

## การใช้เตาเผาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทานสำหรับการสังเคราะห์อะลูมิเนียมฟิลลาร์มอนต์โมริลโลไนต์

### APPLICATION OF AN ELECTRIC RESISTANCE FURNACE FOR SYNTHESIS OF AI-PILLARED MONTMORILLONITE

ศักดิ์สิทธิ์ ชื่นชมขนาดจาด<sup>1\*</sup>, นิดา สีตะมา<sup>2</sup>, ดวงรัตน์ ทองคำ<sup>2</sup>

**Saksit Chuenchomnajak<sup>1\*</sup>, Nida Sitama<sup>2</sup>, Duangrat Thongkum<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา พิษณุโลก

<sup>1</sup>Program of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Phitsanulok.

<sup>2</sup>ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

<sup>2</sup>Department of Chemistry, Faculty of Science, Naresuan University.

\*Corresponding author, e-mail: Saksit273@hotmail.com

Received: 14 January 2019; Revised: 21 May 2019; Accepted: 7 June 2019

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบและสร้างเตาเผาไฟฟ้าที่มีราคาถูก โดยใช้ขดลวดความต้านทานให้อุณหภูมิสูงสุด 1,200 องศาเซลเซียส ตัวเครื่องประกอบด้วย อิฐทนไฟ ไยเซรามิก แท่งเซรามิก ขดลวดความต้านทาน และแผ่นซิลิกาบอร์ด ติดตั้งตัววัดอุณหภูมิ สามารถนำไปใช้ในกระบวนการเผาอะลูมิเนียมฟิลลาร์มอนต์โมริลโลไนต์ (AI-Mt1 และ AI-Mt2) ที่อุณหภูมิสูงได้ ยืนยันเอกลักษณ์ของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการเผาด้วยเทคนิคต่าง ๆ ได้แก่ เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ผลการทดลองยืนยันการเกิดฟิลลาร์ เนื่องจากหมู่ OH และหมู่ Si-O-Si มีความเข้มข้นสูง ศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยเทคนิค Brunauer-Emmett-Teller พบว่า AI-Mt1 มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (217.3625 ตารางเมตรต่อกรัม) มากกว่า AI-Mt2 (203.2639 ตารางเมตรต่อกรัม) ไอโซเทอมการดูดซับไนโตรเจนมีลักษณะเป็น Type IV ตามระบบ IUPAC นอกจากนี้ได้แทรกโมเลกุลอัลคิลเอมีน คลอโรแอนทราควิโนน (L) เข้าไปในโครงสร้างอะลูมิเนียมฟิลลาร์มอนต์โมริลโลไนต์ ได้เป็น AIMt1-L และ AIMt2-L วัสดุที่เตรียมได้นี้ นำไปใช้เป็นตัวดูดซับสำหรับกำจัดไอออนทองแดง ( $\text{Cu}^{2+}$ ) ยืนยันด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี พบว่าประสิทธิภาพการกำจัด  $\text{Cu}^{2+}$  โดยใช้ AIMt1-L มีค่าสูงกว่า AIMt2-L ประมาณร้อยละ 10 และปริมาณการดูดซับ  $\text{Cu}^{2+}$  ที่เวลาใด ๆ (q) ของ AIMt1-L มีค่าสูงกว่า AIMt2-L ประมาณ 4 เท่า

**คำสำคัญ:** การดูดซับ เตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทาน อะลูมิเนียมฟิลลาร์มอนต์โมริลโลไนต์ อัลคิลเอมีน คลอโรแอนทราควิโนน ไอออนทองแดง

## Abstract

In this research, a low-cost electric furnace was designed and fabricated by using resistant coils that provided the maximum heating temperature up to 1,200°C. The furnace was made of refractory bricks, ceramic fibers, ceramic rods, resistant coils, and silica boards, a thermocouple was installed inside. The furnace can be used for calcination of aluminum pillared montmorillonite (Al-Mt1 and Al-Mt2). The prepared montmorillonites were characterized by various techniques such as Fourier transform infrared spectroscopy. The results confirmed the presence of pillars because of the decrease in the intensity of OH and Si-O-Si groups. The data from Brunauer Emmett-Teller displayed the specific surface area of Al-Mt1 (217.3625 m<sup>2</sup>/g) was greater than that of Al-Mt2 (203.2639 m<sup>2</sup>/g). The N<sub>2</sub> adsorption isotherms exhibited Type IV behaviors according to the IUPAC classification. Moreover, alkylamine chloroanthraquinone molecules (L) were added to the Al-Mt1 and Al-Mt2 structures to form AlMt1-L and AlMt2-L, respectively. The prepared materials were used as adsorbent for removal of copper ion (Cu<sup>2+</sup>) and were characterized by UV-visible spectroscopy. The Cu<sup>2+</sup> removal efficiency using AlMt1-L was around 10% higher than that of AlMt2-L. In addition, the quantity of Cu<sup>2+</sup> adsorbed (q) by AlMt1-L was about four times higher than that of AlMt2-L.

