่าอยู่ที่ 10 และ 50 นาที ค่าความจุในการดูดซับจะมีความอิ่มตัวที่เวลา 60 นาที ทั้งนี้ศึกษาการดูดซับแบบ Langmuir และ Freundlich พบว่าการ

ดูดซับแบบ Langmuir ให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าซึ่งดูดซับทองแดงได้ 4.46 mg/g และดูดซับตะกั่วได้ 23.20 mg/g

**R.Gong (2006)** ได้นำฟางข้าวมาสกัดด้วยโซเดียมและทำการปรับปรุงด้วยกรดซิตริก เพื่อเพิ่มหมู่คาร์บอกซิลิกในฟางข้าวให้เป็นตัวดูดซับสีย้อมจากสารละลาย ความสามารถในการกำจัดสีย้อมออกจากสารละลายโดยฟางข้าวที่ผ่านการปรับปรุง พารามิเตอร์ที่มีผลต่อการทดลองคือ pH เริ่มต้น , ความเข้มข้นของตัวดูดซับ , ความเข้มข้นของสีย้อม และระยะเวลาสัมผัส ฟางข้าวที่ผ่านการปรับปรุงการดูดซับจะมีค่าสูงที่ pH 4.250 mg/L ปริมาณการกำจัดสีย้อมออกจากสารละลาย โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับ 2.0 g/L เมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้ค่าการดูดซับเท่ากับ 93% ซึ่งรูปแบบของการดูดซับอาจเป็นแบบ Langmuir หรือ Freundlich สมดุลของการดูดซับจะอยู่ที่เวลาประมาณ 10 ชั่วโมง โดยกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นจะเป็นไปตามจลนศาสตร์แบบ pseudo-first-order หลังจากทำการปรับปรุงทางเคมีพบว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจะสามารถดูดซับสีย้อมได้มากขึ้น จากการศึกษางานวิจัยทำให้เห็นว่าฟางข้าวที่ทำการปรับปรุงด้วยซิตริกสามารถกำจัดสีย้อมออกจากสารละลายได้

**E.Pehlivan(2012)** ฟางข้าวบาร์เลย์เป็นวัสดุทางธรรมชาติที่มีต้นทุนต่ำจึงได้นำมาใช้ประโยชน์โดยทำเป็นวัสดุดูดซับเพื่อกำจัดไอออนทองแดงของจากสารละลาย ได้นำฟางข้าวมาทำการปรับปรุงด้วยกรดซิตริกเพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับไอออนของทองแดง จากการดูดซับได้ทำการศึกษาผลของ pH , ความเข้มข้นของตัวดูดซับ , ระยะเวลาในการสัมผัส , ขอบเขตของการปรับปรุง และความเข้มข้นของทองแดงที่ถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ได้ค่าความสมดุลในการดูดซับทองแดงเท่ากับ 4.64 mg/L และ 31.71 mg/L สำหรับฟางข้าวที่ผ่านการปรับปรุงด้วยกรดซิตริกตามลำดับ pH ที่เหมาะสมในการดูดซับทองแดงอยู่ที่ pH 7 ซึ่งสามารถกำจัดทองแดงได้ถึง 88.1% Langmuir, Freundlich, Scatchard และ D-R (Dubinin-Radushkevich) เป็นไอโซเทอมที่ใช้ในการศึกษาลักษณะการดูดซับของทองแดงบนฟางข้าวที่ผ่านการปรับปรุงด้วยกรดซิตริก ซึ่งหมู่คาร์บอกซิลิกจะเป็นตัวที่จับกับไอออนของทองแดงออกจากสารละลาย

**อรพิน (2553)** ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสังกะสีและทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์โดยทำการทดลองแบบ Batch และแปรผันค่า pH ที่ 2, 3, 4, 5, 6 และ 7 ระยะเวลาการปั่นกวานที่ 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาทีระยะเวลาการสัมผัสที่ 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาทีปริมาณกากชาที่ 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 กรัมและความเข้มข้นของโลหะหนักที่ 25, 50, 75, 100, 150, 200 มิลลิกรัมต่อลิตร จากผลการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสังกะสีคือที่

pH 5 ระยะเวลาในการปั่นกวาน 120นาที่ระยะเวลาในการสัมผัส120นาที่สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดของทองแดงคือที่ pH 6 ระยะเวลาในการปั่นกวาน120นาที่ระยะเวลาในการสัมผัส 60 นาที่เมื่อปริมาณของกากขาเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการบำบัดจะสูงขึ้นและถ้าความเข้มข้นของโลหะหนักเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการบำบัดจะลดลง

**Xincalchen (2011)** Biochars ผลิตได้จากการนำไม้เนื้อแข็งมาผ่านกระบวนการ pyrolysis ที่อุณหภูมิ 450°C (HW450) และฟางข้าวที่ 600°C (CS600) มีคุณสมบัติในการกำจัด Cu(II) และ Zn(II) จากสารละลาย จากข้อมูลการดูดซับไอโซเทอมที่ดีที่สุดคือ Langmuir isotherm โดย Cu(II) และ Zn(II) มีความสามารถในการดูดซับ 12.52 และ 11.00mg/g จาก CS600,6.79mg/g และ HW450,4.54mg/g จากการวิเคราะห์เทอร์โมไดนามิกชี้ให้เห็นว่า การดูดซับเป็นกระบวนการดูดความร้อนและไม่ได้เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติโดย Cu(II) ได้รับผลกระทบเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ Zn(II) ที่ความเข้มข้น >1.0mm จากการศึกษาชี้ให้เห็นว่าพืชตกค้างหรือของเสียทางการเกษตร biocharมีประสิทธิภาพในการดูดซับ

**CrystianGoncalves Rocha (2009)** การทดลองการดูดซับโดยใช้ฟางข้าวเป็นตัวดูดซับทางธรรมชาติ การดูดซับ Cu(II),Zn(II),Cd(II),Hg(II) จากสารละลายที่อุณหภูมิห้องการดูดซับที่ดีขึ้นอยู่กับอิทธิพลของ pH,ระยะเวลาสัมผัส ไอโซเทอมที่เหมาะสม คือ Freundlichisotherm อันดับการดูดซับเป็น Cd(II)> Cu(II)> Zn(II)> Hg(II) กระบวนการดูดซับจะสมดุลก่อน 1.5 ชั่วโมง มีการดูดซับสูงสุดที่ pH 5.0

**Xiaolang Chen (2011)** เส้นใยเซลลูโลสที่สกัดได้จากฟางข้าว โดยวิธีการอบไอน้ำแรงดันสูงโครงสร้างองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติของเส้นใย ตรวจสอบโดยใช้ อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (FTIR) เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (WAXD) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (TGA) FTIR และการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใย แสดงให้เห็นว่า ความดันไอน้ำส่งผลในการกำจัดบางส่วนของเฮมิเซลลูโลสและลิกนินจากโครงสร้างของเส้นใย WAXD เผยให้เห็นว่า ผลึกของเส้นใยฟางข้าวมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5-10 ไมโครเมตร สมบัติทางความร้อนของเส้นใยจากผล TGA พบว่าการย่อยสลายของเส้นใยฟางข้าวเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิ 280 °C

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

##### 3.1.1 สารเคมี

1. เลด(II) ไนเตรต( $Pb(NO_3)_2$ ) A.R. Grade (บริษัท APS Ajax Finechem, USA)
2. ซิงค์ซัลเฟต ( $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ ) A.R. Grade (บริษัท APS Ajax Finechem, USA)
3. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) A.R. Grade (บริษัท Carlo Erba, USA)
4. กรดซिटริก( $C_6H_{10}O_8$ ) A.R. Grade (บริษัท Carlo Erba, USA)
5. กรดไนตริก( $HNO_3$ ) A.R. Grade (บริษัท Italmar, Italy)
6. กรดไฮดรอกลอริก (HCl 0.1 mol/L) เกรด RPE (บริษัท Carlo Erba Reagents, Italy)
7. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH 0.1 mol/L) เกรด RPE (บริษัท Carlo Erba Reagents, Italy)
8. น้ำกลั่น

##### 3.1.2 วัสดุและอุปกรณ์

1. บีกเกอร์
2. บีเปด
3. ลูกยาง
4. กระจกตวง
5. ขวดวัดปริมาตร
6. กรวยแก้ว
7. หลอดหยด
8. แท่งแก้วคนสาร
9. ช้อนตักสาร
10. ขวดพลาสติก
11. ขวดรูปชมพู่
12. ตะแกรงร่อนขนาด 50 เมส ASTM E 11 (บริษัท Endecotts Ltd. London England)
13. ชุดกรองลดความดันประเทศ Germany
14. อลูมิเนียมฟรอยด์
15. ถาดอลูมิเนียม
16. พาราฟิล์ม
17. กระดาษกรอง Whatman (เบอร์ 2, 42) ยี่ห้อ Mancherey Nagel ประเทศ Germany

18. ตัวกรองขนาด 0.45 ไมโครเมตร

### 3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) รุ่น AAnalyst 200 ยี่ห้อ Perkin Elmer
2. เครื่อง pH meter ยี่ห้อ Metrohm รุ่น 827
3. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Sartorius รุ่น E02245
4. เครื่องเขย่า (Shaking machine) ยี่ห้อ Gallenkamp รุ่น Orbital shaker
5. เดซิเตเตอร์
6. เครื่องกรองลดความดัน ยี่ห้อ EYELA (Tokyo rikakikaico, ltd.) รุ่น Aspirator A-35
7. ตู้อบสาร (Oven) ยี่ห้อ Memmert รุ่น UM400 ประเทศ Germany
8. เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR) ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น IRAffinity-1 ประเทศ Germany
9. เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ยี่ห้อ Hitachi รุ่น S-4700 FE-SEM ประเทศ Japan

## 3.2 การเตรียมฟางข้าว

1. นำฟางข้าวมาตัดรากและใบออก แล้วนำมาตัดเป็นท่อนๆ ท่อนละ 10 เซนติเมตรและล้างด้วยน้ำเพื่อเอาเศษดินออก
2. นำไปอบแห้งในเตาอบที่มีอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสและชั่งจนได้น้ำหนักคงที่
3. นำมาบดและร่อนผ่านตะแกรง ขนาด 50 เมช ให้มีขนาดประมาณ 0.30 มิลลิเมตร

## 3.3 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

### 3.3.1 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ของตะกั่วที่มีความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

1. ปิเปตสารละลายเลด(II)ไนเตรต ( $Pb(NO_3)_2$ ) จาก stock เข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 1,000 มิลลิลิตร
2. เติมกรดไนตริกเจือจาง 20% ปริมาตร 25 มิลลิลิตร เพื่อรักษาสภาพสารละลายไม่ให้ถูกดูดซับจากภาชนะบรรจุและป้องกันการตกตะกอนของน้ำเสียสังเคราะห์
3. ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดจะได้ น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของตะกั่ว 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

### 3.3.2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ของสังกะสีที่มีความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

1. ปิเปตสารละลายซิงค์ซัลเฟต จาก stock เข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 1,000 มิลลิลิตร
2. เติมกรดไนตริกเจือจาง 20% ปริมาตร 25 มิลลิลิตร เพื่อรักษาสภาพสารละลายไม่ให้ถูกดูดซับจากภาชนะบรรจุและป้องกันการตกตะกอนของน้ำเสียสังเคราะห์
3. ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีด จะได้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของสังกะสี 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

### 3.3.3 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ของตะกั่วและสังกะสีที่มีความเข้มข้นอื่นๆ

ทำการเตรียมในลักษณะคล้ายกันกับข้อ 3.3.1 และ 3.3.2 แต่ทำการเตรียมความเข้มข้นที่ 0, 50, 100, 200, 400 และ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร

## 3.4 วิธีการทดลอง

### 3.4.1 การปรับปรุงคุณภาพของฟางข้าวด้วยกรดซिटริก (R.Gong.,2006)

1. ชั่งน้ำหนักฟางข้าวที่ผ่านการบดและร่อนมา 5 กรัม ใส่ขวดรูปชมพู่ แล้วนำมาเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 0.1 M ปริมาตร 100 มิลลิลิตร
2. นำไปเขย่าด้วยความเร็ว 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง
3. นำสารละลายมากรองลดความดัน โดยใช้กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 2 แล้วล้างด้วยน้ำกลั่นจนแน่ใจว่าไม่มีเบสเหลืออยู่ ซึ่งสามารถทดสอบได้ด้วยการหยดสารละลายฟีนอล์ฟทาลิน
4. นำฟางข้าวไปอบให้แห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
5. นำมาทำให้เย็นในเคซิเคเตอร์
6. ชั่งฟางข้าวที่ผ่านการสกัดด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 กรัม ใส่บีกเกอร์ ขนาด 30 มิลลิลิตร จำนวน 5 ขวด (ทำซ้ำ 3 ครั้ง)
7. เติมกรดซिटริกที่ความเข้มข้น 0.4 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร เท่ากันทุกขวด แล้วปิดผนึกด้วยพาราฟิล์ม
8. นำไปเขย่าด้วยความเร็ว 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 60 นาที ที่อุณหภูมิห้อง
9. นำฟางข้าวที่ผ่านการปรับปรุงด้วยกรดซिटริกไปทำให้แห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาให้ทำการเพิ่มอุณหภูมิในเตาอบเป็น 120 องศาเซลเซียส และอบต่ออีก 90 นาที
10. นำฟางข้าวที่ผ่านการอบมาทิ้งให้เย็นและเก็บในเคซิเคเตอร์เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

### 3.4.2 ศึกษาการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสารองค์ประกอบในฟางข้าวที่ไม่ได้ปรับปรุงและปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดซิริคโดย Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR)

1. ผสมตัวอย่างเข้ากับ KBr ใน โกร่งบดสาร โดยให้ตัวอย่างมีความเข้มข้น ประมาณ 0.01 เปอร์เซ็นต์ และบดสารให้ละเอียดโดยให้มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ
2. ใส่ตัวอย่างที่บดแล้วลงในแม่พิมพ์ และนำไปอัดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก ทิ้งไว้ 1-3 นาที
3. ถอดตัวประกอบแม่พิมพ์ออก ตัวอย่างจะติดอยู่ที่แม่พิมพ์ มีลักษณะเป็นวงกลมใส และตัวอย่างจะกระจายอยู่บน KBr แล้วนำตัวอย่างเข้าเครื่อง FTIR
4. นำมาวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสารองค์ประกอบในฟางข้าวที่ไม่ปรับปรุงและฟางข้าวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดซิริค

### 3.4.3 การศึกษาลักษณะสัณฐานของฟางข้าวที่ไม่ปรับปรุงและฟางข้าวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดซิริคโดย Scanning Electron Microscope (SEM)

1. เตรียมตัวอย่างของฟางข้าวที่ไม่ปรับปรุงและฟางข้าวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดซิริค นำไปวางบนแท่น Carbon Tape จากนั้นนำตัวอย่างไปเคลือบทองเพื่อให้เกิดการนำไฟฟ้า
2. นำไปศึกษาลักษณะสัณฐานด้วย Scanning Electron Microscope (SEM)

### 3.4.4 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการดูดซับตะกั่วและสังกะสีด้วยฟางข้าวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดซิริค (E.Pehlivan, 2012)

#### 3.4.4.1 การศึกษาหา pH ที่เหมาะสมสำหรับดูดซับตะกั่วและสังกะสี

1. ชั่งฟางข้าวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดซิริค 0.5 กรัม ใส่ในขวดชมพูพลาสติก ขนาด 250 มิลลิลิตร (ทำซ้ำ 3 ครั้ง)
2. เปิดสารละลายตะกั่วและสังกะสี เข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดชมพูพลาสติกที่มีฟางข้าวโดยแปรผัน pH เป็น 3, 4, 5, 6, 7 และ 8 ก่อน
3. นำไปเขย่าด้วยความเร็ว 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 60 นาที
4. กรองสารละลายด้วยเครื่องกรองลดความดันผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 แล้วกรองซ้ำด้วยตัวกรอง ขนาด 0.45 ไมโครเมตร
5. เก็บสารละลายที่กรองได้ใส่ขวดพลาสติกเพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS
6. นำสารละลายตะกั่วและสังกะสี เข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร pH เท่ากับ 3, 4, 5, 6, 7 และ 8 มาทำการทดลองเช่นเดิม โดยไม่ใส่ฟางข้าวเพื่อทำเป็นชุดควบคุม

#### 3.4.4.2 การศึกษาหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับตะกั่วและสังกะสี

- ทำการทดลองซ้ำเหมือนกับข้อ 3.4.4.1 แต่เปลี่ยนระยะเวลาในการสัมผัสเป็น 0, 10, 30, 60, 80 และ 120 นาที (ทำซ้ำ 3 ครั้ง)

### 3.4.5 การศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของตะกั่วและสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีผลต่อการดูดซับ

1. ชั่งฟางข้าวที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดซิตริก 0.5 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของตะกั่ว 50 100 200 400 และ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร (ทำซ้ำ 3 ครั้ง) ลงไป 50 มิลลิลิตร ควบคุมค่า pH ให้เหมาะสมตามผลการทดลองที่ได้จากข้อ 3.4.4.1 (ทำซ้ำ 3 ครั้ง)

2. นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าอัตโนมัติที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที และใช้ระยะเวลาในการเขย่าที่ทำให้เกิดการดูดซับสูงสุด (จากผลการทดลองข้อ 3.4.4.2)

3. กรองสารละลายด้วยเครื่องกรองลดความดันผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 แล้วกรองซ้ำด้วยตัวกรองขนาด 0.45 ไมโครเมตร

4. เก็บสารละลายที่กรองได้ใส่ขวดพลาสติกเพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS

5. เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับเพื่อนำไปใช้ศึกษาไอโซเทอร์มต่อไป

### 3.4.6 ศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับตะกั่วและสังกะสีของฟางข้าวที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดซิตริก

1. ชั่งฟางข้าว 0.3, 0.5, 0.7 และ 0.9 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของตะกั่ว 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ลงไป 25 มิลลิลิตร ควบคุมค่า pH ในสถานะที่เหมาะสม (ทำซ้ำ 3 ครั้ง) ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นสังกะสี 50 มิลลิกรัมต่อลิตรทำเช่นเดียวกัน

2. นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าอัตโนมัติที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที และระยะเวลาในการเขย่าที่เหมาะสม

