# การศึกษาความเป็นไปได้ในการดูดซับทองแดงและโครเมียมโดยใช้ยางธรรมชาติอิพอกไซด์ดัดแปรด้วยเอทิลีนไดเอมีน

# Feasibility of copper and chromium adsorption by using epoxidized natural rubber modified with ethylenediamine


สรายุทธ หมัดหละ

Sarayut mudlha


วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมี

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

Bachelor of Science Project in Chemistry

Nakhon Si Thammarat Rajabhat University

2552

ชื่อโครงการวิจัย การศึกษาความเป็นไปได้ในการดูดซับทองแดงและโครเมียมโดยใช้ยางธรรมชาติอิพอกไซด์ดัดแปรด้วยเอทิลีนไดเอมีน

Feasibility of copper and chromium adsorption by using epoxidized natural rubber modified with ethylenediamine

ผู้ทำวิจัย นายสรายุทธ หมัดหละ

สาขาวิชา เคมี

---

คณะกรรมการที่ปรึกษา

.....ประธานกรรมการ

( อาจารย์รุ่งนภา พิมเสน )

คณะกรรมการสอบ

.....ประธานกรรมการ

( อาจารย์รุ่งนภา พิมเสน )

.....กรรมการ

( อาจารย์ประวิทย์ เนื่องมัจฉา )

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุดกมล ลาโสภา)

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช อนุมัติให้โครงการวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมี

.....

( อาจารย์แน่งน้อย แสงเสน่ห์ )

ประธานหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาเคมี

ชื่อโครงการวิจัย การศึกษาความเป็นไปได้ในการดูดซับทองแดงและโครเมียมโดยใช้ยางธรรมชาติอิพอกไซด์ดัดแปรด้วยเอทิลีนไดเอมีน

Feasibility of copper and chromium adsorption by using epoxidized natural rubber modified with ethylenediamine

ผู้ทำวิจัย นายสรายุทธ หมัดหละ

สาขาวิชา เคมี

---

## บทคัดย่อ

จากการศึกษาความเป็นไปได้ในการดูดซับทองแดง และโครเมียมโดยใช้ยางธรรมชาติ-อิพอกไซด์ดัดแปรด้วยเอทิลีนไดเอมีน (ENR-ED) สภาวะที่ใช้ในการเตรียมยางธรรมชาติอิพอก-ไซด์ (ENR) นั้น เตรียมโดยใช้อัตราส่วนน้ำยาง 1.7 โมล ทำปฏิกิริยาที่ความเข้มข้น 20 %DRC กับกรดเปอร์ฟอร์มิกที่ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 2.6 โมล กรดฟอร์มิก 0.9 โมล โดยใช้ 10 เปอร์เซ็นต์ Triton X-100 จำนวน 30 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักเนื้อยาง ทำปฏิกิริยาภายใต้บรรยากาศแก๊ส ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ยาง ENR ที่ได้มีเปอร์เซ็นต์หมู่อิพอกซีเท่ากับ 58.24 เปอร์เซ็นต์โมลอิพอกซี นำยางธรรมชาติอิพอกไซด์ดัดแปรโดยใช้เอทิลีนไดเอมีนในอัตราส่วน 10 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักเนื้อยาง ทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เมื่อนำยาง ENR-ED ไปวิเคราะห์ FT-IR สามารถยืนยันโครงสร้างของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีการต่อของเอทิลีนไดเอมีน

ศึกษาการดูดซับโลหะ $Cu^{2+}$ และ $Cr^{3+}$ ด้วยยาง ENR-ED พบว่ามีค่าความจุของการดูดซับเท่ากับ 1.3539 และ 3.1499 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ เนื่องจาก $Cr^{3+}$ มีความต้องการอิเล็กตรอนสูงและมีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนสูง ทำให้มีจุของการดูดซับมากกว่า $Cu^{2+}$ สภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะทั้งสอง $Cu^{2+}$ และ $Cr^{3+}$ มีการดูดซับสูงสุดที่เวลา 14 และ 16 ชั่วโมง ตามลำดับ ที่ pH 5 มีการดูดซับ เนื่องจากที่ pH สูง จะมีปริมาณ $OH^-$ เป็นจำนวนมาก จะขัดขวางการโปรโตเนต บนยาง ENR-ED และจะมีปริมาณ $H^+$ น้อย การขัดขวางในการเกิดพันธะโคออร์ดิเนตโควเลนต์ระหว่างลิเกนด์กับโลหะน้อยลง ทำให้มีความสามารถในการดูดซับสูง ที่ pH ต่ำ ๆ จะมี $H^+$ จำนวนมาก $H^+$ จะไปขัดขวางการเกิดพันธะโคออร์ดิเนตโควเลนต์ระหว่างลิเกนด์กับโลหะ $H^+$ จะเกิดการโปรโตเนตเกาะบนตัวดูดซับ ทำให้ไม่สามารถดูดซับโลหะ

# กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยการศึกษาความเป็นไปได้ในการดูดซับทองแดง และโครเมียมโดยใช้ยางธรรมชาติอิพอกไซด์ดัดแปรด้วยเอทิลีนไดเอมีน สำเร็จได้ไปด้วยดี ต้องขอบพระคุณอาจารย์รุ่งนภา พิมเสน อาจารย์ที่ปรึกษาเป็นอย่างสูงที่สละเวลาให้คำปรึกษา และคณาจารย์ทุกคนที่ชี้แนะข้อบกพร่องต่างๆ ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ เป็นผลให้การวิจัยสำเร็จลุล่วงได้ดี

ขอขอบพระคุณอาจารย์หลักสูตรเคมีทุกท่านที่คอยสนับสนุนการทำวิจัย รวมไปถึงเจ้าหน้าที่ทุกท่านทั้งเจ้าหน้าที่ประจำหลักสูตรเคมี และเจ้าหน้าที่ศูนย์วิทยาศาสตร์ที่คอยอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ อุปกรณ์ต่างๆ ในการดำเนินการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณบุพการีซึ่งได้กำเนิดข้าพเจ้าเลี้ยงดูได้ให้การศึกษาที่ดีแก่ข้าพเจ้า และขอขอบคุณพระเจ้ารวมถึงบุคคลหลายๆ ท่านที่เป็นแรงบันดาลใจให้ข้าพเจ้ามีความตั้งใจในศึกษาการเรียน ซึ่งเป็นแรงผลักดันให้ข้าพเจ้าทำการวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

สรายุทธ หมัดหละ

# สารบัญ


| | หน้า |
|---|---|
| บทคัดย่อ | (3) |
| กิตติกรรมประกาศ | (4) |
| สารบัญ | (5) |
| สารบัญตาราง | (7) |
| สารบัญภาพ | (10) |
| **บทที่ 1 บทนำ** | |
| ความสำคัญที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย | 1 |
| วัตถุประสงค์ของการวิจัย | 2 |
| ผลที่คาดว่าจะได้รับ | 2 |
| ขอบเขตของการวิจัย | 3 |
| ระยะเวลาการทำวิจัย | 3 |
| **บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง** | |
| ยางธรรมชาติ | 4 |
| สมบัติของยาง | 8 |
| ปฏิกิริยาอิพอกซีเดชัน | 10 |
| โลหะหนัก | 12 |
| การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย | 20 |
| ทฤษฎีการดูดซับ | 23 |
| ไอโซเทอร์มการดูดซับ | 25 |
| ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ | 29 |
| งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 31 |

# สารบัญ (ต่อ)


หน้า

**บทที่ 3 วิธีการทดลอง**

เครื่องมืออุปกรณ์ และสารเคมี 36

ศึกษาการเตรียมยางธรรมชาติอิพอกไซด์ (ENR) 38

การศึกษาดัดแปรยางธรรมชาติอิพอกไซด์ด้วยเอทิลีนไดเอมีน (ENR-ED) 39

ศึกษาการดูดซับโลหะหนักของยาง ENR-ED 39

การวิเคราะะห์ข้อมูล 41

**บทที่ 4 ผลการทดลอง และอภิปรายผล**

ผลศึกษาการเตรียมยางธรรมชาติอิพอกไซด์ (ENR) 44

ผลการศึกษาดัดแปรยางธรรมชาติอิพอกไซด์ด้วยเอทิลีนไดเอมีน (ENR-ED) 47

ผลศึกษาการดูดซับโลหะหนักของยาง ENR-ED 49

**บทที่ 5 สรุปผลการการทดลอง**

**บรรณานุกรม**

**ภาคผนวก** 68

ภาคผนวก ( ก ) การคำนวณในวิธีการทดลอง 69

ภาคผนวก ( ข ) การวิเคราะห์ผลการทดลอง 73

ภาคผนวก ( ค ) กราฟมาตรฐานการวิเคราะห์โลหะด้วย
เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปคโทรโฟโตมิเตอร์(AAS) 5

**ประวัติของผู้วิจัย** 90

# สารบัญตาราง


หน้า

ตารางที่ 1.1 กิจกรรมและระยะเวลาการทำการวิจัย 3

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพบางอย่างของยางธรรมชาติ 8

ตารางที่ 2.2 ปริมาณน้ำทิ้งและคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะในเขตกรุงเทพ ฯ มะนิลา และสหรัฐอเมริกา 13

ตารางที่ 2.3 ชนิดและปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะหนักที่มีไซยาไนต์ และไม่มีไซยาไนต์ เก็บจากศูนย์บริการกำจัดกากอุตสาหกรรมบางขุนเทียน กรุงเทพมหานคร 14

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติทั่วไปของโลหะทองแดง 15

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติทางกายภาพของโลหะทองแดง 15

ตารางที่ 2.6 คุณสมบัติของอะตอมโลหะทองแดง 16

ตารางที่ 2.7 คุณสมบัติอื่นๆ ของโลหะทองแดง 16

ตารางที่ 2.8 คุณสมบัติทั่วไปของโลหะโครเมียม 18

ตารางที่ 2.9 คุณสมบัติทางกายภาพของโลหะโครเมียม 18

ตารางที่ 2.10 คุณสมบัติของอะตอมโลหะโครเมียม 19

ตารางที่ 2.11 คุณสมบัติอื่นๆ ของโลหะโครเมียม 19

ตารางที่ 3.1 เครื่องมือต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษาวิจัย 36

ตารางที่ 3.2 สารเคมีต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษาวิจัย 38

ตารางที่ 4.1 ผลการศึกษาเวลาสมดุลของการดูดซับ $Cu^{2+}$ ด้วยยาง ENR-ED ที่เวลาต่างๆ 49

ตารางที่ 4.2 ผลการศึกษาเวลาสมดุลของการดูดซับ $Cr^{3+}$ ด้วยยาง ENR-ED ที่เวลาต่างๆ 51

ตารางที่ 4.3 ผลการศึกษา pH ที่เหมาะสมของการดูดซับ $Cu^{2+}$ ด้วยยาง ENR-ED 53

ตารางที่ 4.4 ผลการศึกษา pH ที่เหมาะสมของการดูดซับ $Cr^{2+}$ ด้วยยาง ENR-ED 54

ตารางที่ 4.5 ผลการศึกษาความจุของการดูดซับ $Cu^{2+}$ ด้วยวิธีแบบการแช่ (Batch method) 57

# สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 4.6 ค่า log q (มิลลิกรัม/กรัม) และ log C (มิลลิกรัม/กรัม) เพื่อหาความจุของการดูดซับ $Cu^{2+}$ 57
ตารางที่ 4.7 ผลการศึกษาความจุของการดูดซับ $Cr^{3+}$ ด้วยวิธีแบบการแช่ (Batch method) 58
ตารางที่ 4.8 ค่า log q (มิลลิกรัม/กรัม) และ log C (มิลลิกรัม/กรัม) เพื่อหาความจุของการดูดซับ $Cr^{3+}$ 59
ตารางที่ 4.9 ค่าความจุของการดูดซับ $Cu^{2+}$ และ $Cr^{3+}$ ด้วยวิธีแบบการแช่ โดยสมการของ Freundlich 60
ตารางที่ ข.1 ผลการศึกษาเวลาสมดุลของการดูดซับ $Cu^{2+}$ ด้วยยาง ENR-ED 74
ตารางที่ ข.2 ผลการศึกษาเวลาสมดุลของการดูดซับ $Cu^{2+}$ ด้วยยาง ENR-ED (ต่อ) 75
ตารางที่ ข.3 ผลการศึกษาเวลาสมดุลของการดูดซับ $Cu^{2+}$ ด้วยยาง ENR-ED เฉลี่ย 75
ตารางที่ ข.4 ผลการศึกษาเวลาสมดุลของการดูดซับ $Cr^{3+}$ ด้วยยาง ENR-ED 76
ตารางที่ ข.5 ผลการศึกษาเวลาสมดุลของการดูดซับ $Cr^{3+}$ ด้วยยาง ENR-ED (ต่อ) 77
ตารางที่ ข.6 ผลการศึกษาเวลาสมดุลของการดูดซับ $Cr^{3+}$ ด้วยยาง ENR-ED เฉลี่ย 77
ตารางที่ ข.7 ผลการศึกษา pH ที่เหมาะสมของการดูดซับ $Cu^{2+}$ ด้วยยาง ENR-ED 78
ตารางที่ ข.8 ผลการศึกษา pH ที่เหมาะสมของการดูดซับ $Cu^{2+}$ ด้วยยาง ENR-ED เฉลี่ย 79
ตารางที่ ข.9 ผลการศึกษา pH ที่เหมาะสมของการดูดซับ $Cr^{3+}$ ด้วยยาง ENR-ED 79
ตารางที่ ข.10 ผลการศึกษา pH ที่เหมาะสมของการดูดซับ $Cr^{3+}$ ด้วยยาง ENR-ED ต่อ) 80
ตารางที่ ข.11 ผลการศึกษา pH ที่เหมาะสมของการดูดซับ $Cr^{3+}$ ด้วยยาง ENR-ED เฉลี่ย 80
ตารางที่ ข.12 ผลการศึกษาความจุของการดูดซับ $Cu^{2+}$ ด้วยวิธีแบบการแช่ 81
ตารางที่ ข.13 ผลการศึกษาความจุของการดูดซับ $Cu^{2+}$ ด้วยวิธีแบบการแช่ เฉลี่ย 82
ตารางที่ ข.14 ค่า log q (มิลลิกรัม/กรัม) และ log C (มิลลิกรัม/กรัม) เพื่อหาความจุของการดูดซับ $Cu^{2+}$ เฉลี่ย 82
ตารางที่ ข.15 ผลการศึกษาความจุของการดูดซับ $Cr^{3+}$ ด้วยวิธีแบบการแช่ (Batch method) 82

# สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ ข.16 ผลการศึกษาความจุของการดูดซับ $Cr^{3+}$ ด้วยวิธีแบบการแช่ (Batch method) (ต่อ) 83

ตารางที่ ข.17 ผลการศึกษาความจุของการดูดซับ $Cr^{3+}$ ด้วยวิธีแบบการแช่ เฉลี่ย 79

ตารางที่ ข.18 ค่า log q (มิลลิกรัม/กรัม) และ log C (มิลลิกรัม/กรัม) เพื่อหาความจุของการดูดซับ $Cr^{3+}$ เฉลี่ย 84

# สารบัญภาพ


หน้า

ภาพที่ 2.1 โครงสร้าง cis 1, 4 Polyisoprene 4

ภาพที่ 2.2 โครงสร้างของอนุภาคยางในน้ำยางธรรมชาติ 7

ภาพที่ 2.3 เปรียบเทียบโครงสร้างโมเลกุลของยาง (ก) ก่อนให้แรงดึง (ข) ขณะให้แรงดึง 9

ภาพที่ 2.4 การเกิดปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันโดยใช้กรดเปอร์ออกซีคาร์บอกซิลิก 10

ภาพที่ 2.5 การเปิดวงของหมู่อีพอกไซด์เมื่อค่าคงที่การแตกตัวของ
กรดคาร์บอกซิลิกสูงขึ้น 11

ภาพที่ 2.6 ปฏิกิริยาของหมู่อีพอกไซด์กับสารเคมีชนิดต่างๆ 12

ภาพที่ 2.7 ไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir สมการ (2.2) 26

ภาพที่ 2.8 ไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir สมการ (2.3) 26

ภาพที่ 2.9 ไอโซเทอร์มการดูดซับของ BET สมการ (2.4) 27

ภาพที่ 2.10 ไอโซเทอร์มการดูดซับของ BET สมการ (2.5) 28

ภาพที่ 2.11 ไอโซเทอร์มการดูดซับของของ Freundlich สมการ(2.6) 29

ภาพที่ 4.1 สเปกตรัม FT-IR ของยางธรรมชาติ 44

ภาพที่ 4.2 สเปกตรัม FT-IR ของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ได้ประยุกต์ตาม
วิธีการของเจริญ นาคะสรรค์คณะ (2544) ทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 10 ชั่วโมง 45

ภาพที่ 4.3 กราฟมาตรฐานเปอร์เซ็นต์โมลอิพอกไซด์ของยางธรรมอีพอกไซด์จากการ
วิเคราะห์ด้วยเครื่อง FT-IR (Davey and Loadman, 1984) 45

ภาพที่ 4.4 ยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ได้ประยุกต์ตามวิธีการของเจริญนาคะสรรค์คณะ(2544) 46

ภาพที่ 4.5 สเปกตรัม FT-IR ของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ดัดแปรด้วยเอทิลีนไดเอมีน 47

ภาพที่ 4.6 ปฏิกิริยาการดัดแปรยางธรรมชาติอิพอกไซด์ด้วยเอทีลีนไดเอมีน 48

ภาพที่ 4.7 การโครออนิเนตโดเวเลตระหว่างโลหะกับหมู่ของเอมีนของ poly(acrylo-
amidino diethylenediamine) (Youg Gun และ Ung Su Choi, 2007) 48

ภาพที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับโลหะ $Cu^{2+}$ ที่เวลาต่างๆ 50

ภาพที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับโลหะ $Cr^{3+}$ ที่เวลาต่างๆ 51

ภาพที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับโลหะ $Cu^{2+}$ และ $Cr^{3+}$
ที่เวลาต่างๆ 52

# สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับโลหะ $Cu^{2+}$ ที่ pH ต่างๆ 54
ภาพที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับโลหะ $Cr^{3+}$ ที่ pH ต่างๆ 55
ภาพที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับโลหะ $Cu^{2+}$ และ $Cr^{3+}$ ที่ pH ต่างๆ 56
ภาพที่ 4.14 ความสัมพันธ์ความจุของการดูดซับ $Cu^{2+}$ โดยใช้สม การของ Freundlich 58
ภาพที่ 4.15 ความสัมพันธ์ความจุของการดูดซับ $Cr^{3+}$ โดยใช้สมการของ Freundlich 59
ภาพที่ 4.16 การเกิดพันธะโคออร์ดิเนตโคเวเลนต์ระหว่างตัวดูดซับยาง ENR-ED กับโลหะ $Cr^{3+}$ 61
ภาพที่ ค.1 กราฟมาตรฐานในการวิเคราะห์ $Cu^{2+}$ ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บ-ชันสเปคโทรโฟโตมิเตอร์(AAS) เพื่อศึกษาเวลาสมดุลของการดูดซับที่เวลาต่างๆ 86
ภาพที่ ค.2 กราฟมาตรฐานในการวิเคราะห์ $Cu^{2+}$ ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บ-ชันสเปคโทรโฟโตมิเตอร์(AAS) เพื่อศึกษา pH ที่เหมาะสมของสารละลายโลหะในการดูดซับ 87
ภาพที่ ค.3 กราฟมาตรฐานในการวิเคราะห์ $Cu^{2+}$ ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บ-ชันสเปคโทรโฟโตมิเตอร์(AAS) เพื่อศึกษาความจุของการดูดซับ 87
ภาพที่ ค.4 กราฟมาตรฐานในการวิเคราะห์ $Cr^{3+}$ ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บ-ชันสเปคโทรโฟโตมิเตอร์(AAS) เพื่อศึกษาเวลาสมดุลของการดูดซับที่เวลาต่างๆ 88
ภาพที่ ค.5 กราฟมาตรฐานในการวิเคราะห์ $Cr^{3+}$ ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บ-ชันสเปคโทรโฟโตมิเตอร์(AAS) เพื่อศึกษา pH ที่เหมาะสมของสารละลายโลหะในการดูดซับ 88
ภาพที่ ค.6 กราฟมาตรฐานในการวิเคราะห์ $Cr^{3+}$ ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บ-ชันสเปคโทรโฟโตมิเตอร์(AAS) เพื่อศึกษาความจุของการดูดซับ 89

# บทที่ 1
# บทนำ

**ความสำคัญที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย**

โลหะโดยทั่วไปในธรรมชาติมีความเป็นพิษและสามารถก่อมะเร็งได้ แม้แต่ในปริมาณต่ำๆ (B.L.Rivas และคณะ, 2007) การปนเปื้อนโลหะในสิ่งแวดล้อมนั้น ถูกปล่อยออกมาจากอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์จะมีการใช้ทองแดง และโครเมียมในกระบวนการผลิต ดังนั้นในน้ำเสียจะพบทองแดง และโครเมียมในปริมาณมาก ( ฉัตรปกรณ์ นันทวงค์ และ คณะ, 2548 ) นอกจากนั้นยังพบในอุตสาหกรรมสารเคมี การผลิตท่อน้ำ การผลิตปุ๋ย และการผลิตแบตเตอรี่ ล้วนแล้วแต่ปล่อยโลหะหนักที่ได้กล่าวมาข้างต้นออกมาทั้งสิ้น (Youg Gun & Ung Su Choi, 2007) และมีการปนเปื้อนของโลหะหนักอื่นนอกเหนือจากโลหะหนักที่ได้กล่าวแล้ว จากการศึกษาการปนเปื้อนของโลหะหนักแหล่งน้ำบริเวณชายฝั่งทะเลและแม่น้ำสายต่างๆ ของประเทศไทย พบว่ามีการปนเปื้อนโลหะหนักได้แก่ ปรอท แคดเมียม ตะกั่ว สังกะสี ทองแดง นิกเกิล เหล็ก และแมงกานิส บริเวณชายฝั่งทะเลภาคตะวันออกบริเวณจังหวัดตราด (แววตา ทองระอา, 2549) บริเวณทะเลสาบสงขลามีการปนเปื้อนโลหะได้แก่ ทองแดง ตะกั่ว และปรอท เกินค่ามาตรฐาน (ประดิษฐ์ มีสุข และ เสาวณี โพชนุกูล, 2548) บริเวณแม่น้ำน่านในจังหวัดอุตรดิตถ์ มีการปนเปื้อนของ ทองแดง เหล็ก แมงกานิส และตะกั่ว (ชูสิน ธิรสวัสดิ์, 2551) บริเวณแม่น้ำกวงจังหวัดลำพูน มีการปนเปื้อนของ เหล็ก ตะกั่ว โครเมียม (นิธิวัต จำรูญรัตน์, 2548) นอกจากทะเลและแม่น้ำ พบว่าน้ำบาดาลซึ่งถือได้ว่าเป็นน้ำที่ใช้ในการอุปโภคบริโภคที่มักใช้กันในบ้านเรือนทั้งในตัวเมืองและชนบท พบว่าน้ำบาดาลที่อยู่ใกล้กับแหล่งปฏิกูลในตัวเมืองขอนแก่นมีการปนเปื้อนโลหะหนัก แคลเซียม แมกนิเซียม โซเดียม โพแทสเซียม เหล็ก แมงกานิส สังกะสี ทองแดง แคดเมียม ตะกั่ว โครเมียม ปรอท คาร์บอเนต ซัลเฟส และไนเตรท ซึ่งพบว่ามีปริมาณปรอทเกินค่ามาตรฐาน (ฉลอง บัวผัน และ มนตรี บุญเสนอ, 2542) จะเห็นได้ว่าในแหล่งน้ำหลายๆ ที่ใช้ในการอุปโภคบริโภคมีการปนเปื้อนโลหะหนัก และโลหะหนักบางชนิดมีค่าเกินมาตรฐาน เมื่อได้รับปริมาณโลหะมากจะทำให้เกิดอันตรายต่อร่างกาย ดังนั้นการกำจัดโลหะก่อนปล่อยลงในแหล่งน้ำของโรงงานต่างๆ ถือได้ว่าเป็นความรับผิดชอบของสังคมของโรงงานและการกำจัดโลหะก่อนการอุปโภคบริโภค ซึ่งมีความจำเป็นเพื่อป้องกันอันตรายที่เกิดจากโลหะหนัก

วิธีการกำจัดโลหะมีหลายวิธี เช่น การแลกเปลี่ยนไอออน รีเวอร์สออสโซ การดูดซับ การเกิดสารประกอบเชิงซ้อน และการตกตะกอน ในวิธีทั้งหมดนี้การดูดซับเป็นวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก และแก๊สหลายชนิด (Gulay Bayramoglu & M. Yakup Arica, 2005) นักวิจัยได้ศึกษาวัสดุดูดซับหลายชนิด และพบว่ามีตัวดูดซับหลายชนิดที่นิยมใช้ เช่น ออกไซด์ของแร่ธาตุเรซิน ตัวดูดซับชีวภาพ เส้นใยคีเลตติงพอลิเมอร์ (Polymeric chelating fiber) และตัวดูดซับพอลิเมอร์ (Polymeric adsorbent) (A. Saeed และคณะ, 2007) จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมามีการเปรียบเทียบระหว่างตัวดูดซับพอลิเมอร์กับถ่านกัมมันต์ พบว่าตัวดูดซับที่ผลิตจากพอลิเมอร์มีหมู่ฟังก์ชันที่ทำหน้าที่ดูดซับโลหะหนัก ทำให้การดูดซับดีกว่าถ่านแม้ว่าถ่านกัมมันต์จะมีพื้นผิวจำเพาะในการดูดซับสูงก็ตาม (Youg Gun & Ung Su Choi, 2007) ยางพาราเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติ และโครงสร้างทางเคมีประกอบด้วยพันธะคู่ซึ่งสามารถดัดแปรโดยหมู่ฟังก์ชันที่สามารถเกิดพันธะกับโลหะหนักได้ เช่น หมู่เอมีน เนื่องจากยางพาราเป็นพืชเศรษฐกิจของประเทศไทยโดยการส่งออกส่วนใหญ่จะส่งในรูปวัตถุดิบซึ่งมีมูลค่าต่ำ เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าของยางพาราและสามารถแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากการปนเปื้อนของโลหะหนัก เป็นเหตุทำให้เกิดงานวิจัยครั้งนี้ขึ้น ซึ่งการวิจัยครั้งนี้เน้นการดัดแปรยางธรรมชาติอิพอกไซด์ด้วยเอทิลินไดเอมีน เพื่อใช้ในการดูดซับโลหะ ทองแดง และโครเมียม ในน้ำเสียที่สังเคราะห์

**วัตถุประสงค์ของการวิจัย**

1. ศึกษาการผลิตยางธรรมชาติอิพอกไซด์ดัดแปรด้วยเอทิลีนไดเอมีน (ENR-ED)
2. ศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ดัดแปรเอทิลีนไดเอมีน (ENR-ED)

**ผลที่คาดว่าจะได้รับ**

1. ได้ยางธรรมชาติอิพอกไซด์ ดัดแปรด้วยเอทิลีนไดเอมีน (ED)
2. ยางธรรมชาติอิพอกไซด์ดัดแปรเอทิลีนไดเอมีน (ENR-ED) มีประสิทธิภาพสูงในการดูดซับโลหะ
3. ได้สภาวะที่เหมาะในการดูดซับโลหะของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ดัดแปรเอทิลีนไดเอมีน (ENR-ED) โดยวิธีการดูดซับแบบถังแช่

**ขอบเขตของการวิจัย**

ศึกษาการดัดแปรยางธรรมชาติด้วยเอทิลีนไดเอมีน โดยการเตรียมยางธรรมชาติอิพอกไซด์ด้วยวิธีเปอร์ฟอร์มิกแล้วนำมาดัดแปรเอทิลีนไดเอมีน เพื่อให้สามารถดูดซับโลหะหนักจากน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งจะศึกษาการดูดซับโลหะหนักด้วยยางธรรมชาติอิพอกไซด์ดัดแปรเอทิลีนไดเอมีนด้วยวิธีแบบถังแช่

**ระยะเวลาการทำวิจัย**

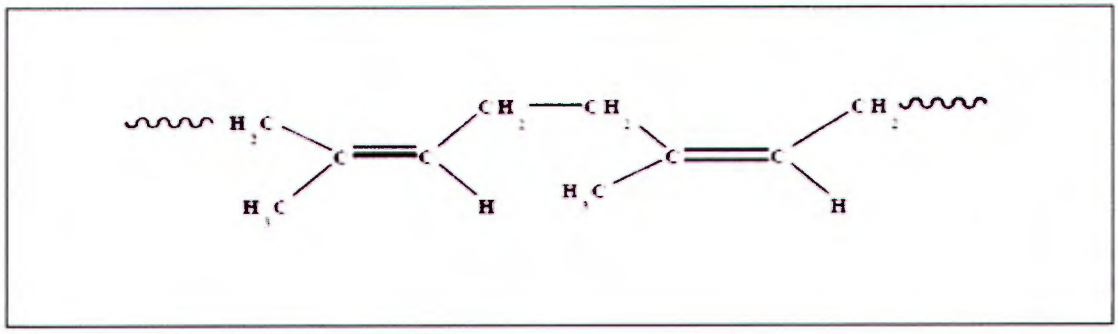
**ตารางที่ 1.1 กิจกรรมและระยะเวลาการทำการวิจัย**

| ลำดับ | กิจกรรมการวิจัย | พ.ศ. 2552 | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | มี.ค. | เม.ย. | พ.ค. | ก.ค. | ส.ค. | ก.ย. | ต.ค. |
| 1 | ศึกษาเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และเขียนเค้าโครงการวิจัย | ← | → | | | | | |
| 2 | ทำการศึกษาทดลอง | | ← | | | → | | |
| 3 | รวบรวมข้อมูล | | | | ← | → | | |
| 4 | วิเคราะห์ข้อมูลแปลผลและสรุปผลการวิจัย | | | | | | ← | → |
| 5 | จัดทำเอกสารรายงานผลการวิจัยและเผยแพร่ | | | | | | | ↔ |

# บทที่ 2
# เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

**ยางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR)**

ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมี คือ ซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน (cis-1,4–Polyisoprene, PI) เป็นพอลิเมอร์สายโซ่ตรงที่มีหน่วยซ้ำๆ กันเป็น $C_5H_8$ จากการศึกษาพบว่าหน่วยซ้ำๆ กันเหล่านี้มีการจัดแบบซิส (cis) กล่าวคือหมู่ $CH_2$ ของทุกหน่วยอยู่ข้างเดียวกันของพันธะคู่ตลอดสายโซ่ของยาง ซึ่งมีโครงสร้างดังภาพที่ 2.1



**ภาพที่ 2.1 โครงสร้าง cis 1, 4 Polyisoprene**
**ที่มา :** (จันทร์ฉาย ทองปิ่น และคณะ, 2548 ; หน้า 8)

โมเลกุลของยางธรรมชาติเป็นพอลิเมอร์ประเภทอีลาสโตเมอร์ ที่ได้จากธรรมชาติ คือ ต้นยางพาราที่มีชื่อทางพฤกษศาสตร์ คือ “ฮีเวีย บราซิเลียนซิส” (Hevea Brasiliensis) บางครั้งจึงเรียกยางธรรมชาติว่า “ยางฮีเวีย” (Hevea latex) หรือยางพารา

น้ำยางที่ได้จากต้นยางโดยปกติแล้วจะมีความหนาแน่นประมาณ 0.98 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร มีสภาพความเป็นกรดและด่าง (pH) ประมาณ 6.5 ถึง 7.0 และมีพลังงานพื้นผิวอิสระ (surface free energy) ตั้งแต่ 4.0 ถึง 4.5 ไมโครจูล/ตารางเซนติเมตร โดยทั่วในน้ำยางจะมีส่วนประกอบต่างๆ แบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ ดังนี้

| | |
|---|---|
| (1). ส่วนที่เป็นเนื้อยาง | 35 เปอร์เซ็นต์ |
| (2). ส่วนที่ไม่ใช่เนื้อยาง | 65 เปอร์เซ็นต์ |
| - ส่วนที่เป็นน้ำ | 55 เปอร์เซ็นต์ |

- ส่วนที่เป็นลูทอยด์ (Lutoid) และสารอื่นๆ 10 เปอร์เซ็นต์

**1. ส่วนที่เป็นเนื้อยาง (Rubber phase)**

ในส่วนของเนื้อยางนั้นจะมีลักษณะของอนุภาคเป็นทรงกลมคล้ายลูกแพร โดยจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.02 ถึง 3 ไมโครเมตร มีความหนาแน่นประมาณ 0.92 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยส่วนประกอบของเนื้อยางแห้งมีดังนี้

| | |
|---|---|
| ยางไฮโดรคาร์บอน | 86 เปอร์เซ็นต์ |
| น้ำ | 10 เปอร์เซ็นต์ |
| ไขมัน | 3 เปอร์เซ็นต์ |
| โปรตีน | 1 เปอร์เซ็นต์ |

นอกจากสารดังกล่าวแล้ว ยังมีโลหะบางชนิด เช่น แมกนีเซียมโพแทสเซียม และทองแดงปน อยู่ในส่วนของยางประมาณ 0.05 เปอร์เซ็นต์

อนุภาคยางเป็นสารที่ไม่ละลายน้ำและมีลักษณะเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ ในสภาพน้ำยางสดผิวรอบอนุภาคถูกหุ้มห่อด้วยไขมันพวกฟอสโฟลิปิด (Phospholipid) และโปรตีน โดยฟอสโฟลิปิดเป็นตัวที่ยึดระหว่างไฮโดรคาร์บอนและสารโปรตีน

**2. ส่วนที่ไม่ใช่เนื้อยาง**

**2.1 ส่วนที่เป็นน้ำ (Aqueous phase)**

**ส่วนที่เป็นน้ำ (Aqueous phase)** หรือ เรียกว่า ซีรัม มีความหนาแน่นประมาณ 1.02 กรัม/มิลลิลิตร ประกอบด้วยสารเคมีต่างๆ ดังนั้น

**2.1.1 คาร์โบไฮเดรต** ส่วนใหญ่เป็นพวกแอลเมททิลลิโนซิทอล (l-Methy linositol) หรือที่เรียกว่า ควีบราซิทอล (Quebrachitol) มีอยู่ประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำยาง และยังมีคาร์โบไฮเดรตอื่นๆ บ้างเล็กน้อยได้แก่พวก กลูโคส ซูโครส กาแลคโตส ฟรุกโตส เป็นต้น คาร์โบไฮเดรตเหล่านี้มีอิทธิพลเพียงเล็กน้อยต่อน้ำยาง กล่าวคือ หากมีการรักษาสภาพน้ำยางไม่เพียงพอ จุลินทรีย์จะเปลี่ยนคาร์โบไฮเดรตไปเป็นพวกกรดไขมันที่ระเหยได้ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นกรดฟอร์มิก อะซิติก และโพรพิโนอิก กรดเหล่านี้มีผลทำให้น้ำยางเสียสถานะและจับตัวเป็นก้อนได้