**Keywords:** Adsorption, Electric resistance furnace, Al-pillared montmorillonite, Alkylamine chloroanthraquinone, Copper Ion

## บทนำ

มนุษย์ได้รู้จักวิธีการเผาและสร้างเตาเผาผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ มาเป็นเวลานานแล้ว เริ่มต้นด้วยการกองสุมผลิตภัณฑ์ที่จะเผาบนพื้นดิน แล้วเผาโดยอาศัยธรรมชาติเป็นเครื่องช่วย [1] ซึ่งเป็นการเรียนรู้ถึงการสร้างเตาเผาแบบง่าย ๆ ถือเป็นขั้นแรกของการวิวัฒนาการเตาเผาที่เกิดขึ้น เตาเผาที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันได้มีผู้ออกแบบหลากหลายชนิด ตามลักษณะและความต้องการของผู้ใช้เพื่อเผาผลิตภัณฑ์ให้ได้ตามความต้องการ ซึ่งนักเซรามิกได้ทำการแบ่งประเภทเตาเผาออกเป็นประเภทต่าง ๆ เช่น นักเซรามิกที่เขียนตำราเกี่ยวกับเตาและการเผาเล่มแรกของประเทศไทยได้แบ่งประเภทของเตาเผาเซรามิกออกเป็น 4 ประเภท ดังนี้ 1) แบ่งตามประเภทการใช้งานของเตา 2) แบ่งตามประเภททางเดินของลมร้อน 3) แบ่งตามลักษณะของเปลวไฟ 4) แบ่งตามชนิดของเชื้อเพลิง เตาที่ใช้เผาผลิตภัณฑ์จะต้องออกแบบให้เหมาะสมกับเชื้อเพลิง ซึ่งเมื่อเลือกเชื้อเพลิงในการเผาจะส่งผลต่อการกำหนดรูปร่างขนาดของเตา วัสดุที่ต้องใช้ในการก่อสร้างเตาเผา และการควบคุมเตาเผา [2]

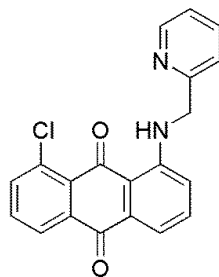
เตาเผาไฟฟ้า (Electric Furnace) เป็นเตาเผาที่สามารถให้อุณหภูมิสูง และสามารถเร่งความเร็วได้ตามต้องการ เป็นเตาที่เผาในสภาวะที่มีการเติมออกซิเจน (การออกซิไดซ์) เท่านั้น เตาเผาไฟฟ้ามีรูปทรงแตกต่างกัน เช่น เตากลม เตาสี่เหลี่ยม เตาที่เปิดด้านบน (Top Loading) เตาที่เปิดด้านหน้า (Front Loading) เป็นต้น ปกติผนังเตาทำจากอิฐทนไฟหรือไฟเบอร์ เตาชนิดไฟฟ้าเป็นเตาที่มีความปลอดภัยในการใช้ เตาแล้วเตาสะอาด แต่มีข้อจำกัดคือไม่เหมาะสมที่จะเผาวัสดุชิ้นแบบเตาแก๊ส เพราะบรรยากาศแบบรีดักชันทำให้ขดลวดในเตาเสื่อมสภาพ ส่วนที่ให้ความร้อนในเตาเผา มักใช้ขดลวดปลายตรงต่อกับวงจรไฟฟ้า ซึ่งขดลวดนำความร้อน (Kanthal Wire) นี้จะฝังพอดอยู่กับผนังเตาโดยเกิดความร้อนและแดงขึ้นเมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน สามารถเผาไฟ