3. กรองสารละลายด้วยเครื่องกรองลดความดันผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 แล้วกรองซ้ำด้วยตัวกรองขนาด 0.45 ไมโครเมตร

4. เก็บสารละลายที่กรองได้ใส่ขวดพลาสติกเพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS

5. เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับ

### 3.4.7 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับของฟางข้าวที่ปรับปรุงและฟางข้าวที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดซิตริกในน้ำเสียสังเคราะห์

1. ชั่งฟางข้าวที่ไม่ได้ปรับปรุงและที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดซิตริก 0.5 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของตะกั่ว 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ลงไป 50 มิลลิลิตร (ทำซ้ำ 3 ครั้ง) ควบคุมค่า pH ในสถานะที่เหมาะสมตามที่ได้จากการทดลองที่ 3.4.4.1

2. นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าอัตโนมัติที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที และระยะเวลาในการเขย่าที่ทำให้เกิดการดูดซับสูงสุด (จากผลการทดลองข้อ 3.4.4.2)

3. กรองสารละลายด้วยเครื่องกรองลดความดันผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 แล้วกรองซ้ำด้วยตัวกรองขนาด 0.45 ไมโครเมตร

4. เก็บสารละลายที่กรองได้ใส่ขวดพลาสติกเพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS

5. เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับระหว่างฟางข้าวที่ไม่ปรับปรุงและฟางข้าวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดซัลฟิวริก

6. ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นสังกะสี 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำเช่นเดียวกันกับข้อ 1-6

### 3.4.8 การศึกษาประสิทธิภาพการนำฟางข้าวที่คายซับแล้วกลับมาใช้ใหม่

1. นำฟางข้าวที่ไม่ได้ปรับปรุงและฟางข้าวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดซัลฟิวริกที่ได้จากข้อ 3.4.7 มาอบด้วยอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2. ชั่งฟางข้าวทั้ง 2 ชนิด มาชนิดละ 0.5 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 50 มิลลิลิตร เติมกรดไฮโดรคลอริก 0.05 โมลต่อลิตร ลงไป 50 มิลลิลิตร (ทำซ้ำ 3 ครั้ง)

3. เขย่าด้วยเครื่องเขย่าอัตโนมัติที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที

4. นำมากรองและล้างด้วยน้ำกลั่นหลายๆ ครั้งจนกระทั่งวัดค่า pH ของน้ำล้างสุดท้ายใกล้เคียงกับค่า pH ของน้ำกลั่น จากนั้นนำฟางข้าวไปอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในเคซิเคเตอร์

5. ชั่งฟางข้าวทั้ง 2 ชนิด มาชนิดละ 0.1 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของตะกั่ว 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ลงไป 50 มิลลิลิตร (ทำซ้ำ 3 ครั้ง)

6. นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าอัตโนมัติที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที และระยะเวลาในการเขย่าที่เหมาะสม

7. กรองสารละลายด้วยเครื่องกรองลดความดันผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 แล้วกรองซ้ำด้วยตัวกรองขนาด 0.45 ไมโครเมตร

8. เก็บสารละลายที่กรองได้ใส่ขวดพลาสติกเพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS

9. เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับระหว่างการดูดซับรอบแรกและการดูดซับหลังจากการคายซับ

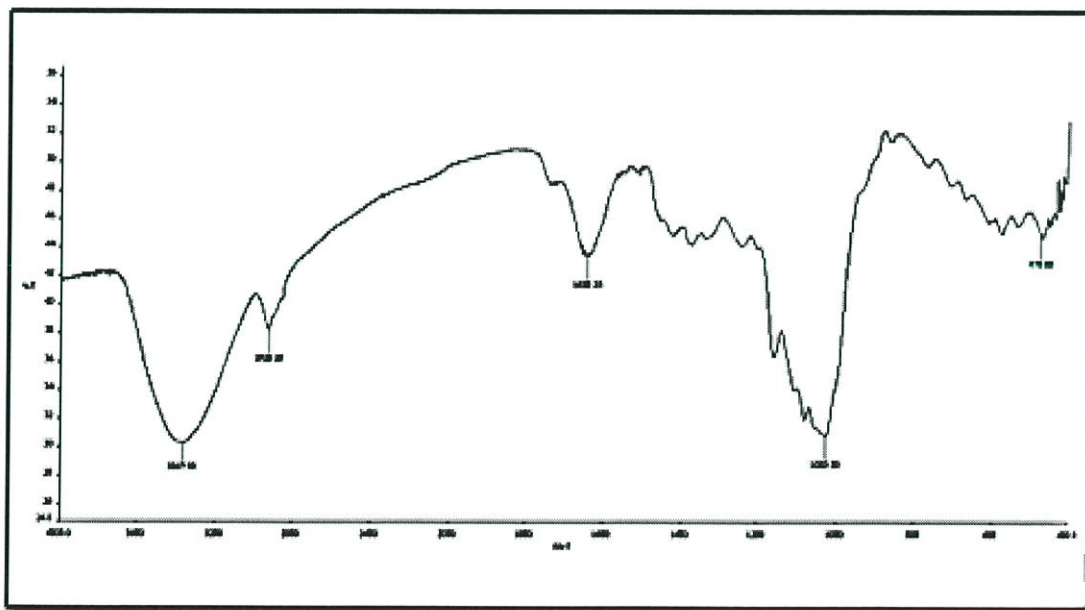
## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและอภิปรายผล

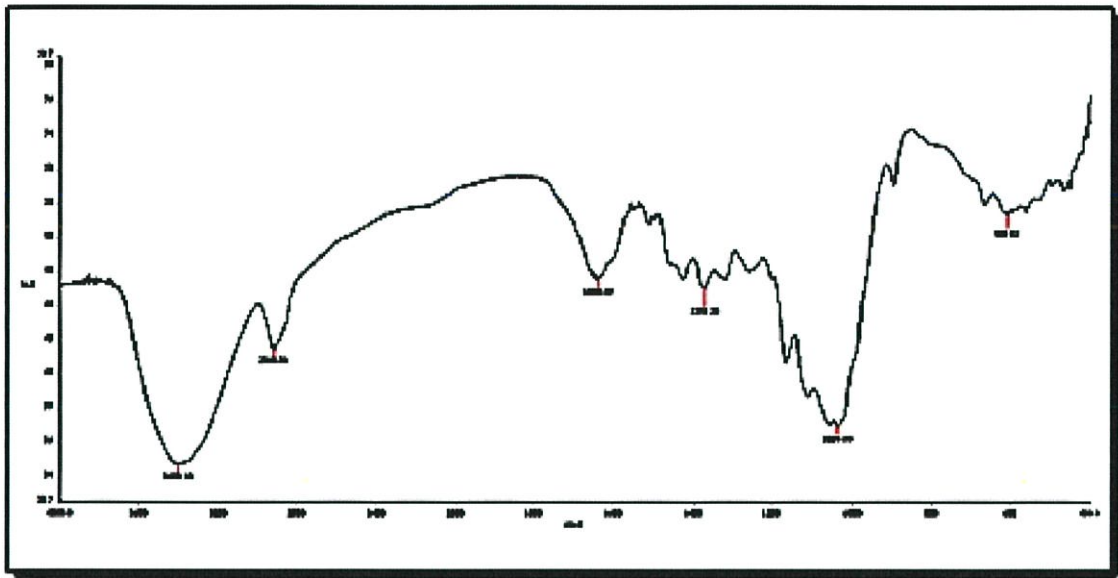
โครงการวิจัยนี้ศึกษาลักษณะและหมู่ฟังก์ชันของสารองค์ประกอบในฟางข้าวที่ไม่ปรับปรุงและปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดซัลฟูริกโดยใช้ FTIR และ SEM จากนั้นทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับตะกั่วและสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ฟางข้าวที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดซัลฟูริก ศึกษาอิทธิพลความเข้มข้นที่จะมีผลต่อการดูดซับและไอโซเทอร์มการดูดซับของฟางข้าว ทำการเปรียบเทียบการดูดซับระหว่างฟางข้าวที่ไม่ปรับปรุงกับฟางข้าวที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดซัลฟูริกและศึกษาประสิทธิภาพการนำฟางข้าวกลับมาใช้ใหม่ ได้ผลการทดลองดังนี้

#### 4.1 การศึกษาการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสารองค์ประกอบในฟางข้าวที่ไม่ได้ปรับปรุงและปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดซัลฟูริกโดย Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR)

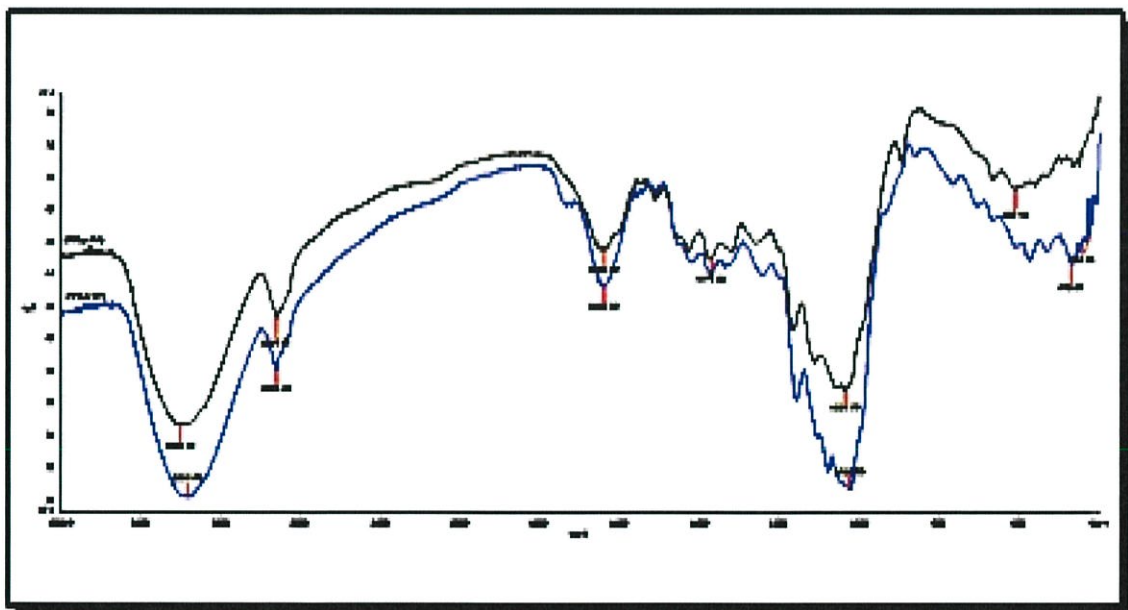
จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสารองค์ประกอบในฟางข้าวที่ไม่ได้ปรับปรุงและปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดซัลฟูริกโดย Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR) ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.1



(A)



(B)



(C)

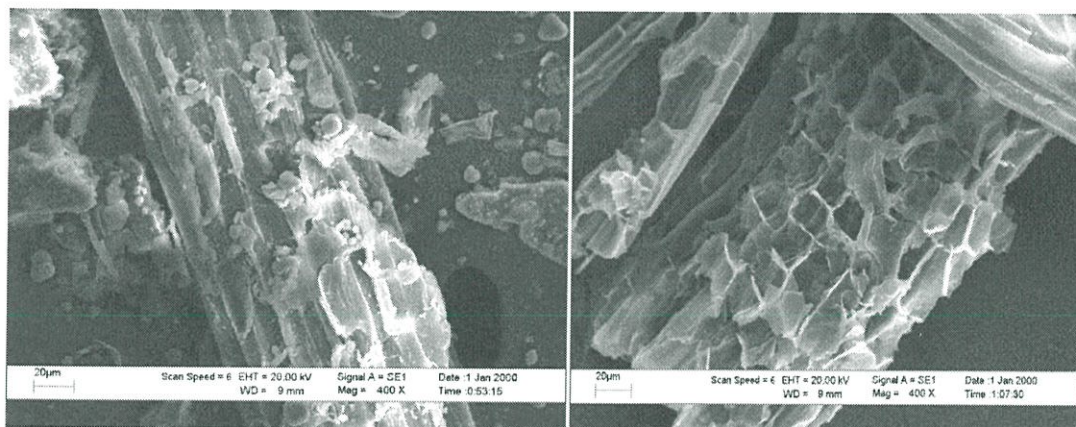
#### รูปที่ 4.1 IR สเปกตรัมของฟางข้าว

- (A) IR สเปกตรัมของฟางข้าวที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ
- (B) IR สเปกตรัมของฟางข้าวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดซัลฟิวริก
- (C) IR สเปกตรัมของฟางข้าวทั้งสองชนิด

จากรูปที่ 4.1 พบว่าลักษณะของฟางข้าวที่ไม่ปรับปรุงและฟางข้าวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดซัลฟิวริกจะให้ IR สเปกตรัมดังรูป (A) และ (B) ตามลำดับ โดย IR สเปกตรัมของฟางข้าวที่ไม่ปรับปรุงและฟางข้าวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดซัลฟิวริกการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นคือมีเปอร์เซ็นต์ T แตกต่างกัน เนื่องจากเกิดการแทนที่ของกรดซัลฟิวริก ( $C_6H_8O_7$ ) ทำให้โครงสร้างของฟางข้าวที่ปรับปรุงด้วยกรดซัลฟิวริกเกิดการเปลี่ยนแปลง แต่โครงสร้างที่เปลี่ยนไปนั้นยังคงแสดงหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบคาร์บอกซิลิก (-COOH) ซึ่งแสดงแถบการยืดตัวของหมู่คาร์บอนิล (C=O) ที่  $1638\text{cm}^{-1}$  และแสดงหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบไฮดรอกซิล (-OH) ซึ่งแสดงแถบการยืดตัวของหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ที่  $3403\text{cm}^{-1}$  ดังนั้น IR สเปกตรัมที่วัดได้ของสารตัวอย่างทั้งสองชนิดจึงขึ้นที่ตำแหน่งเดิม แต่มีการคลุกคลีความถี่ซึ่งแสดงค่าออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์ T ที่แตกต่างกันออกไปตามโครงสร้างของฟางข้าวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดซัลฟิวริก(กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี,2547)

#### 4.2 การศึกษาลักษณะพื้นที่ผิวของฟางข้าวที่ไม่ปรับปรุงและฟางข้าวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดซัลฟิวริกโดย Scanning Electron Microscope (SEM)

จากการศึกษาลักษณะพื้นที่ผิวของฟางข้าวที่ไม่ปรับปรุงและปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดซัลฟิวริกโดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope ที่กำลังขยายเท่ากับ 400 ได้ลักษณะพื้นที่ผิวของฟางข้าวดังรูปที่ 4.2



(A)

(B)

#### รูปที่ 4.2 ภาพภายใต้กล้อง SEM ของฟางข้าว

(A) ลักษณะพื้นที่ผิวของฟางข้าวที่ไม่ได้ปรับปรุงด้วยกรดซัลฟิวริก

(B) ลักษณะพื้นที่ผิวของฟางข้าวที่ปรับปรุงด้วยกรดซัลฟิวริก

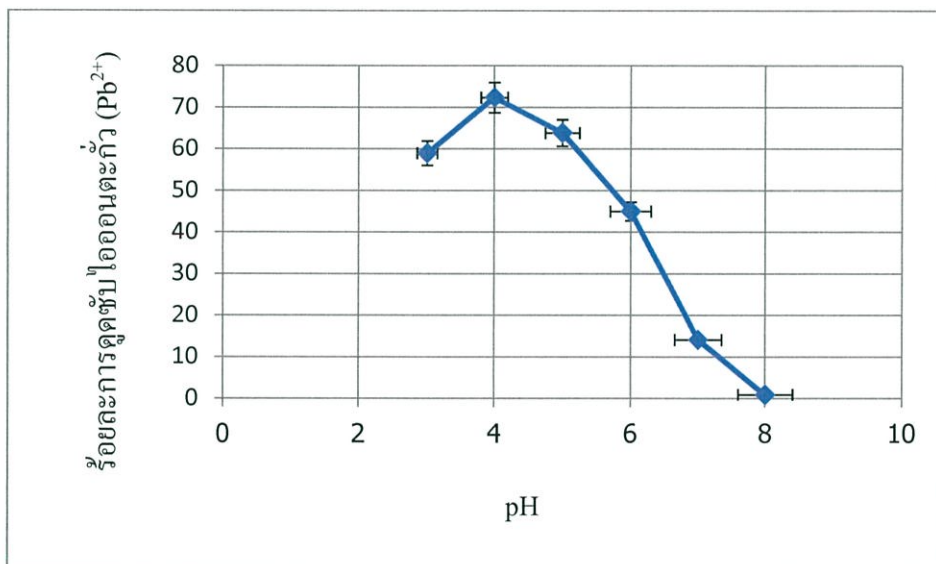
จากรูปที่ 4.2 พบว่า ฟางข้าวที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดซัลฟิวริกจะมีลักษณะพื้นที่ผิวเป็น รูพรุนน้อยกว่าทำให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะได้น้อยกว่าฟางข้าวที่ทำการปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดซัลฟิวริก ซึ่งมีพื้นที่ผิวเป็นลักษณะรูพรุนมากกว่าเนื่องจากได้ทำการสกัดลิกนินและ

เฮมิเซลลูโลสออกด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนทำการปรับปรุงด้วยกรดซิตริก (Puziy, AM., et al., 2004) ทำให้ฟางข้าวที่ผ่านการปรับปรุงด้วยกรดซิตริกมีการดูดซับโลหะได้ดีกว่า