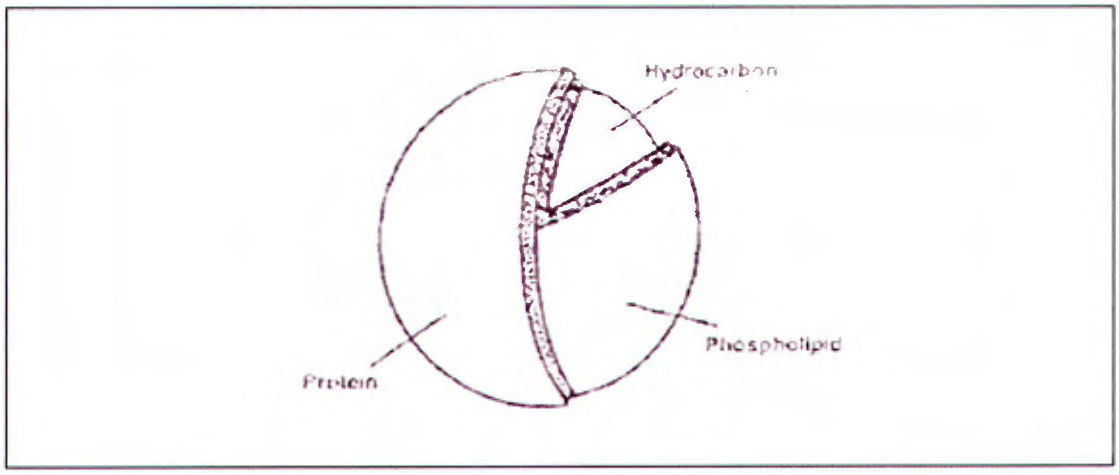
**2.1.2 โปรตีน และกรดอะมิโนโปรตีน** ที่สำคัญได้แก่ อัลฟา-โกลบูลิน ($\alpha$-globulin) และฮีวิน (Hevein) อัลฟา-โกลบูลินเป็นโปรตีนชนิดหนึ่งที่มีมากในส่วนน้ำของน้ำยางสด มีคุณสมบัติไม่ละลายในน้ำกลั่นแต่ละลายได้ในสารละลายของเกลือ ของกรด และของด่าง การเติมแอมโมเนียลงในน้ำยางจะเพิ่มการเคลื่อนไหวของอัลฟา-โกลบูลิน และอนุภาคของยาง ซึ่งเป็นการช่วยรักษาสภาพน้ำยางได้

**2.2 ส่วนที่เป็นลูทอยด์ (Lutoid) และสารอื่นๆ**

ลักษณะของลูทอยด์เป็นรูปกลมมีเยื่อยางห่อหุ้มอยู่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 2-5 ไมโครเมตร หนักกว่าอนุภาคยางภายในเยื่อบางของลูทอยด์ประกอบด้วยของเหลว ที่เรียกว่า บีซีรัม (Bserum) มี pH ประมาณ 5.5 เป็นสารละลายของกรดเกลือ แร่โปรตีน น้ำตาล และพอลิฟีนอลออกซิเดส (Polyphenol Oxidase) พอลิฟีนอลออกซิเดส ทำให้น้ำยางมีสีคล้ำเมื่อสัมผัสกับอากาศหรือออกซิเจนลูทอยด์ในน้ำยางมีอิทธิพลต่อความเหนียวหนืด และสภาพการเป็นสารแขวนลอยของน้ำยางสด กล่าวคือ ลูทอยด์จะจับตัวได้อย่างเต็มที่ และเร็วกว่าส่วนอื่นๆ ของน้ำยาง จากหลักการนี้ได้นำไปใช้ประโยชน์ในการทำยางเครพขาว โดยทำให้น้ำยางส่วนที่มีสีเหลืองจับตัวกันแล้วแยกออกมาก่อน แล้วจึงให้น้ำยางที่เหลือซึ่งมีสีขาวจับตัวอย่างสมบูรณ์

ลูทอยด์มีคุณสมบัติที่เกิดปฏิกิริยาออสโมซิส (Osmosis) ได้ง่าย ดังนั้นการเติมน้ำลงในน้ำยาง จึงมีผลทำให้ลูทอยด์เกิดการบวมหรือพองตัวแล้วแตกออก ทำให้ความหนืดของยางเพิ่มขึ้น ในวิธีการแปรรูปน้ำยางเป็นยางแห้งได้รวมเอาขั้นตอนของการเติมน้ำ ทำให้น้ำยางเจือจางก่อนการทำให้ยางจับตัวหมายความว่า ลูทอยด์เกิดการบวมหรือพองตัวแล้วแตกออก ก่อนที่น้ำยางจะจับตัว และส่วนของลูทอยด์จะต้องติดอยู่ภายในก้อนยางที่จับตัวด้วย ซึ่งจะมีผลกระทบต่อคุณสมบัติของยางได้ เมื่อเจือจางน้ำยางด้วยน้ำ ความหนืดของน้ำยางจะสูงในระยะแรก จนถึงจุดที่หนืดเต็มที่แล้วความหนืดจะลดลงทันที การเปลี่ยนแปลงดังกล่าว เนื่องจากลูทอยด์ในน้ำยางบวมแล้วแตกออก การกรีดยางทำให้น้ำยางภายในท่อน้ำยางเจือจาง ซึ่งมีผลทำให้ลูทอยด์พองตัว แล้วความหนืดของน้ำยางจะเพิ่มขึ้น อันเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้น้ำยางหยุดไหล อีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ลูทอยด์เกิดการเปลี่ยนแปลงจนกระทั่งแตกออก คือขณะที่น้ำยางไหลออกจากต้นยางลูทอยด์จะเกิดการเสียดสีกันเองมีผลทำให้ลูทอยด์แตกได้

นอกจากนี้ในชั้นของลูทอยด์ยังมีสารอีกพวกหนึ่ง ที่เรียก อนุภาคฟรี-วิสลิง (Frey-Wyssling) อนุภาคนี้มีลักษณะกลมอยู่กันเป็นกลุ่ม มีสีเหลืองจัด ไม่ใช่เป็นส่วนของเนื้อยาง มีขนาดและความหนาแน่นมากกว่ายางเล็กน้อย สีเหลืองของฟรี-วิสลิง เป็นผลเนื่องจากสารคาโรทีนอยด์ ฟรี-วิสลิงประกอบด้วยไขมัน และคาโรทีนอยด์ จะไม่พบอนุภาพฟรี-วิสลิงในน้ำยางข้นที่ใส่แอมโมเนีย ทั้งนี้อาจเป็นเพราะอนุภาคเหล่านี้ถูกแยกออกระหว่างการปั่นน้ำยาง หรืออาจละลายในซีรัมขณะเติมแอมโมเนียลงในน้ำยาง ในการทำให้น้ำยางข้นโดยการปั่น จะมีการเติมแอมโมเนียเพื่อรักษาสภาพน้ำยาง แอมโมเนียช่วยเอาลูทอยด์ออก และเยื่อของลูทอยด์อาจละลายอยู่ในสารละลายแอมโมเนีย เกิดเป็นสารละลายสีน้ำตาลกับตะกอน (Sludge) ซึ่งมีลักษณะเป็นตมสีขาว ตะกอนนี้อาจเป็นพวกแมกนีเซียมฟอสเฟตที่ไม่ละลายน้ำ มักติดอยู่ภายในตัวเครื่องปั่น และจะต้องคอยถอดเครื่องเพื่อล้างตะกอนออก ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตน้ำยางข้นลดลง




**ภาพที่ 2.2 โครงสร้างของอนุภาคยางในน้ำยางธรรมชาติ**
**ที่มา :** (จันทร์ฉาย ทองปิ่น และคณะ, 2548 ; หน้า 10)

น้ำยางที่ได้สามารถเก็บรักษาไว้ในรูปของเหลวแขวนลอย โดยการเติมสารละลายแอมโมเนีย ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้ประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ การเก็บรักษานี้ เรียกว่า Preservation เมื่อต้องการให้ตัวยางแยกออกจากระบบแขวนลอยก็เติมกรด เช่น กรดอะซิติก ฟอร์มิก หรือซัลฟิวริก ตัวยางจะรวมตัวกัน (Coagulate) เป็นก้อน เรียกว่า โคเอกูลัม (Coagulum) แล้วนำไปทำเป็นแผ่นล้างให้สะอาดแล้วทำให้แห้งโดยการผึ่งลม แผ่นยางที่ได้เรียกว่าแผ่นยางดิบ

ยางธรรมชาติ ประกอบด้วย 2 วัฏภาค ได้แก่ sol และ gel ความแตกต่าง คือ ความสามารถของการละลายในตัวทำละลายอินทรีย์บางชนิด เนื่องจากเป็นโมเลกุลที่มีปริมาณกิ่งก้านสาขามากๆ และการเชื่อมโยงโมเลกุลที่เกิดขึ้นในยางแตกต่างกัน ซึ่งการทำให้เกิดแรงเฉือนเชิงกล (Mechanical Shear) กับยาง เช่น การบด หรือการเกิดออกซิเดชันด้วยความร้อน และออกซิเจน จะทำให้เจลเฟสแตกออก จึงมีผลทำให้การละลายเพิ่มขึ้น ตัวทำละลายที่ดีของยางธรรมชาติ ได้แก่ Aliphatic และ Aromatic Hydrocarbon, Chlorinated Hydrocarbon, Ether, Carbon Disulfide ส่วนตัวไม่ทำละลาย ได้แก่ Ketone, Alcohol, Esters

**ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพบางอย่างของยางธรรมชาติ**

| | |
|---|---|
| Density | 0.92 |
| Refractive index ($20^0$C) | 1.52 |
| Coefficient of cubical expansion | 0.00062 / $^0$C |
| Cohesive energy density | 63.7 cal./g |
| Thermal conductivity | 0.00032 cal./sec/cm2 |
| Dielectric constant | 2.37 |
| Powder factor (1.000 cycles) | 0.15 – 0.2 |
| Volume resistively | $10^{15}$ homs/c.c. |
| Dielectric strength | 1.000 volts / mil |
| Heat of combusion | 10.700 cal./g |

**ที่มา** : (จันทร์ฉาย ทองปิ่น และคณะ, 2548 ; หน้า 11)

**สมบัติของยาง (Properties of Rubber)**

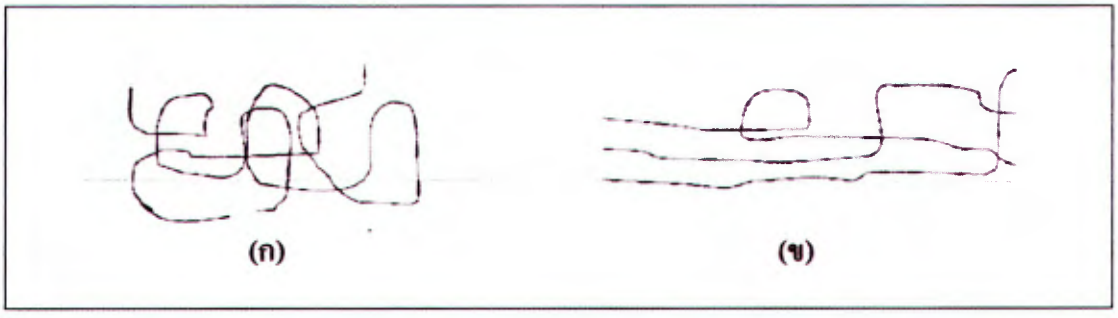
การที่ยางเป็นวัสดุที่นิยมใช้ และมีการประยุกต์ใช้อย่างมาก เนื่องจากมีคุณสมบัติที่เด่น คือ มีสมบัติที่ยืดหยุ่น (Flexible) เหนียว (Tough) แข็งแรง มีการซึมผ่านของน้ำและก๊าซต่ำ สามารถรับแรงดึงหรือแรงกดอัดได้อย่างมาก สามารถเปลี่ยนรูปร่างได้อย่างมากเมื่อได้รับแรง และกลับคืนสู่รูปร่างเดิมได้อย่างรวดเร็วเมื่อปล่อยแรง นอกจากนี้ยางบางชนิดยังมีสมบัติพิเศษ เช่น ทนน้ำมัน ทนอุณหภูมิสูง ทนตัวทำละลาย ฯลฯ ดังนั้น สามารถนำยางมาประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวางและหลากหลาย ผลิตภัณฑ์ยางแต่ละชนิดจะมีสมบัติแตกต่างกันไป เนื่องจากในผลิตภัณฑ์ยางจะมีองค์ประกอบหรือสูตรยาง

แตกต่างกันไป เช่น สารเชื่อมโยง (Vulcanizing agents) สารเร่งการเชื่อมขวาง (Accelerators) ตัวกระตุ้น (Activators) สารเพิ่มเนื้อ (Fillers) สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Antidegradants) ฯลฯ ชนิด และปริมาณของสารเหล่านี้ จะมีผลโดยตรงต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์-ยาง นอกจากนี้วิธี และสภาวะการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง เช่น อุณหภูมิ และเวลาในการขึ้นรูป ก็มีความสำคัญและมีผลต่อสมบัติของยางเช่นกัน

การที่ยางมีสมบัติเด่นดังกล่าว เนื่องมาจากโครงสร้างโมเลกุลที่มีลักษณะสายโซ่ของพอลิเมอร์ที่ยาว มีน้ำหนักโมเลกุลไม่น้อยกว่า 50,000 กรัม/โมล โมเลกุลสามารถเคลื่อนไหวได้ง่าย มีความยืดหยุ่นสูง นั่นหมายถึงว่า สายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์นั้น จะต้องไม่ถูกขัดขวาง

การเคลื่อนที่ และการหมุน เช่น การมีหมู่อะโรมาติกจะทำให้สายโซ่ของพอลิเมอร์นั้นมีความแข็ง ทำให้โมเลกุลไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ง่าย ทำให้พอลิเมอร์นั้นไม่มีสมบัติคล้ายยางอุณหภูมิคล้ายแก้ว ($T_g$) ต่ำ และสมบัติที่สำคัญของยาง คือ สามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้สมบูรณ์เมื่อปล่อยแรง เนื่องจากสายโซ่มีการเกี่ยวพัน (Entanglement) หรือเชื่อมโยงกัน (Crosslink)

การที่วัสดุยางสามารถกลับคืนสู่รูปร่างและขนาดเดิมได้อย่างสมบูรณ์ เมื่อปล่อยแรง โมเลกุลจะต้องมีการเชื่อมโยงเป็นโครงสร้างร่างแห (Crosslinking) โดยมีพันธะเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่ทุก 100 หน่วยโดยประมาณ เพื่อป้องกันการไม่กลับคืนตำแหน่งเดิม โครงสร้างโมเลกุลจะต้องยาว และสามารถ เปลี่ยนการจัดเรียงตัวได้ในหลายรูปแบบ เคลื่อนไหวได้ง่ายและมีความยืดหยุ่นสูง นั่นคือมีโครงสร้าง โมเลกุลที่เปลี่ยนโครงรูป (Configuration) ได้ง่ายโดยการหมุนของสายโซ่โดยไม่จำเป็นต้องใช้พลังงาน มากในการเปลี่ยนมุมระหว่างพันธะ แรงที่ทำให้ยางมีการหดตัวกลับเมื่อทำการยืดและปล่อยแรง เนื่องจากการเปลี่ยน "เอนโทรปี" (Entropy) พิจารณาการเปลี่ยนโครงสร้างโมเลกุลของยางก่อนและหลังการให้แรงดึงดังภาพที่ 2.3 (ก) และ (ข) เมื่อเปรียบเทียบโครงสร้างโมเลกุลของยาง (ก) ก่อนให้แรงดึง (ข) ขณะให้แรงดึง จะเห็นได้ว่าการยืดออกของยางเมื่อได้รับแรงดึง เป็นการเปลี่ยนโครงรูปจากโครงรูปที่พันกัน อย่างไม่เป็นระเบียบ เป็นโครงสร้างที่มีการเรียงตัวของสายโซ่ตามแนวแรง โดยไม่มีการเปลี่ยนมุมระหว่างพันธะ ดังนั้นโครงสร้างจะมีการเปลี่ยนพลังงานภายในเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่จะมีการลดลง



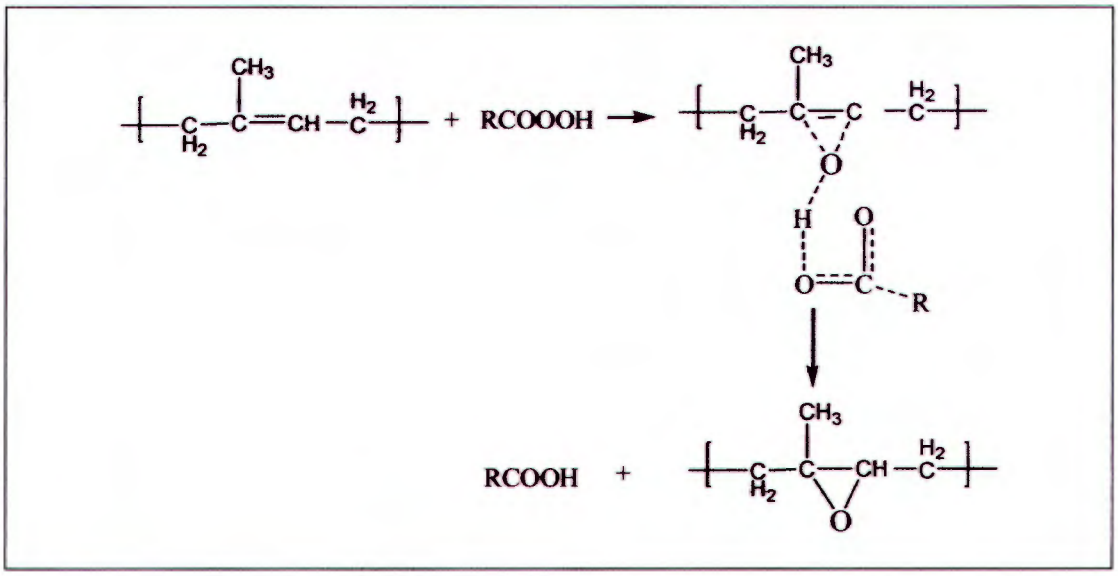

**ภาพที่ 2.3 เปรียบเทียบโครงสร้างโมเลกุลของยาง (ก) ก่อนให้แรงดึง (ข) ขณะให้แรงดึง**
**ที่มา** : (จันทร์ฉาย ทองปิ่น และคณะ, 2548 ; หน้า 12)

จะเห็นได้ว่าการยืดออกของยางเมื่อได้รับแรงดึง เป็นการเปลี่ยนโครงรูปจากโครงรูปที่พันกันอย่างไม่เป็นระเบียบ เป็นโครงสร้างที่มีการเรียงตัวของสายโซ่ตามแนวแรง โดยไม่มีการเปลี่ยนมุมระหว่างพันธะ ดังนั้นโครงสร้างจะมีการเปลี่ยนพลังงานภายในเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่จะมีการลดลงของเอนโทรปีอย่างมาก เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลมีการจัดเรียงตัวตามแนวแรง มี

ความเป็นระเบียบสูงขึ้น เนื่องจากตามธรรมชาติโมเลกุลชอบที่จะอยู่ในสภาวะไร้ระเบียบที่มีเอนโทรปีสูง ดังนั้นเมื่อมีการปล่อยแรงโมเลกุลพอลิเมอร์จึงหดกลับกลายเป็นโครงสร้างไร้ระเบียบเหมือนเดิม เป็นสาเหตุของการหดกลับของยาง การทำให้วัสดุคล้ายยางมีสมบัติความยืดหยุ่น และกลับคืนสู่สภาพเดิมสามารถทำได้ โดยการเติมสารเคมีจำพวก กำมะถัน (Sulphur) หรือเปอร์ออกไซด์ (Peroxide) เพื่อทำให้เกิดพันธะโคเวเลนต์เชื่อมโยงระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ โดยปฏิกิริยาที่เกิดนี้ เรียกว่า ปฏิกิริยาวัลคา-ไนเซชัน (Vulcanization)

**ปฏิกิริยาอิพอกซิเดชัน**

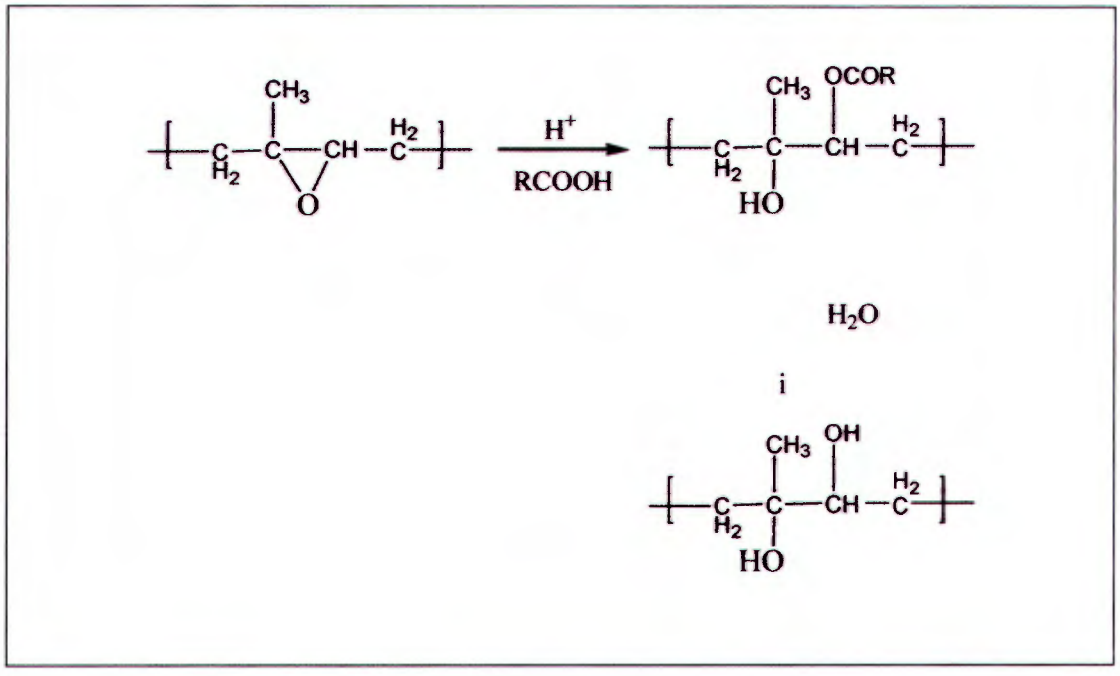
การทำปฏิกิริยาอิพอกซิเดชันเป็นวิธีหนึ่ง ที่ใช้ในการดัดแปรโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ โดยการใช้กรดเปอร์ออกซีเป็นสารเคมีในการทำปฏิกิริยา เช่น กรดเปอร์เบนโซอิก (Perbenzoic acid) กรดเปอร์พธาลิก (Perphthalic acid) กรดคลอโรเปอร์เบนโซอิก (Chloroperbenzoic acid) กรดโมโนเปอร์พธาลิก (Monoperphthalic acid) กรดเปอร์อะซิติก (Peracetic acid) หรือใช้กรดเปอร์อะซิติก โดยกรดพาราโทลูอีนซัลโฟนิก (p-Toluenesulfonic acid) เป็นต้น กลไกของปฏิกิริยาซึ่งเป็นที่ยอมรับเขียนโดย Bartlett ได้เสนอไว้ว่า อิเล็กโตรฟีลิกจะทำปฏิกิริยากับกรดเปอร์ออกซีคาร์บอกซิลิก (Peroxycarboxylic acid) ที่ตำแหน่งพันธะคู่ดังภาพที่ 2.4




**ภาพที่ 2.4 การเกิดปฏิกิริยาอิพอกซิเดชันโดยใช้กรดเปอร์ออกซีคาร์บอกซิลิก**

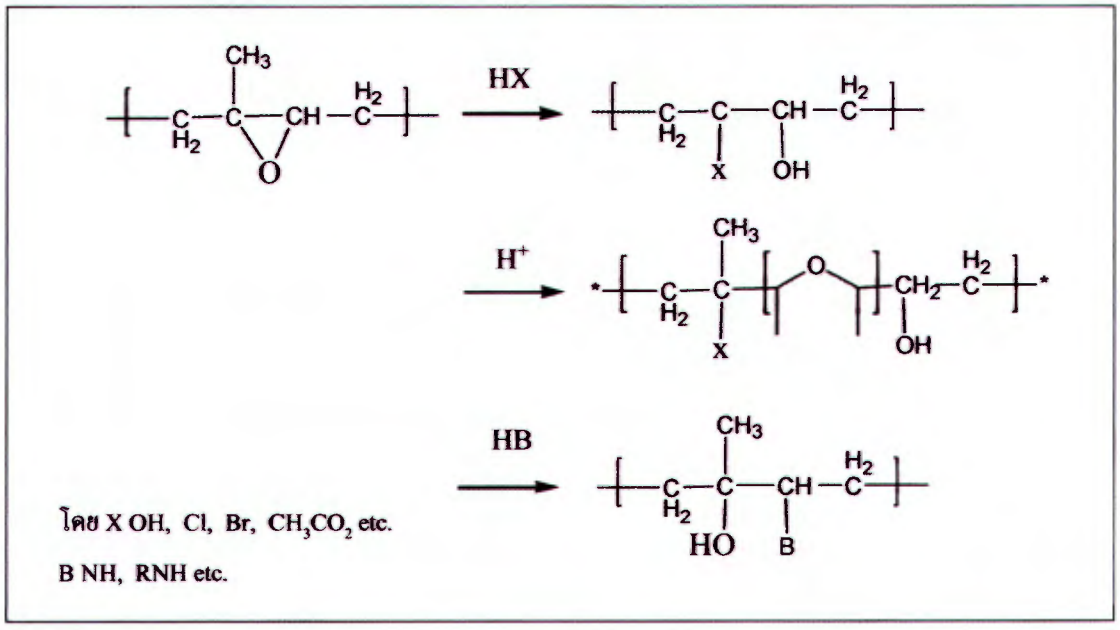
**ที่มา :** (ประวีณา ติระ , 2540)

อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับหมู่ที่ให้อิเล็กตรอนที่ตำแหน่งพันธะคู่ โครงสร้างของกรดเปอร์ออกซีคาร์บอกซิลิก และตัวทำละลาย เมื่อใช้สารตั้งต้นที่มีโครงสร้างเป็นแบบซิสในการทำปฏิกิริยาอิพอกซิเดชัน ที่ได้จะมีโครงสร้างเป็นแบบซิสเช่นเดียวกัน โดยเสถียรภาพของหมู่อิพอกซีจะลดลง เมื่อค่าคงที่การแตกตัว ของกรดคาร์บอกซิลิกเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้วงอิพอกไซด์เปิดออกโดยมีกลไกเปิดวงอีพอกไซด์แสดงดังภาพที่ 2.5




**ภาพที่ 2.5 การเปิดวงของหมู่อิพอกไซด์เมื่อค่าคงที่การแตกตัวของกรดคาร์บอกซิลิกสูงขึ้น**
**ที่มา :** (ประวีณา ติระ , 2540)

ยางธรรมชาติอิพอกไซด์ (Epoxidized natural rubber, ENR) ที่เกิดขึ้นสามารถใช้เป็นสารเริ่มต้นในการดัดแปรโครงสร้างต่อไปได้ เป็นผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆ ขึ้นอยู่กับชนิดของสารเคมีที่เข้าทำปฏิกิริยา ดังตัวอย่างต่อไปนี้




**ภาพที่ 2.6 ปฏิกิริยาของหมู่อิพอกไซด์กับสารเคมีชนิดต่างๆ**
**ที่มา :** (ประวีณา ติระ , 2540)

**โลหะหนัก (Heavy metal)**

โลหะหนัก หมายถึง โลหะที่มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5 ขึ้นไป มีเลขอะตอมอยู่ระหว่าง 23 ถึง 92 ภายในคาบที่ 4 ถึง 7 ของตารางธาตุ โลหะหนักมีสถานะเป็นของแข็ง (ยกเว้นปรอทที่เป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ) คุณสมบัติทางกายภาพของโลหะหนัก คือ นำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี มีความมันวาว เหนียว สามารถนำมาตีเป็นแผ่นบางๆ ได้ และสะท้อนแสงได้ดี คุณสมบัติทางเคมีที่สำคัญของโลหะหนัก คือ มีค่าออกซิเดชันได้หลายค่า ดังนั้นจึงสามารถรวมตัวกับสารอื่นๆ กลายเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (complex compound) ได้หลายรูปและเสถียรกว่าการเป็นโลหะอิสระ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์ (organometallic compound) ซึ่งสามารถถ่ายทอดเข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้โดยผ่านทางห่วงโซ่อาหาร (food chain) โลหะหนักสามารถแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อมได้โดยการปนเปื้อนลงในดิน น้ำ และอากาศ จากนั้นจึงเข้าสู่มนุษย์ พบว่าโลหะหนักหลายชนิดก่อให้เกิดอันตรายร้ายแรงเมื่อเข้าสู่สิ่งมีชีวิต และเกิดการสะสมในเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต

จากการสำรวจปริมาณ และคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะในเขตกรุงเทพมหาครมะนิลา และสหรัฐอเมริกา เปรียบเทียบกัน พบว่า ปริมาณโลหะหนักในน้ำทิ้งของโรงงานชุบโลหะในกรุงเทพฯ สูงกว่ามะนิลาและสหรัฐอเมริกา โดยโครเมียม นิกเกิล สังกะสี และทองแดง

มีปริมาณเกินเกณฑ์มาตรฐาน คือ 210, 62, 29 และ21 เท่า ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 2.2 และจากการสำรวจชนิด และปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะหนักที่มีไซยาไนด์ และไม่มีไซยาไนด์ เก็บจากศูนย์บริการกำจัดกากอุตสาหกรรมบางขุนเทียนกรุงเทพมหานคร แสดงในตารางที่ 2.3

**ตารางที่ 2.2 ปริมาณน้ำทิ้งและคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะในเขตกรุงเทพฯ มะนิลา และสหรัฐอเมริกา**

| คุณภาพน้ำ | กรุงเทพฯ | มะนิลา | สหรัฐอเมริกา | มาตรฐานน้ำทิ้ง* |
|---|---|---|---|---|
| ปริมาณน้ำทิ้ง ($m^3$/day) | 5.1 | 4.0 | 27.0 | - |
| ค่าความเป็นกรด-ด่าง | 6.4 | 6.6 | 8.0 – 9.0 | 5.5 – 9 |
| ปริมาณโครเมียม (mg/l) | 52.5 | 8.9 | 0.02 – 1.8 | ไม่เกิน0.25 |
| ปริมาณนิกเกิล (mg/l) | 62.0 | 9.0 | 2.0 – 4.5 | ไม่เกิน1.00 |
| ปริมาณสังกะสี (mg/l) | 145.0 | 44.8 | 1.0 – 125 | ไม่เกิน5.00 |
| ปริมาณทองแดง (mg/l) | 42.0 | 23.5 | 0.1 – 20 | ไม่เกิน2.00 |

*มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม กำหนดโดยกรมโรงงานอุตสาหกรรมกระทรวงอุตสาหกรรมตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 พ.ศ. 2539

**ที่มา** : (ประวีณา ติระ , 2540)

**ตารางที่ 2.3 ชนิดและปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะหนักที่มีไซยาไนด์ และไม่มีไซยาไนด์ เก็บจากศูนย์บริการกำจัดกากอุตสาหกรรมบางขุนเทียน กรุงเทพมหานคร**

| โลหะหนัก | น้ำเสียที่ไม่มีไซยาไนด์ (มิลลิกรัม/ลิตร) | น้ำเสียที่มีไซยาไนด์ (มิลลิกรัม/ลิตร) |
|---|---|---|
| โครเมียม | 337.5 | 42.5 |
| นิกเกิล | 213.4 | 19.3 |
| ทองแดง | 25 | 19.6 |
| แมงกานีส | 5.7 | 3.1 |
| สังกะสี | 171.3 | 296.3 |
| ตะกั่ว | 1.9 | 0 |
| เหล็ก | 1595.3 | 181 |
| แคดเมียม | 0 | 0 |
| รวม | 2,349.8 | 561.9 |

**ที่มา** : (ประวีณา ติระ , 2540)

ในศึกษาครั้งนี้ทำการศึกษาการดูดซับโดยใช้โลหะ 2 ชนิด ได้แก่ ทองแดงและโครเมียม ซึ่งทั้ง 2 ชนิดจะมีลักษณะและคุณสมบัติต่างกันดังนี้

**1. โลหะทองแดง**

**ทองแดง** คือธาตุที่มีเลขอะตอม 29 และสัญลักษณ์ คือ Cu นิกเกิลอยู่ในตารางธาตุหมู่ 29 เป็นที่ทราบกันว่ามนุษย์ใช้ประโยชน์จากทองแดงมาไม่น้อยกว่า 10,000 ปี พบหลักฐานว่ามนุษย์สามารถหลอมสกัดทองแดงให้บริสุทธิ์ได้เมื่อประมาณ 5000 ปีก่อนคริศตกาล ซึ่งก่อนที่มนุษย์จะรู้จักกับทองคำคือมนุษย์รู้จักทองคำ เมื่อประมาณ 4000 ปีก่อนคริศตกาล ลักษณะและคุณสมบัติต่างแสดงดังตาราง

**ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติทั่วไปของโลหะทองแดง**

| ทั่วไป | |
|---|---|
| ชื่อ, สัญลักษณ์, หมายเลข | ทองแดง, Cu, 29 |
| อนุกรมเคมี | โลหะทรานซิชัน |
| หมู่, คาบ, บล็อก | 11, 4, d |
| ลักษณะ | copper, metallic |
| มวลอะตอม | 63.546(3) กรัม/โมล |
| การจัดเรียงอิเล็กตรอน | $[Ar]\ 3d^{10}\ 4s^{1}$ |
| อิเล็กตรอนต่อระดับพลังงาน | 2, 8, 18, 1 |

**ที่มา** : (แววตา ทองระอา ; 2549)

**ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติทางกายภาพของโลหะทองแดง**

| คุณสมบัติทางกายภาพ | |
|---|---|
| สถานะ | ของแข็ง |
| ความหนาแน่น (ใกล้ r.t.) | 8.96 ก./ซม.$^3$ |
| ความหนาแน่นของของเหลวที่m.p. | 8.02 ก./ซม.$^3$ |
| จุดหลอมเหลว | 1357.77 K (1084.62 °C) |
| จุดเดือด | 2835 K(2562 °C) |
| ความร้อนของการหลอมเหลว | 13.26 กิโลจูล/โมล |
| ความร้อนของการกลายเป็นไอ | 300.4 กิโลจูล/โมล |
| ความร้อนจำเพาะ | (25 °C) 24.440 J/(mol·K) |

**ที่มา** : (แววตา ทองระอา ; 2549)

**ตารางที่ 2.6 คุณสมบัติของอะตอมโลหะทองแดง**

| คุณสมบัติของอะตอม | |
|---|---|
| โครงสร้างผลึก | สี่เหลี่ยมลูกบาศก์ |
| สถานะออกซิเดชัน | 2, 1(ออกไซด์เป็นเบสปานกลาง) |
| อิเล็กโตรเนกาติวิตี | 1.90 (พอลิงสเกล) |
| พลังงานไอออไนเซชัน (เพิ่มเติม) | ระดับที่ 1: 745.5 กิโลจูล/โมล |
| | ระดับที่ 2: 1957.9 กิโลจูล/โมล |
| | ระดับที่ 3: 3555 กิโลจูล/โมล |
| รัศมีอะตอม | 135 pm |
| รัศมีอะตอม (คำนวณ) | 145 pm |
| รัศมีโควาเลนต์ | 138 pm |
| รัศมีวานเดอร์วาลส์ | 140 pm |