สูงได้ถึง 1,200-1,300 องศาเซลเซียส [3] ซึ่งปัจจุบันเตาเผาไฟฟ้าที่สามารถทำความร้อนที่อุณหภูมิสูงเป็นเครื่องมือที่มีราคาค่อนข้างแพง มีราคาตั้งแต่ 100,000-500,000 บาท [4] โดยเตาเผาถูกนำมาใช้งานในหลายด้าน เช่น การ Calcination

Calcination คือ กระบวนการนำอนุภาคหรือสารบางอย่างไปเผาภายใต้อุณหภูมิสูง ในระดับที่ยังไม่ถึงอุณหภูมิจุดหลอมเหลวของอนุภาคหรือสารนั้น กระบวนการนี้ถูกใช้ในหลายวัตถุประสงค์ เช่น กำจัดความชื้น สารอินทรีย์และแก๊สต่าง ๆ หรืออาจใช้เพื่อการเติมออกซิเจน นอกจากนี้ยังเป็นกระบวนการที่ใช้ในเรื่องของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางกายภาพและทางเคมีของสารได้อีกด้วย [5-6] ดังนั้นกระบวนการ Calcination จึงมีความสำคัญเป็นอย่างมากต่ออุตสาหกรรม เช่น ในการเผาดินดิบ การผลิตเซรามิก การปรับปรุงสมบัติของสารดูดซับจากวัสดุชีวภาพและวัสดุอนินทรีย์ เป็นต้น

สารดูดซับ (Adsorbent) มีหลายชนิดทั้งที่เป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ เป็นวัสดุอีกประเภทหนึ่งที่ยิยมใช้ในการดูดซับสารปนเปื้อนในน้ำเสีย ได้แก่ เรซิน ถ่านกัมมันต์ ซีโอไลต์ และแร่ดินเหนียว ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้แร่ดินเหนียวกลุ่มมอนต์โมริลโลไนต์ (Montmorillonite) มาพัฒนาเป็นสารดูดซับ เนื่องจากเป็นวัสดุธรรมชาติที่มีราคาถูก ให้พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสูงเมื่อเทียบกับวัสดุชนิดอื่น ๆ และมีแหล่งวัตถุดิบในประเทศไทย โดยทำการปรับปรุงสมบัติของแร่ดินเหนียวซึ่งเดิมมีลักษณะโครงสร้างเป็นชั้น ๆ โดยการแทรกด้วยออกไซด์ของโลหะที่มีลักษณะโครงสร้างคล้ายเสาหรือฟิลลาร์ ซึ่งโครงสร้างลักษณะดังกล่าวทำให้แร่ดินเหนียวที่ปรับปรุงขึ้นนี้มีความสามารถเป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพและทนความร้อนได้สูง [7-8]

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการออกแบบและพัฒนาเตาเผาไฟฟ้าที่มีราคาถูกกว่าราคาในท้องตลาดเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการ Calcination ในขั้นตอนการสังเคราะห์อะลูมิเนียมฟิลลาร์มอนต์โมริลโลไนต์ (Al-Pillared Montmorillonite) หลังจากนั้นนำแร่ดินเหนียวที่ผ่านการเผาไปแทรกด้วยโมเลกุลอัลคิลเอมีน คลอโรแอน ทราควิโนน (Alkylamine Chloroanthraquinone) หรือโมเลกุลเซนเซอร์ L ที่มีความจำเพาะ (Selectivity) กับไอออนทองแดงทำให้สามารถแยกไอออนทองแดงที่ปนเปื้อนในน้ำออกมาให้อยู่ในชั้นของดินเหนียวเพื่อสะดวกในการกำจัดต่อไป โครงสร้างของ L แสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 โมเลกุลเซนเซอร์ L

### วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อออกแบบและสร้างเตาเผาไฟฟ้าที่มีราคาถูกกว่าราคาในท้องตลาด
2. เพื่อสังเคราะห์และศึกษาโครงสร้างอะลูมิเนียมฟิลลาร์มอนต์โมริลโลไนต์ที่ได้จากการเผาโดยใช้เตาเผาไฟฟ้า
3. เพื่อศึกษาการดูดซับไอออนทองแดงเมื่อใช้วัสดุดูดซับอะลูมิเนียมฟิลลาร์มอนต์โมริลโลไนต์

## วิธีดำเนินการวิจัย

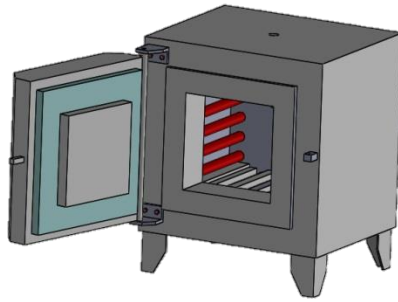
### 1. การออกแบบ การประกอบโครงสร้างและการศึกษาประสิทธิภาพของเตาเผาไฟฟ้า