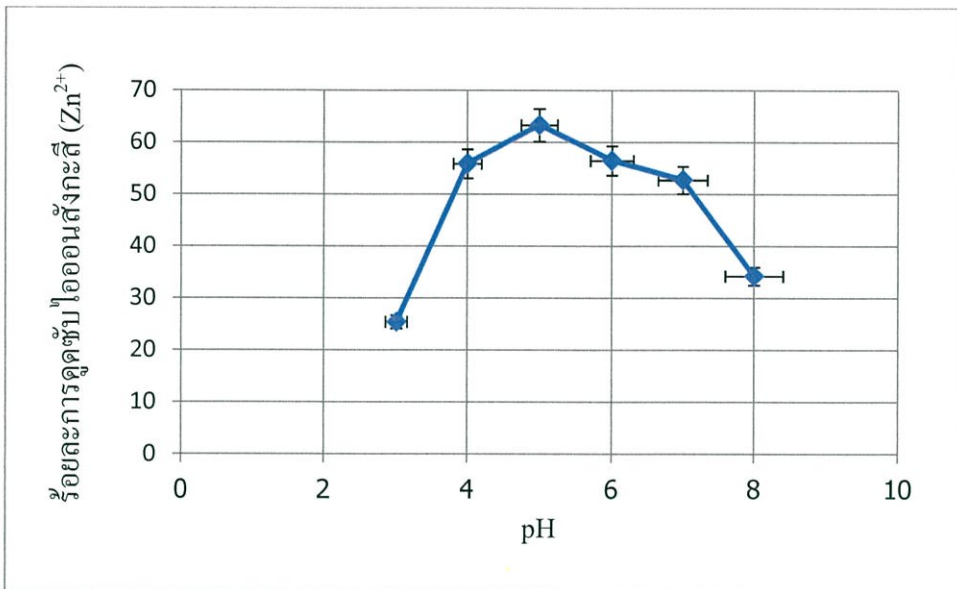
#### 4.3 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับตะกั่วและสังกะสีของฟางข้าวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดซิตริก

##### 4.3.1 การศึกษาหา pH ที่เหมาะสมสำหรับดูดซับตะกั่วและสังกะสี

จากการศึกษาค่า pH ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของตะกั่ว ( $Pb^{2+}$ ) และสังกะสี ( $Zn^{2+}$ ) โดยใช้ น้ำเสี่ยสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นไอออนเท่ากันทั้งสองชนิดคือ 50 mg/L โดยใช้ อัตราส่วนฟางข้าวที่ปรับปรุงด้วยกรดซิตริก 0.5 g ต่อ น้ำเสี่ยสังเคราะห์ 50 ml ทำการแปรผันที่ pH 3, 4, 5, 6, 7 และ 8 ใช้เวลาในการดูดซับน้ำเสี่ยทั้งสองชนิดเป็น 60 นาที ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.3 และ 4.4



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง pH กับร้อยละการดูดซับไอออนตะกั่ว ( $Pb^{2+}$ )



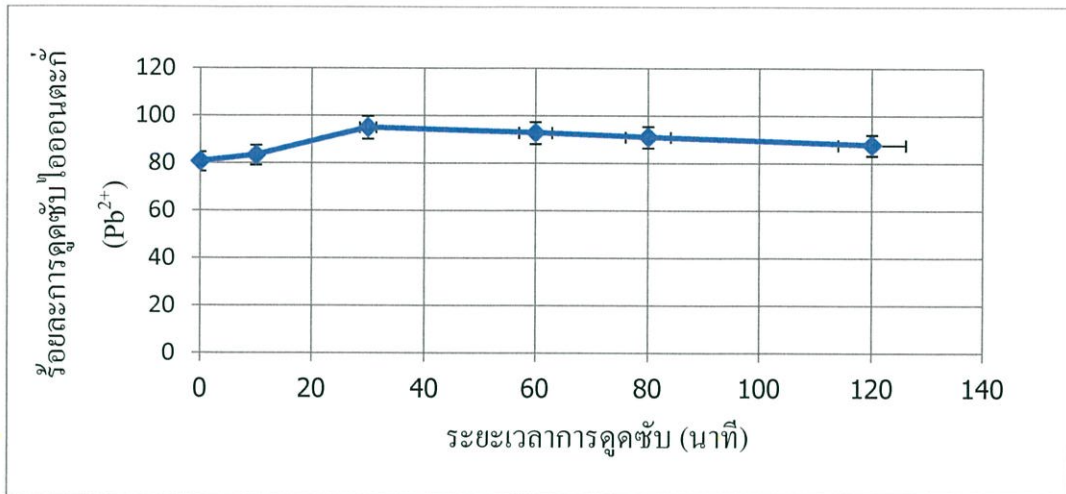
รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง pH กับร้อยละการดูดซับไอออนสังกะสี (Zn<sup>2+</sup>)

จากรูปที่ 4.3 และ 4.4 พบว่าในช่วงแรกๆ เมื่อ pH สูงขึ้นประสิทธิภาพการดูดซับจะเพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 จะเห็นได้ว่าที่ pH ต่ำความสามารถในการดูดซับมีค่าน้อย เพราะเมื่อ pH ลดลงไฮโดรเจนไอออนในระบบจะเพิ่มมากขึ้นไฮโดรเจนไอออนส่วนหนึ่งจะถูกดึงดูดกับหมู่ฟังก์ชันที่เป็นประจุลบของฟางข้าวทำให้ความสามารถในการดูดซับไอออนตะกั่ว (Pb<sup>2+</sup>) และไอออนสังกะสี (Zn<sup>2+</sup>) ในน้ำเสียสังเคราะห์ทั้งสองชนิดลดลง เมื่อ pH เพิ่มสูงขึ้น H<sup>+</sup> จะลดลงทำให้ไอออนของตะกั่วและไอออนของสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์สองชนิดสามารถเข้าไปยึดเกาะบนพื้นที่ผิวของฟางข้าวได้มากขึ้น (E.Pehlivan.,2012) จึงมีผลทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้นมากที่สุดที่ pH เท่ากับ 4 ในการกำจัดไอออนของตะกั่วและมากที่สุดที่ pH เท่ากับ 5 ในการกำจัดไอออนของสังกะสีและพบว่าการกำจัดไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์ทั้งสองชนิด ที่ pH มากกว่า 5 การดูดซับจะสูงขึ้นเรื่อยๆ แต่เมื่อนำมาเทียบกับผลของชุดควบคุม (blank) จะเห็นว่ามีการตกตะกอนร่วมของสารประกอบหมู่ OH<sup>-</sup> จึงทำให้ค่าการดูดซับเป็นดังรูปที่ 4.3 และ 4.4 ค่า pH มากกว่า 5 ขึ้นไปจึงไม่เหมาะสมในการดูดซับดังนั้น pH 4 จึงเป็น pH ที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนของตะกั่ว (Pb<sup>2+</sup>) ประสิทธิภาพการดูดซับเท่ากับร้อยละ 72.52 และ pH 5 เป็น pH ที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนของสังกะสี (Zn<sup>2+</sup>) ให้ประสิทธิภาพการดูดซับเท่ากับร้อยละ 63.28

#### 4.3.2 การศึกษาหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับตะกั่วและสังกะสี

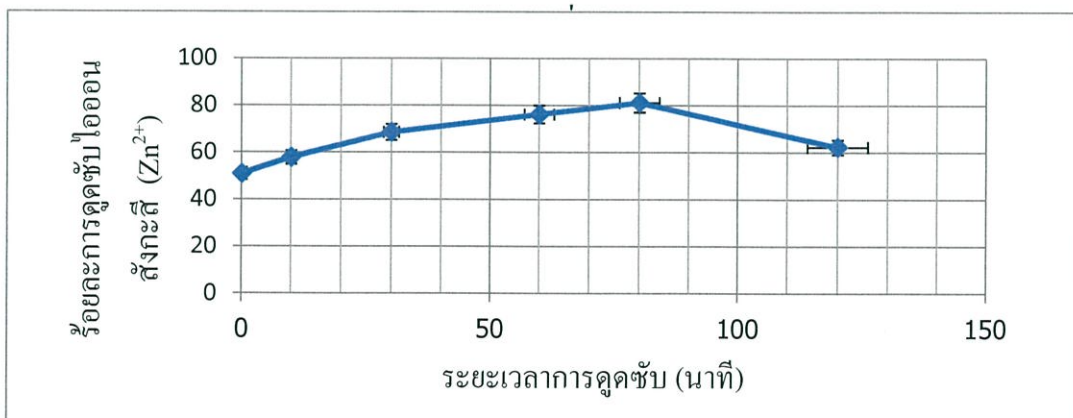
จากการศึกษาระยะเวลาในการดูดซับที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของตะกั่ว (Pb<sup>2+</sup>) และสังกะสี (Zn<sup>2+</sup>) โดยศึกษาจากตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์สองชนิดที่ความเข้มข้นไอออนเท่ากับ 50 mg/L โดยใช้อัตราส่วนฟางข้าวที่ปรับปรุงด้วยกรดซิตริก 0.5 g ต่อน้ำเสียสังเคราะห์ 50 ml ทำการปรับ pH เท่ากับ 4 ในการดูดซับไอออนของตะกั่วและปรับ pH เท่ากับ 5 ในการดูดซับ

ไอออนของสังกะสี ซึ่งเป็น pH ที่เหมาะสมตามลำดับ จากนั้นแปรผันระยะเวลาในการดูดซับเป็น 0, 10, 30, 60, 80 และ 120 นาที ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.5 และ 4.6



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการดูดซับกับร้อยละการดูดซับไอออนตะกั่ว (Pb<sup>2+</sup>)

จากรูปที่ 4.5 เมื่อเพิ่มระยะเวลาสัมผัสจาก 0 นาทีจนถึง 30 นาที การดูดซับของตะกั่วจะสูงขึ้นเรื่อยๆ อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และที่เวลา 30 นาทีเป็นระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสม เนื่องจากให้ประสิทธิภาพการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีไอออนตะกั่วสูงถึงร้อยละ 92.58 เมื่อเพิ่มเวลาจาก 30 นาทีไปถึง 120 นาที การดูดซับจะลดลงเรื่อยๆ เพราะ เมื่อเวลาผ่านไปพื้นที่ผิวในการดูดซับจะลดลง เนื่องจากมีไอออนของโลหะเข้าไปเกาะยึดอยู่ (Thevannan., 2012) อีกทั้งเกิดการคายซับมากขึ้นเมื่อใช้เวลานานๆ



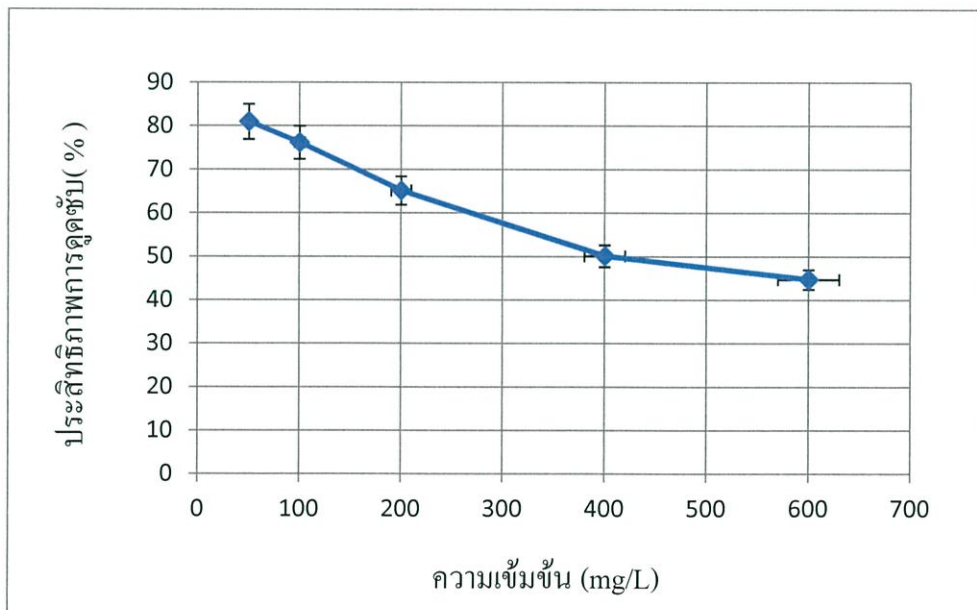
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการดูดซับกับร้อยละการดูดซับไอออนสังกะสี (Zn<sup>2+</sup>)

จากรูปที่ 4.6 เมื่อเพิ่มระยะเวลาสัมผัสจาก 0 นาทีจนถึง 80 นาที การดูดซับของสังกะสีจะสูงขึ้นเรื่อยๆอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และที่เวลา 80 นาทีเป็นระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสม เนื่องจากให้ประสิทธิภาพการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีไอออนสังกะสีสูงถึงร้อยละ 79.46 และเมื่อเพิ่มเวลาจาก 80 นาทีไปถึง 120 นาที ความสามารถในการดูดซับของฟางข้าวจะลดลงเรื่อยๆซึ่งจะสอดคล้องกับผลการศึกษากำจัดตะกั่วและสังกะสีออกจากน้ำเสียโดยใช้ฟางข้าวบาร์เลย์ในการดูดซับ (E. Pehlivan.,2009)

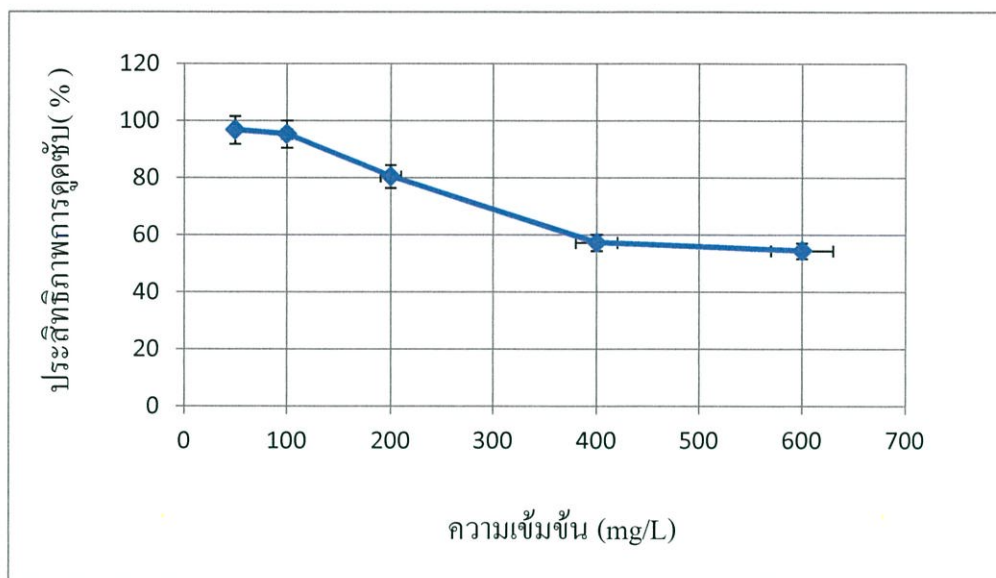
จากการทดลองนี้สามารถสรุปได้ว่า ระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนของตะกั่วจะอยู่ที่ 30 นาที เนื่องจากให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดร้อยละ 92.58 และระยะเวลาในการดูดซับสังกะสีจะอยู่ที่ 80 นาที ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดร้อยละ 79.46

#### 4.4 การศึกษาอิทธิพลความเข้มข้นของตะกั่วและสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีผลต่อการดูดซับ

จากการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วและสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 0, 50, 100, 200, 400 และ 600 mg/L ที่ pH เท่ากับ 4 ใช้ระยะเวลาในการดูดซับ 30 นาที สำหรับตัวอย่างของตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ และที่ pH เท่ากับ 5 ใช้ระยะเวลาในการดูดซับ 80 นาที สำหรับตัวอย่างของสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.7 และ 4.8ตามลำดับ



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตะกั่วกับประสิทธิภาพการดูดซับ

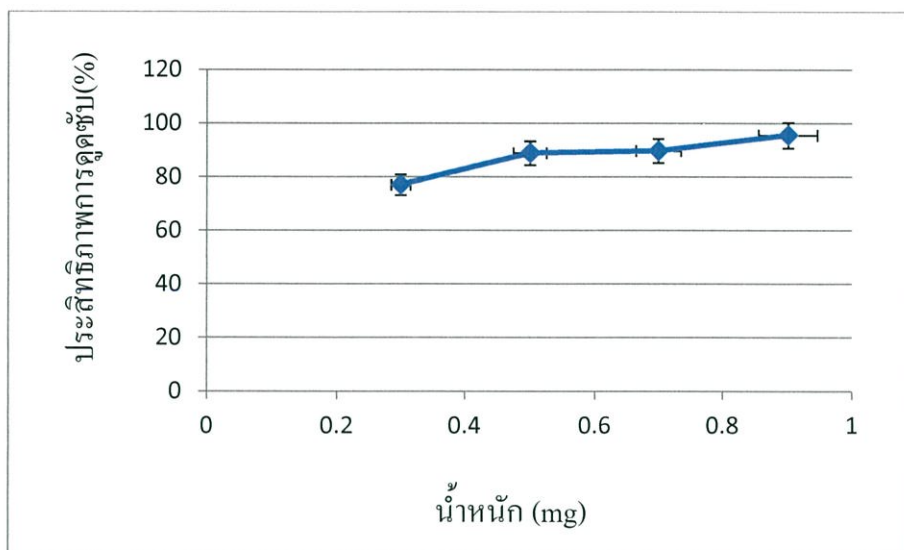


**รูปที่ 4.8** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสังกะสีกับประสิทธิภาพการดูดซับ

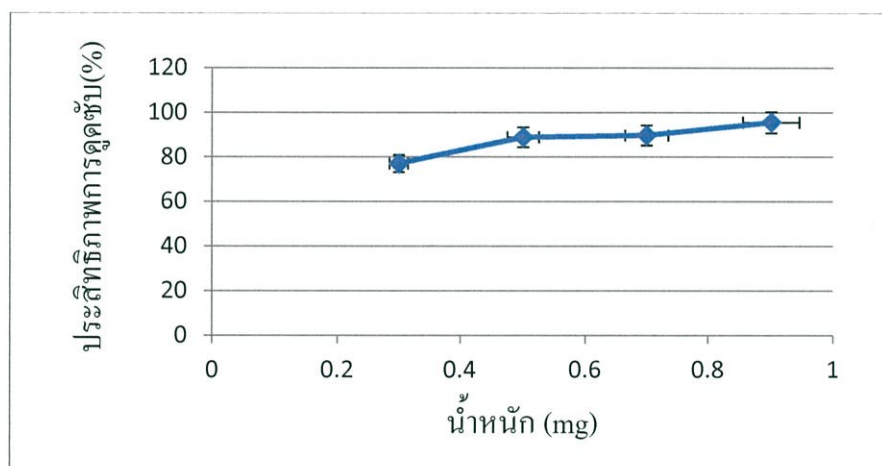
จากการทดลองที่ได้ดังรูปที่ 4.7 และ 4.8 พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นจาก 50 ถึง 400 mg/L ประสิทธิภาพการดูดซับลดลงค่อนข้างมากเนื่องจากระยะแรกความเข้มข้นของสารละลายต่ำและมีพื้นที่ผิวการดูดซับอยู่มากทำให้เกิดการดูดซับได้ง่ายแต่เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มสูงขึ้นพื้นที่ผิวการดูดซับมีจำกัดทำให้เกิดการดูดซับได้ยากขึ้นเรื่อยๆและเมื่อเพิ่มความเข้มข้นจาก 400 ถึง 600 mg/L ประสิทธิภาพการดูดซับลดลงเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากความเข้มข้นของไอออนเพิ่มมากขึ้นจะมีผลต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์ ทำให้ไอออนเข้าไปทำปฏิกิริยากับพื้นผิวของฟางข้าวได้ยาก จึงทำให้เกิดการขัดขวางการเข้าทำปฏิกิริยากับพื้นผิวของฟางข้าวและมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ (อรทัย,2554) จึงเลือกความเข้มข้นของไอออนเท่ากับ 50 mg/L ของตัวอย่างน้ำเสียทั้งสองชนิดในการทดลองต่อไป