**ที่มา** : (แววตา ทองระอา ; 2549)

**ตารางที่ 2.7 คุณสมบัติอื่นๆ ของโลหะทองแดง**

| อื่นๆ | |
|---|---|
| การจัดเรียงทางแม่เหล็ก | diamagnetic |
| ความต้านทานไฟฟ้า | (20 °C) 16.78 nΩ·m |
| การนำความร้อน | (300 K) 401 W/(m·K) |
| การขยายตัวจากความร้อน | (25 °C) 16.5 µm/(m·K) |
| ความเร็วเสียง (thin rod) | (r.t.) (annealed)<br>3810 m/s |
| โมดูลัสของยังก์ | 130 GPa |
| โมดูลัสของแรงเฉือน | 48 GPa |
| โมดูลัสของแรงบีบอัด | 140 GPa |
| อัตราส่วนปัวซอง | 0.34 |

**ที่มา** : (แววตา ทองระอา ; 2549)

**ประโยชน์** ส่วนใหญ่ใช้ประโยชน์ในงานด้านไฟฟ้า เช่น ทำสายไฟฟ้า ไดนาโม มอเตอร์ อุปกรณ์ และเครื่องมือไฟฟ้าต่างๆ เนื่องจากทองแดงทนทานต่อการกัดกร่อนของสารเคมี จึงใช้ทำหม้อน้ำรถยนต์ ผงทองแดงใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา นอกจากนี้ทองแดงยังใช้ทำโลหะผสมต่างๆ เช่น ทองเหลือง (ทองแดง+สังกะสี) ทองสัมฤทธิ์ (ทองแดง+ดีบุก) ทองเหลืองใช้ทำกลอน ประตู ภาชนะหุงต้ม ปลอกกระสุนปืน กุญแจใบพัดเรือ เป็นต้น ทองสัมฤทธิ์ใช้ทำลานนาฬิกา ปืนใหญ่ ระฆัง เป็นต้น สารประกอบคอปเปอร์ (II) ออกไซด์ใช้ทำยาฆ่าแมลงหรือฆ่าเชื้อรา สารประกอบเชิงซ้อนของทองแดง (Cu) ซึ่งเรียกว่า ฮีโมไซยานิน เป็นส่วนประกอบในเลือดของสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังบางชนิด เช่นปลาหมึก ปู หอยโข่ง แมงป่อง ฮีโมไซยานิน ทำหน้าที่ขนส่งออกซิเจนแทนฮีโมโกลบินนอกจากนั้นทองแดงยังเป็นส่วนประกอบของโปรตีนซึ่งมี ความสำคัญในกระบวนการสร้างฮีโมโกลบิน ถ้าร่างกายขาดทองแดงจะเป็นโรคโลหิตจาง กระดูกไม่สมประกอบประสาทเสื่อมและหลอดเลือดหัวใจพิการ นอกจากนั้นทองแดงยังมีธาตุจำเป็นสำหรับพืชด้วย เช่น จำเป็นสำหรับการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์ และเอนไซม์ของพืช

**2. โลหะโครเมียม**

โครเมียม (Chromium) เป็นโลหะมันวาวสีเทา ที่สามารถขัดเป็นในได้ดี และมีจุดหลอมเหลวสูง ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น และสามารถตีขึ้นรูปได้ สถานะออกซิเดชันที่ปรากฏมากที่สุดคือ +2 +3 และ +6 โดยที่ +3 เสถียรที่สุด +1 +4 และ +5 ปรากฏน้อย สารประกอบโครเมียมที่มีสถานะ +6 เป็นตัวออกซิไดส์อานุภาพสูง โครเมียมทำปฏิกิริยากับออกซิเจนทำให้เกิดชั้นออกไซด์บางๆ ที่ป้องกันการทำปฏิกิริยาเพิ่มเติมกับโลหะที่อยู่ภายใต้ ลักษณะและคุณสมบัติต่างๆ แสดงดังตาราง

**ตารางที่ 2.8 แสดงคุณสมบัติทั่วไปของโลหะโครเมียม**

| ทั่วไป | |
|---|---|
| ชื่อ, สัญลักษณ์, หมายเลข | โครเมียม, Cr, 24 |
| อนุกรมเคมี | โลหะทรานซิชัน |
| หมู่, คาบ, บล็อก | 6, 4, d |
| ลักษณะ | สีเงินมันวาว |
| มวลอะตอม | 51.9961 (6) กรัม/โมล |
| การจัดเรียงอิเล็กตรอน | [Ar] $3d^5$ $4s^1$ |
| อิเล็กตรอนต่อระดับพลังงาน | 2, 8, 13, |

**ที่มา** : (แววตา ทองระอา ; 2549)

**ตารางที่ 2.9 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของโลหะโครเมียม**

| คุณสมบัติทางกายภาพ | |
|---|---|
| สถานะ | ของแข็ง |
| ความหนาแน่น (ใกล้ r.t.) | 7.15 ก./ซม.$^3$ |
| ความหนาแน่นของของเหลวที่m.p. | 6.3 ก./ซม.$^3$ |
| จุดหลอมเหลว | 2180 K (1907 °C) |
| จุดเดือด | 2944 K(2671 °C) |
| ความร้อนของการหลอมเหลว | 21.0 กิโลจูล/โมล |
| ความร้อนของการกลายเป็นไอ | 339.5 กิโลจูล/โมล |
| ความร้อนจำเพาะ | (25 °C) 23.35 J/(mol·K) |

**ที่มา** : (แววตา ทองระอา ; 2549)

**ตารางที่ 2.10 คุณสมบัติของอะตอมโลหะโครเมียม**

| คุณสมบัติของอะตอม | |
|---|---|
| โครงสร้างผลึก | cubic body centered |
| สถานะออกซิเดชัน | 6, 3, 2 (ออกไซด์เป็นกรดแก่) |
| อิเล็กโตรเนกาติวิตี | 1.66 (พอลิงสเกล) |
| พลังงานไอออไนเซชัน (เพิ่มเติม) | ระดับที่ 1: 652.9 กิโลจูล/โมล |
| | ระดับที่ 2: 1590.6 กิโลจูล/โมล |
| | ระดับที่ 3: 2987 กิโลจูล/โมล |
| รัศมีอะตอม | 140 pm |
| รัศมีอะตอม (คำนวณ) | 166 pm |
| รัศมีโควาเลนต์ | 127 pm |

**ที่มา** : (แววตา ทองระอา ; 2549)

**ตารางที่ 2.11 คุณสมบัติอื่นๆ ของโลหะโครเมียม**

| อื่นๆ | |
|---|---|
| การจัดเรียงทางแม่เหล็ก | AFM (rather: SDW) |
| ความต้านทานไฟฟ้า | (20 °C) 125 $n\Omega \cdot m$ |
| การนำความร้อน | (300 K) 93.9 W/(m·K) |
| การขยายตัวจากความร้อน | (25 °C) 4.9 µm/(m·K) |
| ความเร็วเสียง (ท่อนบาง) | (20 °C) 5940 m/s |
| โมดูลัสของยังก์ | 279 GPa |
| โมดูลัสของแรงเฉือน | 115 GPa |
| โมดูลัสของแรงบีบอัด | 160 GPa |
| อัตราส่วนปัวซอง | 0.21 |

**ที่มา** : (แววตา ทองระอา ; 2549)

**ประโยชน์** ใช้เป็นส่วนผสมในเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) ประกอบด้วย Fe 73 เปอร์เซ็นต์, Cr 18 เปอร์เซ็นต์, Ni 8 เปอร์เซ็นต์ และ C 0.4 เปอร์เซ็นต์ ใช้ทำเครื่องมือผ่าตัด ตัวเรือนนาฬิกา ช้อน และภาชนะต่างๆ ใช้เคลือบบนผิวเหล็ก เพื่อความสวยงามและป้องกันการผุกร่อนของเหล็กใช้เป็นส่วนประกอบในเหล็กกล้าที่ใช้ทำตู้นิรภัย เครื่องยนต์ เกราะกันกระสุน ใช้ทำโลหะเจือโคบอลต์ซึ่งใช้ทำกระดูกเทียม $Cr_2O_3$ เป็นของแข็งสีเขียวแก่ใช้ ทำสีเพื่อเขียนลวดลายเครื่องเคลือบดินเผา $Na_2Cr_2O_7$ ใช้อุตสาหกรรมฟอกหนัง สารละลายผสมของ $K_2Cr_2O_7$ กับกรดซัลฟิวริก (H2SO4) เข้มข้นใช้ทำความสะอาดเครื่องแก้วในห้องปฏิบัติการเคมี

**โทษ หรือพิษ** พิษของโครเมียมจะเป็นพิษเฉียบพลันจะทำให้เกิดความเสียงายต่อท่อไต haxavalent chromium มีฤทธิ์กัดกร่อนทำให้เกิดแผลทะลุของจมูกได้ และยังทำให้เกิดแผลในบริเวณอื่นได้ด้วย พิษของโครเมียมส่วนใหญ่เกิดจากเฮกซะโครเมียมซึ่งสามารถก่อให้เกิดมะเร็งทางเดินหายใจได้อีกด้วย กลไกการเกิดมะเร็งที่เกิดขึ้นนี้เกี่ยวข้องกับรีดิวซ์ และ การเกิด Reactivr intermediates นอกจากนี้ โครเมียมยังทำให้เกิดอาการแพ้ของผิวหนัง ซึ่งหากโครเมียมเข้าสู่รางกายโดยทางจมูก และผิวหนัง จะทำให้เกิดการอักเสบที่บริเวณผิวหนัง มือ แขน ขา ใบหน้า และหน้าอก ถ้าร่างกายได้รับปริมาณมากจะทำให้กระเพาะอาหาร และลำไส้เกิดการระคายเคือง รวมทั้งทำให้เกิดโรคมะเร็งปอด มะเร็งในระบบย่อยอาหาร และมะเร็งจมูก โครเมียมที่อยู่ในรูปของ trivalent chromium จะมีความจำเป็นต่อการเปลี่ยนแปลงของไขมันและกลูโคสในร่างกาย และป้องกันไม่ให้เกิดโรคเบาหวาน แต่โครเมียมที่อยู่ในรูปของ haxavalent chromium 10 มิลิกรัมต่อกิโลกรัมของร่างกายจะทำให้เซลล์ในตับตาย เกิดโรคตับอักเสบทำให้ตายได้

**การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย**

การกำจัดสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ต่างๆ ที่ละลายอยู่ในน้ำเสีย โดยเฉพาะอย่างยิ่งโลหะหนักที่ออกมาจากขบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมมีหลายวิธี แต่การเลือกใช้วิธีใดนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น ความเป็นไปได้ทางเทคนิค ค่าใช้จ่ายด้านเครื่องมืออุปกรณ์ และเทคโนโลยี ตลอดจนความชำนาญของบุคลากรที่ปฏิบัติงาน ดังนั้นการจะบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อน จึงควรเลือกวิธีการหรือเทคนิคในการบำบัด และกำจัดที่เหมาะสม วิธีการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อนมีหลายวิธี ได้แก่

**1. การตกตะกอนทางเคมี (chemical precipitation)**

เป็นการเติมสารเคมีลงในน้ำ เพื่อทำให้ไอออนของโลหะหนักที่ละลายอยู่ในน้ำเปลี่ยนสถานะมาอยู่ในรูปของแข็งที่ไม่ละลายน้ำเกิดเป็นตะกอนจมตัวลง แล้วจึงแยกออกจากน้ำด้วยวิธีการตกตะกอนหรือการกรอง สารเคมีที่นิยมใช้ ได้แก่ สารส้ม ปูนขาว แคลเซียมไฮดรอกไซด์

เฟอริคคลอไรด์ เฟอริคซัลเฟต เป็นต้น โดยทั่วไปนิยมตกตะกอนโลหะหนักเป็นตะกอน ไฮดรอกไซด์ ซึ่งโลหะแต่ละชนิดจะตกตะกอนได้ดีที่ค่าความเป็นกรด-ด่างต่างๆ กัน ส่วนตะกอนหรือสลัดจ์ (sludge) ที่ได้จะมีส่วนประกอบของโลหะที่เป็นพิษต้องนำไปกำจัดต่อ

**2. การออสโมซิสย้อนกลับ (reverse osmosis)**

เป็นขบวนการที่อาศัยแรงดันสูงผ่านเยื่อกรอง (semipermeable membrane) เพื่อแยกสารอินทรีย์ขนาดใหญ่และสารอนินทรีย์ชนิดต่างๆ ที่ละลายอยู่ในน้ำ มักใช้แรงดัน 300-1,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้วหรือสูงกว่า เยื่อกรองจะยอมให้เฉพาะโมเลกุลของน้ำไหลผ่านไอออนต่างๆ ไม่สามารถผ่านเยื่อกรองได้ แผ่นเยื่อกรองที่นิยมใช้มักทำมาจากเซลลูโลสอะซีเตท (cellulose acetate) มีความหนาประมาณ 100 ไมครอน ประกอบด้วย 2 ชั้น ชั้นที่ใช้งานหนาประมาณ 0.2 ไมครอน ทำหน้าที่ขัดขวางมิให้สารต่างๆ ซึมผ่านไปพร้อมกับน้ำ อีกชั้นทำหน้าที่เป็นพื้นรองรับและมีรูพรุนสำหรับให้น้ำไหลผ่านได้

**3. อิเล็กโตรไดอะไลซิส (electrodialysis)**

เป็นขบวนการอาศัยเยื่อกรองเช่นเดียวกันแต่ใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นแรงขับดันให้เกิดการแยกไอออนออกจากน้ำ แผ่นเยื่อกรองที่ใช้มี 2 ชนิด คือ แผ่นบวก และแผ่นลบ ซึ่งยอมให้เฉพาะไอออนที่มีประจุเหมือนกันไหลผ่าน แต่โมเลกุลของน้ำจะไหลผ่านได้ยากทำให้แยกไอออนของโลหะออกจากน้ำได้

**4. การทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นและรีดักชั่น (oxidation and reduction)**

คือกระบวนการที่เกิดปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับการให้และรับอิเล็กตรอนของอะตอม โดยการใช้สารออกซิแดนท์ (oxidant) และสารรีดิวซิ่ง (reducing agent) ทำปฏิกิริยากับสารต่างๆ ในน้ำเสีย สารออกซิแดนท์มีหลายชนิด เช่น โอโซน ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ด่างทับทิม และคลอรีน ส่วนสารรีดิวซิ่ง ได้แก่ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ โซเดียมไบซัลไฟต์ เมตาไบซัลไฟต์ ไฮโดรซัลไฟต์ และเฟอร์รัสซัลเฟต เป็นต้น

**5. การแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange)**

เป็นปรากฏการณ์ชนิดหนึ่ง ซึ่งมีการสับเปลี่ยนไอออนกลับไปกลับมา (reversible interchange) ระหว่างตัวกลาง 2 ชนิด คือ ตัวกลางของเหลว และตัวกลางของแข็ง โดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านโครงสร้างของตัวกลางของแข็งที่เรียกว่า สารแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ ซีโอไลต์ (zeolite) และเรซินแลกเปลี่ยนไอออน (resinuos ion exchange)

**5.1 ซีโอไลต์มีทั้งแบบธรรมชาติ** ได้แก่ green sand และแบบสังเคราะห์จากสารประกอบต่างๆ เช่น โซเดียมซิลิเกต ซึ่งมีโซเดียมไอออน (Na+) ที่ใช้แลกเปลี่ยนกับไอออนบวกที่อยู่ในน้ำได้ ในปัจจุบันจะใช้ซีโอไลต์ในการกำจัดเหล็กและแมงกานีสเท่านั้น ส่วนเรซินแลกเปลี่ยนไอออนเป็นสารสังเคราะห์พวกอินทรีย์โพลิเมอร์ มีอำนาจการแลกเปลี่ยนไอออนสูงกว่าซีโอไลต์

**5.2 เรซินแลกเปลี่ยนไอออน** ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ โครงร่างที่ไม่มีประจุไฟฟ้าและหมู่ไอออนที่มีประจุไฟฟ้า ซึ่งทำให้มันคงรูปร่างอยู่ได้โดยไม่ละลายน้ำ โครงสร้างนี้สร้างขึ้นจากสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจำนวนมากที่เป็นชนิดเดียวกันซึ่งต่อกันเป็นสายยาว และมีไฮโดรคาร์บอนอีกชนิดหนึ่งมาทำหน้าที่ประสาน เพื่อให้เกิดเป็นรูปสามมิติที่มีความโปร่งหรือความพรุน

**5.1.1 หมู่ฟังก์ชั่น functional group ของเรซิน** เป็นตัวกำหนดความสามารถหรืออำนาจในการแลกเปลี่ยนไอออน หมู่ไอออนเกาะจับอยู่บนไฮโดรคาร์บอน ทำให้เรซินมี ประจุบวกหรือลบ ถ้าหมู่ไอออนมีประจุลบเรซินจะมีประจุลบประจำตัวใช้ในการกำจัดไอออนบวกออกจากน้ำ เรียกว่า เป็น cation exchanger ถ้าหมู่ไอออนมีประจุบวก คือ เป็นสารแลกเปลี่ยนประจุลบออกจากน้ำ เรียกว่า anion exchanger สามารถแบ่งเรซินได้เป็น 4 ชนิด ดังนี้

**(1) เรซินแบบกรดแก่ (strong acid cationic resin)** มีหมู่ซัลโฟนิค ($SO_3^-$) ซึ่งอยู่ในรูปของ $SO_3^-$ $H^+$ หรือ $SO_3^-$ $Na^+$ โดยจะใช้ไอออนบวกของตัวเอง คือ $H^+$ หรือ $Na^+$ แลกเปลี่ยนกับไอออนบวกที่ต้องการกำจัดออกจากน้ำ

**(2) เรซินแบบกรดอ่อน (weak acid cationic resin)** มีหมู่ คาร์บอกซิลิก (COOH) หรือ (COONa) โดยจะใช้ไอออนบวกของตัวเอง คือ $H^+$ หรือ $Na^+$ แลก -เปลี่ยนกับไอออนบวกที่ต้องการกำจัดออกจากน้ำ

**(3) เรซินแบบด่างแก่ (strong basic anionic resin)** มีหมู่ไอออนเป็น quaternary amine เช่น $(CH_3)_3CH_2N^+$ มีไอออนลบอิสระเป็น $OH^-$ หรือ $Cl^-$ สำหรับแลกเปลี่ยนไอออนลบที่ต้องการกำจัดออกจากน้ำ

**(4) เรซินแบบด่างอ่อน (weak basic anionic resin)** ใช้กำจัดได้เฉพาะกรดแก่ เช่น HCl, $H_2SO_4$, $HNO_3$ ออกจากน้ำ โดยไม่มีการแลกเปลี่ยนไอออน แต่กรดแก่ทั้งโมเลกุลจะเข้ามาจับกับเรซิน ซึ่งต่างจากเรซิน ทั้ง 3 ประเภทข้างต้น

**6. การดูดซับหรือดูดติดผิว (adsorption)**

เป็นขบวนการที่สารตัวกลางดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในของเหลวหรือก๊าซให้มาเกาะจับและติดอยู่บนผิวของมัน จัดเป็นการเคลื่อนย้ายสาร (mass transfer) จากของเหลวหรือก๊าซมายังผิวของแข็ง โมเลกุลหรือคอลลอยด์ เรียกว่า adsorbate ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของ adsorbate เรียกว่า adsorbent

**ทฤษฎีการดูดซับหรือการดูดติดผิว**

การดูดซับหรือการดูดติดผิว (adsorption) เป็นปรากฏการณ์ในการที่โมเลกุลของไหลหรือคอลลอยด์เคลื่อนที่ไปสัมผัส และเกาะติดแน่นอยู่บนผิวของแข็ง โดยแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ต่างชนิดกันของสารที่เป็นของแข็งและของไหลนั้น สารของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของโมเลกุลหรือคอลลอยด์ เรียกว่า adsorbent ส่วนโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่มาเกาะจับ เรียกว่า adsorbate การเกาะจับของโมเลกุลบนผิวของสารดูดซับ สามารถอธิบายได้ด้วยเหตุผล 3 ประการ คือ

- การเกาะจับของโมเลกุลบนผิวของสารดูดซับ อาจเกิดขึ้นด้วยแรงกายภาพ เช่น van der waals force หรือ ด้วยแรงเคมี (chemical adsorptioin) หรือทั้ง 2 อย่างรวมกัน
- ความสามารถในการดูดซับ (adsorbability) เนื่องจากสารดูดซับมีพื้นผิวเป็นรูพรุน (capillary tube) จึงเกิดภาวะของ capillary action ทำให้โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเกาะติดอยู่ได้
- สารดูดซับมีประจุบนพื้นผิว (surface charge) สามารถดูดจับกับวัตถุอื่นๆ ที่มีประจุตรงกันข้าม ทำให้เกิดการเกาะติดกันได้ สภาพดังกล่าวนี้คล้ายกับปรากฏการณ์ของการแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange mechanism)

**1. ลักษณะหรือรูปแบบของการดูดซับ**

ที่เกิดขึ้นอาจแบ่งได้เป็น 4 ลักษณะ ดังนี้

**1.1 การดูดซับแบบกายภาพ (physical adsorption)**

การดูดซับแบบนี้อาศัยการดูดติดด้วยแรงประเภท van der waals หรือพันธะไฮโดรเจน ซึ่งมีลักษณะเป็นแรงอ่อน ไม่ยึดติดแน่น และยังพบว่าไม่มีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้องความร้อนของการดูดซับมีค่าน้อย การกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับจะทำได้ง่าย และการดูดซับอาจเกิดซ้อนกันได้เป็นหลายชั้น (multilayer) มักจะเหมาะสมกับสภาวะอุณหภูมิต่ำ

**1.2 การดูดซับแบบเคมี (chemical adsorption)**

เกิดขึ้นเมื่อตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกันส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีจากตัวถูกดูดซับเดิม คือ มีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเดิม

แล้วมีการจัดเรียงอะตอมขึ้นใหม่ โดยมีพันธะเคมีซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง มีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้อง ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูง การกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับจะทำได้ยาก และการดูดซับจะเป็นการดูดซับแบบ-ชั้นเดียว (monolayer)

**1.3 การดูดซับแบบแลกเปลี่ยนประจุ (exchange adsorption)**

การดูดซับแบบนี้ อาศัยการดูดติดด้วยแรงไฟฟ้าสถิต (electrostatic) บริเวณผิว เมื่อตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับมีประจุ และเกิดแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับเป็นไอออนที่มีประจุ กับตัวดูดซับที่มีประจุตรงข้ามกัน

**1.4 การดูดซับแบบเจาะจง (specific adsorption)**

เกิดขึ้นเนื่องจากมีแรงยึดเหนี่ยวของโมเลกุลตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับ ที่มีหมู่ฟังก์ชั่นอยู่บนผิว แต่ไม่ได้มีผลทำให้ตัวถูกดูดซับเปลี่ยนโครงสร้างไป พฤติกรรมการดูดซับชนิดนี้จะมีค่าพลังงานในการยึดเหนี่ยวอยู่ระหว่างพลังงานของการดูดซับแบบกายภาพและแบบเคมี

**2. ขั้นตอนการดูดซับหรือการดูดติดผิว**

อาจแบ่งได้เป็น 4 ช่วงดังนี้

**2.1 การเคลื่อนที่ของโมเลกุลของตัวถูกละลายเข้าหาสารดูดติดผิว**

โดยการ เคลื่อนที่อาจเกิดเนื่องจากมีการกวนน้ำจนทำให้เกิดการปั่นป่วน หรือเนื่องจากกลไกการเคลื่อนที่ระดับโมเลกุลที่เกิดจากการแพร่กระจายแบบราวเนียน การเคลื่อนที่ตามเส้นทางการไหลของน้ำ ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ที่มีกลไกเช่นเดียวกับที่เกิดในเครื่องกรองน้ำ

**2.2 film diffusion**

เมื่อโมเลกุลของตัวถูกละลายเข้ามาถึงสารดูดติดผิว ซึ่งมีฟิล์มของน้ำห่อหุ้มอยู่โดยรอบคล้ายเยื่อบางๆ โมเลกุลต้องแทรกตัวผ่านฟิล์มน้ำให้ได้จึงจะเข้าถึงผิวของสารดูดติดผิวได้

**2.3 pore diffusion**

เนื่องจากสารดูดติดผิวมีลักษณะของพื้นที่ผิวเป็นโพลง หรือช่องว่างภายในโมเลกุลของตัวถูกละลายจึงต้องแทรกตัวเข้าให้ถึงช่องว่างภายในสารดูดติดผิว จึงจะมีการดูดติดผิวเกิดขึ้น

**2.4 โมเลกุลต้องเกาะติดบนผิว**

โมเลกุลต้องเกาะติดบนผิว ของสารดูดติดผิวโดยไม่หลุด

**ไอโซเทอร์มการดูดซับ**

การวิเคราะห์ระบบการดูดซับ ถูกวิเคราะห์โดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์เพื่อให้ได้รูปแบบของสมการอย่างง่ายแล้วนำสมการมาเขียนกราฟ เพื่อสามารถวิเคราะห์หาค่าคงที่ต่างๆ ได้ ซึ่งเป็นแนวทางที่นำมาใช้ในการคำนวณออกแบบระบบดูดซับ การวิเคราะห์ระบบดูดซับได้มีผู้วิเคราะห์ไว้อยู่ 3 กลุ่ม คือ Langmuir, Freundlich และ Brunauer - Emmett - Teller (BET)

**1. สมการของ Langmuir**

สมการของ Langmuir มีเงื่อนไขว่าการดูดซับจะคิดเฉพาะผิวชั้นเดียว และโมเลกุลของสารถูกดูดซับไม่มีการเคลื่อนที่อิสระบนผิว

$$q = \frac{q_m K_A C}{1 + K_A C} \qquad (2.1)$$

เมื่อ $q$ = ปริมาณของสารถูกดูดซับ/ปริมาณของตัวดูดซับ

$q_m$ = ปริมาณของสารถูกดูดซับ/ปริมาณของตัวดูดซับ ณ สภาวะสมดุล

$K_A$ = ค่าคงที่ของการดูดซับ, ลิตรของตัวดูดซับ/มก. ของสารถูกดูดซับ

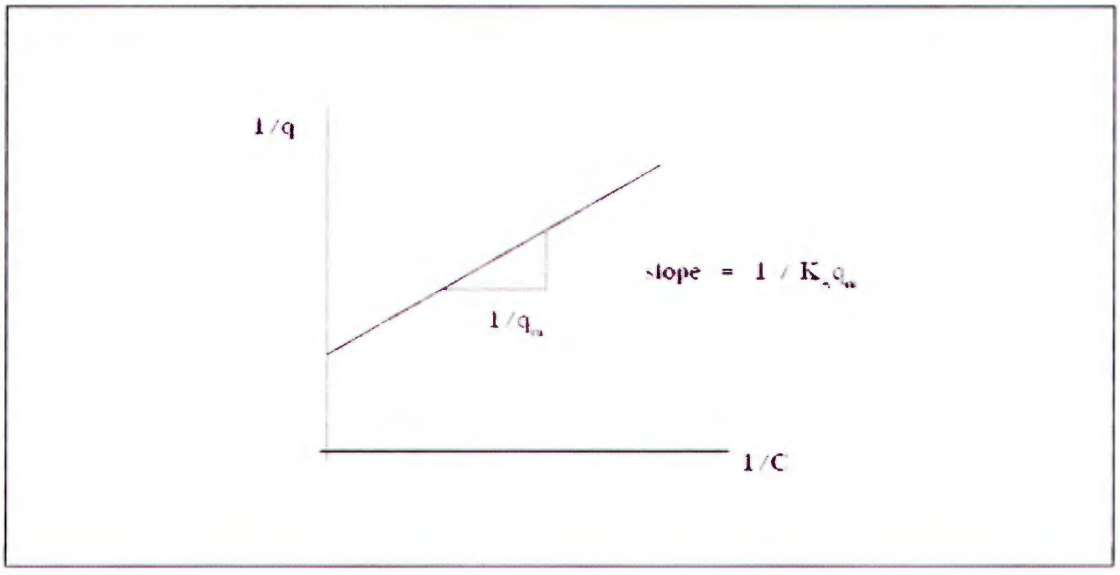
$C$ = ความเข้มข้นของสารละลาย, มก./ล.

เพื่อให้สามารถหาค่า $q_m$ และ $K_A$ ได้ด้วยวิธีกราฟ จึงต้องจัดรูปแบบสมการใหม่ให้เป็นสมการดังนี้

$$1/q = 1/q_m + [1/K_A q_m] * 1/C \qquad (2.2)$$

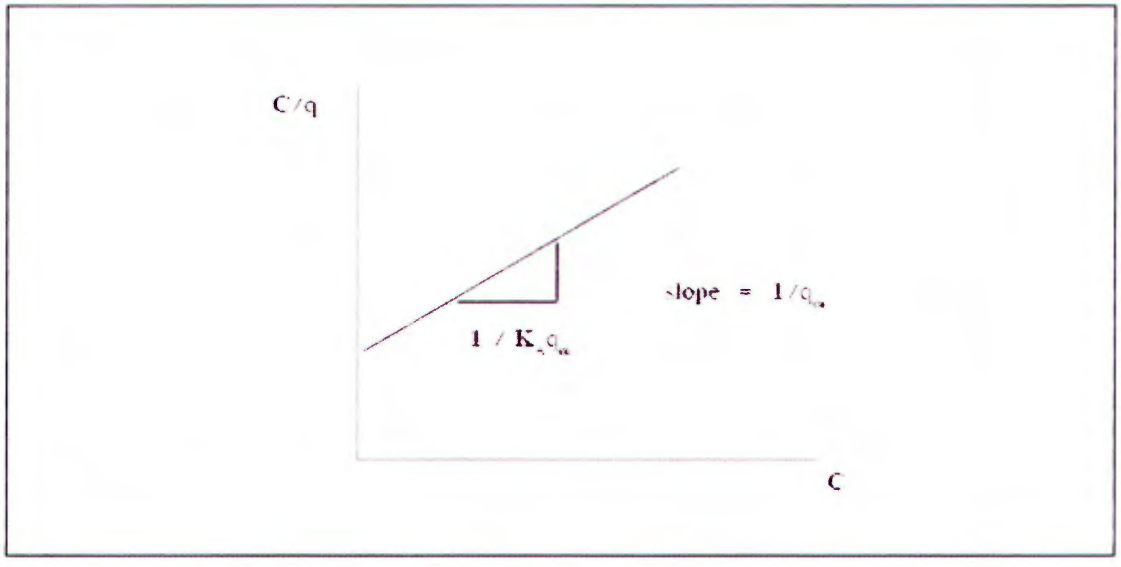
$$C/q = C/q_m + 1/K_A q_m \qquad (2.3)$$

จากสมการดังกล่าว สามารถเขียนกราฟได้ดังนี้




**ภาพที่ 2.7 ไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir สมการ (2.2)**

**ที่มา :** (เอกชัย ประสาทมงคล , 2546)




**ภาพที่ 2.8 ไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir สมการ (2.3)**

**ที่มา :** (เอกชัย ประสาทมงคล , 2546)

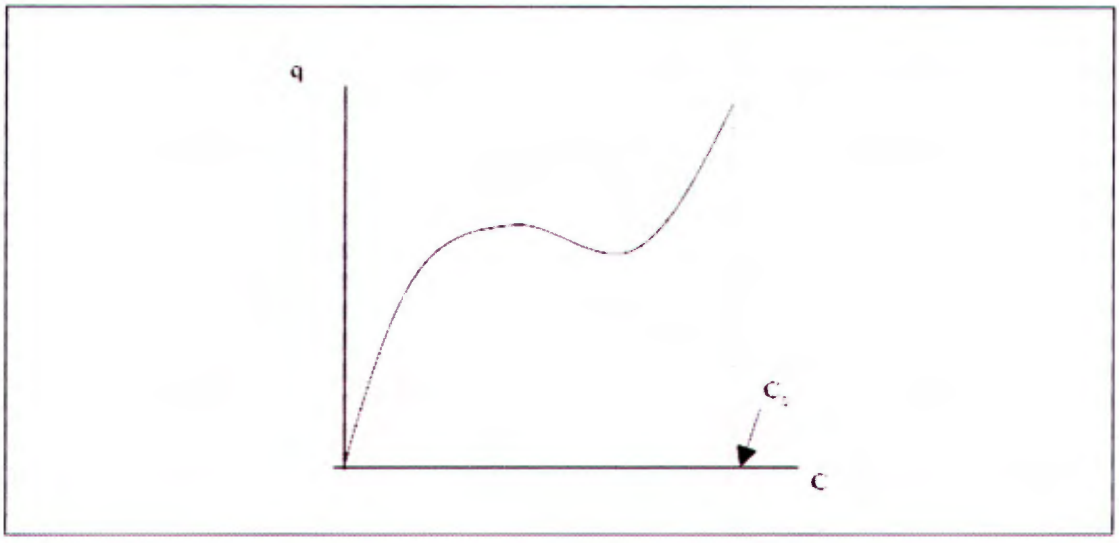
**2. สมการของ Brunauer - Emmett - Teller (BET)**

สมการของ Brunauer - Emmett – Teller (BET) มีเงื่อนไขว่าโมเลกุลของสารถูกดูดซับไม่มีการเคลื่อนที่อิสระบนผิว และการดูดซับมีระดับคงที่ สำหรับทุกๆโมเลกุล

$$q = \frac{q_m K_B C}{(C_S - C)[1+(K_B-1)(C/C_S)]} \qquad (2.4)$$

เมื่อ $C_S$ = ความเข้มข้นอิ่มตัวของสารถูกดูดซับ ณ ทุกๆ ชั้น, มิลลิกรัม/ลิตร

$K_B$ = ค่าคงที่ของการดูดซับ

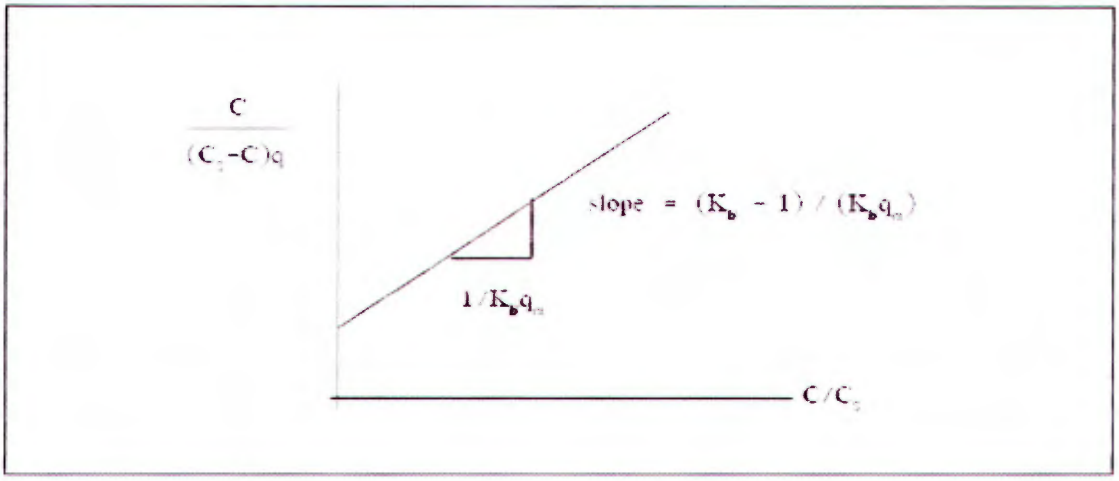



**ภาพที่ 2.9 ไอโซเทอร์มการดูดซับของ BET สมการ (2.4)**

**ที่มา** : (เอกชัย ประสาทมงคล , 2546)

**เพื่อให้สามารถหาค่า $K_B$และ $q_m$ ได้ด้วยวิธีเขียนกราฟ จึงต้องจัดรูปสมการให้เป็น**สมการดังนี้

$$\frac{C}{(C_S-C)q} = \left(\frac{1}{K_B q_m}\right) + \left(\frac{K_B - 1}{K_B q_m}\right)\left(\frac{C}{C_S}\right) \qquad (2.5)$$