#### อุปกรณ์

- |  |  |
|--|--|
| 1) ขดลวดความต้านทาน                            | 2) ปูนทนความร้อน                         |
| 3) อิฐทนความร้อน C1 และ ST76                   | 4) ซิลิกาบอร์ดเป็นแท่นวางชิ้นงานภายในเตา |
| 5) แท่งเซรามิก                                 | 6) ไยเซรามิกทนความร้อน                   |
| 7) ตัววัดอุณหภูมิและชุดควบคุมอุณหภูมิสำเร็จรูป | 8) เหล็กแผ่น                             |

#### การออกแบบโครงสร้าง

โครงสร้างของเตาเผาไฟฟ้าประกอบด้วย ช่องระบายอากาศภายในเตาขนาด 30 มิลลิเมตร ตัวเตามีลักษณะเป็นทรงสี่เหลี่ยมเพื่อให้สะดวกแก่การใช้งาน มีขนาดหน้ากว้าง 608 มิลลิเมตร ลึก 507 มิลลิเมตร และสูง 600 มิลลิเมตร ช่องว่างภายในมีขนาดหน้ากว้าง 300 มิลลิเมตร ลึก 300 มิลลิเมตร และสูง 300 มิลลิเมตร ขดลวดความต้านทานจะติดตั้งไว้ที่ขอบด้านข้างของเตาทั้ง 2 ด้าน ๆ ละ 4 ตัว และด้านล่างเตา 4 ตัว อิฐทนความร้อนเป็นฉนวนกันความร้อนและช่วยเก็บอุณหภูมิภายในเตา ออกแบบตัวเตาให้สามารถทนความร้อนได้ 1,200 องศาเซลเซียส โดยการใส่วัสดุที่เป็นตัวทนความร้อน แสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 โครงสร้างเตาเผาไฟฟ้าที่ออกแบบ

#### ขั้นตอนการประกอบโครงสร้าง

- 1) การสร้างโครงสร้างเตาเผาไฟฟ้า ใช้เหล็กแผ่นหนา 3 มิลลิเมตร พับขึ้นรูปให้เป็นทรงสี่เหลี่ยมมีขนาดหน้ากว้าง 608 มิลลิเมตร ลึก 507 มิลลิเมตร และสูง 600 มิลลิเมตร และมีช่องระบายอากาศด้านบน แสดงดังภาพที่ 3 (ก)
- 2) ประกอบไยเซรามิกทนความร้อนและก่ออิฐทนความร้อนภายในเตา เพื่อป้องกันความร้อนรั่วไหล แสดงดังภาพที่ 3 (ข)
- 3) ประกอบแท่งเซรามิกและขดลวดความต้านทาน โดยนำแท่งเซรามิกวางเรียงเป็นแนวด้านข้าง ด้านละ 4 แท่ง และด้านล่างอีก 4 แท่ง นำขดลวดความต้านทานมาพันรอบแท่งเซรามิกเพื่อเป็นตัวนำความร้อนแก่เตา แสดงดังภาพที่ 3 (ค) หลังจากนั้นวางแท่นซิลิกาบอร์ดเพื่อเป็นแท่นวางชิ้นงานภายในเตา
- 4) ประกอบเตาและตัววัดอุณหภูมิ (Thermocouple) โดยประกอบฝาประตูด้านหน้าติดกับเตา และใส่ตัววัดอุณหภูมิทางด้านหลัง แสดงดังภาพที่ 3 (ง)
- 5) ติดตั้งชุดควบคุมอุณหภูมิสำเร็จรูป จะได้เตาเผาไฟฟ้าที่เสร็จสมบูรณ์แสดงดังภาพที่ 3 (จ) และ (ฉ)

### การศึกษาประสิทธิภาพของเตาเผา

1) เตรียมเหล็ก S50C ยาว 3 เมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร ทำการตัดแบ่งออกเป็นชิ้นงาน ความยาว 25 มิลลิเมตร กลึงปาดหน้าให้ได้ความยาว 20 มิลลิเมตร แล้วนำไปขัดผิว