#### 4.5 การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับตะกั่วและสังกะสีของฟางข้าวที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดซิตริก

เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับตะกั่วและสังกะสีแล้วจะทำการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับตะกั่วและสังกะสีของฟางข้าวแบบ Langmuir Isotherm และ Freundlich Isotherm โดยทำการแปรผันน้ำหนักของฟางข้าวเป็น 0.3, 0.5, 0.7 และ 0.9 กรัม ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับของตะกั่วและสังกะสีในน้ำเสียความเข้มข้นเท่ากันคือ 50 mg/L โดยใช้ pH เท่ากับ 4 ระยะเวลาในการดูดซับ 30 นาที สำหรับการดูดซับตะกั่ว และใช้ pH เท่ากับ 5 ระยะเวลาในการดูดซับ 80 นาที สำหรับการดูดซับสังกะสี ได้ผลการทดลองแสดงรูปที่ 4.9 และ 4.10



รูปที่ 4.9 กราฟผลการใช้ฟางข้าวที่มีน้ำหนักต่างกันในการดูดซับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์



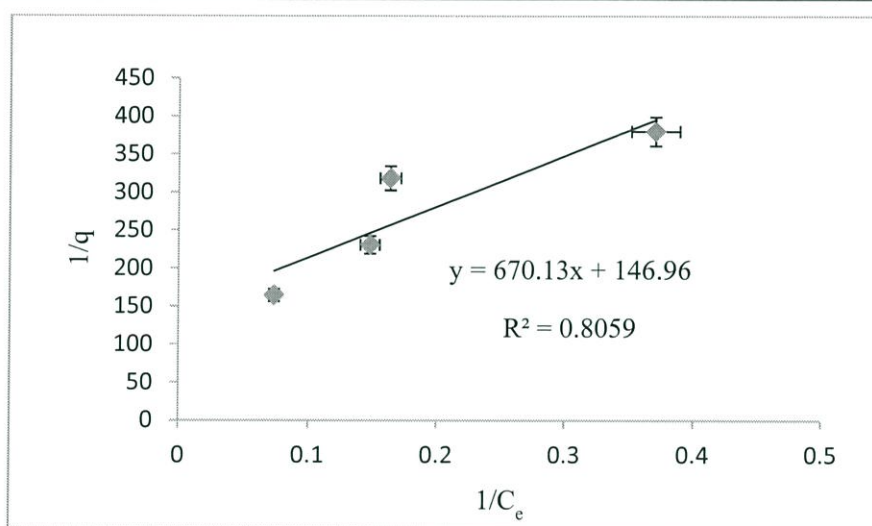
รูปที่ 4.10 กราฟผลการใช้ฟางข้าวที่มีน้ำหนักต่างกันในการดูดซับสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์

จากผลการทดลองที่ได้ดังรูปที่ 4.9 และ 4.10 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณฟางข้าวขึ้นเรื่อยๆ จาก 0.3 ถึง 0.9 mg ประสิทธิภาพในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และเมื่อใช้ฟางข้าว 0.9 mg ประสิทธิภาพการดูดซับของตะกั่วและสังกะสีจะสูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 95.5 และ 83.46 ตามลำดับ เนื่องจากปริมาณฟางข้าวมากขึ้นทำให้มีพื้นที่ผิวของตัวดูดซับในการดูดซับตะกั่วและสังกะสีเพิ่มขึ้นด้วย

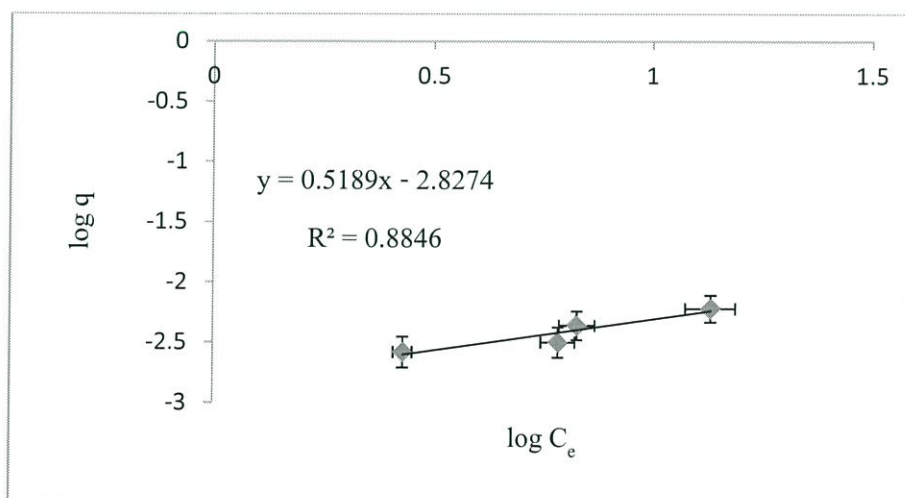
จากนั้นนำผลที่ได้มาทำการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับของตะกั่วและสังกะสีของฟางข้าวแบบ Langmuir Isotherm และ Freundlich Isotherm ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.1, 4.2 และรูปที่ 4.11, 4.12, 4.13 และ 4.14

ตารางที่ 4.1 ผลการศึกษาไอโซเทอร์มของตะกั่ว

| น้ำหนักของฟางข้าว(g) | ปริมาตรที่ใช้(V) | ความเข้มข้นเริ่มต้น ( $C_0$ ) | ความเข้มข้นหลังจากการดูดซับ( $C_e$ ) | q                     | $1/C_e$ | 1/q    | $\log C_e$ | $\log q$ |
|----------------------|------------------|-------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|---------|--------|------------|----------|
| 0.3                  | 50               | 50                            | 13.60                                | $6.07 \times 10^{-3}$ | 0.0735  | 164.74 | 1.1335     | -2.22    |
| 0.5                  | 50               | 50                            | 6.75                                 | $4.33 \times 10^{-3}$ | 0.1481  | 230.95 | 0.8293     | -2.36    |
| 0.7                  | 50               | 50                            | 6.10                                 | $3.14 \times 10^{-3}$ | 0.1639  | 318.47 | 0.7853     | -2.50    |
| 0.9                  | 50               | 50                            | 2.70                                 | $2.63 \times 10^{-3}$ | 0.3704  | 380.23 | 0.4314     | -2.58    |



รูปที่ 4.11 ผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับตะกั่วของฟางข้าวแบบ Langmuir Isotherm

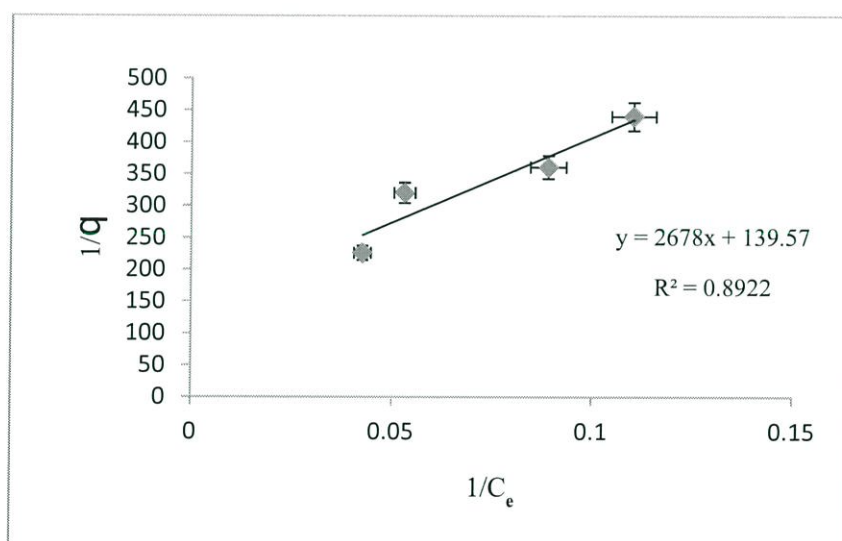


รูปที่ 4.12 ผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับตะกั่วของฟางข้าวแบบ Freundlich Isotherm

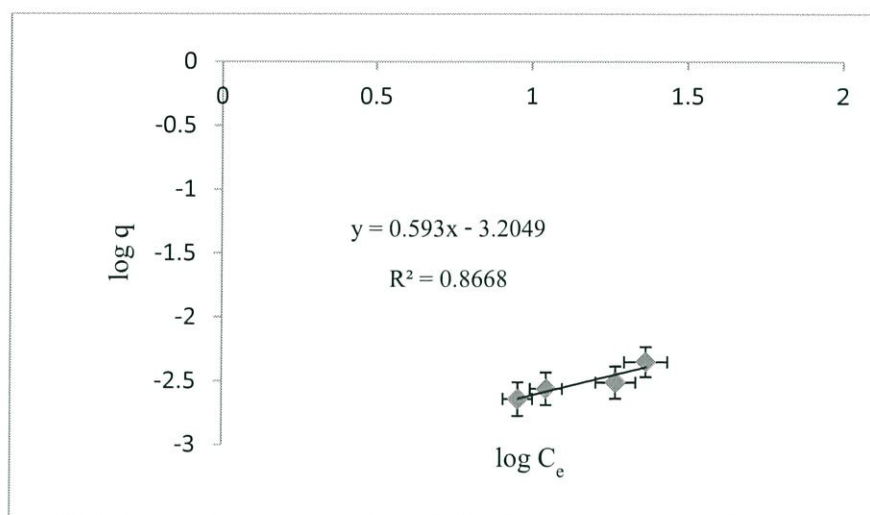
จากผลการศึกษาข้อมูลในตารางที่ 4.1 และสมมติฐานแบบจำลองของการดูดซับตะกั่วแสดงให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) ของแบบจำลองการดูดซับตามสมการฟรุนดิช มีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่าแบบจำลองการดูดซับตามสมการแลงเมียร์ แสดงว่าไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ไม่เหมาะสมในการอธิบายข้อมูลการดูดซับตะกั่วของฟางข้าว แต่พฤติกรรมการดูดซับตะกั่วของฟางข้าวสามารถอธิบายได้ดีด้วยแบบจำลองของฟรุนดิช ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มสอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับหลายชั้น (multilayer sorption) ของฟรุนดิช

ตารางที่ 4.2 ผลการศึกษาไอโซเทอร์มของสังกะสี

| น้ำหนักของฟางข้าว(g) | ปริมาตรที่ใช้(V) | ความเข้มข้นเริ่มต้น ( $C_0$ ) | ความเข้มข้นหลังจากการดูดซับ( $C_e$ ) | (q)                   | $1/C_e$ | $1/q$  | $\log C_e$ | $\log q$ |
|----------------------|------------------|-------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|---------|--------|------------|----------|
| 0.3                  | 50               | 50                            | 23.5                                 | $4.42 \times 10^{-3}$ | 0.0426  | 226.24 | 1.3711     | -2.35    |
| 0.5                  | 50               | 50                            | 18.83                                | $3.13 \times 10^{-3}$ | 0.0531  | 320.51 | 1.2749     | -2.51    |
| 0.7                  | 50               | 50                            | 11.23                                | $2.77 \times 10^{-3}$ | 0.0890  | 361.01 | 1.0504     | -2.56    |
| 0.9                  | 50               | 50                            | 9.07                                 | $2.27 \times 10^{-3}$ | 0.1103  | 440.53 | 0.9576     | -2.64    |



รูปที่ 4.13 ผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับสังกะสีของฟางข้าวแบบ Langmuir Isotherm



รูปที่ 4.14 ผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับสังกะสีของฟางข้าวแบบ Freundlich Isotherm

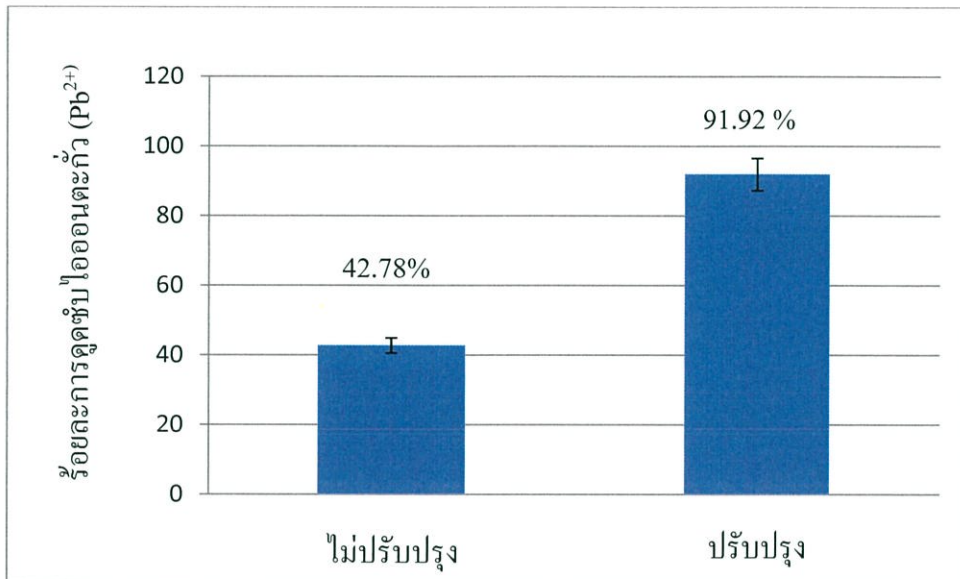
จากผลการศึกษาข้อมูลในตารางที่ 4.2 และสมมติฐานแบบจำลองของการดูดซับสังกะสี แสดงให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) ของแบบจำลองการดูดซับตามสมการแลงเมียร์ มีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่าแบบจำลองการดูดซับตามสมการฟลินดิช แสดงว่าไอโซเทอร์มแบบฟลินดิชไม่เหมาะสมในการอธิบายข้อมูลการดูดซับสังกะสีของฟางข้าว แต่พฤติกรรมการดูดซับสังกะสีของฟางข้าวสามารถอธิบายได้ดีด้วยแบบจำลองของแลงเมียร์ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มสอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer)

จากรูปที่ 4.12 แสดงสมการเส้นตรง  $y = 0.5189x - 2.8274$  ซึ่งมีค่าคงที่  $n$  เท่ากับ 0.5189 และค่า  $1/n$  เท่ากับ 1.9272 โดย  $1/n$  บ่งบอกถึงจำนวนชั้นของการดูดซับของความเป็นพื้นผิวหลายชั้น หากแสดงค่าเข้าใกล้ 0 มากเท่าไร แสดงความเป็นพื้นผิวหลายชั้นมากเท่านั้น และสามารถคำนวณหาค่าคงที่  $K_d$  ซึ่งแสดงถึงปริมาณความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับ มีค่าเท่ากับ  $1.49 \times 10^{-3}$  และจากรูปที่ 4.14 แสดงสมการเส้นตรง  $y = 2678x + 139.57$  ซึ่งมีค่าคงที่  $1/q_m$  เท่ากับ 139.57 และค่า  $q_m$  เท่ากับ  $7.16 \times 10^{-3}$  โดย  $q_m$  บ่งบอกถึงความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สามารถดูดซับได้สูงสุดต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ และสามารถคำนวณหาค่าคงที่  $K_d$  ซึ่งแสดงถึงปริมาณความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับ มีค่าเท่ากับ  $2.68 \times 10^{-6}$

#### 4.6 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับของฟางข้าวที่ไม่ปรับปรุงและปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดซิตริกในน้ำเสียสังเคราะห์สองชนิด

##### 4.6.1 เปรียบเทียบการดูดซับตะกั่วของฟางข้าวที่ไม่ปรับปรุงและปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดซิตริก

จากการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 50 mg/L ที่ pH เท่ากับ 4 ใช้ระยะเวลาในการดูดซับ 30 นาที ของฟางข้าวที่ไม่ปรับปรุงและปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดซิตริก ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.15

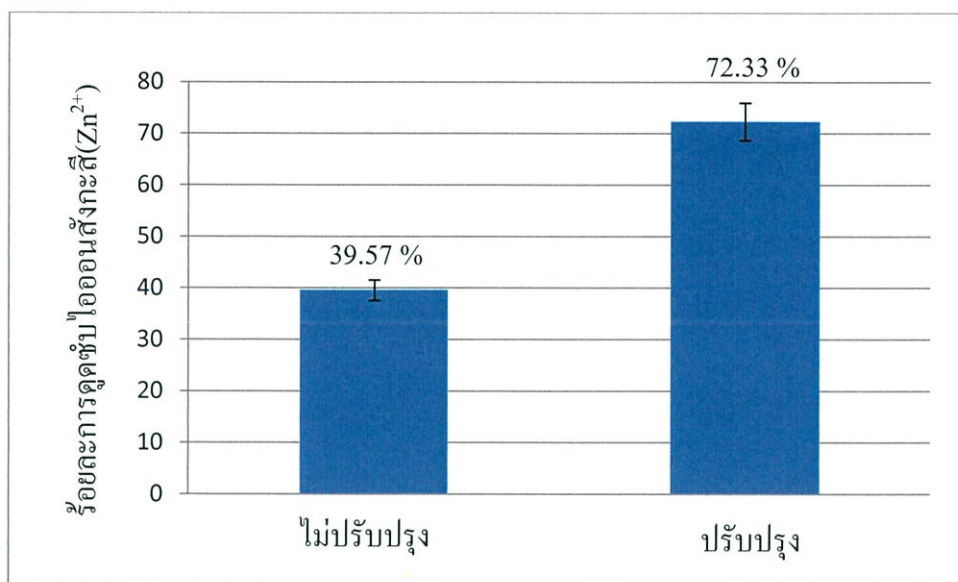


รูปที่ 4.15 ร้อยละการดูดซับไอออนตะกั่ว (Pb<sup>2+</sup>) ของฟางข้าวที่ไม่ปรับปรุงและปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดซิตริก

จากรูปที่ 4.15 พบว่าฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และกรดซิตริกจะมีประสิทธิภาพในการดูดซับเพียงร้อยละ 42.78 เนื่องจากลักษณะพื้นฐานของฟางข้าวที่ไม่ปรับปรุงจะมีพื้นที่ผิวเป็นรูพรุนน้อยทำให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับต่ำ หลังจากทำการสกัดฟางข้าวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 โมลาร์และปรับปรุงด้วยกรดซิตริกจะให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดถึงร้อยละ 91.92 เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นภายในโครงสร้างของเซลลูโลสโดยกรดซิตริกมีผลในการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับของฟางข้าว เพราะการปรับสภาพด้วยกรดซิตริกเป็นการปรับปรุงโครงสร้างของฟางข้าวเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนัก ซึ่งกรดซิตริกจะเข้าไปเติมหมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl Group: -COOH) ให้กับโครงสร้างของฟางข้าว ทำให้ฟางข้าวมีประสิทธิภาพในการจับกับไอออนตะกั่วได้มากขึ้น (ศศิธร, 2551)

#### 4.6.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสังกะสีของฟางข้าวที่ไม่ปรับปรุงและปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดซิตริก

จากการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 50 mg/L ที่ pH เท่ากับ 5 ใช้ระยะเวลาในการดูดซับ 80 นาที ของฟางข้าวที่ไม่ปรับปรุงและปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดซิตริกได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.16



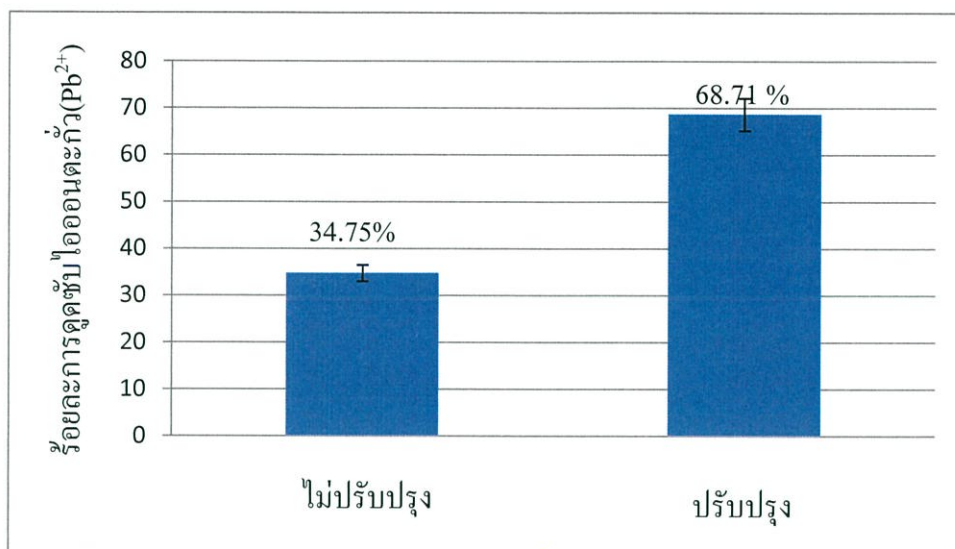
**รูปที่ 4.16** ร้อยละการดูดซับไอออนสังกะสี(Zn<sup>2+</sup>) ของฟางข้าวที่ไม่ปรับปรุงและปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดซิตริก

จากรูปที่ 4.16 พบว่า ฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และกรดซิตริกจะมีประสิทธิภาพการดูดซับเพียงร้อยละ 39.57 และหลังจากทำการสกัดฟางข้าวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 โมลาร์ และทำการปรับปรุงด้วยกรดซิตริกจะให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงขึ้นถึงร้อยละ 72.33 หลักการที่เกิดขึ้นจะเหมือนกับผลการทดลองที่ 4.6.1

#### 4.7 การศึกษาประสิทธิภาพการนำฟางข้าวที่คายซับแล้วกลับมาใช้ใหม่

##### 4.7.1 การศึกษาประสิทธิภาพการนำฟางข้าวที่คายซับแล้วกลับมาดูดซับตะกั่ว

จากการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 50 mg/L ที่ pH เท่ากับ 4 ใช้ระยะเวลาในการดูดซับ 30 นาที ของฟางข้าวที่ไม่ปรับปรุงและปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดซิตริกหลังจากการดูดซับครั้งที่ 1 นำฟางข้าวไปคายซับด้วย HCl แล้วนำฟางข้าวไปดูดซับอีกครั้ง ได้ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.17

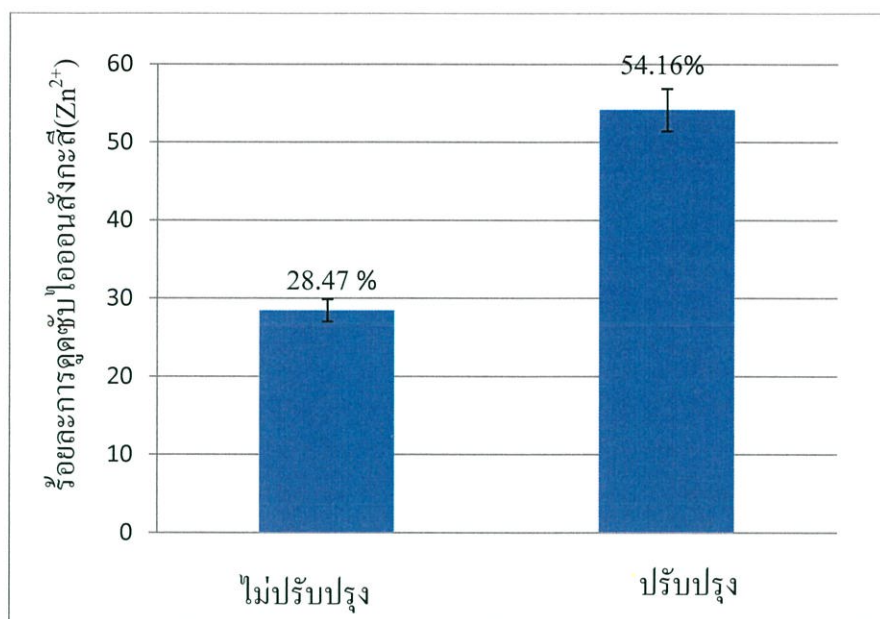


**รูปที่ 4.17** ประสิทธิภาพการนำวัสดุดูดซับกลับมาใช้ใหม่ระหว่างวัสดุที่เป็นฟางข้าวที่ไม่ปรับปรุง และฟางข้าวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดซิตริก

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.17 แสดงให้เห็นว่าฟางข้าวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดซิตริกมี ประสิทธิภาพการดูดซับเปลี่ยนแปลงจากร้อยละ 91.92 (ผลการทดลองอยู่ในรูปที่ 4.15) เป็นร้อยละ 68.71 ซึ่งลดลงร้อยละ 23.21 และฟางข้าวที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพมีประสิทธิภาพการดูดซับ เปลี่ยนแปลงจากร้อยละ 42.78 (ผลการทดลองอยู่ในรูปที่ 4.15) เป็นร้อยละ 34.75 ลดลงร้อยละ 8.03 ดังนั้นสามารถนำฟางข้าวกลับมาใช้ประโยชน์ได้อีกแต่ประสิทธิภาพการดูดซับจะลดลง

#### 4.7.2 การศึกษาประสิทธิภาพการนำฟางข้าวที่คายซับแล้วกลับมาดูดซับสังกะสี

จากการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 50 mg/L ที่ pH เท่ากับ 5 ใช้ระยะเวลาในการดูดซับ 80 นาที ของฟางข้าวที่ไม่ปรับปรุงและปรับปรุงคุณภาพด้วย กรดซิตริกหลังจากการดูดซับครั้งที่ 1 นำฟางข้าวไปคายซับด้วย HCl แล้วนำฟางข้าวไปดูดซับอีกครั้ง ได้ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 ประสิทธิภาพการนำวัสดุคูดซบกลับมาใช้ใหม่ระหว่างวัสดุที่เป็นฟางข้าวที่ไม่ปรับปรุง และฟางข้าวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดซิตริก

จากการทดลองในรูปที่ 4.18 แสดงให้เห็นว่าฟางข้าวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดซิตริกมี ประสิทธิภาพการดูดซับเปลี่ยนแปลงจากร้อยละ 72.33 (ผลการทดลองอยู่ในรูปที่ 4.16) เป็นร้อยละ 54.16 ซึ่งลดลงร้อยละ 18.17 และฟางข้าวที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพมีประสิทธิภาพการดูดซับเปลี่ยนแปลง จากร้อยละ 39.57 (ผลการทดลองอยู่ในรูปที่ 4.16) เป็นร้อยละ 28.47 ลดลงร้อยละ 11.10 ดังนั้น สามารถนำฟางข้าวกลับมาใช้ประโยชน์ได้อีกแต่ประสิทธิภาพการดูดซับจะลดลง

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

โครงการพิเศษนี้ศึกษาความสามารถในการบำบัดตะกั่วและสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยวิธีการดูดซับโดยใช้ฟางข้าวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และกรดซิตริกทำการศึกษาลักษณะพื้นฐานของฟางข้าวทั้งก่อนและหลังทำการปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดซิตริกโดย SEM และวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันขององค์ประกอบในฟางข้าวด้วย FTIR รวมถึงการศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการดูดซับ คือ ค่าความเป็น กรด – ด่าง (pH) ระยะเวลาในการดูดซับเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับศึกษาอิทธิพลของปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วและสังกะสี ปริมาณตัวดูดซับที่มีผลต่อการดูดซับการเปรียบเทียบฟางข้าวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดซิตริกและไม่ปรับปรุงคุณภาพ รวมทั้งศึกษาการนำฟางข้าวกลับมาใช้ใหม่ รวมไปถึงไอโซเทอร์มการดูดซับของฟางข้าวที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยสารเคมี โดยผลการวิจัยสรุปได้ดังนี้

1. จากการศึกษาด้วย FTIR สเปกตรัมของวัสดุดูดซับทั้งที่ปรับปรุงและไม่ปรับปรุงคุณภาพ มีลักษณะที่คล้ายกัน ต่างกันเฉพาะ %T โดยเมื่อปรับปรุงคุณภาพแล้วค่า %T จะสูงขึ้น
2. จากการศึกษาลักษณะพื้นที่ผิวของฟางข้าวโดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่า ฟางข้าวที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดซิตริกจะมีลักษณะพื้นที่ผิวเป็นรูพรุนน้อยกว่า
3. จากการศึกษาหาความเป็น กรด – ด่าง (pH) ที่เหมาะสมต่อการกำจัดโลหะตะกั่วและสังกะสีออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยฟางข้าวที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ พบว่า ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีโลหะตะกั่วที่ pH = 4 จะทำให้ฟางข้าวสามารถดูดซับโลหะตะกั่ว( $Pb^{2+}$ ) ได้ดีที่สุดและ pH 5 เป็น pH ที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนของสังกะสี( $Zn^{2+}$ )
4. จากการศึกษาระยะเวลาการดูดซับที่เหมาะสมต่อการกำจัดโลหะตะกั่วและสังกะสีออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยฟางข้าวที่ผ่านการปรับปรุง พบว่าจากการทดลองนี้ระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนของตะกั่วจะอยู่ที่ 30 นาที และระยะเวลาในการดูดซับสังกะสีจะอยู่ที่ 80 นาที
5. จากการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของตะกั่วและสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีผลต่อการดูดซับ พบว่า เมื่อปริมาณความเข้มข้นของโลหะตะกั่วและสังกะสีเพิ่มมากขึ้นประสิทธิภาพการดูดซับจะลดลง
6. ฟางข้าวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดซิตริก สามารถดูดซับตะกั่วได้สูงสุดถึงร้อยละ 91.92 และบำบัดสังกะสีได้สูงสุดถึงร้อยละ 72.33 ซึ่งฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพให้

ประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วเพียงร้อยละ 42.78 และให้ประสิทธิภาพการดูดซับสังกะสีเพียงร้อยละ 39.57

7. จากการศึกษาการนำฟางข้าวที่คายซับแล้วกลับมาใช้ใหม่ พบว่า ฟางข้าวที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพแล้วสามารถดูดซับตะกั่วและสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ร้อยละ 68.71 และ 54.16 ตามลำดับ และฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพสามารถดูดซับตะกั่วและสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ร้อยละ 34.75 และ 28.47 ตามลำดับ

8. จากการศึกษาอิทธิพลของปริมาณของตัวดูดซับที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับพบว่า เมื่อปริมาณของตัวดูดซับเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วและสังกะสีสูงขึ้น

9. การดูดซับโลหะตะกั่วและสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยฟางข้าวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดซัลฟิวริกมีความสอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิชและแลงเมียร์สำหรับตะกั่วและสังกะสีตามลำดับได้ค่า  $K_d$  เท่ากับ  $1.49 \times 10^{-3}$ ,  $2.68 \times 10^{-6}$  สำหรับตะกั่วและสังกะสีตามลำดับและค่า  $n$  เท่ากับ 0.581 สำหรับตะกั่วและค่า  $q_m$  เท่ากับ  $7.16 \times 10^{-3}$  สำหรับสังกะสี

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรนำไปประยุกต์ใช้กับน้ำเสียอุตสาหกรรมจริงเพื่อศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัด
2. ควรทำการศึกษา นำฟางข้าวไปทำการดูดซับหรือนำไปบำบัดกับโลหะหนักชนิดอื่น
3. ควรศึกษาการปรับปรุงตัวดูดซับด้วยสารอื่น
4. ควรศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ ในการนำวัสดุที่ดูดซับแล้วมาคายซับ แล้วนำกลับมาใช้ใหม่

## เอกสารอ้างอิง

- จรัญ ประจันบาล. 2551. องค์ประกอบทางเคมีและอัตราการย่อยได้ของอินทรีย์วัตถุ. วิทยานิพนธ์  
ปริญญาโท,มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- ณรงค์ศักดิ์และคณะ. 21 ธันวาคม 2556. โรคพิษตะกั่ว (LeadPoisoning).  
<http://www.mechanismart.blogspot.com>.
- दनัย นามโนรา. 29 สิงหาคม 2547. เทคโนโลยีวิทยาศาสตร์คลื่นลูกใหม่กับสังคมไทย. วารสาร  
สงพ.วิจัย &พัฒนา. ปีที่ 14 ฉบับที่ 69 กรกฎาคม-กันยายน 2547.
- นพวรรณ วงศ์สุภาพ. 12 มกราคม 2557. ฟางข้าว.<http://www.vcharkarn.com>.
- ปริญรัชต์ ธนวิฑูรย์ภักดี. 12 มกราคม 2557. โลหะหนัก.<http://www.inmu.mahidol.ac.th>.
- พันธ์ทิพย์ ธรสาธิตกุล (มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง). 20 มกราคม 2557. Atomic Absorption  
Spectrophotometer(AAS).<http://www.mfu.ac.th>.
- พอลตา ศรีสุวรรณศรี. 21 ธันวาคม 2556. การบำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์.  
<http://www.gotoknow.org>.
- วิกิพีเดีย. 21 ธันวาคม 2556. ตะกั่ว. <http://www.th.wikipedia.org>.
- วิทยาลัยนาโน พระจอมเกล้าลาดกระบัง. 21 ธันวาคม 2556. ScanningEletron Microscopy (SEM).  
<http://www.nano.kmitl.ac.th>.
- วลัยพร ตั้งทางธรรม. 21 ธันวาคม 2556. ความเป็นพิษของสังกะสีต่อร่างกายมนุษย์.  
<http://www.chemtrack.org>.
- ศศิธร ศาสตร์มูล. 21 ธันวาคม 2556. การบำบัดน้ำเสีย. <http://www.vcharkarn.com>.
- สำนักงานกองทุนสนับสนุนการสร้างเสริมสุขภาพ. 21 ธันวาคม 2556. พิษของตะกั่ว.  
<http://www.searchgol.com>.
- สุดเขต สายะโสภณ. 21 ธันวาคม 2556. โลหะหนัก:ตัวการปัญหาสิ่งแวดล้อม.  
<http://www.chemtrack.org>.
- หฤทัย มานะวนิชย์. 21 ธันวาคม 2556. บ่อบำบัดน้ำเสีย. <http://www.tapakorn.wordpress.com>.
- อมร เพชรสม (มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา). หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ. ชวน  
พิมพ์. 2539. หน้า 108-192
- อังคณา อมรศรี. 2552.โครงสร้างและคุณสมบัติของเส้นใย.กรุงเทพฯ:สร้างสรรค์
- อัญชลี เลิศสงคราม. การดูดซับโลหะหนักโดยวิธีทางชีวภาพ.วารสารองค์การเภสัชกรรม. ปีที่ 18,  
ฉบับที่ 3,(กรกฎาคม-กันยายน), 2554, หน้า 17-18

- Bo Zho, Tongxiang Fan, Di Zhang. Adsorption of copper ions from aqueous solution by citric acid modified soybean straw. **Journal of Hazardous Materials** **153** (2008) 300-308.
- E. Pehlivan, S. Cetin, B. H. Yanik, Equilibrium studies for the sorption of zinc and copper from aqueous solution using sugar beet pulp and fly ash. **Hazard Mater.** **B135**(2009) 193-199.
- E. Pehlivan, T. Altun, S. Parlayici. Modified barley straw as a potential biosorbent for removal of copper ions from aqueous solution. **Food chemistry** **135** (2012) 2229-2234.
- Glasswarechemical. 21 ธันวาคม 2556. สังกะสี (zinc). <http://www.glasswaremical.com>.

ภาคผนวก ก.

คำมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคม  
อุตสาหกรรม

ตาราง ก. ค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

| ดัชนีคุณภาพน้ำ   | ค่ามาตรฐาน   | วิธีการวิเคราะห์   |
|--|--|--|
| 1.ความเป็นกรดและ<br>ด่าง (pH value)                    | 5.5-9.0  | pH meter   |
| 2.ค่าที่ดิสเอส (TDS หรือ<br>Total Dissolved<br>Solids) | <ul style="list-style-type: none"> <li>● ไม่เกิน 3000 มิลลิกรัม/ลิตร หรืออาจแตกต่างกันเล็กน้อยแต่ประเภทที่รองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 5000 มิลลิกรัม/ลิตร</li> <li>● น้ำทิ้งที่จะระบายลงแหล่งน้ำกร่อยที่มีค่าความเค็ม (Salinity) เกิน 2000 มิลลิกรัม/ลิตร หรือลงสู่ทะเลค่าที่ดิสเอสในน้ำทิ้งจะมีความมากกว่าค่าที่ดิสเอสที่อยู่ในน้ำกร่อยหรือน้ำทะเลได้ไม่เกิน 5000 มิลลิกรัม/ลิตร</li> </ul> | ระเหยแห้งที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง |
| 3.สารแขวนลอย<br>(Suspended Solids)                     | ไม่เกิน 50 มิลลิกรัม/ลิตร หรืออาจแตกต่างกันเล็กน้อยแต่ประเภทที่รองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมหรือประเภทของระบบบำบัดน้ำเสียตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษ  | กรองผ่านกระดาษกรองใยแก้ว (GlasFiberFilter Disc)              |
| <b>ดัชนีคุณภาพน้ำ</b>                                  | <b>ค่ามาตรฐาน</b>  | <b>วิธีการวิเคราะห์</b>                                      |
|  | เห็นสมควรแต่ไม่เกิน 150 มิลลิกรัม/ลิตร   |  |

|   |  |  |
|---|--|--|
| 4.อุณหภูมิ<br>(Temperature)   | ไม่เกิน 40 องศาเซลเซียส  | เครื่องวัดอุณหภูมิ วัดขณะ<br>ทำการเก็บตัวอย่างน้ำ                    |
| 5.สีหรือกลิ่น   | ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ  | ไม่ได้กำหนด  |
| 6.ซัลไฟด์ (Sulfide as<br>H <sub>2</sub> S)  | ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัม/ลิตร   | Titrate  |
| 7.ไซยาไนด์ (Cyanide<br>as HCN)  | ไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัม/ลิตร   | กลั่นและทำตามวิธี<br>Pyridine Barbituric Acid                        |
| 8.น้ำมันและไขมัน<br>(Fat, Oil and Grease)   | ไม่เกิน 5.0 มิลลิกรัม/ลิตร หรืออาจ<br>แตกต่างกันแต่ประเภทที่รองรับ<br>น้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงาน<br>อุตสาหกรรมตามที่คณะกรรมการ<br>ควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่<br>เกิน 15.0 มิลลิกรัม/ลิตร | สกัดด้วยตัวทำละลายแล้ว<br>แยกหาน้ำหนักของไขมัน<br>และน้ำมัน          |
| 9.ฟอร์มัลดีไฮด์<br>(Formaldehyde)   | ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัม/ลิตร   | Spectrophotometer  |
| 10.สารประกอบฟีนอล<br>(Phenols)  | ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัม/ลิตร   | กลั่นและตามด้วยวิธี 4-<br>Aminoantipyrine                            |
| 11.คลอรีนอิสระ (Free<br>Chlorine)   | ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัม/ลิตร   | Iodometric Method  |
| 12.สารที่ใช้ป้องกัน<br>หรือกำจัดศัตรูพืชหรือ<br>สัตว์   | ต้องตรวจไม่พบตามวิธีตรวจสอบ<br>ที่กำหนด  | Gas-Chromatography   |
| 13.ค่าบีโอดี (5 วันที่<br>อุณหภูมิ 20 องศา<br>เซลเซียส Biochemical<br>Oxygen Demand :<br>BOD) | ไม่เกิน 20.0 มิลลิกรัม/ลิตร หรือ<br>อาจแตกต่างกันแต่ประเภทที่<br>รองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของ<br>โรงงานอุตสาหกรรมตามที่<br>คณะกรรมการควบคุมมลพิษ<br>เห็นสมควรแต่ไม่เกิน 60.0               | Azide Modification ที่<br>อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส<br>เป็นเวลา 5 วัน |
| <b>คุณภาพน้ำทิ้ง</b>  | <b>ค่ามาตรฐาน</b>  | <b>วิธีการวิเคราะห์</b>  |
|   | มิลลิกรัม/ลิตร   |  |

|   |  |  |
|---|--|--|
| 14.ค่าทีเคเอ็น( TKN หรือ Total Kjeldahl Nitrogen)   | ไม่เกิน 100 มิลลิกรัม/ลิตร หรือ อาจแตกต่างกันแต่ประเภทที่รองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 200 มิลลิกรัม/ลิตร | Kjeldahl   |
| 14. ซีโอดี(Cheical Oxygen Demand : COD)             | ไม่เกิน 120 มิลลิกรัม/ลิตร หรือ อาจแตกต่างกันแต่ประเภทที่รองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 400 มิลลิกรัม/ลิตร | Potassium Dichromate Digestion                                     |
| 16. โลหะหนัก(heavy metal)                           |  | Atomic Absorption Spectro photometry ชนิด                          |
| 16.1สังกะสี(Zn)                                     | ไม่เกิน 5.0 มิลลิกรัม/ลิตร   | Direct Aspiration หรือวิธี   |
| 16.2 โครเมียมชนิดเฮกซะวาเลนต์ (Hexavalent Chromium) | ไม่เกิน 0.25 มิลลิกรัม/ลิตร  | Plasma Emission Spectroscopy ชนิด Inductively Coupled Plasma : ICP |
| 16.3 โครเมียมชนิดไตรวาเลนต์(Trivalent Chromium)     | ไม่เกิน 0.75 มิลลิกรัม/ลิตร  |  |
| 16. ทองแดง(Cu)                                      | ไม่เกิน 2.0 มิลลิกรัม/ลิตร   |  |
| 16. แคดเมียม(Cd)                                    | ไม่เกิน 0.03 มิลลิกรัม/ลิตร  |  |
| 16.6 แบเรียม(Ba)                                    | ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัม/ลิตร   |  |
| 16.7 ตะกั่ว(Pb)                                     | ไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัม/ลิตร   |  |
| 16.8 นิกเกิล(Ni)                                    | ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัม/ลิตร   |  |
| คุณภาพน้ำทิ้ง                                       | ค่ามาตรฐาน   | วิธีการวิเคราะห์   |
| 16.9 แมงกานีส(Mn)                                   | ไม่เกิน 5.0 มิลลิกรัม/ลิตร   |  |

|                     |                              |   |
|---------------------|------------------------------|---|
| 16.10 อาร์เซนิก(As) | ไม่เกิน 0.25 มิลลิกรัม/ลิตร  | Atomic Absorption   |
| 16.11 เซเลเนียม(Se) | ไม่เกิน 0.02 มิลลิกรัม/ลิตร  | Spectro photometry ชนิด<br>Hydride หรือวิธี Plasma<br>Emission Spectroscopy<br>ชนิด Inductively Coupled<br>Plasma : ICP |
| 16.12ปรอท(Hg)       | ไม่เกิน 0.005 มิลลิกรัม/ลิตร | Atomic Absorption<br>Vapour Technique   |

แหล่งที่มา:

ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ.2539) ลงวันที่ 3 มกราคม 2539 เรื่องกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 113 ตอนที่ 13 ลงวันที่ 13 กุมภาพันธ์ 2539

**ภาคผนวก ข.**  
**ตารางแสดงผลข้อมูล**

ตาราง ข.1ประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วจากสารละลายโดยใช้ฟางข้าวที่ค่า pH ที่เหมาะสม

| ขวด<br>ที่ | pH | ค่าการดูดซับ<br>ที่วัดได้จาก<br>เครื่อง AAS | ค่า SD | ร้อยละ<br>การดูดซับ | ค่าเฉลี่ย<br>ร้อยละการ<br>ดูดซับ | ร้อยละการ<br>ตกตะกอน | ค่าเฉลี่ย<br>ร้อยละการ<br>ตกตะกอน | ร้อยละการ<br>ดูดซับที่<br>แท้จริง | น้ำหนักฟาง<br>ข้าว(g) | pH<br>สารละลาย<br>เบื้องต้น | ปรับ pH ของ<br>สารละลาย |                  |
|------------|----|---|--------|---------------------|----------------------------------|----------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------------|-------------------------|------------------|
|            |    |   |        |                     |                                  |                      |                                   |                                   |                       |                             | pH                      | อุณหภูมิ<br>(°C) |
| 1          | 3  | 0.221                                       | 0.003  | 58.40               | 58.90                            | 0.00                 | 0.00                              | 58.90                             | 0.500                 | 2.42                        | 3.00                    | 25.1             |
| 2          |    | 0.219                                       |        | 58.78               |                                  | 0.00                 |                                   |                                   | 0.500                 |                             |                         |                  |
| 3          |    | 0.215                                       |        | 59.53               |                                  | 0.00                 |                                   |                                   | 0.500                 |                             |                         |                  |
| 1          | 4  | 0.095                                       | 0.057  | 82.12               | 72.52                            | 0.00                 | 0.24                              | 72.28                             | 0.501                 | 2.42                        | 4.00                    | 25.1             |
| 2          |    | 0.207                                       |        | 61.04               |                                  | 0.24                 |                                   |                                   | 0.501                 |                             |                         |                  |
| 3          |    | 0.136                                       |        | 74.40               |                                  | 0.24                 |                                   |                                   | 0.501                 |                             |                         |                  |
| 1          | 5  | 0.165                                       | 0.013  | 68.94               | 66.68                            | 2.34                 | 2.88                              | 63.80                             | 0.501                 | 2.42                        | 5.00                    | 25.2             |
| 2          |    | 0.190                                       |        | 64.24               |                                  | 3.10                 |                                   |                                   | 0.502                 |                             |                         |                  |
| 3          |    | 0.176                                       |        | 66.87               |                                  | 3.21                 |                                   |                                   | 0.501                 |                             |                         |                  |

ตาราง ข.1 ประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วจากสารละลายโดยใช้ฟางข้าวที่ค่า pH ที่เหมาะสม(ต่อ)

| ขวด<br>ที่ | pH | ค่าการดูดซับ<br>ที่วัดได้จาก<br>เครื่อง AAS | ค่า SD | ร้อยละ<br>การดูดซับ | ค่าเฉลี่ย<br>ร้อยละการ<br>ดูดซับ | ร้อยละการ<br>ตกตะกอน | ค่าเฉลี่ย<br>ร้อยละการ<br>ตกตะกอน | ร้อยละการ<br>ดูดซับที่<br>แท้จริง | น้ำหนักฟาง<br>ข้าว(g) | pH<br>สารละลาย<br>เบื้องต้น | ปรับ pH ของ<br>สารละลาย |                  |      |      |
|------------|----|---|--------|---------------------|----------------------------------|----------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------------|-------------------------|------------------|------|------|
|            |    |   |        |                     |                                  |                      |                                   |                                   |                       |                             | pH                      | อุณหภูมิ<br>(°C) |      |      |
| 1          | 6  | 0.197                                       | 0.021  | 62.92               | 63.99                            | 15.81                | 19.07                             | 44.92                             | 0.501                 | 2.42                        | 6.00                    | 25.2             |      |      |
| 2          |    | 0.209                                       |        | 60.66               |                                  | 20.01                |                                   |                                   | 0.500                 |                             |                         |                  | 6.00 | 25.2 |
| 3          |    | 0.168                                       |        | 68.38               |                                  | 21.36                |                                   |                                   | 0.501                 |                             |                         |                  | 6.00 | 25.2 |
| 1          | 7  | 0.178                                       | 0.070  | 66.48               | 54.32                            | 49.18                | 40.27                             | 14.05                             | 0.501                 | 2.42                        | 7.00                    | 25.3             |      |      |
| 2          |    | 0.317                                       |        | 40.34               |                                  | 51.82                |                                   |                                   | 0.501                 |                             |                         |                  | 7.00 | 25.3 |
| 3          |    | 0.233                                       |        | 56.15               |                                  | 19.82                |                                   |                                   | 0.500                 |                             |                         |                  | 7.00 | 25.3 |
| 1          | 8  | 0.187                                       | 0.027  | 64.80               | 58.91                            | 64.24                | 58.06                             | 0.85                              | 0.501                 | 2.42                        | 8.00                    | 25.3             |      |      |
| 2          |    | 0.234                                       |        | 55.96               |                                  | 53.25                |                                   |                                   | 0.502                 |                             |                         |                  | 8.00 | 25.3 |
| 3          |    | 0.234                                       |        | 55.96               |                                  | 56.71                |                                   |                                   | 0.501                 |                             |                         |                  | 8.00 | 25.3 |

ตาราง ข.2 ประสิทธิภาพการดูดซับสังกะสีจากสารละลาย โดยใช้ฟางข้าว ที่ค่า pH ที่เหมาะสม

| ขวดที่ | pH | ค่าการดูดซับ<br>ที่วัดได้จาก<br>เครื่อง AAS | ค่า SD | ร้อยละ<br>การดูดซับ | ค่าเฉลี่ย<br>ร้อยละการ<br>ดูดซับ | ร้อยละการ<br>ตกตะกอน | ค่าเฉลี่ย<br>ร้อยละการ<br>ตกตะกอน | ร้อยละการ<br>ดูดซับที่<br>แท้จริง | น้ำหนักฟาง<br>ข้าว(g) | pH<br>สารละลาย<br>เบื้องต้น | ปรับ pH ของ<br>สารละลาย |                  |
|--------|----|---|--------|---------------------|----------------------------------|----------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------------|-------------------------|------------------|
|        |    |   |        |                     |                                  |                      |                                   |                                   |                       |                             | pH                      | อุณหภูมิ<br>(°C) |
| 1      | 3  | 0.358                                       | 0.049  | 34.40               | 44.64                            | 20.84                | 19.25                             | 25.39                             | 0.500                 | 2.48                        | 3.00                    | 25.4             |
| 2      |    | 0.284                                       |        | 47.96               |                                  | 20.65                |                                   |                                   | 0.501                 |                             |                         |                  |
| 3      |    | 0.266                                       |        | 51.56               |                                  | 16.25                |                                   |                                   | 0.500                 |                             |                         |                  |
| 1      | 4  | 0.137                                       | 0.007  | 74.89               | 75.81                            | 18.64                | 19.98                             | 55.83                             | 0.500                 | 2.48                        | 4.00                    | 25.4             |
| 2      |    | 0.124                                       |        | 77.28               |                                  | 17.17                |                                   |                                   | 0.500                 |                             |                         |                  |
| 3      |    | 0.135                                       |        | 75.26               |                                  | 24.13                |                                   |                                   | 0.500                 |                             |                         |                  |
| 1      | 5  | 0.102                                       | 0.005  | 81.31               | 81.00                            | 19.74                | 17.72                             | 63.28                             | 0.501                 | 2.48                        | 5.00                    | 25.6             |
| 2      |    | 0.100                                       |        | 81.67               |                                  | 9.84                 |                                   |                                   | 0.501                 |                             |                         |                  |
| 3      |    | 0.109                                       |        | 80.03               |                                  | 23.58                |                                   |                                   | 0.501                 |                             |                         |                  |
| 1      | 6  | 0.112                                       | 0.015  | 79.48               | 77.95                            | 21.02                | 21.51                             | 56.44                             | 0.500                 | 2.48                        | 6.00                    | 25.6             |
| 2      |    | 0.111                                       |        | 79.66               |                                  | 17.35                |                                   |                                   | 0.500                 |                             |                         |                  |
| 3      |    | 0.138                                       |        | 74.71               |                                  | 26.15                |                                   |                                   | 0.501                 |                             |                         |                  |

ตาราง ข.2 ประสิทธิภาพการดูดซับสังกะสีจากสารละลาย โดยใช้ฟางข้าว ที่ค่า pH ที่เหมาะสม (ต่อ)

| ขวดที่ | pH | ค่าการดูดซับ<br>ที่วัดได้จาก<br>เครื่อง AAS | ค่า SD | ร้อยละ<br>การดูดซับ | ค่าเฉลี่ย<br>ร้อยละการ<br>ดูดซับ | ร้อยละการ<br>ตกตะกอน | ค่าเฉลี่ย<br>ร้อยละการ<br>ตกตะกอน | ร้อยละการ<br>ดูดซับที่<br>แท้จริง | น้ำหนักฟาง<br>ข้าว(g) | pH<br>สารละลาย<br>เบื้องต้น | ปรับ pH ของ<br>สารละลาย |                  |
|--------|----|---|--------|---------------------|----------------------------------|----------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------------|-------------------------|------------------|
|        |    |   |        |                     |                                  |                      |                                   |                                   |                       |                             | pH                      | อุณหภูมิ<br>(°C) |
| 1      | 7  | 0.079                                       | 0.001  | 85.52               | 85.58                            | 35.67                | 32.88                             | 52.70                             | 0.501                 | 2.48                        | 7.00                    | 25.1             |
| 2      |    | 0.077                                       |        | 85.89               |                                  | 28.17                |                                   |                                   | 0.500                 |                             | 7.00                    | 25.1             |
| 3      |    | 0.080                                       |        | 85.34               |                                  | 34.81                |                                   |                                   | 0.500                 |                             | 7.00                    | 25.1             |
| 1      | 8  | 0.024                                       | 0.033  | 95.60               | 92.79                            | 59.44                | 58.58                             | 34.21                             | 0.501                 | 2.48                        | 8.00                    | 25.1             |
| 2      |    | 0.017                                       |        | 96.88               |                                  | 60.87                |                                   |                                   | 0.500                 |                             | 8.00                    | 25.1             |
| 3      |    | 0.077                                       |        | 85.89               |                                  | 55.44                |                                   |                                   | 0.501                 |                             | 8.00                    | 25.1             |