**ภาพที่ 2.10 ไอโซเทอร์มการดูดซับของ BET สมการ (2.5)**

**ที่มา** : (เอกชัย ประสาทมงคล , 2546)

**3. สมการของ Freundlich**

สมการของ Freundlich เป็นสมการที่นิยมใช้กันมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งใช้กับสารละลายที่ค่อนข้างเจือจาง และมีความเข้มข้นค่อนข้างต่ำ

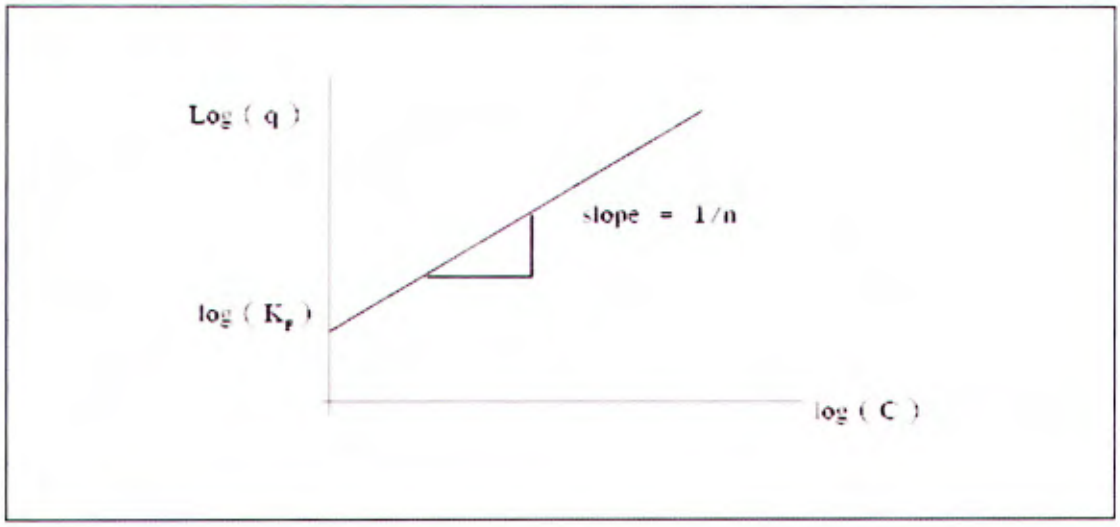
$$q = K_F C^{1/n} \qquad (2.6)$$

เมื่อ $K_F$ = ค่าคงที่

1/n = ค่าคงที่

เพื่อให้สามารถหาค่า $K_F$และ 1/n ได้ด้วยวิธีเขียนกราฟ จึงจำเป็นต้องใช้ Logarithm มาจัดรูปสมการใหม่ ให้เป็น สมการดังนี้

$$\text{Log}\,(q) = \log\,(K_F) + 1/n \log\,(C)$$




**ภาพที่ 2.11 ไอโซเทอร์มการดูดซับของของ Freundlich สมการ(2.6)**

**ที่มา :** (เอกชัย ประสาทมงคล , 2546)

**ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ**

อัตราเร็วและความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังต่อไปนี้

**1. ความปั่นป่วน (Turbulence)**

อัตราเร็วในการดูดซับอาจขึ้นอยู่กับการแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม (Film diffusion) หรือการแพร่ผ่านรูพรุน (Pore diffusion) ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบตัวดูดซับจะมีความหนามาก (เพราะไม่ถูกรบกวน) จะเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาตัวดูดซับ ทำให้การแพร่ผ่านฟิล์มน้ำเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าน้ำมีความปั่นป่วนสูง ทำให้น้ำไม่อาจสะสมตัวจนเป็นฟิล์มหนาเป็นผลให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มน้ำเข้าไปหาตัวดูดซับได้เร็วกว่า การเคลื่อนที่เข้าไปในรูพรุน กรณีนี้การแพร่ผ่านรูพรุนจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

**2. ขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ**

คุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญของตัวดูดซับ คือ ขนาดและพื้นที่ผิว โดยพบว่าอัตราเร็วในการดูดซับเป็นอัตราส่วนผกผันกับขนาดของตัวดูดซับ ดังนั้นตัวดูดซับที่มีขนาดเล็กจะมีอัตราเร็วในการดูดติดที่ผิวสูงกว่าขนาดใหญ่ ส่วนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับนั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ (Adsorption capacity) นั่นคือ ตัวดูดซับที่มีพื้นผิวมากย่อมดูดโมเลกุลตัวถูกดูดซับได้มากกว่าตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวน้อย

**3. ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)**

ค่าความเป็นกรด-ด่าง มีความสัมพันธ์โดยตรงต่อปริมาณไฮโดรเนียมไอออน ($H_3O^+$) เนื่องจากที่ค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำๆ จะมีปริมาณไฮโดรเนียมไอออนมากกว่าที่ค่าความเป็นกรด-ด่างสูงๆ ซึ่งจะมีผลต่อค่าการดูดซับหรือไม่นั้น ก็ขึ้นกับชนิดของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ กล่าวคือในกรณีที่ตัวถูกดูดซับมีประจุเป็นบวก และตัวดูดซับมีตำแหน่งดูดซับที่มีประจุเป็นลบ ถ้าสารละลายมีค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำๆ จะทำให้ความสามารถในการดูดซับมีแนวโน้มลดลง เนื่องมาจากการแย่งกันที่จะถูกดูดซับในตัวดูดซับระหว่างตัวถูกดูดซับที่มีประจุบวกกับไฮโดรเนียมไอออนในสารละลาย แต่จะมีผลในทางตรงกันข้าม เมื่อการดูดซับอยู่ในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างสูงๆ เนื่องจากไฮโดรเนียมไอออนมีปริมาณน้อยลง (และปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออน ($OH^-$) เพิ่มขึ้น) จึงลดการเข้าแย่งจับหรือดูดซับกับตัวถูกดูดซับ และในกรณีที่ตัวถูกดูดซับมีประจุเป็นลบก็จะให้ผลตรงกันข้าม

**4. อุณหภูมิ**

ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับขึ้นอยู่กับว่าการดูดซับเป็นประเภทใด คือถ้าเป็นการดูดซับทางกายภาพ อุณหภูมิจะทำให้ความสามารถในการดูดซับเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยหรือไม่เปลี่ยนแปลง ถ้าเป็นการดูดซับทางเคมี อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นไปด้วย เนื่องจากอิทธิพลของความร้อนจะช่วยเร่งการสร้างพันธะเคมีให้เร็วขึ้น และเพิ่มโอกาสที่ตัวถูกดูดซับจะเคลื่อนที่เข้าสัมผัสกับตำแหน่งดูดซับของตัวดูดซับได้มากขึ้น

**5. ความสามารถในการละลายน้ำของสารที่ถูกดูดซับต่อการดูดซับ**

เมื่อมีการดูดซับเกิดขึ้น โมเลกุลตัวถูกดูดซับจะถูกดึงดูดออกจากน้ำก่อนแล้วจึงไปเกาะติดบนผิวของของแข็ง สารที่มีความสามารถละลายน้ำได้ดีย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำมากกว่าสารที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยกว่า จึงทำให้ยากต่อการดูดซับมากกว่าสารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้น้อยกว่า อย่างไรก็ตาม เกณฑ์ข้างบนไม่ได้เป็นจริงเสมอไป ทั้งนี้เพราะมีสารละลายน้ำได้น้อยหลายชนิดเกาะติดผิวของตัวดูดซับได้ยาก ด้วยเหตุนี้จึงไม่อาจกล่าวได้อย่างเต็มที่ว่าความสามารถในการดูดซับ และความสามารถในการละลายน้ำมีความสัมพันธ์กันอย่างแน่นอนในเชิงปริมาณ

**6. ขนาดของสารที่ถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับ**

ขนาดของสาร หรือโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะมีผลต่อการเพิ่มความสามารถในการดูดซับ เมื่อน้ำหนักโมเลกุลและขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้น เช่น การดูดซับกรดอินทรีย์โดยถ่านกัมมันต์จะพบว่า ถ่านกัมมันต์ดูดซับกรดฟอร์มิก กรดอะซิติก กรดโพรพิออนิก และกรดบิวเทอริกได้มากขึ้นตามขนาดโมเลกุลที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ขนาดโมเลกุลที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลต่อการ

ละลายด้วย โดยสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างยาวมักจะมีความสามารถในการละลายน้ำลดลงจึงส่งผลทำให้เกิดการดูดซับโดยตัวดูดซับมากขึ้นตามขนาดที่เพิ่มขึ้น แต่ในกรณีที่ตัวดูดซับมีรูพรุนมาก สารที่มีโมเลกุลเล็กกว่ารูพรุนมักจะถูกดูดซับได้ดีมากกว่าสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เนื่องจากสารโมเลกุลขนาดใหญ่ไม่สามารถเข้ารูพรุนได้ และพื้นที่ผิวภายนอกที่จะดูดซับมีอยู่น้อย เนื่องจากพื้นผิวภายนอกเป็นรูพรุน

**8. เวลาสัมผัส (contact time)**

เวลาสัมผัสในกระบวนการดูดติดผิวเป็นพารามิเตอร์สำคัญอย่างหนึ่ง ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดติดผิว และอายุการใช้งานของการดูดติดผิวแบบต่อเนื่อง (Cheremisinoff และคณะ, 1976) แนะนำไว้ว่าเพื่อที่จะให้แน่ใจได้ว่าการดูดติดผิวของสารแปลกปลอมในน้ำเป็นไปอย่างเหมาะสม สารละลายควรจะมีเวลาเก็บกักในชั้นของคาร์บอนนานประมาณ 30 นาที

**งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง**

Young Gun Ko & Ung So Choi (2007) ศึกษาการดูดซับโลหะหนักด้วย polymeric cheling fiber (poly(acrylo-amidino diethylendiamine)) ซึ่งเตรียมโดยใช้ Polyacrylonitrile fiber 6 กรัม ทำปฏิกิริยากับ diethylendiamine 500 กรัม และเติม $AlCl_3 6H_2O$ 20 กรัม ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เท่ากับ 11.4 mequiv/g เปรียบเทียบกับ ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) มีค่าประสิทธิภาพการดูดซับเท่ากับ 1560 ตารางเมตร/กรัม และพบว่าทั้ง (poly(acrylo-amidino diethylendiamine)) และ ถ่านกัมมันต์มีพฤติกรรมการดูดซับเหมือนกันดูจากไอโซเทอม ของการดูดซับ (adsorption isotherm) โดย cations ($Cu^{2+}$ $Ni^{2+}$ $Fe^{2+}$ และ$Ag^{+}$) ที่ pH สูง เกิดการดูดซับได้ดีกว่า pH ต่ำ เนื่องจาก $H^{+}$ ดูดซับบนวงแวนเบนซีนในกรณีของ ถ่านกัมมันต์ และ acticvated groups ในกรณี poly(acrylo-amidino diethylendiamine) ซึ่งทำให้ไปขัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะระหว่างวัสดุดังกล่าว การดูดซับโลหะหนักบนถ่านกัมมันต์ต่ำกว่า poly(acrylo-amidino diethylendiamine) เนื่องจาก poly(acrylo-amidino diethylendiamine) เกิดการเติบตัวของผลึกทำให้หมู่ฟังชันก์ที่ทำหน้าที่ดูดซับโลหะหนักมีมากขึ้นทำให้การดูดซับดีกว่าแม้ว่า ถ่านกัมมันต์จะมีจำเพาะในการดูดซับสูงกว่าก็ตาม ส่วนในกรณี anions ( $CrO_4^{2-}$ และ $PO_4^{3-}$ ) จากการดูดซับในระดับที่สูงที่สูด pH ต่ำ

Gulay Bayramoglu & M. Yakup Arıca (2005) ศึกษาการขจัดโครเมตไอออน ($CrO_4^{2-}$ ) ด้วย Ethylenediamine grafted poly(glycidylmethacrylate-co-methylmethacrylate) ศึกษาโดยการเตรียม poly(GMA-co-MMA) beads ด้วยวิธีการพอลิเมไรเซชันแบบแขวนลอย ด้วยสารละลายของ 0.2 M NaCl ขั้นตอนประกอบด้วย GMA (7.5 มิลลิลิตร), MMA (10

มิลลิลิตร), EGDMA (7.5 มิลลิลิตร; as cross-linker) และisopropyl alcohol (15 มิลลิลิตร, containing 5.0 เปอร์เซ็นต์ polyvinyl alcoholas stabilizer) ผสมรวมกันกับ 0.5 กรัมของ AIBN ใน 30 มิลลิลิตร ของโทลูอีน (toluene) ใส่ในเครื่องปฏิกรณ์ให้อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส กวน ตลอดเวลาปล่อยแก๊สไนโตรเจน ทำการรีฟลักผสมทำปฏิกิริยาพอลิเมไรเซชันในฟันเนล (funnel) กวน 200 รอบ/นาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนทำปฏิกิริยาที่ 75 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 2 ชั่วโมง และขณะที่ 85 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 2 ชั่วโมงหลังจากทำปฏิกิริยา นำไปกรองบีด (beads) และล้างด้วยน้ำกลั่นและเอทานอลทำให้แห้งด้วยการอบนำ Ethylenediamine เชื่อมต่อที่ epoxy groups carrying บนบีดของ poly(GMA-co-MMA) ทำปฏิกิริยากับสารละลาย ethylenediamine (2.0 เปอร์เซ็นต์ ในน้ำกลั่น) ที่ 80 องศาเซลเซียส, pH 11.0 (ปรับ NaOH) ใน บีด 10 กรัม และกวน magnetically เป็นเวลา 4 ชั่วโมง หลังทำปฏิกิริยาได้ poly(GMA-co-MMA)-ED แล้วนำไปดูดซับสารละลาย $CrO_4^{2-}$ พบว่าทั้งสองมีการดูดซับสูงที่ pH 2 การดูดซับสูงสุด 0.044 และ 0.441 มิลลิโมล ตามลำดับ ไอโซเทอมการดูดซับเป็นตามแบบจำลองของแลงเมียร์-ฟรุนดิช

Z.Ylmaz และคณะ (2007) ศึกษาการกำจัด ไนโตรเจนไอออน (nitrite ions) จากสารละลายโดยใช้ poly (N,N dimethyammine ethymethacylate)hydrogeis Poly(DMAEMA) ซึ่งมีประสิทธิภาพและควรเลือกจำเพาะสูงในการกำจัดไนโตรเจนไอออนพบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับไนโตรเจนไอออนของ Poly(DMAEMA) เพิ่มขึ้นเป็น 3100 มิลลิกรัม $NO_2^-$ ลิตร/กรัม ของ Poly(DMAEMA) dry gel มีการเกิด interaction ระหว่างไนโตรเจนไอออนและ quatermized amin groups

Mourad Amara & Hac ene Kerdioud (2005) ศึกษาการดูดซับไนเตรทไอออนโดยใช้ polydiethylendiamine เป็นหลักการ electro-adsorption (anion exchange) membrane

Mykola Seredych และTeresa J. Bandoaz (2007) ศึกษาการดูดซับแอมโมเนียโดยใช้ graphite oxide (GO) ที่มีขายตามท้องตลาด การดูดซับแอมโมเนียเกิดได้ทั้งจากปฏิกิริยาเคมีที่พื้นผิวของ GO และทางกายภาพ ในการศึกษาเน้นที่ปฏิกิริยาเคมี เนื่องจาก GO มีหมู่ฟังก์ชัน OH, COOH, epoxy ซึ่งสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับและแอมโมเนีย

S. Shiratori (2001) ศึกษาการดูดซับแก๊สพิษด้วยสารเคมีที่ผสมในพอลิเมอร์ ทำการทดลองโดยการเติมสารเคมีตัวเติมสมรรถนะสูงเพื่อดูดซับแก๊สพิษ เช่น แอมโมเนีย อะเซทอลดีไฮด์ เป็นวัสดุใหม่ล่าสุดที่ทำให้เกิดเป็นแผ่นฟิล์มด้วยตัวมันเอง บนพื้นผิวของผ้าฉนวนใยแก้ว คุณภาพดีกว่าถ่านกัมมันต์ (activated carbon) ที่ใช้อยู่เดิม ตัวเติมที่พัฒนาขึ้นมามีสมรรถนะสูงอย่างน่าทึ่ง เพราะสามารถดูดซับโมเลกุลของแก๊สได้จำนวนมากทั้งทางเคมีและทางกายภาพ

Ronald R.Navrro และคณะ (2000) ศึกษาบทบาทของไอออนลบบนเซลลูโลสดัดแปร poly (glycidylmethacrylate) และ polyethylene-imine เตรียม poly (CGMAPEI) โดยทำปฏิกิริยาในระบบแก๊สไนโตรเจนในขวดสามคอที่ต่อกับเครื่องกวนที่ 25 องศาเซลเซียส ผสม Celulose 5 กรัม และน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร ให้ความร้อน 50 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที ปล่อย air คุมส่วนผสม เติม ammonium nitrate initiator (CAN) 7.5 กรัม กวน 150 รอบ/นาที อีก 15 นาที เติม glycidylmethacrylate (GMA) 25 มิลลิกรัม ทำการ graft polymerization 4 ชั่วโมง ได้ poly (cellulose-GMA) นำไประเหยสารทำละลายออก 6 ชั่วโมง แล้วทำปฏิกิริยากับ PEI ที่ 100 องศาเซลเซียส ในสารละลาย diethyformamide (DMF) ได้เป็น poly(CGMAPEI) ศึกษาอิทธิพล anions บน poly (CGMAPEI) ดูดซับโลหะหนักจากสารละลายการทดลองแสดงให้เห็นการดูดซับโลหะด้วยไอออนลบของ resin การศึกษาการดูดซับในเวลาเริ่มต้นเกิดการดูดไอออนโลหะหนักในสารละลายและเพิ่มขึ้นที่มี pH เพิ่มขึ้น pH จะมีผลต่อปฏิกิริยาทำให้การดูดมีประสิทธิภาพดีขึ้นความเข้มข้นของไอออนลบ เช่นกันผันแปรตามกระบวนการไอออนลบ มีบทบาทสำคัญต่อประสิทธิภาพการดูดซับของตัวดูดซับ(chelating adsorbent)

วรพัฒน์ พัฒนวรเศรษฐ์ (2546) ศึกษาการสังเคราะห์พอลิอะมิโนสไตรีน เพื่อใช้เป็นตัวดูดซับไอออนของโลหะนิกเกิล สังกะสี ทองแดง และโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ เป็นการสังเคราะห์พอลิอะมิโนสไตรีนจากปฏิกิริยาไนเตรชันของพอลิสไตรีน และปฏิกิริยารีดักชันเพื่อเปลี่ยนพอลิไนโตรสไตรีนให้เป็นพอลิอะมิโนสไตรีนโดยใช้สแตนนัสคลอไรด์ ($SnCl_4$) กับกรดไฮโดรคลอริก (HCl) พอลิอะมิโนสไตรีนที่สังเคราะห์จะมีหมู่เอมีนที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนกับโลหะ นำไปดูดซับในการกำจัดไอออนของโลหะหนักนิกเกิล [Ni(II)] ทองแดง [Cu(II)] สังกะสี [Zn(II)] และโครเมียม [Cr(III)] พบว่า pH ที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดโลหะหนักนิกเกิลและสังกะสีเท่ากับ 6.5 และเวลาที่เหมาะสมคือ 6 ชั่วโมง ส่วนโลหะหนักทองแดงมี pH ที่เหมาะสมในการใช้งานเท่ากับ 5 และเวลาที่เหมาะสมคือ 6 ชั่วโมง แต่ไม่ดูดซับโครเมียม ความสามารถและประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนของโลหะหนัก สามารถอธิบายได้จากไอโซเทอมการดูดซับของสมการแลงเมียร์และฟรุนดิช

เจริญ นาคะสรรค์ และคณะ (2549) ศึกษาโครงการเทอร์โมพลาสติกวัลคาร์ไนซ์จากการเบลนด์ไวนิลอะซิเตตกับยางธรรมชาติอิพอกไซด์และยางธรรมชาติที่มีหมู่ไดบิวฟอสเฟต ศึกษาโดยการเตรียมอิพอกไซด์ด้วยวิธีเปอร์ฟอร์มิก ทำปฏิกิริยาที่ 1.10 ชั่วโมง ที่ 50 องศาเซลเซียส ยางธรรมชาติมี หมู่อิพอกไซด์ประมาณ 20 เปอร์เซ็นโมลอิพอกไซด์ดัดแปรโมเลกุลด้วยไดบิวทิวฟอสฟอต (DSNR) ในความเข้มข้น (ENR-20)/ไดบิวทิวฟอสฟอต = 1 ที่ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เตรียมเบลนด์เอทิลีไวนิตอะซิเตทกับยางธรรมชาติอิพอกไซด์ โดยพอลิเมอร์

เบลนด์แบบธรรมดาของ ENR-20 กับโคพอลิเมอร์ของเอทิลีนกับไวนิลอะซิเตท (ENR) [ENR-20/ENR] และDSNR/EA ที่ 160 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 60 รอบ/นาที นำทั้งสองเตรียมเทอร์โมพลาสติกของ (ENR) [ENR-20/ENR] และDSNR/EA ผสมในลูกกลิ้งที่ 50 องศาเซลเซียส พบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ทั้งสองเข้ากันบางส่วน มีสมบัติการไหลสูงกว่าการเบลนด์แบบธรรมดามีสมบัติต้านต่อตัวทำละลายที่เป็นน้ำมันและต้านการติดไฟ

อาซิซัน แกสมาณ และคณะ (2547) ศึกษาการเตรียมยางเบลนด์ระหว่างพอลิเมทิลเมทาคริเลตกับยางธรรมชาติอิพอกไซด์ซึ่งเตรียมยางธรรมชาติอิพอกไซด์ ด้วยวิธีการเกิดกรดเปอร์ฟอร์มิกใช้น้ำยางธรรมชาติแอมโมเนียสูง 20 %DRC 115 กรัม เติม Teric-N30 ความเข้ม 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก 13 กรัม กวน 30 นาที เติมกรดฟอร์มิกความเข้ม 94 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก 0.9 โมลาร์ เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้ม 50 ปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก 2.9 โมลาร์ ทำปฏิกิริยาที่ 50 องศาเซลเซียส กวน 170 รอบ/นาที เตรียมพอลิเมทาคริเลตโดยเทคนิคอิมัลชัน โดยใช้โพแทสเซียมเปอร์วัลเฟตเป็นตัวริเริ่ม และโพแทสเซียมคลอเรตเป็นอิมัลซิไฟเออร์ที่ 65 องศาเซลเซียส ในระบบไนโตรเจน กวน 400 รอบ/นาที ทำการเบลนด์ทั้งสองชนิดในสภาวะลาเท็กซ์ที่อุณหภูมิห้อง ในอัตราส่วนระหว่างพอลิเมอร์กับยางอิพอกไซด์ต่างกัน และเปอร์เซ็นต์อิพอกไซด์ของยางธรรมชาติต่างกัน พบว่าค่าความหนืดมูนนี่เพิ่มขึ้นตามหมู่อิพอกไซด์ลดลงเมื่อพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น ค่าความเค้นเฉือนและความหนืดเฉือนเพิ่มขึ้นตามหมู่อิพอกไซด์ อัตราส่วน 75/25 (ENR-10, ENR-30, ENR-50) และ 50/50 (ENR-20, ENR-40) จะมีความเค้นเฉือนสูงสุด

เจริญ นาคะสรรค์ และคณะ (2544) ศึกษาการเตรียมสมบัติเชิงความร้อนและสมบัติการไหลของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ การเตรียมยางธรรมชาติอิพอกไซด์ทำโดยการทำปฏิกิริยาของน้ำยางกับกรดเปอร์ฟอร์มิกในระบบก๊าซไนโตรเจน โดยใช้นอนไอออน (ชื่อการค้า Emulwin W) เป็นสารเพิ่มความเสถียรของยาง สภาวะที่เหมาะสมในการเกิดหมู่อิพอกไซด์ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยา ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาอิพอกซิเดชันคือ ชุดการทดลองในสภาวะที่ 1 อัตราส่วนน้ำยาง 1.7 โมลาร์ ทำปฏิกิริยาที่ความเข้มข้น 20 %DRC กับกรดเปอร์ฟอร์มิกที่ได้จากการเตรียมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 2.6 โมลาร์ กรดฟอร์มิก 0.9 โมลาร์ ผสมกันแล้วนำไปทำปฏิกิริยากับน้ำยางในระบบแก๊สไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ใช้เวลากวนทำปฏิกิริยาที่ 10 ชั่วโมง ซึ่งจะทำให้เกิดหมู่อิพอกไซด์สูงสุดถึง 60 โมลเปอร์เซ็นต์อิพอกไซด์ การหาปริมาณหมู่อิพอกไซด์ทำโดยการใช้เทคนิคอินฟราเรดสเปคโตรสโคปีแล้วนำกราฟที่ได้ไปเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานโมลอิพอกไซด์ การศึกษาสมบัติของยางธรรมชาติอิพอกไซด์พบว่า ค่าอุณหภูมิคล้ายแก้ว (Tg) ของยางธรรมชาติอิพอกไซด์มีค่าสูงขึ้น

กว่ายางธรรมชาติ และจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณ หมู่อีพอกไซด์ในลักษณะเป็นกราฟเส้นตรง ค่าความหนืดมูนนี่ของยางธรรมชาติอิพอกไซด์จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณหมู่อิพอกไซด์ นอกจากนี้ค่าความเค้นเฉือนและความหนืดเฉือนจะเพิ่มตามหมู่อิพอกไซด์ สมบัติของไหลพบว่ายางธรรมชาติอิพอกไซด์ขณะหลอมเหลวมีพฤติกรรมการไหลแบบซูโดพลาสติก

ประวีณา ติระ (2540) ศึกษาการยางธรรมชาติให้เป็นยางเรซิน เตรียมโดยผ่านปฏิกิริยาอิพอกซิเดชันเป็นยางธรรมชาติอิพอกไซด์ ซึ่งอุณหภูมิ ชนิดของกรด และค่าความเป็นกรดมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาอิพอกซิเดชัน ชนิดของน้ำยางและสารเคมีทำให้เสถียรไม่มีผลต่อปฏิกิริยาอิพอกซิเดชัน triton X-100 เหมาะในการทำปฏิกิริยาทนความได้ดี เวลาที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณหมู่อิพอกไซด์เพิ่มขึ้น แล้วนำยางธรรมชาติอิพอกไซด์ดัดแปรโครงสร้างให้มีหมู่แลกเปลี่ยนไอออน เพื่อใช้ในการกำจัดโลหะ สามารถกำจัดโลหะอยู่ในช่าง 0.00 - 0.11 mg/g

# บทที่ 3
# วิธีการทดลอง

## เครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมี

### 1. เครื่องมือ

เครื่องมือต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้แสดงดังตารางที่ 3.1

**ตารางที่ 3.1 เครื่องมือต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษาวิจัย**

| ลำดับ | เครื่องมือ | ยี่ห้อ |
|---|---|---|
| 1 | เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปคโทรโฟโตมิเตอร์ | Perkin Elmer รุ่น 3110 |
| 2 | เครื่องFT-IR | - |
| 3 | เครื่องกวน | IKA®RW20 digitat |
| 4 | เตาอบ | Hotpack รุ่น 352602 |
| 5 | แผ่นให้ความร้อน | Gerhadt |
| 6 | เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง | Meter Toledo |
| 7 | อ่างอังไอน้ำ | Julaba |
| 8 | เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง | Meter Toledo |
| 9 | ตู้ดวัน | Meter Toledo |
| 10 | พีเอชมิเตอร์ | Model 1260 |

**2. อุปกรณ์**

1. บีกเกอร์
2. กระบอกตวง
3. ปีเปตต์
4. ขวดปรับปริมาตร
5. หลอดหยด
6. ขวดรูปชมพู่
7. บิวเรตต์
8. กระดาษกรอง
9. กรวยกรอง
10. สแตน
12. กระดาษอะลูมิเนียมฟรอยด์
13. แท่งแก้ว
14. ช้อนตักสาร
15. ขวดพลาสติกเก็บตัวอย่าง
16. ลูกยาง
17. โถดูดความชื้น
18. กระดาษชั่งสาร
19. พาราฟิล์ม
20. คอลัมน์
21. สายยาง
22. ขวดก้นกลมสามคอ
23. จุกยาง
24. ถังแก๊สไนโตรเจน

**3. สารเคมี**

สารเคมีต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้แสดงดังตารางที่ 3.2

**ตารางที่ 3.2 สารเคมีต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษาวิจัย**

| ลำดับ | ชื่อสารเคมี | สูตรเคมี | เกรด | บริษัท |
|---|---|---|---|---|
| 1. | น้ำยางแอมโมเนียสูง 60 %DRC | $C_5H_8$ | HA | - |
| 2 | กรดฟอร์มิก 95เปอร์เซ็นต์ | HCOOH | AR | Carlo erbe |
| 3 | ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 35 เปอร์เซ็นต์ | $H_2O_2$ | AR | Qrec |
| 4 | ไตรตอนเอ็กซ์-100 | - | - | Panrrae |
| 5 | เอทิลินไดเอมีน 99 เปอร์เซ็นต์ | $NH_2(CH_2)_2NH_2$ | AR | Fluka |
| 6 | กรดไนตริก | $HNO_3$ | AR | Poison |
| 7 | โซเดียมไฮดรอกไซด์ | NaOH | AR | LAB-SCAN |
| 8 | น้ำกลั่น | $H_2O$ | - | - |
| 9 | แก๊สไนโตรเจน | $N_2$ | - | ร้านนครกิจ |
| 10 | สารละลายมาตรฐานคอบเปอร์ความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัม/ลิตร | $Cu^{2+}$ | AR | spectrosol |
| 11 | สารละลายมาตรฐานโครเมียมความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัม/ลิตร | $Cr^{3+}$ | AR | spectrosol |

**ศึกษาการเตรียมยางธรรมชาติอิพอกไซด์ (ENR)**

การเตรียมยางธรรมชาติอิพอกไซด์ ได้ประยุกต์ตามวิธีการของเจริญ นาคะสรรค์คณะ (2544) โดยเตรียมยางธรรมชาติอิพอกไซด์ในอัตราส่วนน้ำยาง 1.7 โมล ทำปฏิกิริยาที่ความเข้มข้น 20 %DRC กับ กรดเปอร์ฟอร์มิกที่ได้จากการเตรียมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 2.6 โมล กรดฟอร์มิก 0.9 โมล ใช้ 10 เปอร์เซ็นต์ Triton X-100 จำนวน 30 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักเนื้อยาง เตรียมในขวดสามคอที่ต่อกับเครื่องกวนภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน มีขั้นตอนและอัตราส่วนดังนี้ น้ำยางความเข้มข้น 60 %DRC 192.6 กรัม ใส่ลงในขวดสามคอที่ต่อกับเครื่องกวน เจือจางน้ำยาง 60 %DRC ด้วยน้ำกลั่น 385.2 มิลลิลิตร ให้ได้ความเข้มข้นของน้ำยางเท่ากับ 20 %DRC กวนผสมให้เข้ากัน เป็นเวลา 20 เติม 10 เปอร์เซ็นต์ Triton X-100 จำนวน 167.34 มิลลิลิตร กวนผสมให้เข้ากัน เป็นเวลา 20 นาที หลังจากนั้นค่อยๆ เติมกรดเปอร์ฟอร์มิกที่ได้จากการเตรียมระหว่างกรดฟอร์มิก 95 เปอร์เซ็นต์ 39.9 มิลลิลิตร กับ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 35 เปอร์เซ็นต์ 230.91 มิลลิลิตร กวนทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง นำน้ำยาง 10 กรัม ทำให้แข็งตัวโดยการเติมเมทานอลปริมาณ 5 - 10 มิลลิลิตร แล้วรีดให้เป็น

แผ่นบางๆ นำไปอบที่ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำไปวิเคราะห์หาหมู่อิพอกซีด้วยเทคนิค FT-IR

**การศึกษาดัดแปรยางธรรมชาติอิพอกไซด์ด้วยเอทิลีนไดเอมีน (ENR-ED)**

การศึกษาดัดแปรยางธรรมชาติอิพอกไซด์ด้วยเอทิลีนไดเอมีน เป็นกราฟต์พอลิเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติอิพอกไซด์ (ENR) กับเอทิลีนไดเอมีน (ED) เตรียมพอลิเมอร์ด้วยปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบแขวนลอย โดยใช้ยางธรรมชาติอิพอกไซด์ในสภาวะลาเท็กซ์ (ที่เตรียมเป็นเวลา 10 ชั่วโมง) ทำการทดลองต่อจากการเตรียมยางธรรมชาติอิพอกไซด์ โดยเติมเอทิลีนไดเอมีนในอัตราส่วน 10 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักเนื้อยาง ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และกวนตลอดเป็นเวลา 6 ชั่วโมง หลังจากการพอลิเมอไรเซชันนำยางธรรมชาติอิพอกไซด์ดัดแปรด้วยเอทิลีนไดเอมีน มาทำให้แข็งตัวโดยการเติมเมทานอลแล้วล้างด้วยน้ำกลั่น แล้วอบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ตัดให้เป็นชิ้นเล็กๆ นำไปศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนัก

**ศึกษาการดูดซับโลหะหนักของยาง ENR-ED**

การศึกษาการดูดซับโลหะหนักของยาง ENR-ED โลหะที่ใช้ในการศึกษาการดูดซับโลหะหนักของยาง ENR-ED มีโลหะหลายชนิดที่พบในแหล่งน้ำธรรมชาติที่ถูกปล่อยออกจากอุตสาหกรรม และสิ่งปฏิกูล ในการศึกษาครั้งนี้ศึกษาการดูดซับโลหะทองแดง ($Cu^{2+}$) และโครเมียม ($Cr^{3+}$)

**1. ศึกษาการดูดซับของยาง ENR-ED ด้วยวิธีแบบการแช่ (Batch method)**

การศึกษาการดูดซับของยาง ENR-ED โดยแช่ ENR-ED 1 กรัม ในสารละลายโลหะความเข้มข้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร ของโลหะ $Cu^{2+}$ และ $Cr^{3+}$ แต่ละชนิดโดยเตรียมจาก Stock Solution 1000 มิลลิกรัม/ลิตร เป็น 10 มิลลิกรัม/ลิตร โดยใช้ Stock Solution 1000 มิลลิกรัม/ลิตร 10 มิลลิลิตร ปรับปริมาตร 1000 มิลลิลิตร ด้วย 1 เปอร์เซ็นต์กรดไนตริก