2) วางชิ้นงานทั้งหมด 5 ตำแหน่ง บนแท่นวางชิ้นงานภายในเตา ได้แก่ มุมทั้ง 4 ของแท่นวาง และกึ่งกลางแท่นวางอีก 1 ตำแหน่ง

3) ตั้งค่าระบบที่อุณหภูมิ 840 องศาเซลเซียส ตั้งเวลา 60 นาที จากนั้นเปิดสวิตช์ เพื่อทำความร้อนภายในเตาจากนั้นกดสวิตช์ ALARM สำหรับการแจ้งเตือนเมื่อจบการทำงาน รอให้อุณหภูมิลดลงจนถึงอุณหภูมิต้อง

4) นำตัวอย่างเหล็ก S50C ทั้ง 5 ตำแหน่ง ออกจากเตา นำไปชุบในน้ำนาน 30 วินาที แล้วนำมาวัดค่าความแข็งด้วยเครื่อง Universal Hardness Tester เลือกการทดสอบแบบหัวกดเพชร (Rockwell C Scale) บันทึกค่าความแข็งของเหล็กแต่ละตำแหน่งในหน่วย HRC



(ก)

(ข)



(ค)

(ง)



(จ)

(ฉ)

ภาพที่ 3 (ก) โครงของเตาเผา (ข) วางอิฐเรียงต่อกันเป็นทรงสี่เหลี่ยม (ค) ประกอบแท่งเซรามิกเข้ากับตัวเครื่อง (ง) ตำแหน่งการใส่ตัววัดอุณหภูมิทางด้านหลังเตา (จ) โครงสร้างภายใน และ (ฉ) โครงสร้างภายนอกเตาเผาไฟฟ้าที่เสร็จสมบูรณ์

## 2. การสังเคราะห์และการศึกษาโครงสร้างของอะลูมิเนียมฟิลลาร์มอนต์โมริลโลไนต์

### สารเคมี

โซเดียมไฮดรอกไซด์: NaOH (MW=39.99 กรัมต่อโมล) จากบริษัท Ajax finechem แร่ดินเหนียว K-10 มอนต์โมริลโลไนต์: Mt-K10 (CEC=125 meq/100 กรัม) จากบริษัท Sigma-aldrich อะลูมิเนียมคลอไรด์ เฮกซะไฮเดรต:  $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (MW=241.43 กรัมต่อโมล) จากบริษัท Ajax finechem ไฮโดรคลอริก: HCl (MW=36.46 กรัมต่อโมล) จากบริษัท Carlo erba คอปเปอร์ (II) ไนเตรดไตรไฮเดรต:  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  (MW=241.60 กรัมต่อโมล) จากบริษัท Sigma-aldrich อะซิโตนไนไตรล์:  $\text{CH}_3\text{CN}$  (MW=41.05 กรัมต่อโมล) จากบริษัท Lab-Scan และอัลคิลเอมีนคลอโรแอนทราควิโนน: L (MW=348.78 กรัมต่อโมล) สังเคราะห์ตามงานวิจัยก่อนหน้า [9-10]

### เครื่องมือ

- 1) เครื่องชั่งสารทศนิยม 4 ตำแหน่ง Sartorius รุ่น BSA224S-CW
- 2) เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า Mettler Toledo รุ่น S30 SevenEasy
- 3) เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุน Micromeritics รุ่น TriStar II 3020
- 4) เครื่องปั่นเหวี่ยง GEMMY รุ่น PLC-012E
- 5) เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ Perkin Elmer รุ่น Spectrum GX
- 6) เครื่องยูวีและวิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ Analytik Jena รุ่น Specord 200 Plus

### การเตรียมฟิลลาร์ เอเจนท์ (Pillaring Agent)

สภาวะที่ 1 เตรียมสารละลาย  $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  0.2 โมลาร์ (1.2072 กรัม) ในน้ำบริสุทธิ์คุณภาพสูง 25.00 มิลลิลิตร หลังจากนั้นเตรียมสารละลาย NaOH 0.5 โมลาร์ (0.5000 กรัม) ในน้ำบริสุทธิ์คุณภาพสูง 25.00 มิลลิลิตร นำสารละลาย  $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  25.00 มิลลิลิตรที่เตรียมได้ไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส พร้อมกับกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็ก จากนั้นค่อย ๆ หยดสารละลาย NaOH ที่ละลายจนครบปริมาตร 20.00 มิลลิลิตร คิดเป็นอัตราส่วนจำนวนโมล  $\text{OH}^-/\text{Al}^{3+} = 0.010/0.005$  (โมล  $\text{OH}^-/\text{Al}^{3+} = 2/1$ ) หยุดให้ความร้อน และกวนสารละลายที่อุณหภูมิห้อง 1 คืน โดยวิธีการเตรียมสารละลายฟิลลาร์ เอเจนท์ที่ดัดแปลงจากงานวิจัยก่อนหน้า [11-12]