ตาราง ข.3 ประสิทธิภาพการดูดซับสังกะสีจากสารละลายโดยใช้ฟางข้าวที่ค่าระยะเวลาที่เหมาะสม

| ขวดที่ | ระยะเวลาการสัมผัส (นาที) | ค่าการดูดซับที่วัดได้จากเครื่อง AAS | ค่า SD | ร้อยละการดูดซับ | ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซับ | น้ำหนักฟางข้าว(g) | pH สารละลายเบื้องต้น | ปรับ pH ของสารละลาย |               |
|--------|--------------------------|-------------------------------------|--------|-----------------|--------------------------|-------------------|----------------------|---------------------|---------------|
|        |                          |                                     |        |                 |                          |                   |                      | pH                  | อุณหภูมิ (°C) |
| 1      | 0                        | 0.221                               | 0.016  | 47.22           | 50.88                    | 0.500             | 2.48                 | 5.00                | 25.0          |
| 2      |                          | 0.207                               |        | 50.56           |                          | 0.500             |                      |                     |               |
| 3      |                          | 0.189                               |        | 54.86           |                          | 0.500             |                      |                     |               |
| 1      | 10                       | 0.169                               | 0.005  | 58.20           | 57.81                    | 0.501             | 2.48                 | 5.00                | 25.0          |
| 2      |                          | 0.177                               |        | 57.73           |                          | 0.500             |                      |                     |               |
| 3      |                          | 0.178                               |        | 57.49           |                          | 0.500             |                      |                     |               |
| 1      | 30                       | 0.129                               | 0.003  | 69.19           | 68.55                    | 0.501             | 2.48                 | 5.00                | 25.4          |
| 2      |                          | 0.132                               |        | 68.47           |                          | 0.501             |                      |                     |               |
| 3      |                          | 0.134                               |        | 68.00           |                          | 0.501             |                      |                     |               |
| 1      | 60                       | 0.113                               | 0.011  | 73.01           | 76.12                    | 0.501             | 2.48                 | 5.00                | 25.5          |
| 2      |                          | 0.092                               |        | 78.03           |                          | 0.500             |                      |                     |               |
| 3      |                          | 0.095                               |        | 77.31           |                          | 0.501             |                      |                     |               |

ตาราง ข.3 ประสิทธิภาพการดูดซับสังกะสีจากสารละลายโดยใช้ฟางข้าวที่ค่าระยะเวลาที่เหมาะสม (ต่อ)

| ขวดที่ | ระยะเวลาการสัมผัส (นาที) | ค่าการดูดซับที่วัดได้จากเครื่อง AAS | ค่า SD | ร้อยละการดูดซับ | ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซับ | น้ำหนักฟางข้าว(g) | pH สารละลายเบื้องต้น | ปรับ pH ของสารละลาย |               |
|--------|--------------------------|-------------------------------------|--------|-----------------|--------------------------|-------------------|----------------------|---------------------|---------------|
|        |                          |                                     |        |                 |                          |                   |                      | pH                  | อุณหภูมิ (°C) |
| 1      | 80                       | 0.085                               | 0.006  | 79.70           | 81.13                    | 0.502             | 2.48                 | 5.00                | 25.5          |
| 2      |                          | 0.079                               |        | 81.13           |                          | 0.502             |                      |                     |               |
| 3      |                          | 0.073                               |        | 82.57           |                          | 0.502             |                      |                     |               |
| 1      | 120                      | 0.159                               | 0.043  | 62.03           | 62.26                    | 0.501             | 2.48                 | 5.00                | 25.5          |
| 2      |                          | 0.200                               |        | 52.23           |                          | 0.500             |                      |                     |               |
| 3      |                          | 0.115                               |        | 72.53           |                          | 0.501             |                      |                     |               |

ตาราง ข.4 ประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วจากสารละลายโดยใช้ฟางข้าวที่ค่าระยะเวลาที่เหมาะสม

| ขวดที่ | ระยะเวลา<br>การสัมผัส<br>(นาที) | ค่าการดูดซับที่<br>วัดได้จากเครื่อง<br>AAS | ค่า SD | ร้อยละการดูด<br>ซับ | ค่าเฉลี่ยร้อยละ<br>การดูดซับ | น้ำหนักฟาง<br>ข้าว(g) | pH สารละลาย<br>เบื้องต้น | ปรับ pH ของสารละลาย |                  |
|--------|---------------------------------|--|--------|---------------------|------------------------------|-----------------------|--------------------------|---------------------|------------------|
|        |                                 |  |        |                     |                              |                       |                          | pH                  | อุณหภูมิ<br>(°C) |
| 1      | 0                               | 0.109                                      | 0.007  | 79.08               | 80.62                        | 0.500                 | 2.44                     | 4.00                | 25.0             |
| 2      |                                 | 0.099                                      |        | 81.00               |                              | 0.501                 |                          |                     |                  |
| 3      |                                 | 0.095                                      |        | 81.77               |                              | 0.500                 |                          |                     |                  |
| 1      | 10                              | 0.094                                      | 0.008  | 81.96               | 83.31                        | 0.501                 | 2.44                     | 4.00                | 25.0             |
| 2      |                                 | 0.089                                      |        | 82.92               |                              | 0.500                 |                          |                     |                  |
| 3      |                                 | 0.078                                      |        | 85.06               |                              | 0.501                 |                          |                     |                  |
| 1      | 30                              | 0.039                                      | 0.011  | 92.51               | 95.01                        | 0.501                 | 2.44                     | 4.00                | 25.0             |
| 2      |                                 | 0.021                                      |        | 95.97               |                              | 0.501                 |                          |                     |                  |
| 3      |                                 | 0.018                                      |        | 96.55               |                              | 0.501                 |                          |                     |                  |
| 1      | 60                              | 0.035                                      | 0.003  | 93.28               | 92.77                        | 0.501                 | 2.44                     | 4.00                | 25.0             |
| 2      |                                 | 0.041                                      |        | 92.13               |                              | 0.502                 |                          |                     |                  |
| 3      |                                 | 0.037                                      |        | 92.90               |                              | 0.501                 |                          |                     |                  |

ตาราง ข.4 ประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วจากสารละลายโดยใช้ฟางข้าวที่ค่าระยะเวลาที่เหมาะสม (ต่อ)

| ขวดที่ | ระยะเวลาการสัมผัส (นาที) | ค่าการดูดซับที่วัดได้จากเครื่อง AAS | ค่า SD | ร้อยละการดูดซับ | ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซับ | น้ำหนักฟางข้าว(g) | pH สารละลายเบื้องต้น | ปรับ pH ของสารละลาย |               |
|--------|--------------------------|-------------------------------------|--------|-----------------|--------------------------|-------------------|----------------------|---------------------|---------------|
|        |                          |                                     |        |                 |                          |                   |                      | pH                  | อุณหภูมิ (°C) |
| 1      | 80                       | 0.060                               | 0.012  | 88.48           | 90.98                    | 0.500             | 2.44                 | 4.00                | 25.5          |
| 2      |                          | 0.045                               |        | 91.36           |                          | 0.500             |                      |                     |               |
| 3      |                          | 0.036                               |        | 93.09           |                          | 0.500             |                      |                     |               |
| 1      | 120                      | 0.079                               | 0.013  | 85.03           | 87.65                    | 0.501             | 2.44                 | 4.00                | 25.5          |
| 2      |                          | 0.061                               |        | 88.29           |                          | 0.501             |                      |                     |               |
| 3      |                          | 0.054                               |        | 89.64           |                          | 0.502             |                      |                     |               |

ตาราง ข.5 ประสิทธิภาพการดูดซับสังกะสีจากสารละลายโดยใช้ฟางข้าวที่ค่าความเข้มข้นที่เหมาะสม

| ขวดที่ | ความเข้มข้น | ค่าการดูดซับที่วัดได้จากเครื่อง AAS | ค่า SD | ร้อยละการดูดซับ | ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซับ | น้ำหนักฟางข้าว (g) | pH สารละลายเบื้องต้น | ปรับ pH ของสารละลาย |               |      |      |    |
|--------|-------------|-------------------------------------|--------|-----------------|--------------------------|--------------------|----------------------|---------------------|---------------|------|------|----|
|        |             |                                     |        |                 |                          |                    |                      | pH                  | อุณหภูมิ (°C) |      |      |    |
| 1      | 0           | 0.000                               | 0.000  | 0.00            | 0.00                     | 0.500              | 2.44                 | 5.00                | 25            |      |      |    |
| 2      |             | 0.000                               |        | 0.00            |                          | 0.501              |                      |                     |               | 2.44 | 5.00 | 25 |
| 3      |             | 0.000                               |        | 0.00            |                          | 0.500              |                      |                     |               | 2.44 | 5.00 | 25 |
| 1      | 50          | 0.014                               | 0.003  | 97.34           | 96.77                    | 0.501              | 2.44                 | 5.00                | 25            |      |      |    |
| 2      |             | 0.020                               |        | 96.20           |                          | 0.502              |                      |                     |               | 2.44 | 5.00 | 25 |
| 3      |             | 0.017                               |        | 96.77           |                          | 0.500              |                      |                     |               | 2.44 | 5.00 | 25 |
| 1      | 100         | 0.068                               | 0.005  | 87.81           | 88.83                    | 0.500              | 2.44                 | 5.00                | 25            |      |      |    |
| 2      |             | 0.059                               |        | 89.43           |                          | 0.501              |                      |                     |               | 2.44 | 5.00 | 25 |
| 3      |             | 0.060                               |        | 89.25           |                          | 0.500              |                      |                     |               | 2.44 | 5.00 | 25 |

ตาราง ข.5 ประสิทธิภาพการดูดซับสังกะสีจากสารละลายโดยใช้ฟางข้าวที่ค่าความเข้มข้นที่เหมาะสม(ต่อ)

| ขวดที่ | ความเข้มข้น | ค่าการดูดซับที่วัดได้จากเครื่อง AAS | ค่า SD | ร้อยละการดูดซับ | ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซับ | น้ำหนักฟางข้าว(g) | pH สารละลายเบื้องต้น | ปรับ pH ของสารละลาย |               |
|--------|-------------|-------------------------------------|--------|-----------------|--------------------------|-------------------|----------------------|---------------------|---------------|
|        |             |                                     |        |                 |                          |                   |                      | pH                  | อุณหภูมิ (°C) |
| 1      | 200         | 0.070                               | 0.003  | 64.85           | 66.02                    | 0.500             | 2.44                 | 5.00                | 25            |
| 2      |             | 0.068                               |        | 65.85           |                          | 0.501             |                      |                     |               |
| 3      |             | 0.065                               |        | 67.36           |                          | 0.500             |                      |                     |               |
| 1      | 400         | 0.172                               | 0.006  | 54.65           | 54.48                    | 0.501             | 2.44                 | 5.00                | 25            |
| 2      |             | 0.167                               |        | 55.97           |                          | 0.501             |                      |                     |               |
| 3      |             | 0.179                               |        | 52.81           |                          | 0.500             |                      |                     |               |
| 1      | 600         | 0.305                               | 0.006  | 43.34           | 43.46                    | 0.500             | 2.44                 | 5.00                | 25            |
| 2      |             | 0.298                               |        | 44.64           |                          | 0.501             |                      |                     |               |
| 3      |             | 0.310                               |        | 42.41           |                          | 0.501             |                      |                     |               |

ตาราง ข.6 ประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วจากสารละลายโดยใช้ฟางข้าวที่ค่าความเข้มข้นที่เหมาะสม

| ขวดที่ | ความเข้มข้น | ค่าการดูดซับที่วัดได้จากเครื่อง AAS | ค่า SD | ร้อยละการดูดซับ | ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซับ | น้ำหนักฟางข้าว (g) | pH สารละลายเบื้องต้น | ปรับ pH ของสารละลาย |               |      |      |    |
|--------|-------------|-------------------------------------|--------|-----------------|--------------------------|--------------------|----------------------|---------------------|---------------|------|------|----|
|        |             |                                     |        |                 |                          |                    |                      | pH                  | อุณหภูมิ (°C) |      |      |    |
| 1      | 0           | 0.000                               | 0.000  | 0.00            | 0.00                     | 0.500              | 2.46                 | 4.00                | 25            |      |      |    |
| 2      |             | 0.000                               |        | 0.00            |                          | 0.501              |                      |                     |               | 2.46 | 4.00 | 25 |
| 3      |             | 0.000                               |        | 0.00            |                          | 0.500              |                      |                     |               | 2.46 | 4.00 | 25 |
| 1      | 50          | 0.095                               | 0.013  | 82.76           | 80.99                    | 0.501              | 2.46                 | 4.00                | 25            |      |      |    |
| 2      |             | 0.099                               |        | 82.03           |                          | 0.502              |                      |                     |               | 2.46 | 4.00 | 25 |
| 3      |             | 0.120                               |        | 78.18           |                          | 0.500              |                      |                     |               | 2.46 | 4.00 | 25 |
| 1      | 100         | 0.250                               | 0.005  | 75.75           | 76.19                    | 0.500              | 2.46                 | 4.00                | 25            |      |      |    |
| 2      |             | 0.240                               |        | 76.72           |                          | 0.501              |                      |                     |               | 2.46 | 4.00 | 25 |
| 3      |             | 0.246                               |        | 76.10           |                          | 0.500              |                      |                     |               | 2.46 | 4.00 | 25 |

ตาราง ข.6 ประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วจากสารละลายโดยใช้ฟางข้าวที่ค่าความเข้มข้นที่เหมาะสม(ต่อ)

| ขวดที่ | ความเข้มข้น | ค่าการดูดซับที่วัดได้จากเครื่องAAS | ค่า SD | ร้อยละการดูดซับ | ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซับ | น้ำหนักฟางข้าว (g) | pH สารละลายเบื้องต้น | ปรับ pH ของสารละลาย |               |
|--------|-------------|------------------------------------|--------|-----------------|--------------------------|--------------------|----------------------|---------------------|---------------|
|        |             |                                    |        |                 |                          |                    |                      | pH                  | อุณหภูมิ (°C) |
| 1      | 200         | 0.805                              | 0.002  | 60.05           | 60.17                    | 0.500              | 2.46                 | 4.00                | 25            |
| 2      |             | 0.802                              |        | 60.20           |                          | 0.501              |                      |                     |               |
| 3      |             | 0.801                              |        | 60.26           |                          | 0.500              |                      |                     |               |
| 1      | 400         | 1.952                              | 0.004  | 50.19           | 50.13                    | 0.501              | 2.46                 | 4.00                | 25            |
| 2      |             | 1.950                              |        | 50.24           |                          | 0.501              |                      |                     |               |
| 3      |             | 1.957                              |        | 49.96           |                          | 0.500              |                      |                     |               |
| 1      | 600         | 3.047                              | 0.009  | 44.79           | 44.73                    | 0.500              | 2.46                 | 4.00                | 25            |
| 2      |             | 3.044                              |        | 44.85           |                          | 0.501              |                      |                     |               |
| 3      |             | 3.060                              |        | 44.55           |                          | 0.501              |                      |                     |               |

ตาราง ข.7 ประสิทธิภาพการดูดซับสังกะสีจากสารละลายโดยใช้ฟางข้าวที่ไม่ปรับปรุงและปรับปรุงด้วยกรดซิตริก

| ขวดที่ | ลักษณะฟางข้าว            | ค่าการดูดซับที่วัดได้จากเครื่อง AAS | ค่า SD | ร้อยละการดูดซับ | ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซับ | น้ำหนักฟางข้าว(g) | pH สารละลายเบื้องต้น | ปรับ pH ของสารละลาย |               |
|--------|--------------------------|-------------------------------------|--------|-----------------|--------------------------|-------------------|----------------------|---------------------|---------------|
|        |                          |                                     |        |                 |                          |                   |                      | pH                  | อุณหภูมิ (°C) |
| 1      | ปรับปรุงด้วยซิตริก       | 0.151                               | 0.010  | 70.08           | 72.33                    | 0.500             | 2.50                 | 5.00                | 25            |
| 2      |                          | 0.137                               |        | 72.86           |                          | 0.501             |                      | 5.00                | 25            |
| 3      |                          | 0.131                               |        | 74.04           |                          | 0.500             |                      | 5.00                | 25            |
| 1      | ไม่ปรับปรุงด้วยกรดซิตริก | 0.295                               | 0.012  | 41.55           | 39.57                    | 0.501             | 2.50                 | 5.00                | 25            |
| 2      |                          | 0.319                               |        | 36.79           |                          | 0.502             |                      | 5.00                | 25            |
| 3      |                          | 0.301                               |        | 40.36           |                          | 0.500             |                      | 5.00                | 25            |

ตาราง ข.8 ประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วจากสารละลายโดยใช้ฟางข้าวที่ไม่ปรับปรุงและปรับปรุงด้วยกรดซิตริก

| ขวดที่ | ลักษณะฟางข้าว            | ค่าการดูดซับที่วัดได้จากเครื่อง AAS | ค่า SD | ร้อยละการดูดซับ | ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซับ | น้ำหนักฟางข้าว(g) | pH สารละลายเบื้องต้น | ปรับ pH ของสารละลาย |               |    |
|--------|--------------------------|-------------------------------------|--------|-----------------|--------------------------|-------------------|----------------------|---------------------|---------------|----|
|        |                          |                                     |        |                 |                          |                   |                      | pH                  | อุณหภูมิ (°C) |    |
| 1      | ปรับปรุงด้วยซิตริก       | 0.066                               | 0.012  | 89.01           | 91.29                    | 0.500             | 2.48                 | 4.00                | 25            |    |
| 2      |                          | 0.048                               |        | 92.01           |                          | 0.500             |                      | 4.00                | 25            |    |
| 3      |                          | 0.043                               |        | 92.84           |                          | 0.500             |                      | 4.00                | 25            |    |
| 1      | ไม่ปรับปรุงด้วยกรดซิตริก | 0.342                               | 0.004  | 43.00           | 42.78                    | 0.501             | 2.48                 | 4.00                | 25            |    |
| 2      |                          | 0.340                               |        | 43.33           |                          | 0.500             |                      | 2.48                | 4.00          | 25 |
| 3      |                          | 0.348                               |        | 42.00           |                          | 0.500             |                      | 2.48                | 4.00          | 25 |