**1.1 ศึกษาเวลาสมดุลของการดูดซับ**

การศึกษาเวลาสมดุลของการดูดซับ โดยใช้ยาง 1 กรัม แช่ใน สารละลายโลหะ 10 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาณ 50 มิลลิลิตร ศึกษาการดูดซับที่เวลา 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18 และ 20 ชั่งโมง

**1.2 ศึกษา pH ที่เหมาะสมของสารละลายโลหะในการดูดซับของยาง ENR-ED**

การศึกษา pH ของสารละลายที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนักด้วยยาง ENR-ED ครั้งนี้ศึกษาโดยใช้ยาง ENR-ED 1 กรัม แช่ในสารละลายโลหะ 10 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาณ 50 มิลลิลิตร โดยทำการศึกษาการดูดซับโดยใช้สารลายโลหะที่มีค่า pH เท่ากับ 1, 2, 3, 4, และ 5 ใช้ $HNO_3$ และ NaOH ในการปรับค่า pH ใช้เวลาในการดูดซับ จากเวลาที่เหมาะสมจากข้อที่ 1.1

**1.3 ศึกษาความจุของการดูดซับแบบถังแช่**

การศึกษาความจุของการดูดซับแบบถังแช่ ทำโดยนำยาง ENR-ED 1 กรัม แช่ในสารละลายโลหะความเข้มข้นต่างกันแต่ละชนิด ดั้งนี้ 20 , 40 , 60 , 80 , 100 , 120 และ140 มิลลิกรัม/ลิตร เตรียมจาก Stock Solution 1000 มิลลิกรัม/ลิตร ศึกษาที่ pH และเวลาที่เหมาะสมจากการทดลอง

**2 วิเคราะห์โลหะด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปคโทรโฟโตมิเตอร์(AAS)**

การวิเคราะห์หาปริมาณโลหะด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอบชันสเปคโตรสโคปี (AAS) จะต้องเตรียมสารละลายมาตรฐาน ในการทำกราฟมาตรฐานของโลหะแต่ละชนิดจะมีการเตรียมดังนี้

**2.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐาน $Cu^{2+}$**

ใช้ Stock Solution 1000 มิลลิกรัม/ลิตร ปรับด้วย 1 เปอร์เซ็นต์กรดไนตริก

**2.1.1 การสร้างกราฟมาตรฐาน $Cu^{2+}$** สร้างกราฟมาตรฐานที่ความเข้มข้น 1 , 2 , 3 , 4 , และ 5 มิลลิกรัม/ลิตร เตรียมโดยนำ Stock Solution 1000 มิลลิกรัม/ลิตร มา 0.1 , 0.2 , 0.3 ,0.4 และ 0.5 มิลลิกรัม ปรับปริมาตร 100 มิลลิลิตร ด้วย 1 เปอร์เซ็นต์กรดไนตริก ตามลำดับ

**2.1.2 วิเคราะห์ $Cu^{2+}$** ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปคโทรโฟโตมิเตอร์ (AAS) ที่ 324.นาโนเมตร

**2.2 การเตรียมสารละลายมาตรฐาน $Cr^{3+}$**

ใช้ Stock Solution 1000 มิลลิกรัม/ลิตร ปรับด้วย 1 เปอร์เซ็นต์กรดไนตริก

**2.2.1 การสร้างกราฟมาตรฐาน $Cr^{3+}$** สร้างกราฟมาตรฐานที่ความเข้มข้น 1 , 2 , 3 , 4 , และ 5 มิลลิกรัม/ลิตร เตรียมโดยนำ Stock Solution 1000 มิลลิกรัม/ลิตร มา 0.1 , 0.2 , 0.3 ,0.4 และ 0.5 มิลลิกรัม ปรับปริมาตร 100 มิลลิลิตร ด้วย 1 เปอร์เซ็นต์กรดไนตริก ตามลำดับ

**2.2.2 วิเคราะห์ $Cr^{3+}$** ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปคโทรโฟโตมิเตอร์ (AAS) ที่ 357.9 นาโนเมตร

**การวิเคราะห์ข้อมูล**

**1. การคำนวณหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD)**

การคำนวณหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ เป็นการทดสอบความเที่ยงในการวิเคราะห์ สามารถคำนวณหาโดยใช้สูตรดังนี้

$$\text{ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ \%RSD} = \frac{\mathbf{SD \times 100}}{\overline{\mathbf{X}}} \qquad (3.1)$$

เมื่อ $\overline{X}$ = ค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่าง

$X$ = ค่าที่วัดได้ของตัวอย่าง

$n$ = จำนวนตัวอย่าง

**2. ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation)**

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) หมายถึง รากที่สองของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลแต่ละตัว จากค่าเฉลี่ยกำลังสองเป็นการวัดการกระจายที่บอกว่าข้อมูลกระจายไปจากค่าเฉลี่ยมากน้อยเพียงใด ถ้าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่ามากแสดงว่าข้อมูลในกลุ่มแตกต่างกันมาก ถ้ามีค่าน้อยแสดงว่าข้อมูลในกลุ่มนั้นใกล้เคียงกัน สัญลักษณ์ที่ใช้ คือ SD การหาค่าเฉลี่ยมีวิธีการดังนี้

$$\mathbf{SD} = \frac{\sqrt{\sum (Xi - \overline{X})^2}}{n-1} \qquad (3.2)$$

เมื่อ $\mathbf{SD}$ = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

$\mathbf{Xi}$ = ค่าของตัวอย่างที่วัดได้ในแต่ละครั้ง

$\mathbf{n}$ = จำนวนตัวอย่างทั้งหมด

$\overline{\mathbf{X}}$ = ค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่าง

**3. มัชฌิมาเลขคณิต (Arithmetic mean)**

มัชฌิมาเลขคณิต (Arithmetic mean) หรือ ค่าเฉลี่ย หมายถึง ค่าที่ได้จากการนำคะแนนทั้งหมดมารวมกันแล้วหารด้วยคะแนนทั้งหมด สัญลักษณ์ที่ใช้คือ $\mathbf{X}$ การหาค่าเฉลี่ยมีวิธีการดังนี้

$$\overline{\mathbf{X}} = \frac{\sum \mathbf{X}}{\mathbf{n}} \qquad (3.3)$$

เมื่อ $\overline{\mathbf{X}}$ = ค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่าง

$\sum \mathbf{X}$ = ผลรวมของคะแนน

$\mathbf{n}$ = จำนวนตัวอย่าง

**4. ค่าความจุของการดูดซับ (adsorption capacity)**

ค่าความจุของการดูดซับเป็นค่าของปริมาณตัวดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ หน่วยเป็นปริมาณตัวดูดซับต่อมวลตัวดูดซับ เช่น โมล/กิโลกรัม, โมล/กรัม, มิลลิกรัม/กิโลกรัม มีสมการในการหาดังนี้

$$q = \frac{(C_0 - C)V}{M} \qquad (3.4)$$

เมื่อ $\mathbf{q}$ = (ความจุของการดูดซับ) ปริมาณตัวดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

$\mathbf{C}$ = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลาย หน่วยเป็นความเข้มข้น เช่น โมล/ลิตร

$\mathbf{C_0}$ = ความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายหน่วยเป็นความเข้มข้น เช่น โมล/ลิตร

$\mathbf{V}$ = ปริมาตรของสารละลายที่มีตัวถูกดูดซับละลายอยู่ หน่วย ซม.$^3$ หรือ ลิตร

$\mathbf{M}$ = มวลของตัวดูดซับที่ใช้ หน่วยเป็นน้ำหนัก เช่น กิโลกรัม

**5. หาความจุของการดูดซับโดยสมการของ Freundlich**

เป็นสมการที่นิยมใช้กันมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งใช้กับสารละลายที่ค่อนข้างเจือจาง และมีความเข้มข้นค่อนข้างต่ำ

$$\mathbf{Log\ (q) = log\ (K_F) + 1/n\ log\ (C)} \qquad (3.5)$$

เขียนกราฟระหว่าง Log (q) กับ log(C) จะได้ ความชัน = 1/n และ จุดตัด = $\log(K_F)$

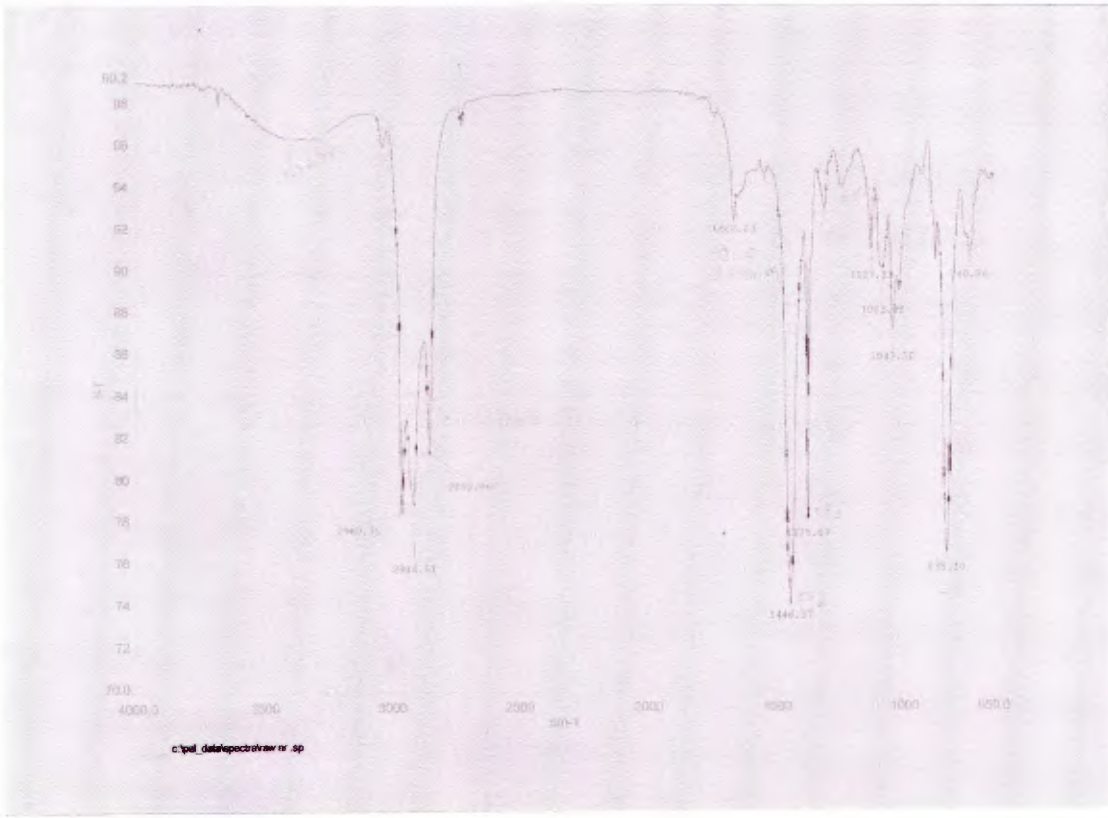
หาความจุของการดูดซับจาก

$$\mathbf{q = 10^{log\ k}}\ \text{มิลลิกรัม/กรัม} \qquad (3.6)$$

# บทที่ 4
# ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

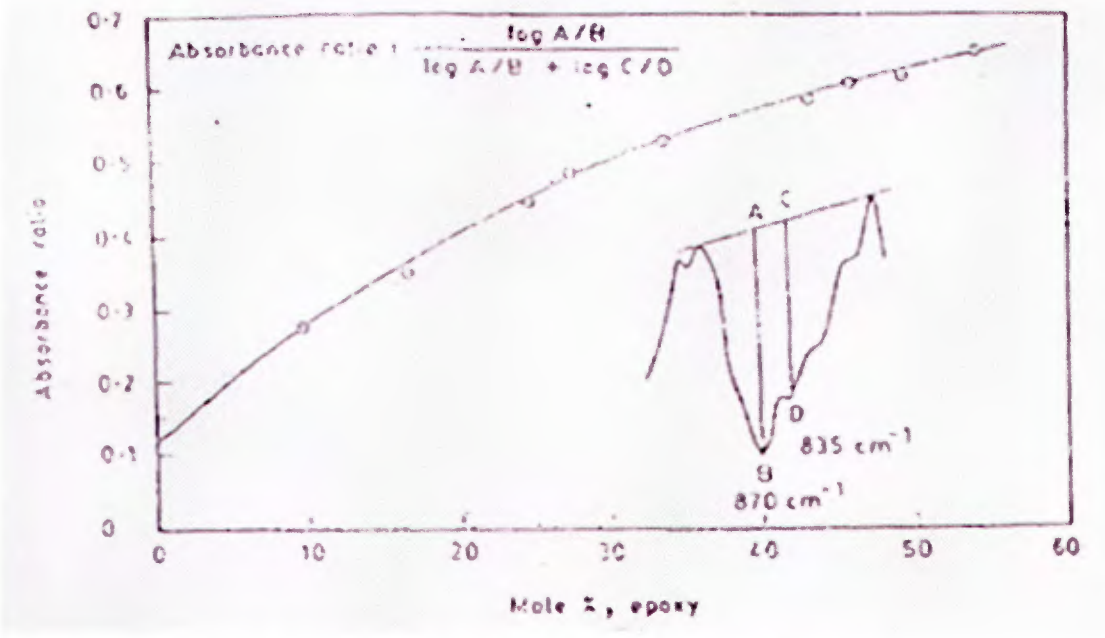
**ผลศึกษาการเตรียมยางธรรมชาติอิพอกไซด์ (ENR)**

จากการเตรียมยางธรรมชาติอิพอกไซด์ ได้ประยุกต์ตามวิธีการของเจริญ นาคะสรรค์ คณะ (2544) โดยเตรียมยางธรรมชาติอิพอกไซด์ในอัตราส่วนน้ำยาง 1.7 โมล ทำปฏิกิริยาที่ความเข้มข้น 20 %DRC กับ กรดเปอร์ฟอร์มิกที่ได้จากการเตรียมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 2.6 โมล กรดฟอร์มิก 0.9 โมล ใช้ 10 เปอร์เซ็นต์ Triton X-100 จำนวน 30 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักเนื้อยาง ทำปฏิกิริยาเวลา 10 ชั่วโมง นำไปวิเคราะห์หาหมู่อิพอกซีด้วยเทคนิค FT-IR แสดงสเปกตรัมดังภาพที่ 4.2 เมื่อเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของยางธรรมชาติในภาพที่ 4.1 พบว่าปรากฏสเปกตรัมการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่ตำแหน่งเลขคลื่นใหม่ โดยเป็นแถบการดูดกลืนของหมู่ฟังก์ชันอิพอกไซด์ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 870 และ 1240 ซม.$^{-1}$ เกิดเพิ่มขึ้นในของยางธรรมชาติ



**ภาพที่ 4.1 สเปกตรัม FT-IR ของยางธรรมชาติ**

**ภาพที่ 4.2 สเปกตรัม FT-IR ของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 10 ชั่วโมง**

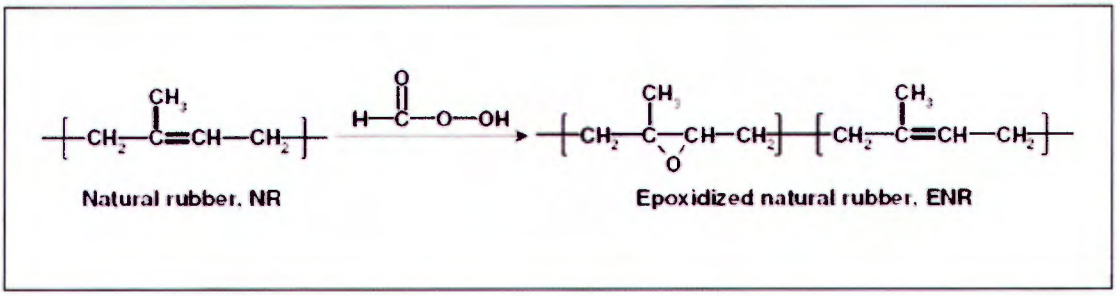



**ภาพที่ 4.3 กราฟมาตรฐานเปอร์เซ็นต์โมลอิพอกไซด์ของยางธรรมอิพอกไซด์**

**ที่มา :** (Davey and Loadman, 1984)

ภาพที่ 4.2 สเปกตรัม FT-IR ของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ได้ ปรากฏสเปกตรัมของแถบการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่ตำแหน่งเลขคลื่น 870 และ 835 ซม.$^{-1}$ นำมาคำนวณหาค่า Absorbance Ratio จากพื้นที่ใต้พีคที่การดูดแสงดังกล่าว นำมาเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานตามผลงานวิจัยของ (Davey and Loadman, 1984) ดังภาพที่ 4.3 เพื่อหาปริมาณเปอร์เซ็นต์โมลอิพอกไซด์ ยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่เตรียมได้มีเปอร์เซ็นต์โมลอิพอกไซด์ เท่ากับ 58.24 เปอร์เซ็นต์โมล

ในการทำปฏิกิริยาเตรียมยางธรรมชาติอิพอกไซด์ทำปฏิกิริยาระหว่างน้ำยางกับกรดเปอร์ฟอร์มิกสามารถแสดงการเกิดปฏิริกิยาได้ดังนี้



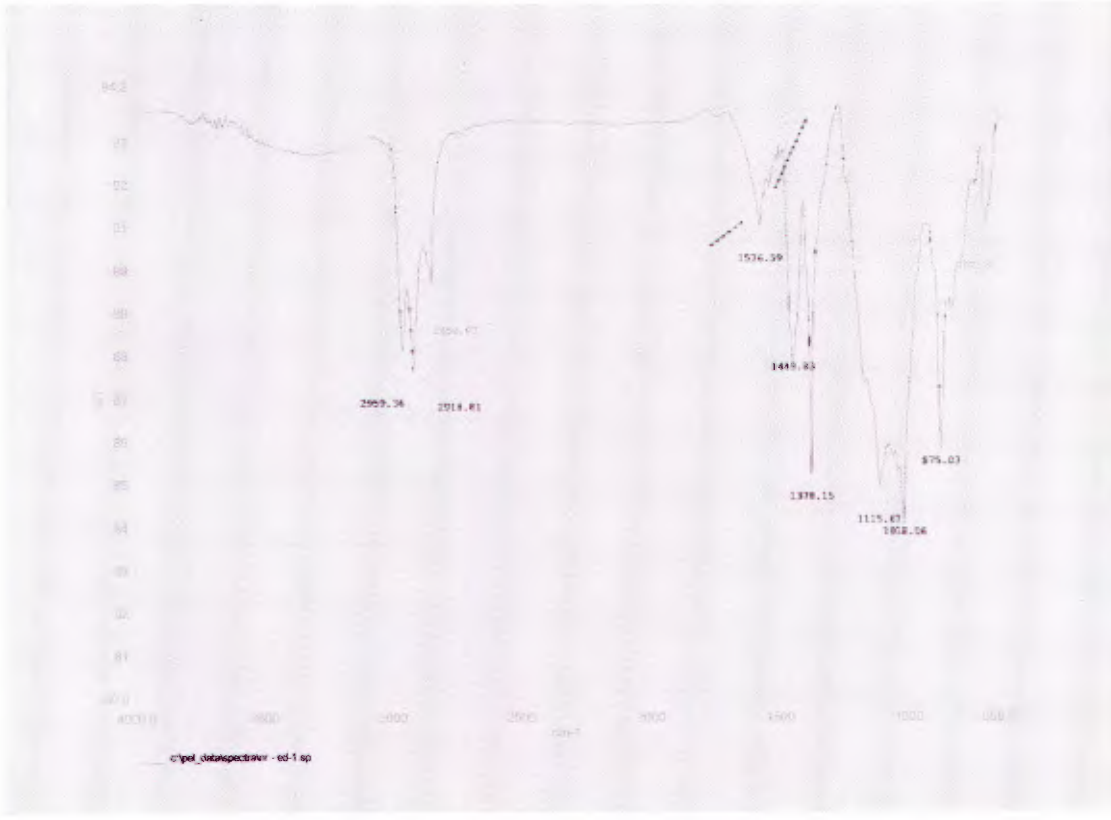

**ภาพที่ 4.4 ปฏิกิริยาเตรียมยางธรรมชาติอิพอกไซด์ด้วยกรดเปอร์ฟอร์มิก**

**ที่มา :** (รังรอง ยกส้าน 2549 ; หน้า 15)

การเตรียมยางธรรมชาติอิพอกไซด์สามารทำได้หลายวิธี เช่น วิธีการกรดเปอร์เบนโซอิก วิธีการกรดเปอร์พะทาลิก วิธีกรดเปอร์อะซิติก และวิธีกรดเปอร์ฟอร์มิก (เจริญ นาคะสรรค์, 2544) ซึ่งวิธีการที่ทำให้ได้ปริมาณเปอร์เซ็นต์โมลอิพอกไซด์สูงในเวลาที่น้อย คือวิธีกรดเปอร์ฟอร์มิก ซึ่งการเตรียมยางธรรมชาติอิพอกไซด์ โดยวิธีการวิธีกรดเปอร์ฟอร์มิกที่ประยุกต์ตามวิธีการของเจริญ นาคะสรรค์คณะ (2544) เมื่อทำการเปลี่ยนสารลดแรงตึงผิวจาก Emulwin W เป็น Tritor X-100 เตรียมในอัตราส่วนเดียวกัน ที่ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 10 ชั่วโมง ได้ยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีเปอร์เซ็นต์โมลอิพอกไซด์เท่ากับ 58.24 เปอร์เซ็นต์โมล ซึ่งใกล้เคียงกับงานวิจัยของเจริญ นาคะสรรค์ (2544) เดิมยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่เตรียมได้มีเปอร์เซ็นต์โมลอิพอกไซด์ เท่ากับ 60 เปอร์เซ็นต์โมล

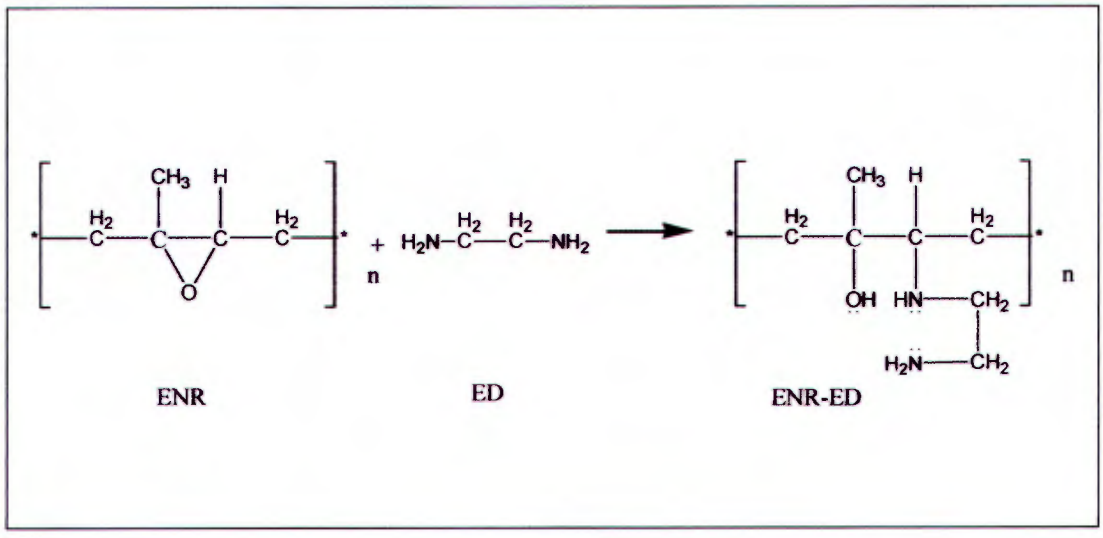
**ผลการศึกษาดัดแปรยางธรรมชาติอิพอกไซด์ด้วยเอทิลีนไดเอมีน (ENR-ED)**

จากการศึกษาดัดแปรยางธรรมชาติอิพอกไซด์ด้วยเอทิลีนไดเอมีน ซึ่งเป็นวิธีการกราฟต์พอลิเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติอิพอกไซด์ (ENR) กับเอทิลีนไดเอมีน (ED) เตรียมพอลิเมอร์ด้วยปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบแขวนลอย หลังจากการพอลิเมอไรเซชันนำยางธรรมชาติอิพอกไซด์ดัดแปรด้วยเอทิลีนไดเอมีน แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วย FT-IR จะได้สเปกตรัมดังภาพที่ 4.5 เปรียบเทียบกับสเปกตรัม FT-IR ของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ในภาพที่ 4.1 พบว่าแถบการดูดกลืนที่ตำแหน่งเลขคลื่นที่ 1243.16 ซม.$^{-1}$ แสดงตำแหน่งแถบการดูดกลืนของหมู่ C-O-C ไม่ปรากฏในภาพที่ 4.5 ซึ่งเป็นผลจากการดัดแปรเอทิลีนไดเอมีน ทำให้พันธะระหว่าง C-O-C ที่อยู่เป็นวงในยางธรรมชาติอิพอกไซด์แตกออกต่อกับเอทิลีนไดเอมีน และพบแถบการดูดกลืนใหม่ที่ตำแหน่งเลขคลื่นที่ 1576.59 และ 1533.82 แสดงตำแหน่งแถบการดูดกลืนของหมู่ $NH_2$ และ NH ตามลำดับ หมู่ดังกล่าวเป็นหมู่ฟังก์ชันองค์ประกอบของเอทิลีนไดเอมีน



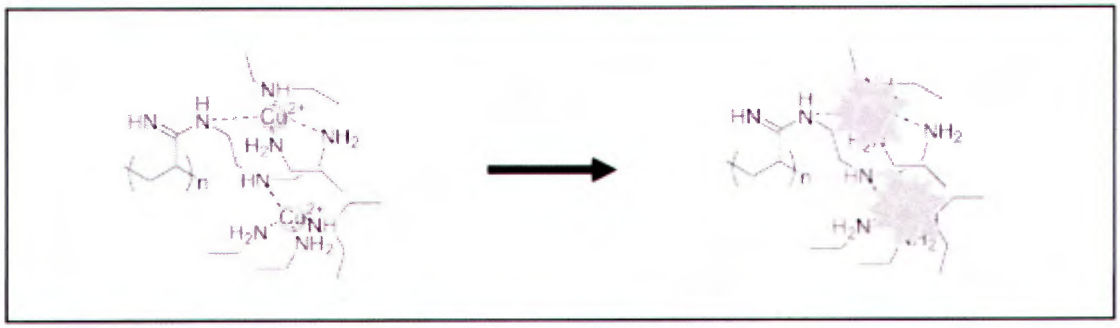

**ภาพที่ 4.5 สเปกตรัม FT-IR ของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ดัดแปรด้วยเอทิลีนไดเอมีน**

จากการดัดแปรโครงสร้างของยางธรรมชาติอิพอกไซด์โดยการกราฟต์ด้วยเอทิลีนไดเอมีนสามารถสันนิฐานโครงสร้างของยางดังภาพที่ 4.6




**ภาพที่ 4.6 ปฏิกิริยาการดัดแปรยางธรรมชาติอิพอกไซด์ด้วยเอทีลีนไดเอมีน**

เมื่อทำการกราฟต์ด้วยเอทิลีนไดเอมีน จะได้ยางธรรมชาติชนิดใหม่ที่ต่อเอทิลีนไดเอมีน (ENR-ED ) ซึ่งเอทิลีนไดเอมีนมีหมู่ของเอมีนในโครงสร้าง 2 หมู่ ซึ่งหมู่ของเอมีน จะมีไนโตรเจนจะมีอิเล็กตรอนคู่โดดเดียวเหลืออยู่ ซึ่งเมื่อพบกับโลหะหนัก ไนโตรเจนสามารถที่จะเกิดพันธะโคออร์ดิเนตโคเวเลนต์ กับโลหะเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน โลหะจะติดกับโครงสร้างของยาง ENR-ED ทำให้สามารถกำจัดโลหะในสารละลายได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เกิดการโคออร์ดิเนตโคเวเลนต์แสดงดังภาพที่ 4.7



**ภาพที่ 4.7 การโคออร์ดิเนตโคเวเลตต์ระหว่างโลหะกับหมู่ของเอมีนของ poly(acrylo-amidino diethylenediamine)**

**ที่มา** : (Youg Gun & Ung Su Choi, 2007)

จากภาพที่ 4.7 จะเห็นการเกิดพันธะโคออร์ดิเนตโคเวเลนต์ระหว่างโลหะกับหมู่ของเอมีนซึ่งเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดการโคออร์ดิเนตโคเวเลนต์จับโลหะได้เพิ่มขึ้น จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการต่อเอทิลินไดเอมีนแล้ว สามารถดูดซับโลหะจากสารละลายจากการทดลองได้ ซึ่งสามารถอธิบายการดูดซับโลหะของยาง ENR-ED ในลักษณะเดียวกัน

**ผลการศึกษาการดูดซับโลหะหนักของยาง ENR-ED**

**1 ผลการศึกษาการดูดซับของยาง ENR-ED ด้วยวิธีแบบการแช่ (Batch method)**

เมื่อศึกษาการดูดซับของยาง ENR-ED โดยแช่ ENR-ED 1 กรัม ในสารละลายโลหะ $Cu^{2+}$ และ $Cr^{3+}$ ความเข้มข้น 10 มิลิกรัม/ลิตร ให้ผลดังนี้

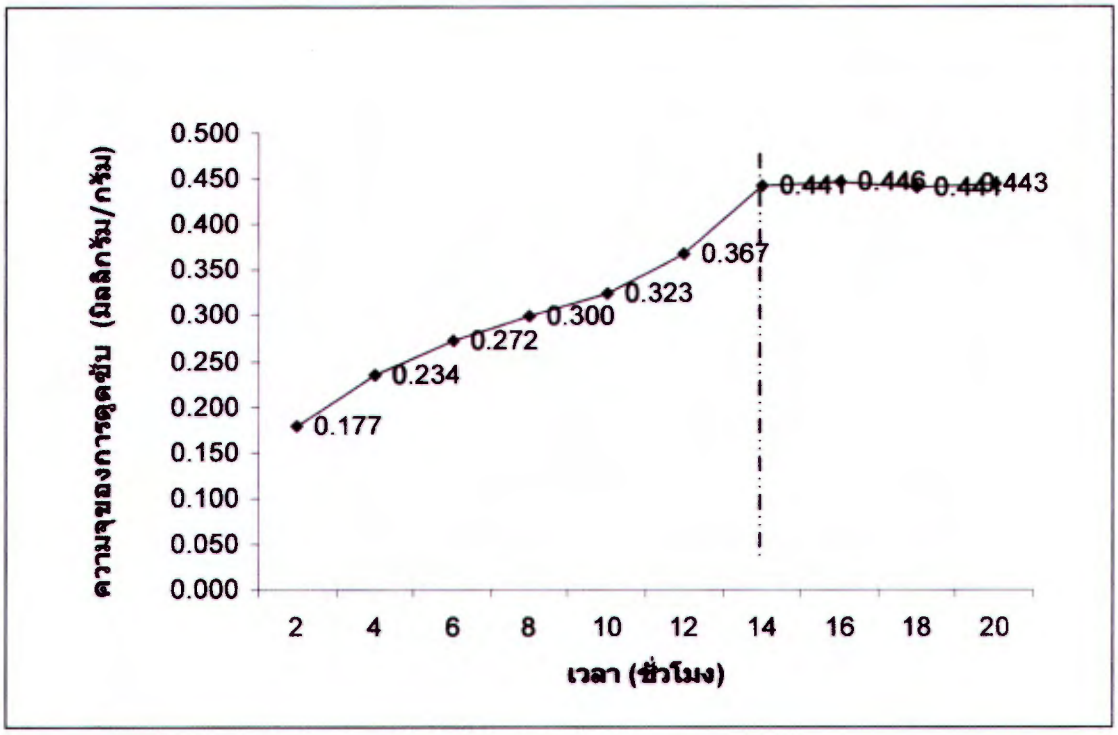
**1.1 ผลการศึกษาเวลาสมดุลของการดูดซับ**

จากการศึกษาเวลาสมดุลของการดูดซับ ซึ่งศึกษาการดูดซับที่เวลา 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18 และ 20 ชั่งโมง โดยใช้สารละลายโลหะที่มี pH 5 ซึ่งจะเห็นได้จากการทดลองทั้งการดูดซับโลหะสองชนิด โดยปริมาณการดูดซับโลหะทั้งสองแสดงผลดังตาราง 4.1, 4.2 และภาพที่ 4.8, 4.9

**ตารางที่ 4.1 ผลการศึกษาเวลาสมดุลของการดูดซับ $Cu^{2+}$ ด้วยยางENR-ED ที่เวลาต่างๆ**

| เวลา (ชั่วโมง) | q ครั้งที่ 1 (มิลลิกรัม/กรัม) | q ครั้งที่ 2 (มิลลิกรัม/กรัม) | q ครั้งที่ 3 (มิลลิกรัม/กรัม) | q เฉลี่ย (มิลลิกรัม/กรัม) | SD |
|---|---|---|---|---|---|
| 2.000 | 0.192 | 0.172 | 0.168 | 0.177 | 0.013 |
| 4.000 | 0.272 | 0.207 | 0.224 | 0.234 | 0.034 |
| 6.000 | 0.283 | 0.256 | 0.276 | 0.272 | 0.014 |
| 8.000 | 0.306 | 0.287 | 0.305 | 0.300 | 0.011 |
| 10.000 | 0.325 | 0.340 | 0.305 | 0.323 | 0.018 |
| 12.000 | 0.373 | 0.389 | 0.339 | 0.367 | 0.025 |
| 14.000 | 0.448 | 0.499 | 0.378 | 0.441 | 0.061 |
| 16.000 | 0.467 | 0.491 | 0.379 | 0.446 | 0.059 |
| 18.000 | 0.469 | 0.489 | 0.364 | 0.441 | 0.067 |
| 20.000 | 0.469 | 0.492 | 0.369 | 0.443 | 0.065 |