สภาวะที่ 2 ชั่งน้ำหนัก  $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  2.4143 กรัม และ NaOH 1.0091 กรัม และทำการทดลองเช่นเดียวกับสภาวะที่ 1 แต่เตรียมสารละลายทั้ง 2 ชนิดให้มีปริมาตร 50.00 มิลลิลิตร หลังจากนั้นผสมสารละลายของ  $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  50.00 มิลลิลิตร กับสารละลาย NaOH 40.00 มิลลิลิตร คิดเป็นอัตราส่วนจำนวนโมล  $\text{OH}^-/\text{Al}^{3+} = 0.020/0.010$  (โมล  $\text{OH}^-/\text{Al}^{3+} = 2/1$ ) โดยสารละลายฟิลลาร์ เอเจนท์ในสภาวะที่ 2 มีจำนวนโมลของ  $\text{OH}^-$  และ  $\text{Al}^{3+}$  มากกว่าสภาวะที่ 1 จำนวน 2 เท่า

### การแทรกอะลูมิเนียมในโครงสร้างของ K-10 มอนต์โมริลโลไนต์ (Intercalation)

ชั่งน้ำหนัก Mt-K10 1.5000 กรัม ในน้ำบริสุทธิ์คุณภาพสูงปริมาตร 50.00 มิลลิลิตร กวนด้วยแท่งแม่เหล็ก จากนั้นหยุดฟิลลาร์ เอเจนท์ ที่เตรียมไว้ที่ละลายจนหมด และกวนสารละลายที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนที่อุณหภูมิห้อง 12 ชั่วโมง นำสารละลายที่ได้เข้าเครื่องหมุนเหวี่ยงในอัตราเร็ว 4,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 นาที ล้างไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายออกจนหมดด้วยน้ำบริสุทธิ์คุณภาพสูง โดยนำสารละลายที่ได้จากการล้างไปตรวจสอบด้วยวิธีการวัดค่าการนำไฟฟ้าเทียบกับน้ำบริสุทธิ์คุณภาพสูง จากนั้นนำตะกอนที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 คืน [11, 13] แร่ดินเหนียวจากสภาวะที่ 1 ที่ผ่านการอบ เรียกว่า In-AIMt1 และจากสภาวะที่ 2 เรียกว่า In-AIMt2 ตามลำดับ

### การเผาโดยใช้เตาเผาไฟฟ้า (Calcination)

เผาแร่ดินเหนียว In-AIMt1 และ In-AIMt2 ด้วยเตาเผาไฟฟ้าที่สร้างขึ้น โดยให้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เผาที่อุณหภูมิตั้งที่ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง [14-15] แร่ดินเหนียวที่ได้ในขั้นตอนนี้เรียกว่า Al-Mt1 และ Al-Mt2 จากสภาวะที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

ศึกษาเอกลักษณ์ของสารประกอบทุกชนิดที่เตรียมได้จากสภาวะที่ 1 และ 2 ด้วยเทคนิคต่าง ๆ ได้แก่ ฟลูเรียวรานฟอรัมอินฟราเรดสเปกโทรปี และเทคนิคการวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนด้วยวิธี Brunauer-Emmett-Teller และเทลเลอร์ เปรียบเทียบกับ Mt-K10