ตาราง ข.9 ประสิทธิภาพการดูดซับสังกะสีจากสารละลายโดยใช้ฟางข้าวที่ไม่ปรับปรุงและปรับปรุงด้วยกรดซิตริกที่ผ่านการคายซับและนำมาดูดซับใหม่

| ขวดที่ | ลักษณะฟางข้าว            | ค่าการดูดซับที่วัดได้จากเครื่อง AAS | ค่า SD | ร้อยละการดูดซับ | ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซับ | น้ำหนักฟางข้าว(g) | pH สารละลายเบื้องต้น | ปรับ pH ของสารละลาย |               |
|--------|--------------------------|-------------------------------------|--------|-----------------|--------------------------|-------------------|----------------------|---------------------|---------------|
|        |                          |                                     |        |                 |                          |                   |                      | pH                  | อุณหภูมิ (°C) |
| 1      | ปรับปรุงด้วยซิตริก       | 0.265                               | 0.010  | 55.88           | 54.16                    | 0.500             | 2.48                 | 5.00                | 25            |
| 2      |                          | 0.275                               |        | 54.22           |                          | 0.500             | 2.50                 | 5.00                | 25            |
| 3      |                          | 0.286                               |        | 52.39           |                          | 0.500             | 2.50                 | 5.00                | 25            |
| 1      | ไม่ปรับปรุงด้วยกรดซิตริก | 0.443                               | 0.008  | 26.26           | 27.20                    | 0.500             | 2.51                 | 5.00                | 25            |
| 2      |                          | 0.435                               |        | 27.58           |                          | 0.500             | 2.52                 | 5.00                | 25            |
| 3      |                          | 0.434                               |        | 27.75           |                          | 0.500             | 2.50                 | 5.00                | 25            |

ตาราง ข.10 ประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วจากสารละลายโดยใช้ฟางข้าวที่ไม่ปรับปรุงและปรับปรุงด้วยกรดซิตริกที่ผ่านการคายซับและนำมาดูดซับใหม่

| ขวดที่ | ลักษณะฟางข้าว            | ค่าการดูดซับที่วัดได้จากเครื่อง AAS | ค่า SD | ร้อยละการดูดซับ | ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซับ | น้ำหนักฟางข้าว(g) | pH สารละลายเบื้องต้น | ปรับ pH ของสารละลาย |               |
|--------|--------------------------|-------------------------------------|--------|-----------------|--------------------------|-------------------|----------------------|---------------------|---------------|
|        |                          |                                     |        |                 |                          |                   |                      | pH                  | อุณหภูมิ (°C) |
| 1      | ปรับปรุงด้วยซิตริก       | 0.189                               | 0.004  | 68.54           | 68.71                    | 0.500             | 2.48                 | 4.00                | 25            |
| 2      |                          | 0.191                               |        | 68.21           |                          | 0.500             | 2.50                 | 4.00                | 25            |
| 3      |                          | 0.184                               |        | 69.37           |                          | 0.500             | 2.50                 | 4.00                | 25            |
| 1      | ไม่ปรับปรุงด้วยกรดซิตริก | 0.398                               | 0.005  | 33.75           | 34.75                    | 0.500             | 2.51                 | 4.00                | 25            |
| 2      |                          | 0.388                               |        | 35.42           |                          | 0.500             | 2.52                 | 4.00                | 25            |
| 3      |                          | 0.390                               |        | 35.09           |                          | 0.500             | 2.50                 | 4.00                | 25            |

ภาคผนวก ค

การคำนวณไอโซเทอร์มการดูดซับ

### ค.1 การคำนวณไอโซเทอร์มการดูดซับ

จากผลการทดลอง

|  |     |       |       |       |      |
|--|-----|-------|-------|-------|------|
| สารดูดซับ(mg),W  | 0.0 | 0.3   | 0.5   | 0.7   | 0.9  |
| Pb <sup>2+</sup> ที่เหลือในสารละลาย<br>(mg/L),C <sub>c</sub> | 50  | 13.60 | 6.75  | 6.10  | 2.70 |
| Zn <sup>2+</sup> ที่เหลือในสารละลาย<br>(mg/L),C <sub>c</sub> | 50  | 23.50 | 18.83 | 11.23 | 9.07 |

คำนวณหาความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ โดยใช้สมการ

$$q = V (C_0 - C_c)$$

เมื่อ  $q$  = ความเข้มข้นของสารเคมีบนพื้นผิวของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล(mol/kg หรือ mg/kg)

$W$  = น้ำหนักของตัวดูดซับที่ใช้ในการทดสอบแต่ละครั้ง(kg)

$V$  = ปริมาตรของสารละลายที่ใช้ในการทดสอบ(L)

$C_0$  = ความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับที่อยู่ในสารละลาย(mg/L)

$C_c$  = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายที่สภาวะสมดุล(mg/L)

คำนวณค่า  $q$  ของ Pb<sup>2+</sup>

$$q_{0.3g} = \frac{50\text{mL} \times \frac{1\text{L}}{1000\text{mL}} \left( \frac{50\text{mg}}{\text{L}} - 13.60\text{mg/L} \right)}{300\text{mg}} = 6.07 \times 10^{-3} \text{mg/mg}$$

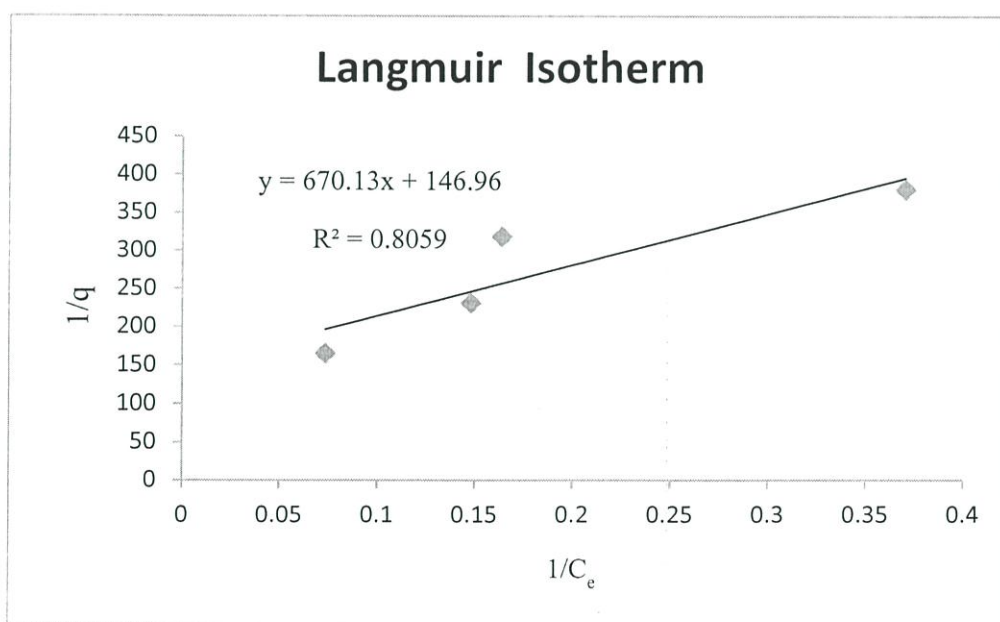
$$q_{0.5g} = \frac{50\text{mL} \times \frac{1\text{L}}{1000\text{mL}} \left( \frac{50\text{mg}}{\text{L}} - 6.75\text{mg./L} \right)}{500\text{mg}} = 4.33 \times 10^{-3} \text{mg/mg}$$

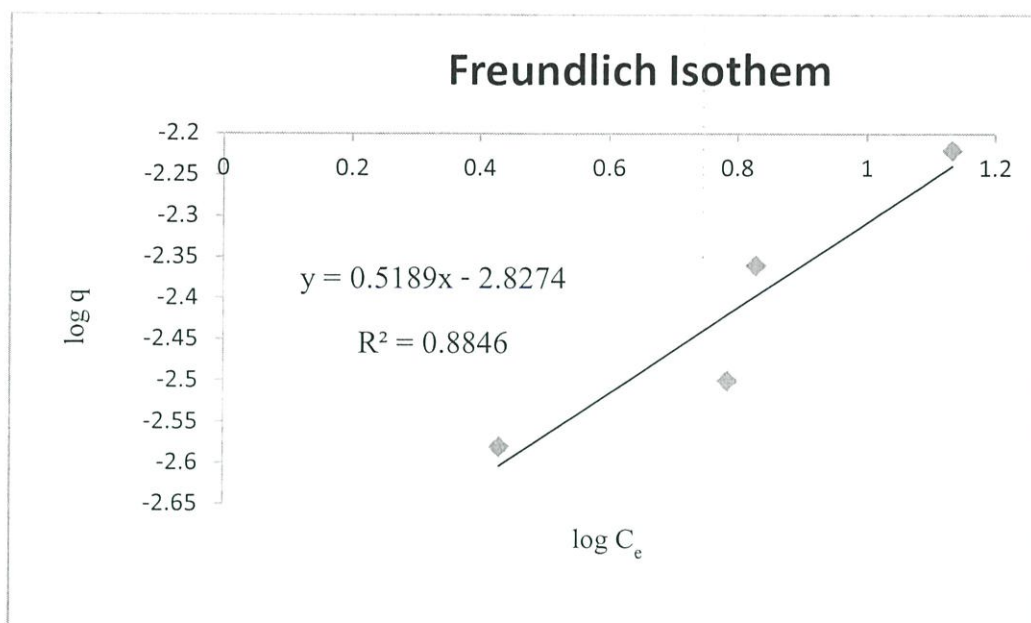
$$q_{0.7g} = \frac{50\text{mL} \times \frac{1\text{L}}{1000\text{mL}} \left( \frac{50\text{mg}}{\text{L}} - 6.10\text{mg/L} \right)}{700\text{mg}} = 3.14 \times 10^{-3} \text{mg/mg}$$

$$q_{0.9g} = \frac{50\text{mL} \times \frac{1\text{L}}{1000\text{mL}} \left( \frac{50\text{mg}}{\text{L}} - 2.70\text{mg/L} \right)}{900\text{mg}} = 2.63 \times 10^{-3} \text{mg/mg}$$

| W(mg) | V(mL) | $C_0$ (mg/L) | $C_e$ (mg/L) | q                     |
|-------|-------|--------------|--------------|-----------------------|
| 300   | 50    | 50           | 13.60        | $6.07 \times 10^{-3}$ |
| 500   | 50    | 50           | 6.75         | $4.33 \times 10^{-3}$ |
| 700   | 50    | 50           | 6.10         | $3.14 \times 10^{-3}$ |
| 900   | 50    | 50           | 2.70         | $2.63 \times 10^{-3}$ |
| 0     | 50    | 50           | -            | -                     |

| สมการ Langmuir Isotherm |        | สมการ Freundlich Isotherm |          |
|-------------------------|--------|---------------------------|----------|
| $1/C_e$                 | $1/q$  | $\log C_e$                | $\log q$ |
| 0.0735                  | 164.74 | 1.1335                    | -2.22    |
| 0.1481                  | 230.95 | 0.8293                    | -2.36    |
| 0.1639                  | 318.47 | 0.7853                    | -2.50    |
| 0.3704                  | 380.23 | 0.4314                    | -2.58    |





จากผลการศึกษาสมมุติฐานแบบจำลองทั้งสองแสดงให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) ของแบบจำลองการดูดซับตามสมการฟรุนดิช มีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่าแบบจำลองการดูดซับตามสมการแลงเมียร์แสดงว่าพฤติกรรมการดูดซับตะกั่วของฟางข้าวสามารถอธิบายได้ดีด้วยแบบจำลองของฟรุนดิช

จากสมการ  $q = K_d(C_e)$

นำมาจัดรูปใหม่ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงด้วยการใส่ลอการิทึมทั้งสองข้าง จะได้

$$\log q = \log K_b + n \log C_e$$

จากกราฟไอโซเทอร์มการดูดซับตะกั่วแบบ Freundlich Isothem

ได้สมการเส้นตรง  $y = 0.5189x - 2.8274$

เนื่องจากค่าความชันเท่ากับ  $n$  ดังนั้น  $n = 0.5189$  และ  $1/n = 1.9272$

จุดตัดแกน  $y$  เท่ากับ  $\log K_b$  ดังนั้น  $K_b = 10^{-2.8274} = 1.49 \times 10^{-3}$

คำนวณค่า  $q$  ของ  $Zn^{2+}$

$$q_{0.3g} = \frac{50mL \times \frac{1L}{1000mL} \left( \frac{50mg}{L} - 23.50mg/L \right)}{300mg} = 4.42 \times 10^{-3} mg/mg$$

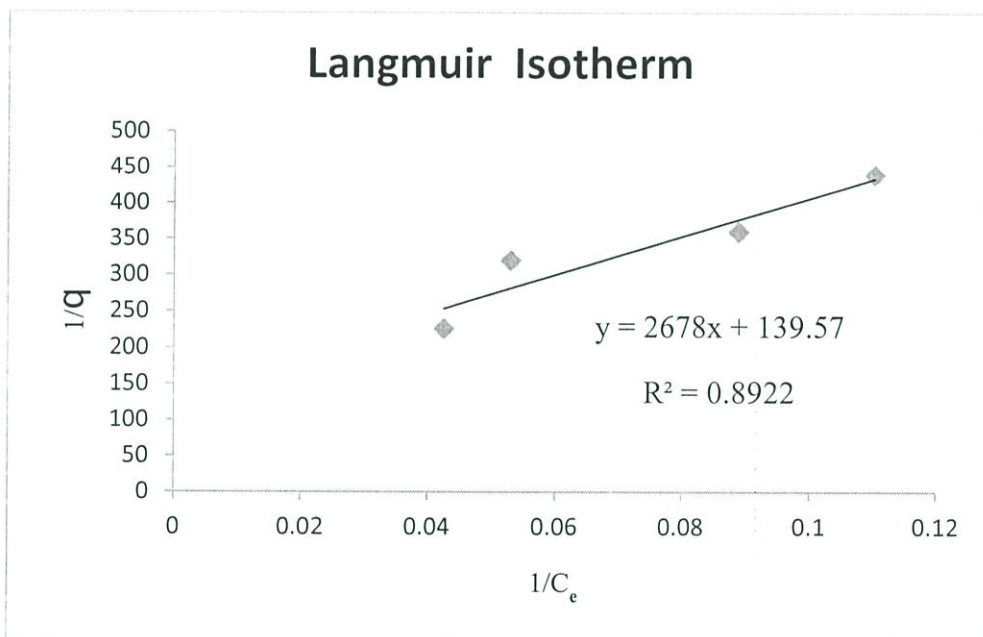
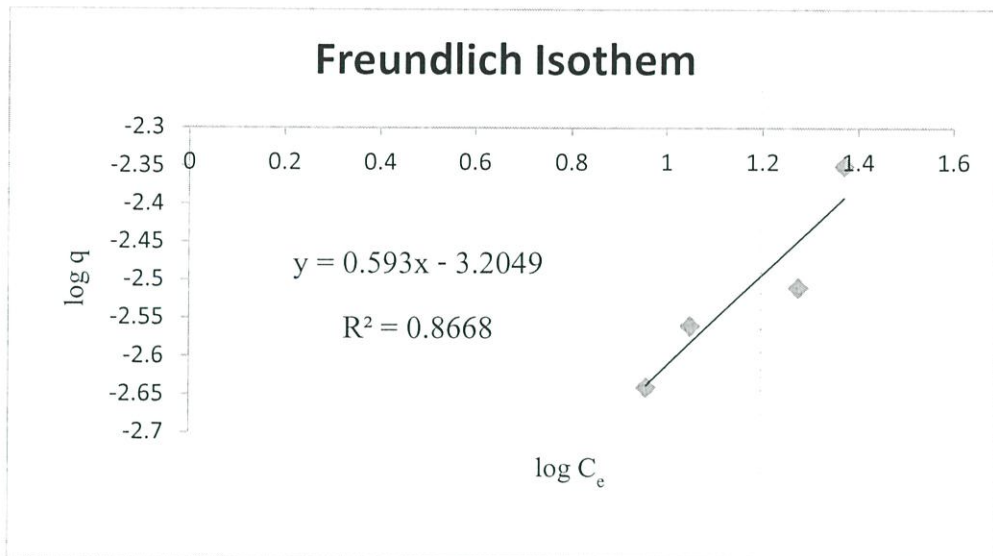
$$q_{0.5g} = \frac{50mL \times \frac{1L}{1000mL} \left( \frac{50mg}{L} - 18.83mg/L \right)}{500mg} = 3.13 \times 10^{-3} mg/mg$$

$$q_{0.7g} = \frac{50mL \times \frac{1L}{1000mL} \left( \frac{50mg}{L} - 11.23mg/L \right)}{700mg} = 2.77 \times 10^{-3} mg/mg$$

$$q_{0.9g} = \frac{50mL \times \frac{1L}{1000mL} \left( \frac{50mg}{L} - 9.07mg/L \right)}{900mg} = 2.07 \times 10^{-3} mg/mg$$

| W(mg) | V(mL) | $C_0$ (mg/L) | $C_e$ (mg/L) | $q$                   |
|-------|-------|--------------|--------------|-----------------------|
| 300   | 50    | 50           | 23.50        | $4.42 \times 10^{-3}$ |
| 500   | 50    | 50           | 18.83        | $3.13 \times 10^{-3}$ |
| 700   | 50    | 50           | 2.77         | $2.77 \times 10^{-3}$ |
| 900   | 50    | 50           | 2.07         | $2.07 \times 10^{-3}$ |
| 0     | 50    | 50           | -            | -                     |

| สมการ Langmuir Isotherm |        | สมการ Freundlich Isotherm |          |
|-------------------------|--------|---------------------------|----------|
| $1/C_e$                 | $1/q$  | $\log C_e$                | $\log q$ |
| 0.0426                  | 226.24 | 1.3711                    | -2.35    |
| 0.0531                  | 320.51 | 1.2749                    | -2.51    |
| 0.0890                  | 361.01 | 1.0504                    | -2.56    |
| 0.1103                  | 440.53 | 0.9576                    | -2.64    |



จากผลการศึกษาสมมุติฐานแบบจำลองทั้งสองแสดงให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) ของแบบจำลองการดูดซับตามสมการแลงเมียร์ มีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่าแบบจำลองการดูดซับตามสมการฟลูนดิชแสดงว่าพฤติกรรมของการดูดซับสังกะสีของฟางข้าวสามารถอธิบายได้ดีด้วยแบบจำลองของแลงเมียร์

จากสมการ  $q = K_d C_e$

จัดรูปใหม่ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงจะได้

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m} + \frac{1}{K_d q_m} \left( \frac{1}{C_e} \right)$$

จากกราฟไอโซเทอร์มการดูดซับสั้งกะสีแบบLangmuir Isotherm

ได้สมการเส้นตรง  $y = 2678x + 139.57$

เนื่องจากค่าความชันเท่ากับ ดังนั้น  $1/q_m = 139.57$  และ  $q_m = 7.16 \times 10^{-3}$

จุดตัดแกน y เท่ากับ  $K_b = 2.68 \times 10^{-3}$