หมายเหตุ q ; ความจุของการดูดซับ



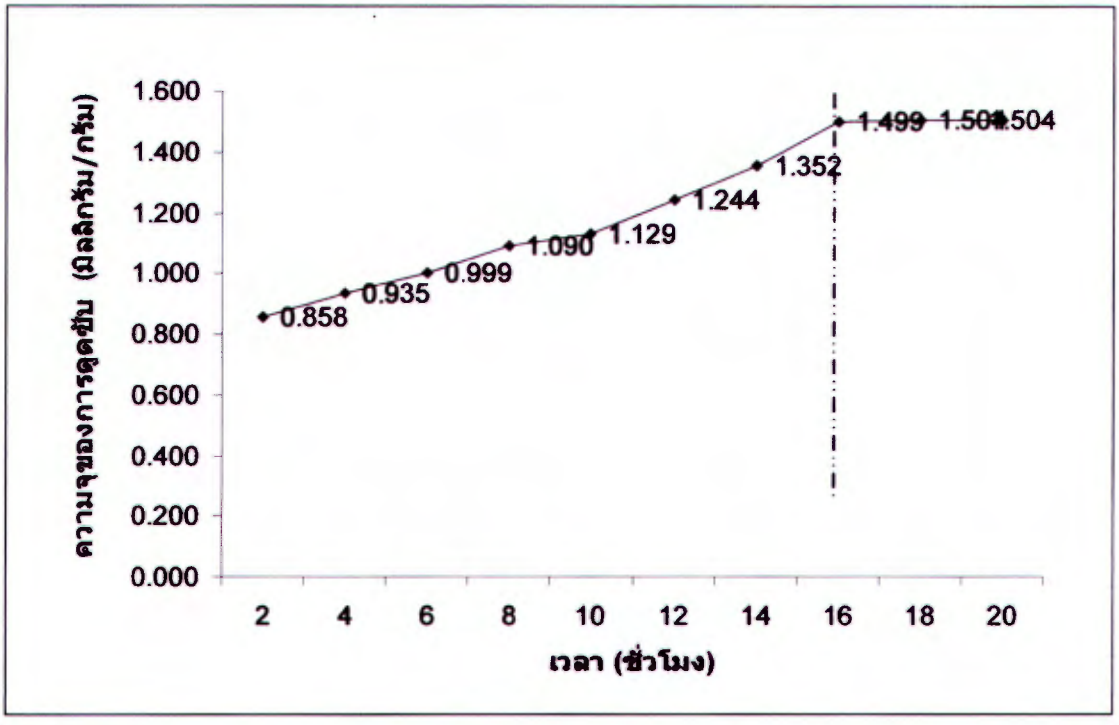

**ภาพที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับโลหะ $Cu^{2+}$ ที่เวลาต่างๆ**

จากผลการทดลองซึ่งแสดงให้เห็นจากภาพที่ 4.8 ปริมาณการดูดซับโลหะ $Cu^{2+}$ ปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้นและมีการดูดซับเริ่มคงที่ ที่เวลา 14 ชั่วโมง เกิดจากพื้นที่ผิวของยาง ENR-ED ถูกปกคลุมไปด้วยโลหะ $Cu^{2+}$ ที่เกิดพันธะโคออร์ดิเนตโคเวเลนต์ระหว่างตัวลิเกนด์กับโลหะบนพื้นผิวยาง ENR-ED (Young Gun Ko & Ung So Choi ,2007) เนื่องจากตัวดูดซับมีจำนวนจำกัด เมื่อโลหะเกิดพันธะจับกับลิเกนด์จนเต็มทั่วทั้งพื้นผิวตัวดูดซับจึงไม่สามารถดูดซับโลหะได้อีก (วรพัฒน์ พัฒนวรเศรษฐ์, 2546) เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นทำให้ผลของการดูดซับคงที่ เป็นผลทำให้สมดุลของการดูดซับโลหะ $Cu^{2+}$ สมดุลที่เวลา 14 ชั่วโมง

**ตารางที่ 4.2 ผลการศึกษาเวลาสมดุลของการดูดซับ $Cr^{3+}$ ด้วยยาง ENR-ED ที่เวลาต่างๆ**

| เวลา (ชั่วโมง) | q ครั้งที่ 1 (มิลลิกรัม/กรัม) | q ครั้งที่ 2 (มิลลิกรัม/กรัม) | q ครั้งที่ 3 (มิลลิกรัม/กรัม) | q เฉลี่ย (มิลลิกรัม/กรัม) | SD |
|---|---|---|---|---|---|
| 2.000 | 0.852 | 0.723 | 1.000 | 0.858 | 0.138 |
| 4.000 | 0.883 | 0.807 | 1.115 | 0.935 | 0.160 |
| 6.000 | 0.955 | 0.836 | 1.206 | 0.999 | 0.189 |
| 8.000 | 0.986 | 0.953 | 1.330 | 1.090 | 0.209 |
| 10.000 | 0.979 | 1.002 | 1.404 | 1.129 | 0.239 |
| 12.000 | 1.073 | 1.116 | 1.542 | 1.244 | 0.259 |
| 14.000 | 1.166 | 1.351 | 1.539 | 1.352 | 0.187 |
| 16.000 | 1.295 | 1.496 | 1.706 | 1.499 | 0.206 |
| 18.000 | 1.354 | 1.527 | 1.630 | 1.504 | 0.140 |
| 20.000 | 1.351 | 1.455 | 1.706 | 1.504 | 0.182 |

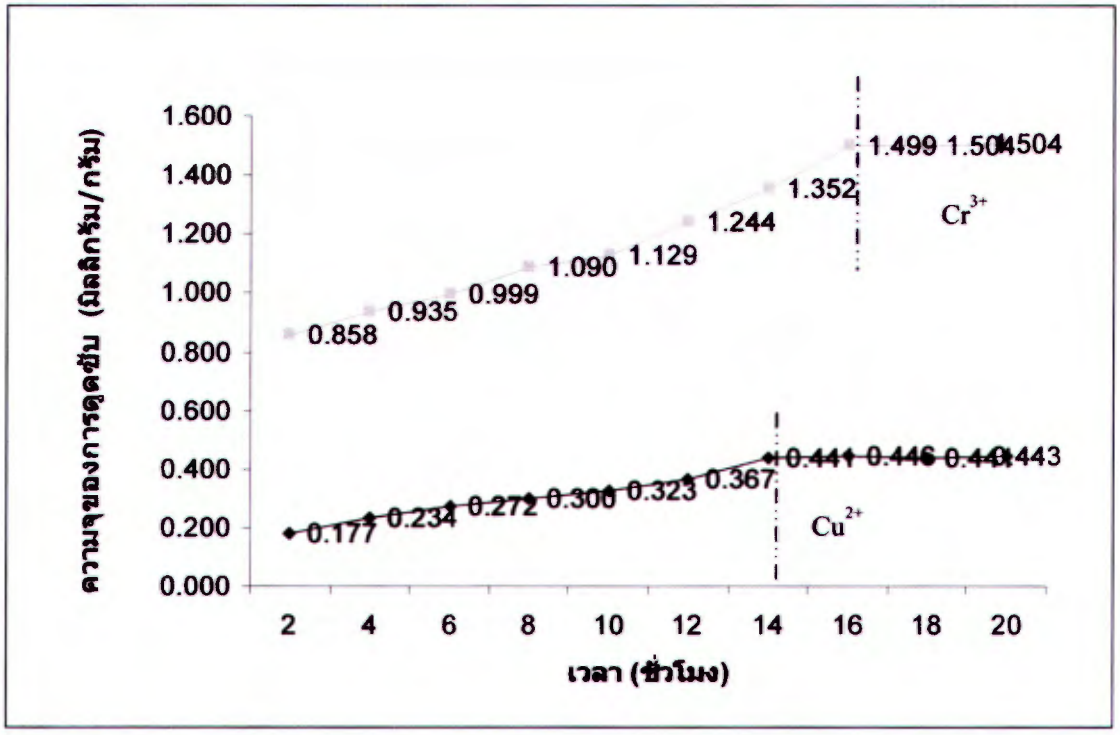
หมายเหตุ q ; ความจุของการดูดซับ




**ภาพที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับโลหะ $Cr^{3+}$ ที่เวลาต่างๆ**

เมื่อทำการศึกษาเวลาสมดุลของการดูดซับ $Cr^{3+}$ จากผลการทดลองจะสังเกตเห็นดังได้จากภาพที่ 4.9 จากภาพจะเห็นได้ว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นปริมาณการดูดซับ $Cr^{3+}$ จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามเวลาที่เพิ่มขึ้นแล้วจะเริ่มคงที่ ที่เวลา 16 ชั่วโมง ซึ่งสามารถอธิบายได้ในทนองเดียวกับการดูดซับ $Cu^{2+}$ เนื่องจาก $Cr^{3+}$ เกิดพันธะโคออร์ดิเนตโคเวเลนต์ระหว่างตัวลิเกนด์กับโลหะจับอยู่บนพื้นผิวยาง ENR-ED เต็มทั่วทั้งพื้นผิวทำให้ไม่สามารถที่จะดูดซับโลหะได้อีก

เมื่อนำการดูดซับ $Cr^{3+}$ และ $Cu^{2+}$ ที่เวลาต่างๆ มาเปรียบเทียบกันแสดงให้เห็นในภาพที่ 4.10




**ภาพที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับโลหะ $Cu^{2+}$ และ $Cr^{3+}$ ที่เวลาต่างๆ**

จากภาพที่ 4.10 เมื่อนำผลของการศึกษาเวลาสมดุลของการดูดซับโลหะ $Cu^{2+}$ และ $Cr^{3+}$ มาเปรียบเทียบกันความจุของการดูดซับและเวลาที่สมดุลของการดูดซับทั้งสองแตกต่างกัน ความจุของการดูดซับและเวลาที่สมดุลของการดูดซับโลหะ $Cr^{3+}$ จะมากกว่าการดูดซับโลหะ $Cu^{2+}$ โดยโลหะ $Cr^{3+}$ การดูดซับที่สมดุลที่เวลา 16 ชั่วโมง มีปริมาณการดูดซับที่สมดุลเท่ากัน 1.499 มิลิกรัม/ลิตร ซึ่งต่างจากโลหะ $Cu^{2+}$ ที่มีการดูดซับสมดุลที่เวลา 14 ชั่วโมง มีปริมาณการดูดซับที่

สมดุลเท่ากับ 0.441 มิลลิกรัม/ลิตร เป็นเช่นนี้เนื่องจากความสามารถของยาง ENR-ED ในการดูดซับโลหะ $Cr^{3+}$ มีมากกว่าการดูดซับโลหะ $Cu^{2+}$ เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นการดูดซับจะเป็นไปในลักษณะเดียวกัน แต่เมื่อการดูดโลหะ $Cu^{2+}$ ถึงจุดสมดุล โลหะ $Cr^{3+}$ จะมีการดูดซับต่อไป ทำให้ยังสามารถที่จะดูดซับโลหะ $Cr^{3+}$ ได้แต่เมื่อโลหะ $Cr^{3+}$ ถูกจับเต็มบนพื้นผิวของยาง ENR-ED ในการดูดซับจะคงที่ ณ จุดสมดุล

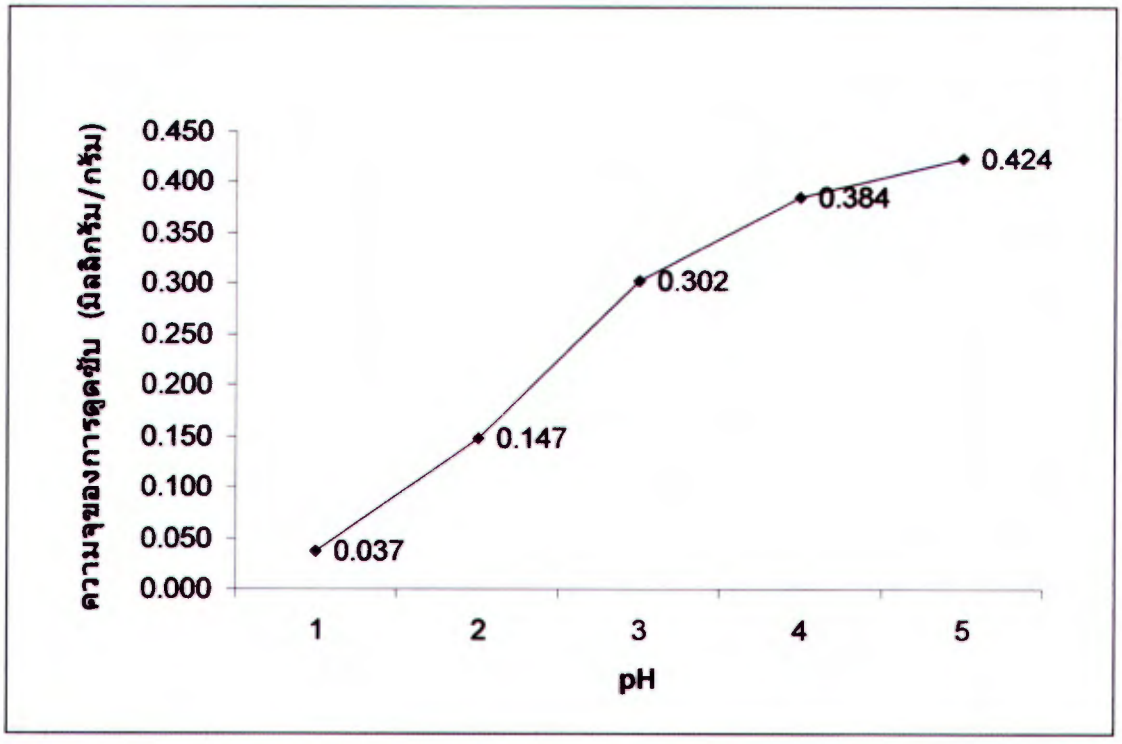
### 1.2 ผลศึกษา pH ที่เหมาะสมของสารละลายโลหะในการดูดซับของยาง ENR-ED

จากการศึกษา pH ที่เหมาะสมของสารละลายโลหะในการดูดซับของยาง ENR-ED ประสิทธิภาพการดูดซับของยาง ENR-ED ขึ้นอยู่กับ pH ของสารละลายโลหะ ประสิทธิภาพการดูดโลหะสูงที่ pH สูง (Young Gun Ko & Ung So Choi, 2007) จากศึกษาการดูดซับโลหะครั้งนี้ที่ค่า pH เท่ากับ 1, 2, 3, 4, และ 5 ซึ่งช่วง pH จาก 1- 5 นี้เป็นช่วงที่ไม่ทำให้โลหะตกตะกอน การตกตะกอนของโลหะที่เกิดดังกล่าวทำให้รบกวนการทดลอง ผลการศึกษา pH ที่เหมาะสมของสารละลายโลหะในการดูดซับของยาง ENR-ED แสดงให้ดังตารางที่ 4.3, 4.4 และ ภาพที่ 4.11, 4.12

**ตารางที่ 4.3 ผลการศึกษา pH ที่เหมาะสมของการดูดซับ $Cu^{2+}$ ด้วยยาง ENR-ED**

| PH | q ครั้งที่ 1 (มิลลิกรัม/กรัม) | q ครั้งที่ 2 (มิลลิกรัม/กรัม) | q ครั้งที่ 3 (มิลลิกรัม/กรัม) | q เฉลี่ย (มิลลิกรัม/กรัม) | SD |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0.005 | 0.048 | 0.060 | 0.037 | 0.029 |
| 2 | 0.008 | 0.065 | 0.368 | 0.147 | 0.194 |
| 3 | 0.244 | 0.289 | 0.371 | 0.302 | 0.064 |
| 4 | 0.364 | 0.405 | 0.384 | 0.384 | 0.020 |
| 5 | 0.409 | 0.493 | 0.369 | 0.424 | 0.063 |

หมายเหตุ q ; ความจุของการดูดซับ

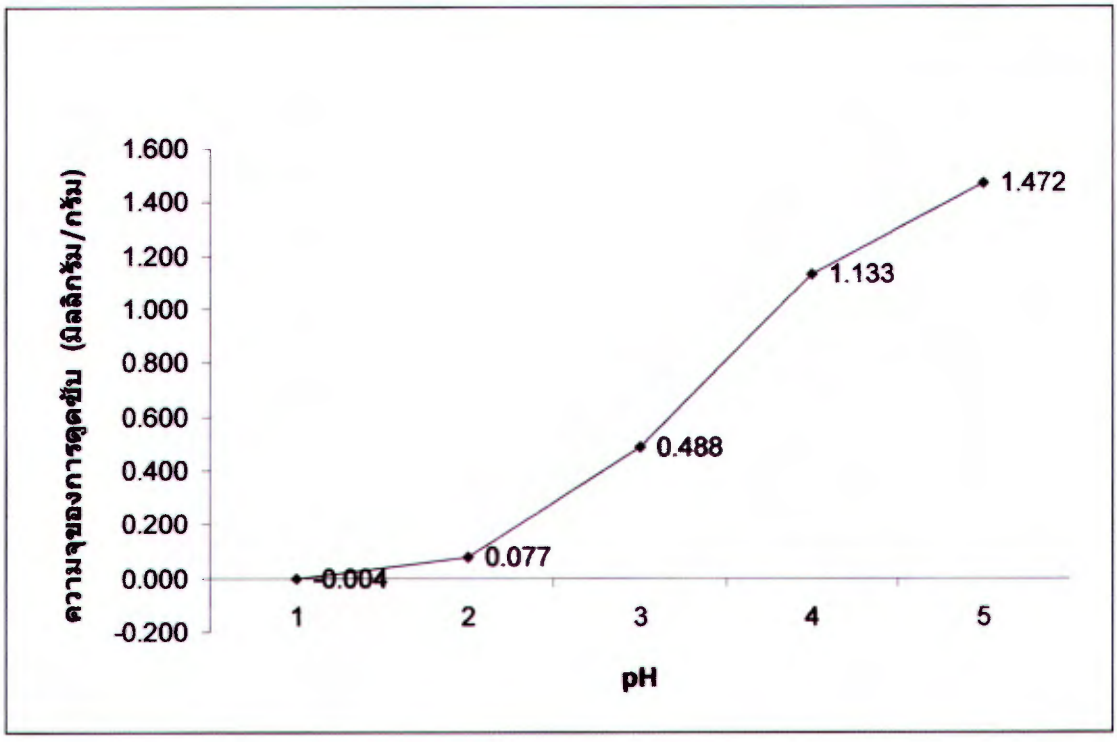



**ภาพที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับโลหะ $Cu^{2+}$ ที่ pH ต่างๆ**

**ตารางที่ 4.4 ผลการศึกษา pH ที่เหมาะสมของการดูดซับ $Cr^{2+}$ ด้วยยาง ENR-ED**

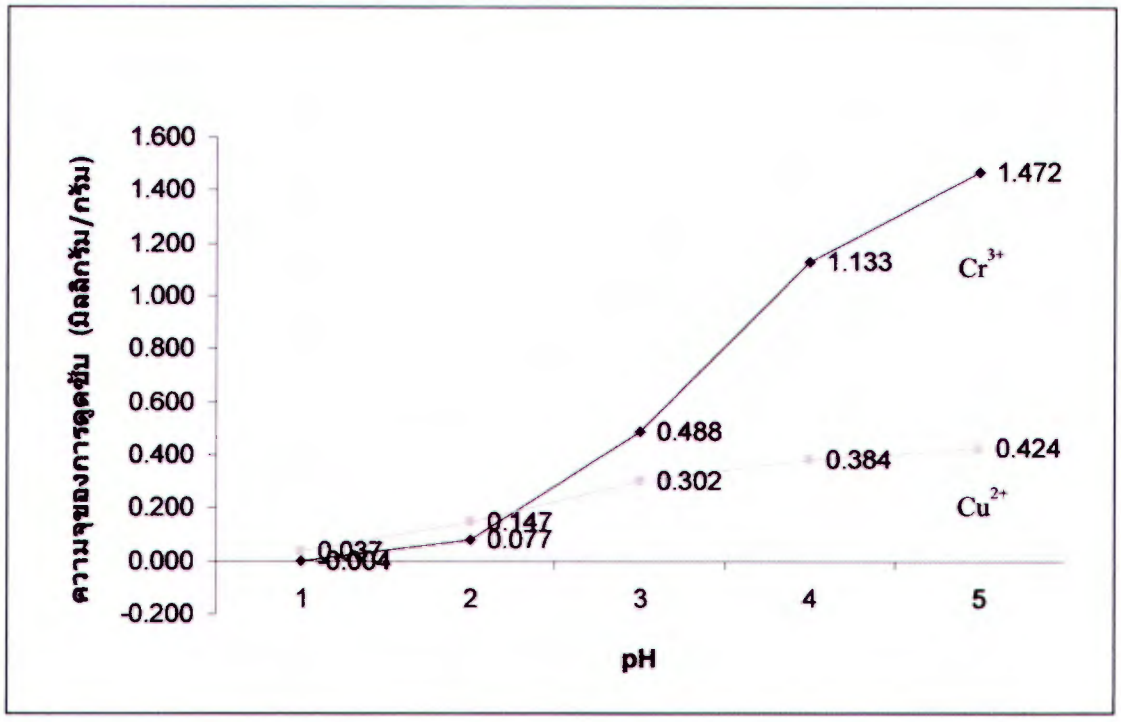
| PH | q ครั้งที่ 1 (มิลลิกรัม/กรัม) | q ครั้งที่ 2 (มิลลิกรัม/กรัม) | q ครั้งที่ 3 (มิลลิกรัม/กรัม) | q เฉลี่ย (มิลลิกรัม/กรัม) | SD |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | -0.081 | -0.061 | 0.130 | -0.004 | 0.116 |
| 2 | 0.047 | 0.138 | 0.047 | 0.077 | 0.053 |
| 3 | 0.464 | 0.507 | 0.494 | 0.488 | 0.022 |
| 4 | 1.172 | 1.085 | 1.140 | 1.133 | 0.044 |
| 5 | 1.366 | 1.397 | 1.654 | 1.472 | 0.158 |

หมายเหตุ q ; ความจุของการดูดซับ




**ภาพที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับโลหะ $Cr^{3+}$ ที่ pH ต่างๆ**

จากผลการทดลองสามารถสังเกตเห็นได้จากภาพที่ 4.11 และ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง pH ของสารละลายกับความสามารถในการดูดซับโลหะของยาง ENR-ED จะเห็นได้ว่าโลหะทั้งสองชนิดจะเป็นไปในลักษณะเดียวกัน คือ ประสิทธิภาพการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตาม pH ที่เพิ่มขึ้น สามารถเห็นได้ชัดเจนเมื่อนำทั้งสองมาเปรียบเทียบกันดังภาพที่ 4.13




**ภาพที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับโลหะ $Cu^{2+}$ และ $Cr^{3+}$ ที่ pH ต่างๆ**

จากภาพที่ 4.13 เมื่อนำทั้งสองมาเปรียบเทียบจะเห็น ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะทั้งสอง $Cu^{2+}$ และ $Cr^{3+}$ จะเพิ่มขึ้นเมื่อ pH ที่เพิ่มขึ้น ที่ pH ต่ำไม่มีการดูดซับหรือดูดซับน้อย เนื่องจากสารละลายที่มี pH ต่ำจะมี $H^+$ จำนวนมาก $H^+$ จะไปขัดขวางการเกิดพันธะโคออร์ดิเนตโคเวเลนต์ระหว่างลิเกนด์กับโลหะ (Young Gun Ko & Ung So Choi, 2007) $H^+$ จะเกิดการโปรตรอเนตบนยาง ENR-ED (Ronald R.Navrro และคณะ , 2000) ทำให้ไม่สามารดูดซับโลหะได้ แต่ในสารละลายที่มี pH สูง จะมีปริมาณ $OH^-$ เป็นจำนวนมาก จะช่วยขัดขวางการโปรโตเนตบนยาง ENR-ED (Ronald R.Navrro และคณะ , 2000) และจะมีปริมาณ $H^+$ น้อย การขัดขวางในการเกิดพันธะโคออร์ดิเนตโคเวเลนต์ระหว่างลิเกนด์กับโลหะน้อยลง (Young Gun Ko & Ung So Choi, 2007) ทำให้มีความสามารถในการดูดซับสูง

**1.3 ผลศึกษาความจุของการดูดซับแบบถังแช่**

จากการศึกษาความจุของการดูดซับโลหะ $Cu^{2+}$ และ $Cr^{3+}$ ทำโดยนำยาง ENR-ED 1 กรัม แช่ในสารละลายโลหะความเข้มข้นต่างกันแต่ละชนิด ดังนี้ 20 , 40 , 60 , 80 , 100 , 120 และ 140 มิลลิกรัม/ลิตร ศึกษาที่ pH 5 และเวลาการดูดซับโลหะ $Cu^{2+}$ และ $Cr^{3+}$ ใช้เวลา 14 และ 16 ชั่วโมง ตามลำดับ หาความจุของการดูดซับโดยใช้สมการของ Freundlich แสดงผลการศึกษาดังตารางที่ 4.5 , 4.6 , 4.7 , 4.8 และภาพที่ 4.15 , 4.16

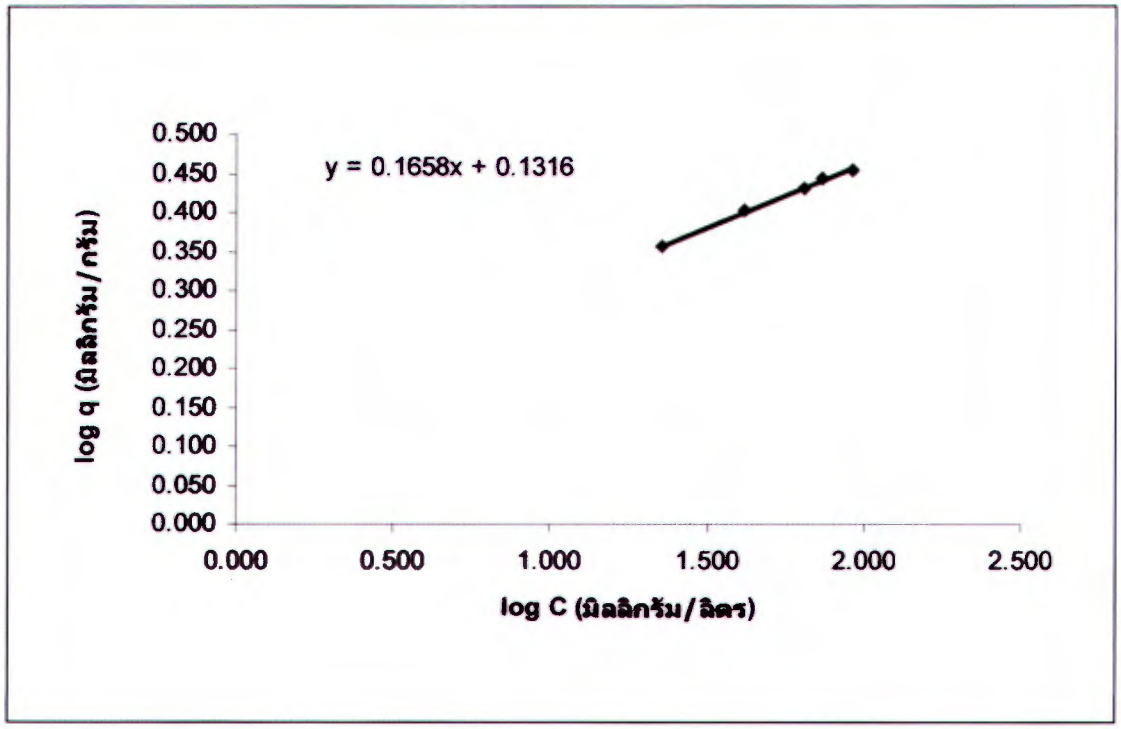
**ตารางที่ 4.5 ผลการศึกษาความจุของการดูดซับ $Cu^{2+}$ ด้วยวิธีแบบการแช่ (Batch method)**

| ความเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร) | q ครั้งที่ 1 (มิลลิกรัม/กรัม) | q ครั้งที่ 2 (มิลลิกรัม/กรัม) | q ครั้งที่ 3 (มิลลิกรัม/กรัม) | q เฉลี่ย (มิลลิกรัม/กรัม) | SD |
|---|---|---|---|---|---|
| 20 | 2.443 | 1.854 | 2.502 | 2.266 | 0.358 |
| 40 | 2.649 | 2.396 | 2.536 | 2.527 | 0.127 |
| 60 | 2.958 | 2.440 | 2.693 | 2.697 | 0.259 |
| 80 | 3.041 | 2.517 | 2.779 | 2.779 | 0.262 |
| 100 | 3.188 | 2.622 | 2.723 | 2.844 | 0.302 |

หมายเหตุ q ; ความจุของการดูดซับ

**ตารางที่ 4.6 ค่า log q (มิลลิกรัม/กรัม) และ log C (มิลลิกรัม/กรัม) เพื่อหาความจุของการดูดซับ $Cu^{2+}$**

| ความเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร) | log q (มิลลิกรัม/กรัม) | log C (มิลลิกรัม/กรัม) |
|---|---|---|
| 20 | 0.355 | 1.358 |
| 40 | 0.403 | 1.620 |
| 60 | 0.431 | 1.807 |
| 80 | 0.444 | 1.867 |
| 100 | 0.454 | 1.961 |




**ภาพที่ 4.14 ความสัมพันธ์ความจุของการดูดซับ $Cu^{2+}$ โดยใช้สม การของ Freundlich**

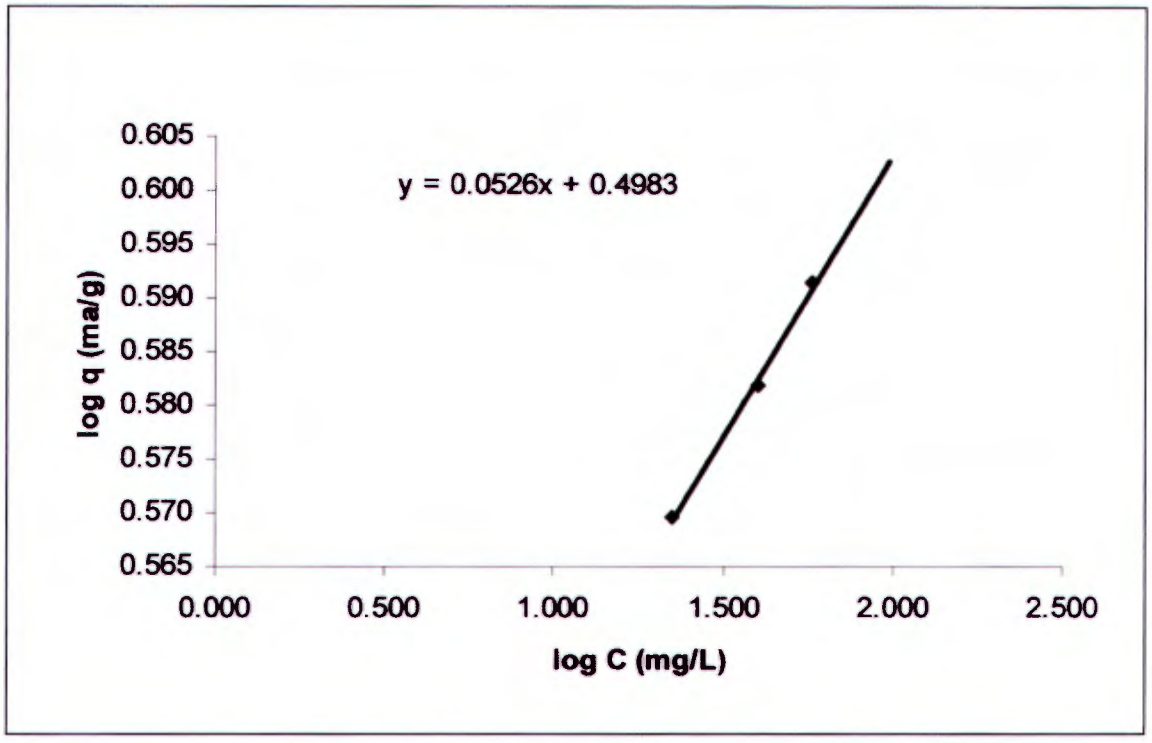
**ตารางที่ 4.7 ผลการศึกษาความจุของการดูดซับ $Cr^{3+}$ ด้วยวิธีแบบการแช่ (Batch method)**

| ความเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร) | q ครั้งที่ 1 (มิลลิกรัม/กรัม) | q ครั้งที่ 2 (มิลลิกรัม/กรัม) | q ครั้งที่ 3 (มิลลิกรัม/กรัม) | q เฉลี่ย (มิลลิกรัม/กรัม) | SD |
|---|---|---|---|---|---|
| 20 | 3.596 | 3.830 | 3.533 | 3.653 | 0.157 |
| 40 | 3.703 | 3.792 | 3.638 | 3.711 | 0.077 |
| 60 | 3.778 | 3.913 | 3.763 | 3.818 | 0.082 |
| 80 | 3.741 | 4.193 | 3.774 | 3.903 | 0.252 |
| 100 | 4.067 | 4.127 | 4.241 | 4.145 | 0.089 |

หมายเหตุ q ; ความจุของการดูดซับ

ตารางที่ 4.8 ค่า log q (มิลลิกรัม/กรัม) และ log C (มิลลิกรัม/กรัม) เพื่อหาความจุของการดูดซับ $Cr^{3+}$

| ความเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร) | log q (มิลลิกรัม/กรัม) | log C (มิลลิกรัม/กรัม) |
|---|---|---|
| 20 | 0.563 | 1.350 |
| 40 | 0.570 | 1.602 |
| 60 | 0.582 | 1.763 |
| 80 | 0.591 | 1.887 |
| 100 | 0.618 | 1.987 |



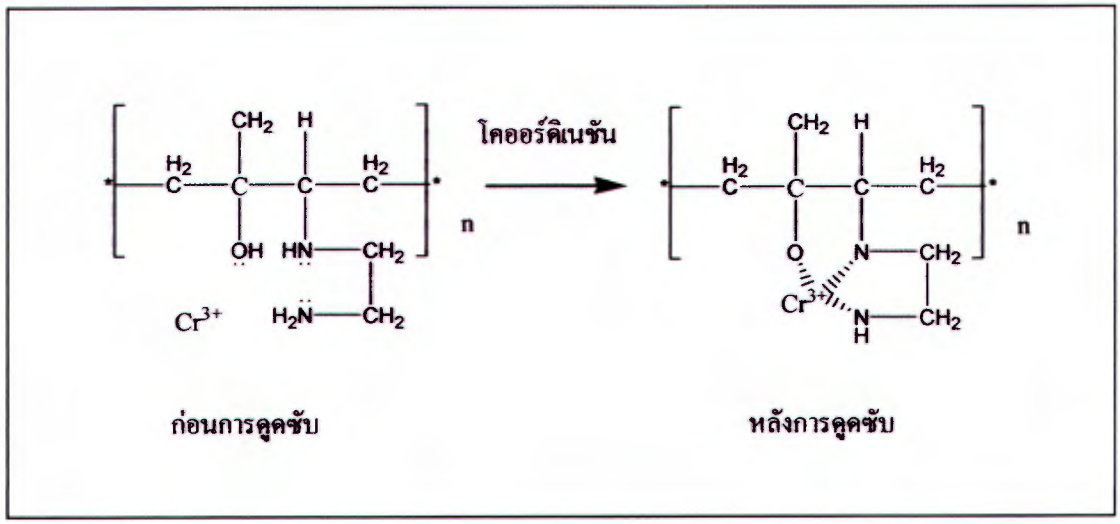

ภาพที่ 4.15 ความสัมพันธ์ความจุของการดูดซับ $Cr^{3+}$ โดยใช้สมการของ Freundlich

**ตารางที่ 4.9 ค่าความจุของการดูดซับ $Cu^{2+}$ และ $Cr^{3+}$ ด้วยวิธีแบบการแช่ โดยสมการของ Freundlich**

| โลหะ | ค่าความจุของการดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม) |
|---|---|
| $Cu^{2+}$ | 1.3539 |
| $Cr^{3+}$ | 3.1499 |

จากการทดลองดังแสดงดังตารางที่ 4.9 พบว่าค่าความจุของการดูดซับของโลหะ $Cu^{2+}$ และ $Cr^{3+}$ ได้เท่ากับ 1.359 และ 3.1499 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่มีการใช้โพลิอะมิโนสไตรีนสังเคราะห์สำหรับดูดซับ $Cr^{3+}$ (วรพัฒน์ พัฒนวรเศรษฐ์, 2546) พบว่าไม่สามารถดูดซับ $Cr^{3+}$ ได้ และจากการศึกษาการดัดแปรยางธรรมชาติให้เป็นยางเรซิน (ประวีณา ติระ, 2540) เตรียมโดยผ่านปฏิกิริยาอิพอกซิเดชันเป็นยางธรรมชาติอิพอกไซด์เพื่อใช้ในการกำจัดโลหะ $Cu^{2+}$ และ $Cr^{3+}$ พบว่าสามารถกำจัดได้อยู่ในช่วง 0.0-0.11 มิลลิกรัม/กรัม ซึ่งจะเห็นได้ว่างานวิจัยครั้งนี้ มีความสามารถในการดูดซับโลหะ $Cu^{2+}$ และ $Cr^{3+}$ สูงกว่างานวิจัยที่ผ่านมา แสดงให้เห็นได้ว่าการนำยางธรรมชาติดัดแปรให้มีหมู่ฟังก์ชั่นเอทิลีนไดเอมีน สามารถเกิดพันธะโคออร์ดิเนตโคเวเลนต์กับโลหะจะมีความสามารถในการดูดซับที่สูงกว่าการนำยางธรรมชาติดัดแปรให้มีหมู่แลกเปลี่ยนไอออนในโครงสร้าง