### 3. การแทรกโมเลกุลเซนเซอร์ L ในโครงสร้างของอะลูมิเนียมฟอสเฟตโมริสไลนด์

ชั่งน้ำหนัก AIMt1 1.0000 กรัม (หรือ AIMt2) เติมน้ำบริสุทธิ์คุณภาพสูง 24.00 มิลลิลิตร และเติม CH<sub>3</sub>CN 16.00 มิลลิลิตร กวนให้เข้ากันเป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นเตรียมสารละลาย L ความเข้มข้น  $1.66 \times 10^{-3}$  โมลาร์ (0.0029 กรัม) ใน CH<sub>3</sub>CN 5.00 มิลลิลิตร ทำการปิเปตสารละลายที่เตรียมได้ 1.44 มิลลิลิตร เติมน้ำ CH<sub>3</sub>CN 14.56 มิลลิลิตร และน้ำบริสุทธิ์คุณภาพสูง 24.00 มิลลิลิตร จะได้ความเข้มข้นของ L เป็น  $6.00 \times 10^{-5}$  โมลาร์ จากนั้นผสมสารแขวนลอย AIMt1 และสารละลายของ L เข้าด้วยกัน ปรับพีเอช (pH) ด้วย HCl และ NaOH ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ให้ได้พีเอชเท่ากับ 3.0 กวนให้เข้ากันที่อุณหภูมิห้องนาน 2 ชั่วโมง นำสารละลายที่ได้เข้าเครื่องหมุนเหวี่ยงในอัตราเร็ว 4,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นนำตะกอนสีชมพูที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส แร่ดินเหนียวที่ผ่านการแทรกโมเลกุลเซนเซอร์ L ในขั้นตอนนี้เรียกว่า AIMt1-L และ AIMt2-L

### 4. ศึกษาการดูดซับไอออนทองแดงในน้ำ

เตรียมสารละลาย Cu(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·3H<sub>2</sub>O ความเข้มข้น  $7.00 \times 10^{-3}$  โมลาร์ (0.0423 กรัม) โดยใช้ น้ำบริสุทธิ์คุณภาพสูงปริมาตร 25.00 มิลลิลิตร และชั่งน้ำหนัก AIMt1-L 0.0200 กรัม จากนั้นปิเปตสารละลาย Cu<sup>2+</sup> 3.00 มิลลิลิตร ลงไปในช่องแข็งของ AIMt1-L กวนสารละลายที่เวลา 15, 30, 45, 60, 90 และ 120 นาที ตามลำดับ นำสารละลายเข้าเครื่องหมุนเหวี่ยง 4,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที วัดการดูดกลืนแสงของสารละลายที่แยกตะกอนออกแล้วด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี ติดตามปริมาณของ Cu<sup>2+</sup> ที่เหลือจากการดูดซับที่ความยาวคลื่น 800 นาโนเมตร โดยใช้กราฟมาตรฐานของสารละลาย Cu(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·3H<sub>2</sub>O ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง นำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดแสดงดังสมการ (1) และคำนวณปริมาณการดูดซับ Cu<sup>2+</sup> ที่เวลาใด ๆ หรือ q<sub>t</sub> (มิลลิกรัมต่อกรัม) แสดงดังสมการ (2) เมื่อ C<sub>i</sub> และ C<sub>t</sub> คือความเข้มข้นเริ่มต้น และความเข้มข้นที่เวลาใด ๆ ของ Cu<sup>2+</sup> (มิลลิกรัมต่อลิตร) ตามลำดับ M คือ น้ำหนักของแร่ดินเหนียว (กรัม) และ V คือ ปริมาตรของสารละลาย (เปลี่ยนหน่วยมิลลิลิตรให้เป็นลิตร) [16] สำหรับ AIMt2-L ทำการทดลองเช่นเดียวกัน

$$\text{ร้อยละประสิทธิภาพการกำจัด} = \frac{C_i - C_t}{C_i} \times 100 \quad (1)$$

$$q_t = \frac{C_i - C_t}{M} \times V \quad (2)$$

## ผลการวิจัย

### 1. การออกแบบ การประกอบโครงสร้างและการศึกษาประสิทธิภาพของเตาเผาไฟฟ้า

เตาเผาไฟฟ้าที่จัดสร้างขึ้นสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยทำอุณหภูมิได้ตามขอบเขตที่กำหนดไว้ คือ 1,200 องศาเซลเซียส สามารถปรับค่าความร้อน เวลาที่ใช้ในการเผา และปรับอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ ตามเวลาที่กำหนดได้ตามความต้องการ โดยใช้ระบบไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส แรงดัน 380 โวลต์ นอกจากนี้ยังมี ต้นทุนในการผลิตต่ำ คือ 50,000 บาท ต่อเครื่อง เนื่องจากเป็นเตาเผาที่ใช้อุปกรณ์ที่มีราคาถูกลงมาประกอบเอง ในประเทศ เมื่อเปรียบเทียบกับราคาเตาเผาไฟฟ้าที่จัดจำหน่ายในท้องตลาดในรุ่นที่ใกล้เคียงกัน พบว่ามีราคาสูงถึง 100,000-500,000 บาท