ยาง ENR-ED ที่เตรียมขึ้นจากการวิจัยครั้งนี้จะมีการดูดซับที่สูงกว่ายางเรซิน เนื่องจากตัวดูดซับที่เตรียมขึ้นใหม่นี้ จะมีลิเกนด์ที่สามารถที่จะปรับตัวขยับห่างของเอทิลีนไดเอมีนที่อยู่ในโครงสร้างของยาง ENR เข้ามาใกล้กันทำให้เหมาะสมกับการดูดซับ แสดงในภาพที่ 4.16 ทำให้สามารถเกิดพันธะโคออร์ดิเนตโคเวเลนต์กับโลหะ ซึ่งการศึกษาครั้งนี้ค่าความจุของการดูดซับของโลหะ $Cr^{3+}$ มากกว่า $Cu^{2+}$ เป็นสองเท่า และอาจจะสันนิฐานได้ว่า $Cr^{3+}$ มีความต้องการอิเล็กตรอนและมีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนสูงซึ่งพอดีกับอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวของตัวดูดซับทำให้ค่าความจุของ $Cr^{3+}$ มีมากกว่า $Cu^{2+}$

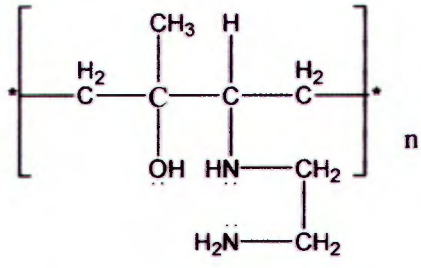



**ภาพที่ 4.16 การเกิดพันธะโคออร์ดิเนตโคเวเลนต์ระหว่างตัวดูดซับยาง ENR-ED กับโลหะ $Cr^{3+}$**

# บทที่ 5
# สรุปผลการทดลอง

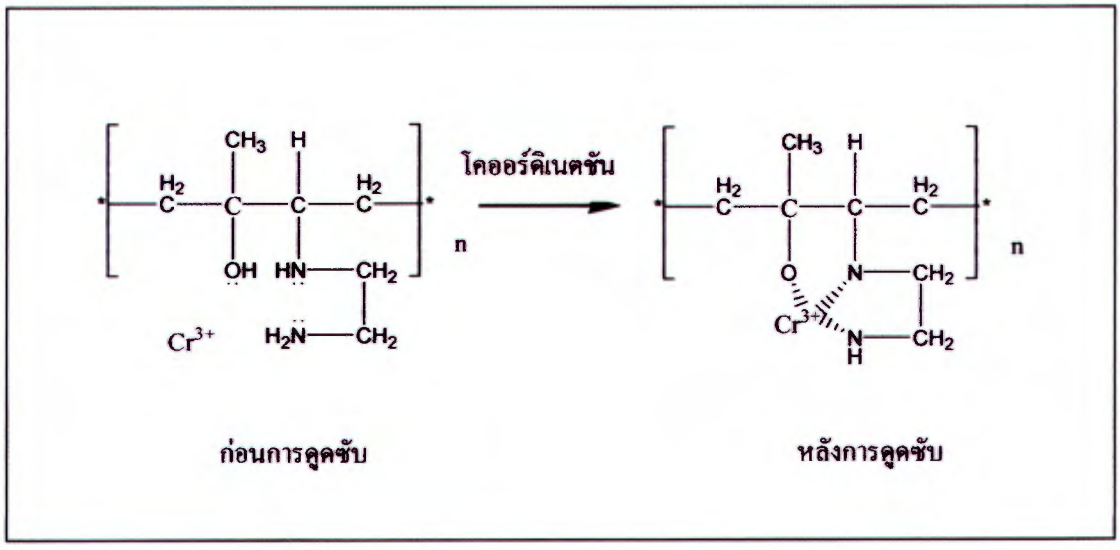
จากการเตรียมยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ได้ประยุกต์ตามวิธีการของเจริญ นาคะสรรค์ คณะ (2544) โดยเตรียมยางธรรมชาติอิพอกไซด์ในอัตราส่วนน้ำยาง 1.7 โมล ทำปฏิกิริยาที่ความเข้มข้น 20 %DRC กับ กรดเปอร์ฟอร์มิกที่ได้จากการเตรียมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 2.6 โมล กรดฟอร์มิก 0.9 โมล ใช้ 10 เปอร์เซ็นต์ Triton X-100 จำนวน 30 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักเนื้อยาง ทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 10 ชั่วโมง อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ยางธรรมชาติอิพอกไซด์ได้มีเปอร์เซ็นต์โมลอิพอกซีเท่ากับ 58.24 เปอร์เซ็นต์โมล ใกล้เคียงกับของคุณเจริญ นาคะสรรค์คณะ (2544) การใช้สารลดแรงตึงผิว Triton X-100 แทน Emulwin W จะให้ผลใกล้เคียงกัน

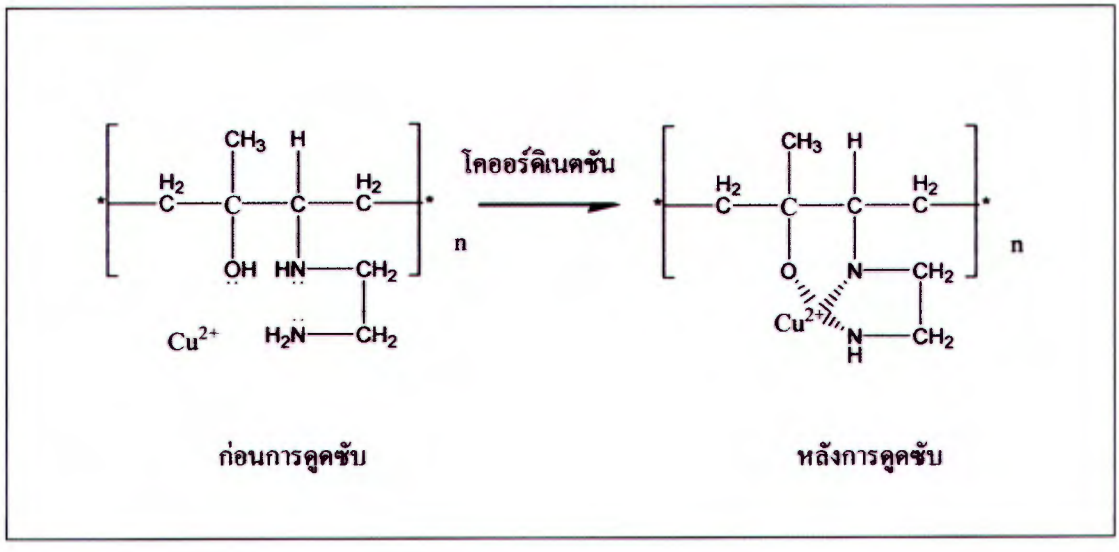
เมื่อนำยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ได้จากการเตรียม ในสภาพของลาเท็กซ์ดัดแปรด้วยเอทิลีนไดเอมีนในอัตราส่วน 10 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักเนื้อยาง ทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ด้วยดัดแปรเอทิลีนไดเอมีนได้มีการต่อของเอทิลีนไดเอมีนในโครงสร้าง ซึ่งสามารถยืนยันโครงสร้างที่เกิดขึ้นได้จากสเปกตรัม FT-IR ของยาง ENR-ED โครงสร้างที่เกิดขึ้นใหม่นี้สามารถสันนิฐานโครงสร้างดังนี้




ENR-ED

โครงสร้างของยางธรรมชาติหลังจากดัดแปรเอทิลไดเอมีน จะมีการต่อเอทิลีนไดเอมีนได้เป็นยาง ENR-ED ซึ่งเอทิลีนไดเอมีนมีหมู่ของเอมีนในโครงสร้าง 2 หมู่ และ ออกซิเจน ซึ่งหมู่ของเอมีน และออกซิเจน จะมีอิเล็กตรอนคู่โดดเดียวเหลืออยู่ ซึ่งสามารถจะเกิดพันธะโคออร์ดิเนตโควาเลนต์กับโลหะเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน โลหะจะจับบนพื้นผิวยาง ENR-ED ทำให้สามารถกำจัดโลหะ ดังปฏิกิริยา



จากการนำยางธรรมชาติอิพอกไซด์ดัดแปรเอทิลีนไดเอมีน (ENR-ED) ศึกษาการดูดซับโลหะ $Cu^{2+}$ และ $Cr^{3+}$ พบว่าสมดุลของการดูดซับที่ pH 5 ของโลหะทั้งสองให้ผลที่ต่างกัน โลหะ $Cu^{2+}$ การดูดซับสมดุลที่เวลา 14 ชั่วโมง โลหะ $Cr^{3+}$ การดูดซับที่สมดุลที่เวลา 16 ชั่วโมง ซึ่งมีปริมาณการดูดซับที่สมดุลเท่ากับ 0.441 และ 1.499 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ การดูดซับโลหะ $Cr^{3+}$ มากกว่า โลหะ $Cu^{2+}$ สันนิฐานได้ว่า โลหะ $Cr^{3+}$ มีความต้องการอิเล็กตรอนสู่งซึ่งพอดีกับอิเล็กตรอนคู่โดดเดียวของตัวดูดซับมากกว่า $Cu^{2+}$ ทำให้ค่าความจุของ $Cr^{3+}$ มีมากกกว่า

pH ของสารละลายโลหะ จะมีผลต่อปริมาณการดูดซับโลหะของยาง ENR-ED ปริมาณการดูดซับของโลหะทั้งสองมีการดูดซับสูงที่ pH สูง ที่ pH สูง จะมีปริมาณ $OH^-$ เป็นจำนวนมากจะช่วยในการขัดขวางการโปรตรอเนตบนตัวดูดซับ (Ronald R.Navrro และคณะ, 2000) ที่ pH สูงจะมีปริมาณ $H^+$ น้อยทำให้ไม่มีการขัดขวางในการเกิดพันธะโคออร์ดิเนตโคเวเลนต์ระหว่างลิเกนด์กับโลหะ (Young Gun Ko & Ung So Choi, 2007) ปริมาณการดูดซับโลหะเพิ่มขึ้น จากการทำการทดลองศึกษาการดูดซับที่ pH 1-5 พบว่าปริมาณการดูดซับของโลหะทั้งสองจะเพิ่มสอดคลองกับค่า pH ที่เพิ่มขึ้น มีการดูดซับสูงสุดที่ pH 5 ที่ pH ต่ำ ๆ จะมี $H^+$ จำนวนมาก $H^+$ จะไปขัดขวางการเกิดพันธะโคออร์ดิเนตโคเวเลนต์ระหว่างลิเกนด์กับโลหะ (Young Gun Ko & Ung So Choi, 2007) โดย $H^+$ จะเกิดการโปรตรอเนตบนพื้นผิวยาง ENR-ED (Ronald R.Navrro และคณะ , 2000) ทำให้ไม่สามารดูดซับโลหะได้ การดูดซับโลหะ $Cu^{2+}$ และ $Cr^{3+}$ จึงค่าต่ำมาก ที่ pH 1 ซึ่งเป็นผลที่สอดคล้องกับงานวิจัยอื่นที่นำมาอ้างอิงถึง

ความจุของการดูดซับโลหะทั้งสอง คือ โลหะ $Cu^{2+}$ และ $Cr^{3+}$ ให้ผลที่สอดคลองกับเวลาที่สมดุลที่ของการดูดซับ โดยความจุของการดูดซับโลหะ $Cu^{2+}$ น้อยกว่าโลหะ $Cr^{3+}$ มีค่าเท่ากับ 1.0312 และ 2.820 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ

จากการศึกษาการดูดซับโลหะ $Cu^{2+}$ และ $Cr^{3+}$ ด้วยยาง ENR-ED ครั้งนี้ได้สภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะทั้งสองดั้งนี้ โลหะ $Cu^{2+}$ มีการดูดซับสูงสุดที่เวลา 14 ชั่งโมง และโลหะ $Cr^{3+}$ มีการดูดซับสูงสุดที่เวลา 16 ชั่งโมง ในสารละลายโลหะ pH 5

จากการนำผลการดูดซับที่ได้เปรียบเทียบกับงานวิจัยที่มีการใช้โพลิอะมิโนสไตรีนสังเคราะห์ สำหรับดูดซับ $Cr^{3+}$ (วรพัฒน์ พัฒนวรเศรษฐ์, 2546) และการศึกษาการดัดแปรยางธรรมชาติให้เป็นยางเรซิน (ประวีณา ติระ, 2540) ยาง ENR-ED ที่เตรียมขึ้นจากการวิจัยครั้งนี้มีความสามารถในการดูดซับโลหะ $Cu^{2+}$ และ $Cr^{3+}$ สูงกว่างานวิจัยที่ผ่านมา แสดงให้เห็นได้ว่าการนำยางธรรมชาติดัดแปรให้มีหมู่ฟังก์ชั่นเอทิลีนไดเอมีน สามารถเกิดพันธะโคออร์ดิเนตโคเวเลนต์กับโลหะ จะมีความสามารถในการดูดซับที่สูงกว่าการนำยางธรรมชาติดัดแปรให้มีหมู่แลกเปลี่ยนไอออนในโครงสร้าง

**ข้อเสนอแนะ**

1. ในการศึกษาทำการวิจัยควรศึกษาปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่อการดูดซับเพื่อหาสภาวะที่ทำให้ยาง ENR-ED มีประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับ

2. ควรทำการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนกระบวนการเพื่อที่จะทำให้โครงสร้างที่เกิดขึ้นมีการต่อของเอทิลีนไดเอมีนที่มีอัตราที่สูงขึ้น

3. ควรที่จะศึกษาการนำ ENR-ED ไปใช้ในอุตสาหกรรมหรือควรนำมาประยุกต์ใช้ได้จริง

# บรรณานุกรม


B. L. Rivas and M.Carmen Aguirre. 2007. Nitrite removal from water using water-soluble polymers in conjunction with liquid-phase polymer-based retention technique, Reactive &Functional Polymers 67, 1487-1494

Young Gun Ko andUng So Choi. 2007. Observation of metal ions adsorption on novel polymeric chelating fiber and activated carbon fibe, Separation and Purification Technology. 15 October, 338-347

Mourad Amara and Hac ene Kerdioudj. 2005. Analytica Chimica Acta 547, 50-52

Mykola Seredych and Teresa J. Bandoaz. 2007. Letters to the Editor/Carbon 45, 226–2139

Gulay Bayramoglu and M. Yakup Arıca. 2005. Ethylenediamine grafted poly (glycidylme thacrylate-co-methylmethacrylate) adsorbent for removal of chromate anions, Separation and Purification Technology 45, 192–199

S. Shiratori. 2001. Removal of toxic gas by hybrid chemical filter fabricated by the sequential Adsorption of polymers, Thin Solid Films. 39, 243-248

Ronald R. Navrro, Kenji Tatsuhiro, Katsuhiro Sumi and Masatoshi Matsumura. 2000. Role of anions no heavy metal sorption of a cellulosemodified with poly(glycidylmetha-crylate) and Polyethyleneimine, Wat. Res. 2001; 35(11), 2724–2730,

Davey, J.E. and Loadman, M.J.R. 1984 Chemical demonstration fo the randomness fo Epoxidatio fo natural, Br. Polym. J., 16 : 134-138

ฉัตรปกรณ์ นันทวงศ์ และคณะ. 2548 "การประชุมวิชาการทางวิศวรรณศาสตร์", มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. ครั้งที่4

เจริญ นาคะสรรค์ และคณะ. 2547. เทอร์โมพลาสติกวัลคาร์ไนซ์จากการเบลนด์ไวนิลอะซิเตตกับยางธรรมชาติอีพอกไซด์และยางธรรมชาติที่มีหมู่ไดบิวฟอสเฟต, รายงานฉบับสมบูรณ์ชุดโครงการวิจัยแห่งชาติยางพารา สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

----------และคณะ. 2544. การเตรียมสมบัติเชิงความร้อนและสมบัติการไหลของยางลธรรมชาติอีพอกไซด์. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ,ปีที่ 28.ฉบับที่ 5, 1071-1082

ฉลอง บัวผัน และมนตรี บุญเสนอ. 2542. โลหะหนักในบาคาลเนื่องจากการปนเปื้อนจากกองขยะเมืองขอนแก่น. รายงานการวิจัย ภาคเทคโนโลยีธรณี คณะเทคโนโลยี สำนักงานกรรมการวิจัยแห่งชาติ

อาซิซัน แกสมาณ และคณะ. 2547. การเตรียมยางเบลนด์ระหว่างพอลิเมทิลเมทาคริเลตกับยางธรรมชาติอีพอกไซด์, รายงานฉบับสมบูรณ์ชุดโครงการ วิจัยแห่งชาติยางพารา สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

ประดิษฐ์ มีสุข และ เสาวณี โพชนุกูล. 2548. การวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักในน้ำทะเลสาบสงขลา, รายงานการวิจัย สาขาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ สงขลา

วรพัฒน์ พัฒนวรเศรษฐ์. 2546. การสังเคราะห์โพลิอะมิโนสไตรีนเพื่อใช้เป็นตัวดูดซับไอออนของโลหะนิกเกิล สังกะสี ทองแดง และโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์, วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ประวีณา ติระ. 2540. การเตรียมยางธรรมชาติให้เป็นยางเรซิน, วิทยานิพนธ์ ปริญญามหาบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

แววตา ทองระอา. 2549. การปนเปื้อนของโลหะหนักในน้ำและตะกอนบริเวณชายฝั่งทะเลภาคตะวันออก, วิทยานิพนธ์ ปริญญามหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยบูรพา

ซูสิน ธิรสวัสด์ และคณะ. 2551. การศึกษาคุณภาพทางเคมีและปริมาณโลหะหนักบางชนิดในแม่น้ำน่านบริเวณจังหวัดอุตรดิตถ์, วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์

นิธิวัฒ จำรูญรัตน์ และคณะ. 2548. การศึกษาการปนเปื้อนของโลหะหนักในแม่น้ำกวง กรณีศึกษาเขตเมืองลำพูน, วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิต สาขาสิ่งแวดล้อม คณะวิชาโยธา สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล เชียงใหม่

จันทร์ฉาย ทองปิ่น และคณะ. 2548. โครงการการใช้ยางธรรมชาติที่ถูกดัดแปรเพื่อปรับปรุงความเหนียวของอีพอกซีเรซิน, รายงานฉบับสมบูรณ์ สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

เอกชัย ประสาทมงคล และคณะ. 2546. การปรับโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติแนวทางสำหรับการพัฒนากาว, รายงานฉบับสมบูรณ์ สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

# ภาคผนวก

# ภาคผนวก (ก)
# การคำนวณในวิธีการทดลอง

**ก.1 การคำนวณอัตราส่วนสารเคมีในการเตรียมยางอิพอกไซด์**

การเตรียมอัตราส่วนการเตรียมยางธรรมชาติอิพอกไซด์โดยใช้วิธีของเจริญ นาคะสรรค์ และคณะ(2554) ใช้อัตราส่วนน้ำยาง 1.7 โมล ที่มีความเข้มข้น 20 %DRC ทำปฏิกิริยากับกรดเปอร์ฟอร์มิก ที่ได้จากการเตรียมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 2.6 โมล กรดฟอร์มิก 0.9 โมล

คำนวณอัตราส่วนต่างๆดังนี้

ก.1.1 การเตรียมน้ำยาง 1.7 โมลความเข้มข้น 20 %DRC

$$\text{น้ำหนักยาง} = \frac{(1.7 \text{ โมล})(68 \text{ กรัม})(100 \text{ กรัม})}{(1 \text{ โมล})(60 \text{ กรัม})}$$

$$= 192.66 \text{ กรัม}$$

ดังนั้น ; จะได้น้ำหนักยางที่ความเข้มข้น 60 %DRC หนัก 192.66 กรัม

เจือจางน้ำยางจากความเข้มข้น 60 %DRC เป็น20 %DRC

จากสมการ $C_1V_1 = C_2V_2$

$$V_2 = \frac{(60 \text{ เปอร์เซ็นต์})(192.66 \text{เปอร์เซ็นต์})}{20 \text{ เปอร์เซ็นต์}}$$

$$= 577.8 \text{ กรัม}$$

ดังนั้น ; จะต้องเจือจางด้วยน้ำ 577.8 -192.66 = 385.2 กรัม

เนื่องจาก 1กรัม $\approx$ 1 มิลลิลิตร

ดังนั้น ; ในการเจือจางน้ำยางจากความเข้มข้น 60 %DRC เป็น20 %DRC จะต้องใช้น้ำปราศจากไอออน 385.2 มิลลิลิตร เจือจางน้ำยางหนัก 192.66 กรัม

ก.1.2 การเตรียมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 2.6 โมล

$$\text{น้ำหนักไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์} = \frac{(2.9 \text{ โมล})(34 \text{ กรัม})(100 \text{ กรัม})}{(1 \text{ โมล})(35 \text{ กรัม})}$$

$$= 281.7 \text{ กรัม}$$

ปริมาตรไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ = $\frac{(281.7 \text{ กรัม})(1 \text{ มิลลิลิตร})}{1.22 \text{ กรัม}}$

= 230.91 มิลลิลิตร

ดังนั้น ; ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 2.6 โมล มีปริมาตรเท่ากับ 230.91 มิลลิลิตร

ก.1.3 การเตรียมกรดฟอร์มิก 0.9 โมล

น้ำหนักกรดฟอร์มิก = $\frac{(0.9 \text{ โมล})(46 \text{ กรัม})(100 \text{ กรัม})}{(1 \text{ โมล})(85 \text{ กรัม})}$

= 48.7 กรัม

ปริมาตรไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ = $\frac{(48.7 \text{ กรัม})(1 \text{ มิลลิลิตร})}{1.22 \text{ กรัม}}$

= 39.9 มิลลิตร

ดังนั้น ; ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 2.6 โมล มีปริมาตรเท่ากับ 39.9 มิลลิลิตร

ก.1.4 การเตรียม10 เปอร์เซ็นต์ Tritor X-100 30 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักเนื้อยาง

ปริมาตรของ 10 เปอร์เซ็นต์ Tritor X-100 = $\frac{(30 \text{ มิลลิลิตร})(557.8 \text{ กรัม})}{(100 \text{ กรัม})}$

= 167.34 มิลลิลิตร

ดังนั้น ; การเตรียม 10 เปอร์เซ็นต์ Tritor X-100 30 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักงเนื้อยางใน เนื้อยาง 557.8 กรัม จะต้องใช้ 10 เปอร์เซ็นต์ Tritor X-100 ปริมาตร167.34 มิลลิลิตร

จากการคำนวณจะได้อัตราส่วนในการเตรียมยางธรรมชาติอีพอกไซด์ดังนี้ น้ำยาง 192.66 กรัม เจือจางน้ำปราศจากไอออน 385.2 มิลลิลิตร ให้ได้ความเข้มข้น 20 %DRC ทำปฏิกิริยากับกรดเปอร์ฟอร์มิกที่ได้จากการเตรียมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 230.91 มิลลิลิตร กรดฟอร์มิก 39.9 มิลลิลิตร จะต้องใช้ 10 เปอร์เซ็นต์ Tritor X-100 ปริมาตร 167.34 มิลลิลิตร

**ก.2 การคำนวณอัตราส่วนในการเตรียมยางธรรมชาติอิพอกไซด์ดัดแปรด้วยเอทิลีนไดเอ มีน**

ในการเตรียมยางธรรมชาติอิพอกไซด์ดัดแปรด้วยเติมเอทิลีนไดเอมีน ในอัตราส่วน 10 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักเนื้อยาง

คำนวณ ดังนี้

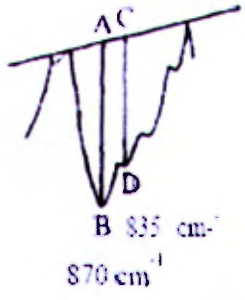
$$\text{ปริมาณเอทิลีนไดเอมีน} = \frac{(\text{น้ำหนักของธรรมชาติอิพอกไซด์ กรัม}) \times 10}{100}$$

$$= \ldots\ldots\ldots \text{กรัม}$$

**ก.3 การหาปริมาณอิพอกซีของยางธรรมชาติที่เตรียมได้**

โดยในหาปริมาณของหมู่อิพอกซีที่เกิดขึ้นทำโดยนำอัตราส่วนความสูงของพีค ไปเทียบกับกราฟมาตรฐานเปอร์เซ็นโมลอีพอกซีของ Davey และ Loadman (1984) คำนวณหาอัตราส่วนความสูงของพีค ดังนี้

$$\text{อัตราส่วนความสูงของพีค} = \frac{\log A/B}{\log A/B + \log C/D}$$



# ภาคผนวก (ข)

# การวิเคราะห์ผลการทดลอง

## ศึกษาการดูดซับโลหะหนักของยาง ENR-ED

### ตารางที่ ข.1 ผลการศึกษาเวลาสมดุลของการดูดซับ $Cu^{2+}$ ด้วยยาง ENR-ED

| การทดลองครั้งที่ 1 | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| เวลา (ชั่วโมง) | น้ำหนัก ENR-ED (g) | Co (mg/l) | C (mg/l) | m (mg/l) | C-m (mg/l) | Co-(C-m) (mg/l) |
| 2.000 | 1.006 | 10.140 | 9.864 | 0.111 | 9.753 | 0.387 |
| 4.000 | 1.019 | 10.140 | 9.702 | 0.117 | 9.585 | 0.555 |
| 6.000 | 1.009 | 10.140 | 9.684 | 0.116 | 9.568 | 0.572 |
| 8.000 | 1.011 | 10.140 | 9.636 | 0.115 | 9.521 | 0.619 |
| 10.000 | 1.021 | 10.140 | 9.591 | 0.114 | 9.477 | 0.663 |
| 12.000 | 1.001 | 10.140 | 9.508 | 0.114 | 9.394 | 0.746 |
| 14.000 | 1.005 | 10.140 | 9.352 | 0.112 | 9.240 | 0.900 |
| 16.000 | 1.025 | 10.140 | 9.300 | 0.117 | 9.183 | 0.957 |
| 18.000 | 1.019 | 10.140 | 9.302 | 0.118 | 9.184 | 0.956 |
| 20.000 | 1.014 | 10.140 | 9.310 | 0.121 | 9.189 | 0.951 |
| การทดลองครั้งที่ 2 | | | | | | |
| เวลา (ชั่วโมง) | น้ำหนักENR-ED (g) | Co (mg/l) | C (mg/l) | m (mg/l) | C-m (mg/l) | Co-(C-m) (mg/l) |
| 2.000 | 1.010 | 10.140 | 9.904 | 0.111 | 9.793 | 0.347 |
| 4.000 | 1.098 | 10.140 | 9.802 | 0.117 | 9.685 | 0.455 |
| 6.000 | 1.078 | 10.140 | 9.704 | 0.116 | 9.588 | 0.552 |
| 8.000 | 1.053 | 10.140 | 9.650 | 0.115 | 9.535 | 0.605 |
| 10.000 | 1.044 | 10.140 | 9.544 | 0.114 | 9.430 | 0.710 |
| 12.000 | 1.027 | 10.140 | 9.456 | 0.114 | 9.342 | 0.798 |
| 14.000 | 1.015 | 10.140 | 9.240 | 0.112 | 9.128 | 1.012 |
| 16.000 | 1.025 | 10.140 | 9.250 | 0.117 | 9.133 | 1.007 |
| 18.000 | 1.022 | 10.140 | 9.258 | 0.118 | 9.140 | 1.000 |
| 20.000 | 1.017 | 10.140 | 9.260 | 0.121 | 9.139 | 1.001 |

หมายเหตุ ; Co = ความเข้มข้นเริ่มต้น , C = ความเข้มข้นที่เหลือหลังการดูดซับ , m = ผลที่เกิดขึ้นจากตัวดูดซับ

**ตารางที่ ข.2 ผลการศึกษาเวลาสมดุลของการดูดซับ $Cu^{2+}$ ด้วยยาง ENR-ED (ต่อ)**

| การทดลองครั้งที่ 3 | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| เวลา (ชั่วโมง) | น้ำหนัก ENR-ED (g) | Co (mg/l) | C (mg/l) | m (mg/l) | C-m (mg/l) | Co-(C-m) (mg/l) |
| 2.000 | 1.031 | 10.140 | 9.904 | 0.111 | 9.793 | 0.347 |
| 4.000 | 1.012 | 10.140 | 9.804 | 0.117 | 9.687 | 0.453 |
| 6.000 | 1.012 | 10.140 | 9.698 | 0.116 | 9.582 | 0.558 |
| 8.000 | 1.007 | 10.140 | 9.640 | 0.115 | 9.525 | 0.615 |
| 10.000 | 1.070 | 10.140 | 9.602 | 0.114 | 9.488 | 0.652 |
| 12.000 | 1.018 | 10.140 | 9.564 | 0.114 | 9.450 | 0.690 |
| 14.000 | 1.021 | 10.140 | 9.480 | 0.112 | 9.368 | 0.772 |
| 16.000 | 1.011 | 10.140 | 9.490 | 0.117 | 9.373 | 0.767 |
| 18.000 | 1.047 | 10.140 | 9.496 | 0.118 | 9.378 | 0.762 |
| 20.000 | 1.030 | 10.140 | 9.500 | 0.121 | 9.379 | 0.761 |

หมายเหตุ ; Co = ความเข้มข้นเริ่มต้น , C = ความเข้มข้นที่เหลือหลังการดูดซับ , m = ผลที่เกิดขึ้นจากตัวดูดซับ

**ตารางที่ ข.3 ผลการศึกษาเวลาสมดุลของการดูดซับ $Cu^{2+}$ ด้วยยาง ENR-ED เฉลี่ย**

| เวลา (ชั่วโมง) | q ครั้งที่1 (mg/g) | q ครั้งที่ 2 (mg/g) | q ครั้งที่ 3 (mg/g) | q เฉลี่ย (mg/g) | SD |
|---|---|---|---|---|---|
| 2.000 | 0.192 | 0.172 | 0.168 | 0.177 | 0.013 |
| 4.000 | 0.272 | 0.207 | 0.224 | 0.234 | 0.034 |
| 6.000 | 0.283 | 0.256 | 0.276 | 0.272 | 0.014 |
| 8.000 | 0.306 | 0.287 | 0.305 | 0.300 | 0.011 |
| 10.000 | 0.325 | 0.340 | 0.305 | 0.323 | 0.018 |
| 12.000 | 0.373 | 0.389 | 0.339 | 0.367 | 0.025 |
| 14.000 | 0.448 | 0.499 | 0.378 | 0.441 | 0.061 |
| 16.000 | 0.467 | 0.491 | 0.379 | 0.446 | 0.059 |
| 18.000 | 0.469 | 0.489 | 0.364 | 0.441 | 0.067 |
| 20.000 | 0.469 | 0.492 | 0.369 | 0.443 | 0.065 |

**ตารางที่ ข.4 ผลการศึกษาเวลาสมดุลของการดูดซับ $Cr^{3+}$ ด้วยยางENR-ED**

| การทดลองครั้งที่ 1 | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| เวลา (ชั่วโมง) | น้ำหนัก ENR-ED (g) | Co (mg/l) | C (mg/l) | m (mg/l) | C-m (mg/l) | Co-(C-m) (mg/l) |
| 2.000 | 1.025 | 8.752 | 6.858 | -0.148 | 7.006 | 1.746 |
| 4.000 | 1.009 | 8.752 | 6.824 | -0.146 | 6.970 | 1.782 |
| 6.000 | 1.023 | 8.752 | 6.648 | -0.150 | 6.798 | 1.954 |
| 8.000 | 1.014 | 8.752 | 6.604 | -0.148 | 6.752 | 2.000 |
| 10.000 | 1.037 | 8.752 | 6.574 | -0.148 | 6.722 | 2.030 |
| 12.000 | 1.024 | 8.752 | 6.404 | -0.149 | 6.553 | 2.199 |
| 14.000 | 1.017 | 8.752 | 6.230 | -0.151 | 6.381 | 2.371 |
| 16.000 | 1.063 | 8.752 | 5.848 | -0.151 | 5.999 | 2.753 |
| 18.000 | 1.019 | 8.752 | 5.842 | -0.152 | 5.994 | 2.758 |
| 20.000 | 1.034 | 8.752 | 5.808 | -0.149 | 5.957 | 2.795 |
| การทดลองครั้งที่ 2 | | | | | | |
| เวลา (ชั่วโมง) | น้ำหนัก ENR-ED (g) | Co (mg/l) | C (mg/l) | m (mg/l) | C-m (mg/l) | Co-(C-m) (mg/l) |
| 2.000 | 1.005 | 8.752 | 7.150 | -0.148 | 7.298 | 1.454 |
| 4.000 | 1.018 | 8.752 | 6.962 | -0.146 | 7.108 | 1.644 |
| 6.000 | 1.011 | 8.752 | 6.912 | -0.150 | 7.062 | 1.690 |
| 8.000 | 1.018 | 8.752 | 6.664 | -0.148 | 6.812 | 1.940 |
| 10.000 | 1.016 | 8.752 | 6.568 | -0.148 | 6.716 | 2.036 |
| 12.000 | 1.030 | 8.752 | 6.304 | -0.149 | 6.453 | 2.299 |
| 14.000 | 1.042 | 8.752 | 5.786 | -0.151 | 5.937 | 2.815 |
| 16.000 | 1.019 | 8.752 | 5.552 | -0.151 | 5.703 | 3.049 |
| 18.000 | 1.013 | 8.752 | 5.506 | -0.152 | 5.658 | 3.094 |
| 20.000 | 1.031 | 8.752 | 5.602 | -0.149 | 5.751 | 3.001 |

หมายเหตุ ; Co = ความเข้มข้นเริ่มต้น , C = ความเข้มข้นที่เหลือหลังการดูดซับ , m = ผลที่เกิดขึ้นจากตัวดูดซับ

**ตารางที่ ข.5 ผลการศึกษาเวลาสมดุลของการดูดซับ $Cr^{3+}$ ด้วยยาง ENR-ED (ต่อ)**

| การทดลองครั้งที่ 3 | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| เวลา (ชั่วโมง) | น้ำหนัก ENR-ED (g) | Co (mg/l) | C (mg/l) | m (mg/l) | C-m (mg/l) | Co-(C-m) (mg/l) |
| 2.000 | 1.025 | 8.752 | 6.554 | -0.148 | 6.702 | 2.050 |
| 4.000 | 1.032 | 8.752 | 6.304 | -0.146 | 6.450 | 2.302 |
| 6.000 | 1.015 | 8.752 | 6.154 | -0.150 | 6.304 | 2.448 |
| 8.000 | 1.024 | 8.752 | 5.880 | -0.148 | 6.028 | 2.724 |
| 10.000 | 1.016 | 8.752 | 5.750 | -0.148 | 5.898 | 2.854 |
| 12.000 | 1.012 | 8.752 | 5.484 | -0.149 | 5.633 | 3.119 |
| 14.000 | 1.039 | 8.752 | 5.402 | -0.151 | 5.553 | 3.199 |
| 16.000 | 1.022 | 8.752 | 5.112 | -0.151 | 5.263 | 3.489 |
| 18.000 | 1.041 | 8.752 | 5.208 | -0.152 | 5.360 | 3.392 |
| 20.000 | 1.017 | 8.752 | 5.132 | -0.149 | 5.281 | 3.471 |

หมายเหตุ ; Co = ความเข้มข้นเริ่มต้น , C = ความเข้มข้นที่เหลือหลังการดูดซับ , m = ผลที่เกิดขึ้นจากตัวดูดซับ

**ตารางที่ ข.6 ผลการศึกษาเวลาสมดุลของการดูดซับ $Cr^{3+}$ ด้วยยางENR-ED เฉลี่ย**

| เวลา (ชั่วโมง) | q ครั้งที่1 (mg/g) | q ครั้งที่ 2 (mg/g) | q ครั้งที่ 3 (mg/g) | q เฉลี่ย (mg/g) | SD |
|---|---|---|---|---|---|
| 2.000 | 0.852 | 0.723 | 1.000 | 0.858 | 0.138 |
| 4.000 | 0.883 | 0.807 | 1.115 | 0.935 | 0.160 |
| 6.000 | 0.955 | 0.836 | 1.206 | 0.999 | 0.189 |
| 8.000 | 0.986 | 0.953 | 1.330 | 1.090 | 0.209 |
| 10.000 | 0.979 | 1.002 | 1.404 | 1.129 | 0.239 |
| 12.000 | 1.073 | 1.116 | 1.542 | 1.244 | 0.259 |
| 14.000 | 1.166 | 1.351 | 1.539 | 1.352 | 0.187 |
| 16.000 | 1.295 | 1.496 | 1.706 | 1.499 | 0.206 |
| 18.000 | 1.354 | 1.527 | 1.630 | 1.504 | 0.140 |
| 20.000 | 1.351 | 1.455 | 1.706 | 1.504 | 0.182 |

หมายเหตุ ; Co = ความเข้มข้นเริ่มต้น , C = ความเข้มข้นที่เหลือหลังการดูดซับ , m = ผลที่เกิดขึ้นจากตัวดูดซับ

**ตารางที่ ข.7 ผลการศึกษา pH ที่เหมาะสมของการดูดซับ $Cu^{2+}$ ด้วยยาง ENR-ED**

| การทดลองครั้งที่ 1 | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| pH | น้ำหนัก ENR-ED (g) | Co (mg/l) | C (mg/l) | m (mg/l) | C-m (mg/l) | Co-(C-m) (mg/l) |
| 1 | 1.048 | 9.610 | 9.600 | 0.114 | 9.486 | 0.010 |
| 2 | 1.051 | 9.624 | 9.608 | 0.112 | 9.496 | 0.016 |
| 3 | 1.052 | 9.842 | 9.328 | 0.117 | 9.211 | 0.514 |
| 4 | 1.056 | 9.712 | 8.942 | 0.118 | 8.824 | 0.770 |
| 5 | 1.014 | 10.140 | 9.310 | 0.121 | 9.189 | 0.830 |
| การทดลองครั้งที่ 2 | | | | | | |
| pH | น้ำหนัก ENR-ED (g) | Co (mg/l) | C (mg/l) | m (mg/l) | C-m (mg/l) | Co-(C-m) (mg/l) |
| 1 | 1.052 | 9.610 | 9.610 | 0.114 | 9.510 | 0.100 |
| 2 | 1.030 | 9.624 | 9.624 | 0.112 | 9.490 | 0.134 |
| 3 | 1.018 | 9.842 | 9.842 | 0.117 | 9.253 | 0.589 |
| 4 | 1.023 | 9.712 | 9.712 | 0.118 | 8.884 | 0.828 |
| 5 | 1.016 | 10.140 | 10.140 | 0.121 | 9.139 | 1.001 |
| การทดลองครั้งที่ 3 | | | | | | |
| pH | น้ำหนัก ENR-ED (g) | Co (mg/l) | C (mg/l) | m (mg/l) | C-m (mg/l) | Co-(C-m) (mg/l) |
| 1 | 1.041 | 9.610 | 9.600 | 0.114 | 9.486 | 0.124 |
| 2 | 1.014 | 9.624 | 8.990 | 0.112 | 8.878 | 0.746 |
| 3 | 1.012 | 9.842 | 9.208 | 0.117 | 9.091 | 0.751 |
| 4 | 1.067 | 9.712 | 9.010 | 0.118 | 8.892 | 0.820 |
| 5 | 1.030 | 10.140 | 9.500 | 0.121 | 9.379 | 0.761 |

หมายเหตุ ; Co = ความเข้มข้นเริ่มต้น , C = ความเข้มข้นที่เหลือหลังการดูดซับ , m = ผลที่เกิดขึ้นจากตัวดูดซับ

**ตารางที่ ข.8 ผลการศึกษา pH ที่เหมาะสมของการดูดซับ $Cu^{2+}$ ด้วยยาง ENR-ED เฉลี่ย**

| PH | q ครั้งที่1 (mg/g) | q ครั้งที่ 2 (mg/g) | q ครั้งที่ 3 (mg/g) | q เฉลี่ย (mg/g) | SD |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0.005 | 0.048 | 0.060 | 0.037 | 0.029 |
| 2 | 0.008 | 0.065 | 0.368 | 0.147 | 0.194 |
| 3 | 0.244 | 0.289 | 0.371 | 0.302 | 0.064 |
| 4 | 0.364 | 0.405 | 0.384 | 0.384 | 0.020 |
| 5 | 0.409 | 0.493 | 0.369 | 0.424 | 0.063 |

**ตารางที่ ข.9 ผลการศึกษา pH ที่เหมาะสมของการดูดซับ $Cr^{3+}$ ด้วยยาง ENR-ED**

| การทดลองครั้งที่ 1 | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| pH | น้ำหนัก ENR-ED (g) | Co (mg/l) | C (mg/l) | m (mg/l) | C-m (mg/l) | Co-(C-m) (mg/l) |
| 1 | 1.009 | 8.530 | 8.544 | -0.149 | 8.693 | -0.163 |
| 2 | 1.018 | 9.750 | 9.504 | -0.151 | 9.655 | 0.095 |
| 3 | 1.044 | 9.162 | 8.042 | -0.151 | 8.193 | 0.969 |
| 4 | 1.038 | 8.770 | 6.184 | -0.152 | 6.336 | 2.434 |
| 5 | 1.023 | 8.752 | 5.808 | -0.149 | 5.957 | 2.795 |
| การทดลองครั้งที่ 2 | | | | | | |
| pH | น้ำหนัก ENR-ED (g) | Co (mg/l) | C (mg/l) | m (mg/l) | C-m (mg/l) | Co-(C-m) (mg/l) |
| 1 | 1.007 | 8.530 | 8.504 | -0.149 | 8.653 | -0.123 |
| 2 | 1.077 | 9.750 | 9.302 | -0.151 | 9.453 | 0.297 |
| 3 | 1.022 | 9.162 | 7.974 | -0.151 | 8.125 | 1.037 |
| 4 | 1.017 | 8.770 | 6.410 | -0.152 | 6.562 | 2.208 |
| 5 | 1.074 | 8.752 | 5.602 | -0.149 | 5.751 | 3.001 |

หมายเหตุ ; Co = ความเข้มข้นเริ่มต้น , C = ความเข้มข้นที่เหลือหลังการดูดซับ , m = ผลที่เกิดขึ้นจากตัวดูดซับ

**ตารางที่ ข.10 ผลการศึกษา pH ที่เหมาะสมของการดูดซับ $Cr^{3+}$ ด้วยยาง ENR-ED (ต่อ)**

| การทดลองครั้งที่ 3 | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| pH | น้ำหนัก ENR-ED (g) | Co (mg/l) | C (mg/l) | m (mg/l) | C-m (mg/l) | Co-(C-m) (mg/l) |
| 1 | 1.045 | 8.530 | 8.110 | -0.149 | 8.259 | 0.271 |
| 2 | 1.021 | 9.750 | 9.504 | -0.151 | 9.655 | 0.095 |
| 3 | 1.033 | 9.162 | 7.990 | -0.151 | 8.141 | 1.021 |
| 4 | 1.039 | 8.770 | 6.248 | -0.152 | 6.400 | 2.370 |
| 5 | 1.049 | 8.752 | 5.132 | -0.149 | 5.281 | 3.471 |

หมายเหตุ ; Co = ความเข้มข้นเริ่มต้น , C = ความเข้มข้นที่เหลือหลังการดูดซับ , m = ผลที่เกิดขึ้นจากตัวดูดซับ

**ตารางที่ ข.11 ผลการศึกษา pH ที่เหมาะสมของการดูดซับ $Cr^{3+}$ ด้วยยาง ENR-ED เฉลี่ย**

| PH | q ครั้งที่1 (mg/g) | q ครั้งที่ 2 (mg/g) | q ครั้งที่ 3 (mg/g) | q เฉลี่ย (mg/g) | SD |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | -0.081 | -0.061 | 0.130 | -0.004 | 0.116 |
| 2 | 0.047 | 0.138 | 0.047 | 0.077 | 0.053 |
| 3 | 0.464 | 0.507 | 0.494 | 0.488 | 0.022 |
| 4 | 1.172 | 1.085 | 1.140 | 1.133 | 0.044 |
| 5 | 1.366 | 1.397 | 1.654 | 1.472 | 0.158 |

ตารางที่ ข.12 ผลการศึกษาความจุของการดูดซับ $Cu^{2+}$ ด้วยวิธีแบบการแช่

| การทดลองครั้งที่ 1 | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ความเข้มข้น (mg/l) | น้ำหนัก ENR-ED (g) | Co (mg/l) | C (mg/l) | m (mg/l) | C-m (mg/l) | Co-(C-m) (mg/l) |
| 20 | 1.015 | 22.820 | 17.860 | 0.121 | 17.739 | 4.960 |
| 40 | 1.061 | 41.720 | 36.100 | 0.121 | 35.979 | 5.620 |
| 60 | 1.045 | 64.140 | 57.960 | 0.121 | 57.839 | 6.180 |
| 80 | 1.026 | 73.680 | 67.440 | 0.121 | 67.319 | 6.240 |
| 100 | 1.013 | 91.360 | 84.900 | 0.121 | 84.779 | 6.460 |
| การทดลองครั้งที่ 2 | | | | | | |
| ความเข้มข้น (mg/l) | น้ำหนัก ENR-ED (g) | Co (mg/l) | C (mg/l) | m (mg/l) | C-m (mg/l) | Co-(C-m) (mg/l) |
| 20 | 1.019 | 22.820 | 19.040 | 0.121 | 18.919 | 3.780 |
| 40 | 1.018 | 41.720 | 36.840 | 0.121 | 36.719 | 4.880 |
| 60 | 1.049 | 64.140 | 59.020 | 0.121 | 58.899 | 5.120 |
| 80 | 1.025 | 73.680 | 68.520 | 0.121 | 68.399 | 5.160 |
| 100 | 1.026 | 91.360 | 85.980 | 0.121 | 85.859 | 5.380 |
| การทดลองครั้งที่ 3 | | | | | | |
| ความเข้มข้น (mg/l) | น้ำหนัก ENR-ED (g) | Co (mg/l) | C (mg/l) | m (mg/l) | C-m (mg/l) | Co-(C-m) (mg/l) |
| 20 | 1.007 | 22.820 | 17.900 | 0.121 | 17.779 | 5.041 |
| 40 | 1.014 | 41.720 | 36.700 | 0.121 | 36.579 | 5.141 |
| 60 | 1.010 | 64.140 | 58.820 | 0.121 | 58.699 | 5.441 |
| 80 | 1.004 | 73.680 | 68.220 | 0.121 | 68.099 | 5.581 |
| 100 | 1.036 | 91.360 | 85.840 | 0.121 | 85.719 | 5.641 |

หมายเหตุ ; Co = ความเข้มข้นเริ่มต้นจริง , C = ความเข้มข้นที่เหลือหลังการดูดซับ , m = ผลที่เกิดขึ้นจากตัวดูดซับ

**ตารางที่ ข.13 ผลการศึกษาความจุของการดูดซับ $Cu^{2+}$ ด้วยวิธีแบบการแช่ เฉลี่ย**

| ความเข้มข้น(mg/l) | q ครั้งที่1 (mg/g) | q ครั้งที่ 2 (mg/g) | q ครั้งที่ 3 (mg/g) | q เฉลี่ย (mg/g) | SD |
|---|---|---|---|---|---|
| 20 | 2.443 | 1.854 | 2.502 | 2.266 | 0.358 |
| 40 | 2.649 | 2.396 | 2.536 | 2.527 | 0.127 |
| 60 | 2.958 | 2.440 | 2.693 | 2.697 | 0.259 |
| 80 | 3.041 | 2.517 | 2.779 | 2.779 | 0.262 |
| 100 | 3.188 | 2.622 | 2.723 | 2.844 | 0.302 |

**ตารางที่ ข.14 ค่า log q (mg/g) และ log C (mg/g) เพื่อหาความจุของการดูดซับ $Cu^{2+}$ เฉลี่ย**

| ความเข้มข้น(mg/l) | log q (mg/g) | log C (mg/g) |
|---|---|---|
| 20 | 0.355 | 1.358 |
| 40 | 0.403 | 1.620 |
| 60 | 0.431 | 1.807 |
| 80 | 0.444 | 1.867 |
| 100 | 0.454 | 1.961 |

**ตารางที่ ข.15 ผลการศึกษาความจุของการดูดซับ $Cr^{3+}$ ด้วยวิธีแบบการแช่**

| การทดลองครั้งที่ 1 | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ความเข้มข้น (mg/l) | น้ำหนัก ENR-ED (g) | Co (mg/l) | C (mg/l) | m (mg/l) | C-m (mg/l) | Co-(C-m) (mg/l) |
| 20 | 1.044 | 22.380 | 14.720 | -0.151 | 14.871 | 7.509 |
| 40 | 1.052 | 39.960 | 32.020 | -0.151 | 32.171 | 7.789 |
| 60 | 1.039 | 57.900 | 49.900 | -0.151 | 50.051 | 7.849 |
| 80 | 1.081 | 77.140 | 68.900 | -0.151 | 69.051 | 8.089 |
| 100 | 1.049 | 97.120 | 88.440 | -0.151 | 88.591 | 8.529 |

**ตารางที่ ข.16 ผลการศึกษาความจุของการดูดซับ $Cr^{3+}$ ด้วยวิธีแบบการแช่ (ต่อ)**

| การทดลองครั้งที่ 2 | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ความเข้มข้น (mg/l) | น้ำหนัก ENR-ED (g) | Co (mg/l) | C (mg/l) | m (mg/l) | C-m (mg/l) | Co-(C-m) (mg/l) |
| 20 | 1.035 | 22.380 | 14.300 | -0.151 | 14.451 | 7.929 |
| 40 | 1.085 | 39.960 | 31.582 | -0.151 | 31.733 | 8.227 |
| 60 | 1.062 | 57.900 | 49.440 | -0.151 | 49.591 | 8.309 |
| 80 | 1.027 | 77.140 | 68.380 | -0.151 | 68.531 | 8.609 |
| 100 | 1.019 | 97.120 | 88.560 | -0.151 | 88.711 | 8.409 |
| **การทดลองครั้งที่ 3** | | | | | | |
| ความเข้มข้น (mg/l) | น้ำหนัก ENR-ED (g) | Co (mg/l) | C (mg/l) | m (mg/l) | C-m (mg/l) | Co-(C-m) (mg/l) |
| 20 | 1.029 | 22.380 | 14.960 | -0.151 | 15.111 | 7.269 |
| 40 | 1.016 | 39.960 | 32.420 | -0.151 | 32.571 | 7.389 |
| 60 | 1.017 | 57.900 | 50.100 | -0.151 | 50.251 | 7.649 |
| 80 | 1.029 | 77.140 | 69.220 | -0.151 | 69.371 | 7.769 |
| 100 | 1.008 | 97.120 | 88.420 | -0.151 | 88.571 | 8.549 |

หมายเหตุ ; Co = ความเข้มข้นเริ่มต้นจริง , C = ความเข้มข้นที่เหลือหลังการดูดซับ , m = ผลที่เกิดขึ้นจากตัวดูดซับ

**ตารางที่ ข.17 ผลการศึกษาความจุของการดูดซับ $Cr^{3+}$ ด้วยวิธีแบบการแช่ เฉลี่ย**

| ความเข้มข้น(mg/l) | q ครั้งที่1 (mg/g) | q ครั้งที่ 2 (mg/g) | q ครั้งที่ 3 (mg/g) | q เฉลี่ย (mg/g) | SD |
|---|---|---|---|---|---|
| 20 | 3.596 | 3.830 | 3.533 | 3.653 | 0.157 |
| 40 | 3.703 | 3.792 | 3.638 | 3.711 | 0.077 |
| 60 | 3.778 | 3.913 | 3.763 | 3.818 | 0.082 |
| 80 | 3.741 | 4.193 | 3.774 | 3.903 | 0.252 |
| 100 | 4.067 | 4.127 | 4.241 | 4.145 | 0.089 |

**ตารางที่ ข.18 ค่า log q (mg/g) และ log C (mg/g) เพื่อหาความจุของการดูดซับ $Cr^{3+}$ เฉลี่ย**

| ความเข้มข้น(mg/l) | log q (mg/g) | log C (mg/g) |
|---|---|---|
| 20 | 0.563 | 1.350 |
| 40 | 0.570 | 1.602 |
| 60 | 0.582 | 1.763 |
| 80 | 0.591 | 1.887 |
| 100 | 0.618 | 1.987 |

# ประวัติของผู้วิจัย

| | |
|---|---|
| ชื่อ | นายสรายุทธ หมัดหละ |
| วัน เดือน ปีเกิด | 30 มีนาคม 2530 |
| อายุ | 23 ปี |
| ภูมิลำเนา | บ้านเลขที่ 232/1 หมู่ 1 ตำบลปากพะยูน อำเภอ ปากพะยูน จังหวัดพัทลุง |
| ที่อยู่ | บ้านเลขที่ 232/1 หมู่ 1 ตำบลปากพะยูน อำเภอ ปากพะยูน จังหวัดพัทลุง |

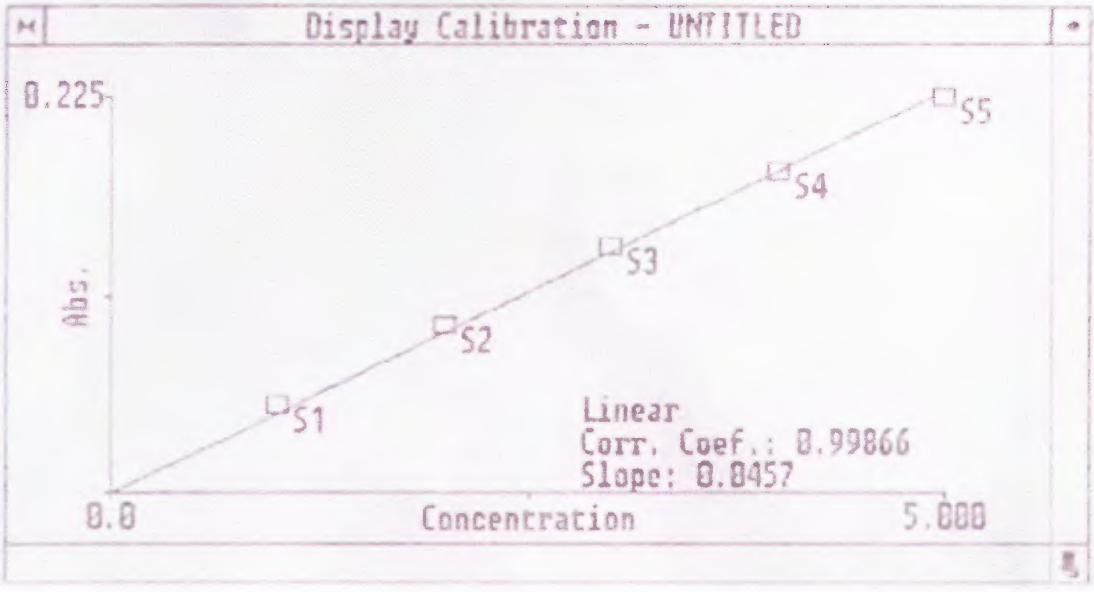
ประวัติการศึกษา

| | |
|---|---|
| พ.ศ.2543 | ประถมศึกษา โรงเรียนอนุบาลปากพะยูน ตำบลปากพะยูน อำเภอ ปากพะยูน จังหวัดพัทลุง 93120 |
| พ.ศ.2546 | มัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนมัธยมเกาะหมาก ตำบลเกาะหมาก อำเภอ ปากพะยูน จังหวัดพัทลุง 93120 |
| พ.ศ.2549 | มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนมัธยมเกาะหมาก ตำบลเกาะหมาก อำเภอ ปากพะยูน จังหวัดพัทลุง 93120 |
| ปัจจุบัน | ปริญญาตรี หลักสูตรเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช 80280 |

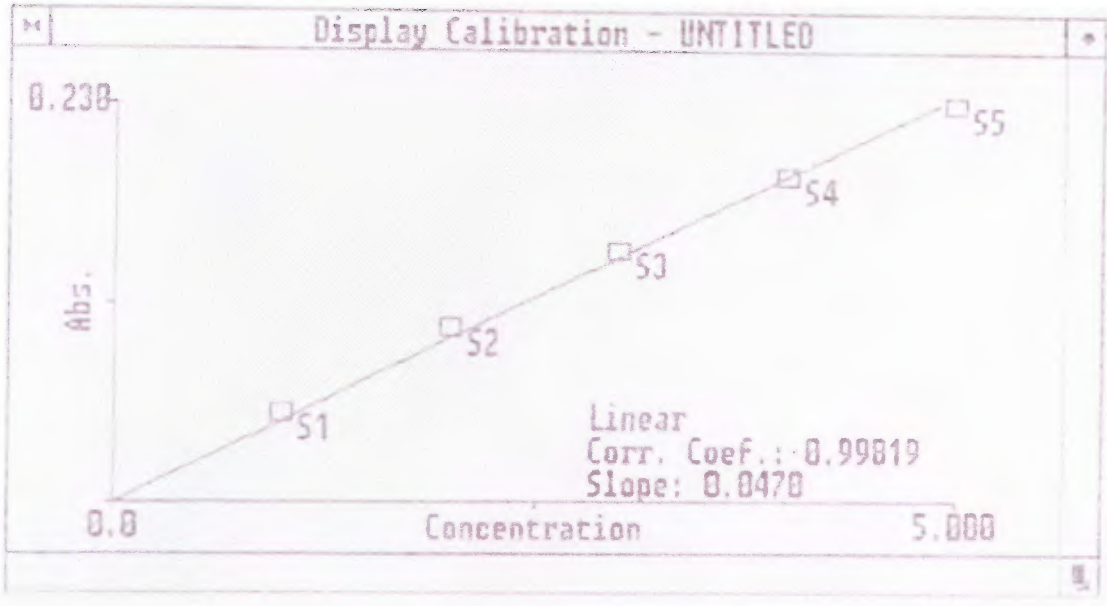
# ภาคผนวก (ค)

# กราฟมาตรฐานการวิเคราะห์โลหะ
# ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปคโทรโฟโตมิเตอร์(AAS)

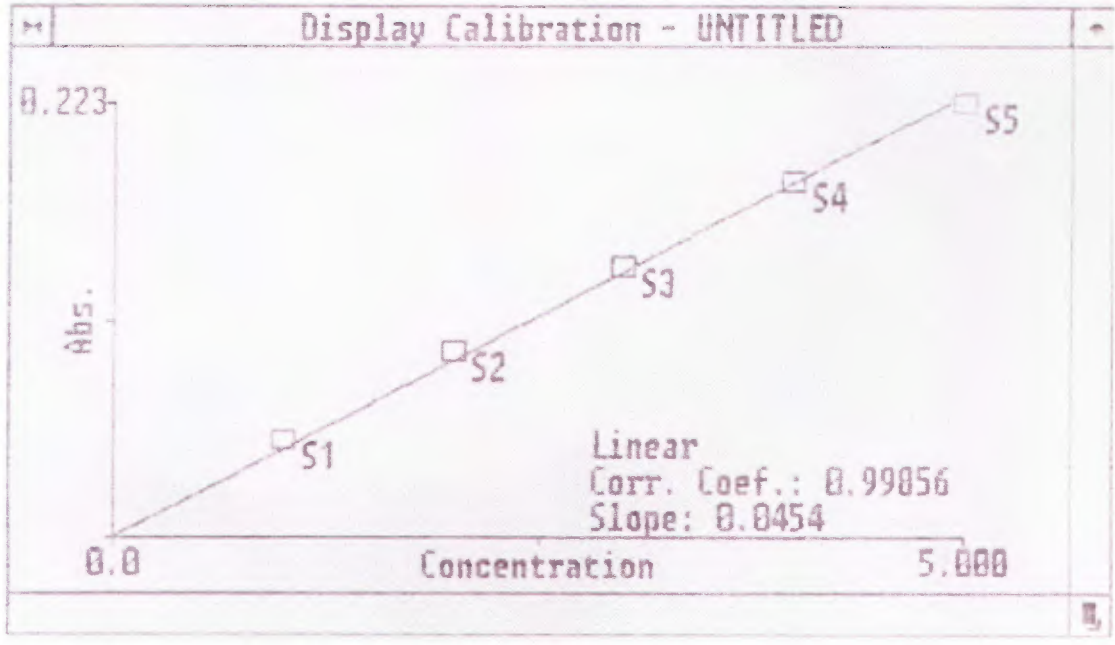
การวิเคราะห์การดูดซับโลหะของตัวดูดซับยาง ENR-ED ศึกษาโดยใช้ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปคโทรโฟโตมิเตอร์(AAS) ในการวิเคราะห์โลหะแต่ละครั้ง มีกราฟมาตรฐานในการวิเคราะห์ดังนี้



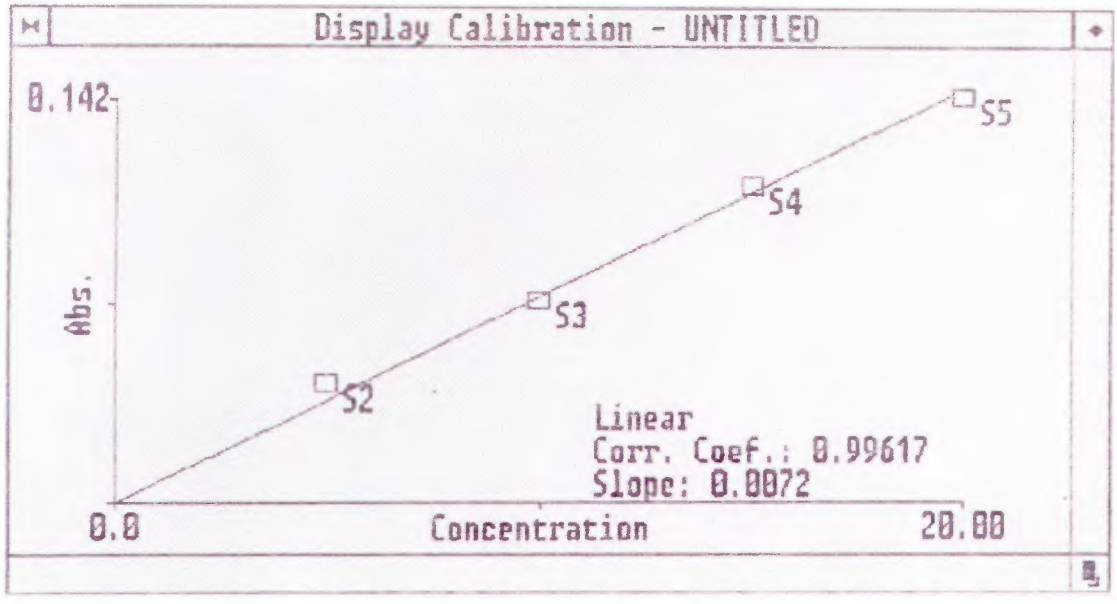

**ภาพที่ ค.1 แสดงกราฟมาตรฐานในการวิเคราะห์ $Cu^{2+}$ ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปคโทรโฟโตมิเตอร์(AAS) เพื่อศึกษาเวลาสมดุลของการดูดซับที่เวลาต่างๆ**



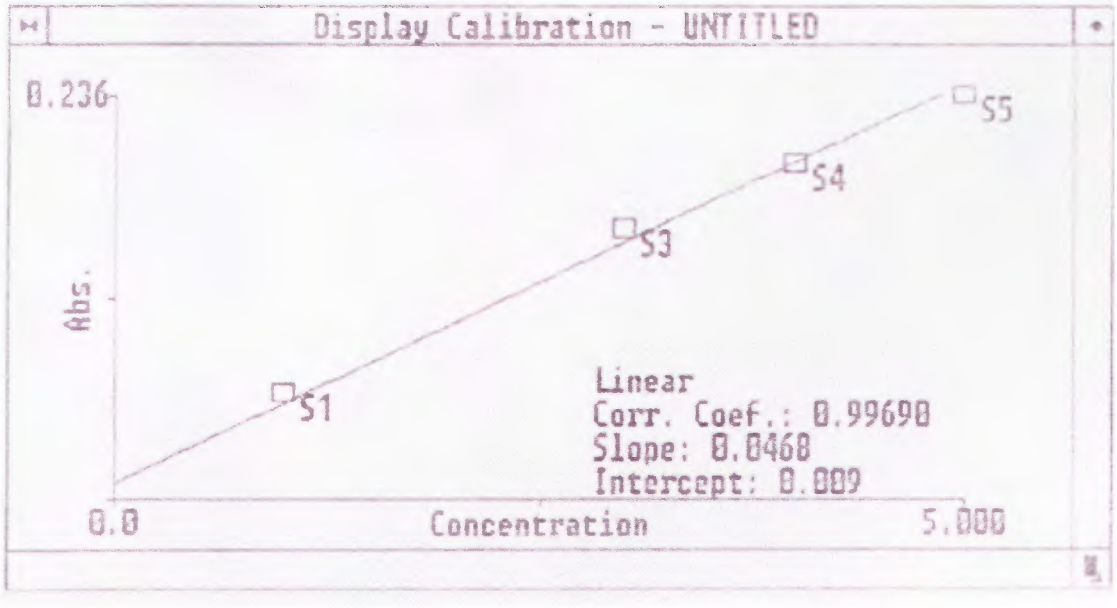

**ภาพที่ ค.2 แสดงกราฟมาตรฐานในการวิเคราะห์ $Cu^{2+}$ ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปค-โทรโฟโตมิเตอร์(AAS) เพื่อศึกษา pH ที่เหมาะสมของสารละลายโลหะในการดูดซับ**



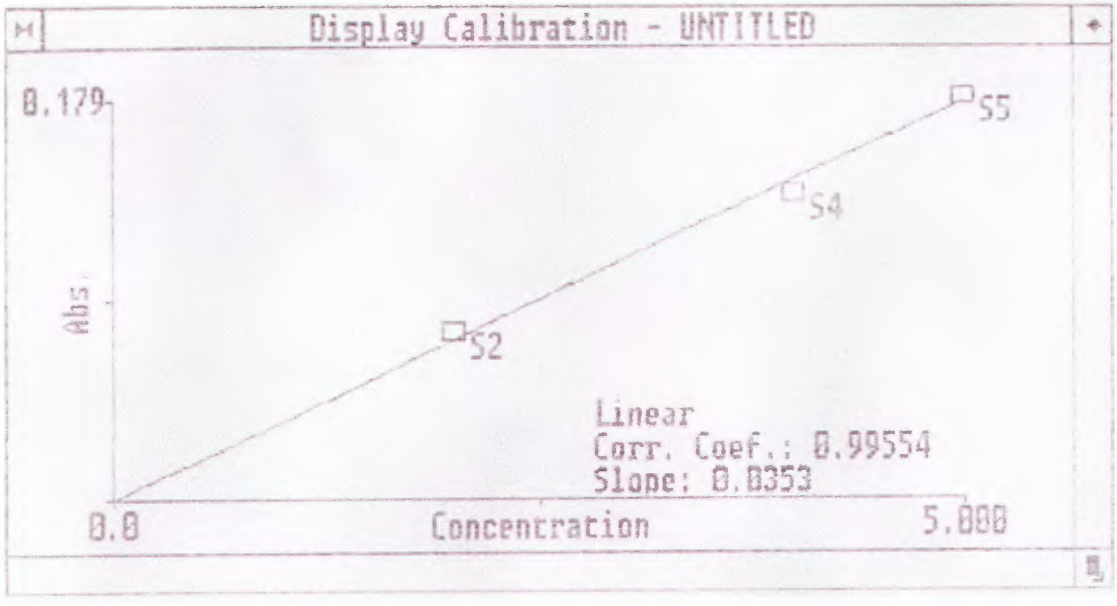

**ภาพที่ ค.3 แสดงกราฟมาตรฐานในการวิเคราะห์ $Cu^{2+}$ ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอบชันสเปค-โตรสโคปี (AAS) เพื่อศึกษาความจุของการดูดซับ**




**ภาพที่ ค.4 แสดงกราฟมาตรฐานในการวิเคราะห์ $Cr^{3+}$ ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปค-โทรโฟโตมิเตอร์(AAS) เพื่อศึกษาเวลาสมดุลของการดูดซับที่เวลาต่างๆ**




**ภาพที่ ค.5 แสดงกราฟมาตรฐานในการวิเคราะห์ $Cr^{3+}$ ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปค-โทรโฟโตมิเตอร์(AAS)เพื่อศึกษา pH ที่เหมาะสมของสารละลายโลหะในการดูดซับ**




**ภาพที่ ค.6 แสดงกราฟมาตรฐานในการวิเคราะห์ $Cr^{3+}$ ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปค-โทรโฟโตมิเตอร์(AAS) เพื่อศึกษาความจุของการดูดซับ**

# ประวัติของผู้วิจัย

| | |
|---|---|
| ชื่อ | นายสรายุทธ หมัดหละ |
| วัน เดือน ปีเกิด | 30 มีนาคม 2530 |
| อายุ | 23 ปี |
| ภูมิลำเนา | บ้านเลขที่ 232/1 หมู่ 1 ตำบลปากพะยูน อำเภอ ปากพะยูน จังหวัดพัทลุง |
| ที่อยู่ | บ้านเลขที่ 232/1 หมู่ 1 ตำบลปากพะยูน อำเภอ ปากพะยูน จังหวัดพัทลุง |

ประวัติการศึกษา

| | |
|---|---|
| พ.ศ.2543 | ประถมศึกษา โรงเรียนอนุบาลปากพะยูน ตำบลปากพะยูน อำเภอ ปากพะยูน จังหวัดพัทลุง 93120 |
| พ.ศ.2546 | มัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนมัธยมเกาะหมาก ตำบลเกาะหมาก อำเภอ ปากพะยูน จังหวัดพัทลุง 93120 |
| พ.ศ.2549 | มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนมัธยมเกาะหมาก ตำบลเกาะหมาก อำเภอ ปากพะยูน จังหวัดพัทลุง 93120 |
| ปัจจุบัน | ปริญญาตรี หลักสูตรเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช 80280 |