การศึกษาประสิทธิภาพของเตาเผาไฟฟ้า โดยพิจารณาจากค่าความแข็ง (Hardness) ของเหล็ก S50C หลังการอบที่อุณหภูมิ 840 องศาเซลเซียส แล้วชุบแข็งด้วยน้ำ ผลการทดสอบแบบ Rockwell C Scale แสดงดังตารางที่ 1 พบว่าให้ค่าความแข็งเฉลี่ยหลังการชุบแข็งด้วยน้ำเท่ากับ 55.36 HRC ซึ่งอยู่ในช่วงเดียวกับ ค่ามาตรฐานของเหล็ก S50C ที่มีค่า 55-60 HRC

ตารางที่ 1 ค่าความแข็งของเหล็ก S50C ตามตำแหน่งการวางชิ้นงานหลังจากการชุบแข็งด้วยน้ำ

ตำแหน่งชิ้นงาน	ค่าความแข็งหลังจากการชุบแข็ง (HRC)					ค่าเฉลี่ยตามตำแหน่งชิ้นงาน
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	
ล่างซ้าย	58.46	58.03	56.96	55.43	56.97	57.17
ล่างขวา	58.83	49.16	57.36	59.44	51.73	55.30
กึ่งกลาง	59.23	52.40	58.70	56.44	58.73	57.10
บนซ้าย	57.00	52.40	56.80	45.06	57.20	53.69
บนขวา	53.86	52.26	55.63	56.33	49.56	53.53
ค่าเฉลี่ยต่อครั้งในการทดลอง	57.48	52.85	57.09	54.54	54.84	55.36

### 2. การศึกษาโครงสร้างของอะลูมิเนียมฟิลลาร์มอนต์โมริลโลไนต์ เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

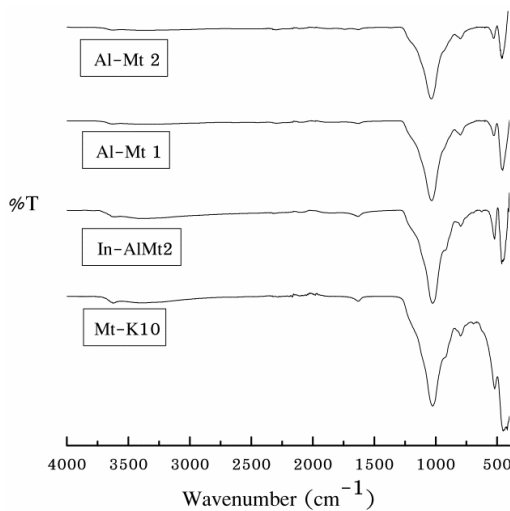
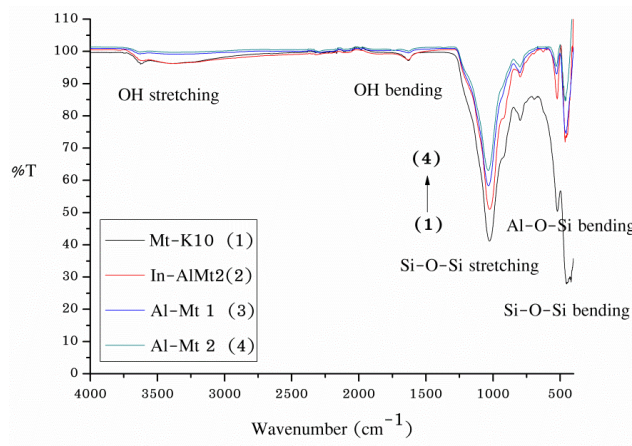
เทคนิค FT-IR สามารถยืนยันได้ว่าอะลูมิเนียมฟิลลาร์ถูกแทรกเข้าไปในโครงสร้างของแร่ดินเหนียวได้อย่างสมบูรณ์ โดยพิจารณาจากแถบการสั่นแบบยืดหดและแบบงอของหมู่ฟังก์ชัน OH ของ Al-Mt1 และ Al-Mt2 ที่มีความเข้มลดลงในช่วงเลขคลื่น 3600 และ 1600 ต่อเซนติเมตร ซึ่งเกิดจากการดึงน้ำและการกำจัดหมู่ OH ออกจากแร่ดินเหนียวทำให้เกิดการแทนที่ของไอออนบวกในช่องว่างระหว่างชั้น นอกจากนี้ยังพบว่า In-AIMt2, AIMt1 และ AIMt2 เกิดการสั่นแบบยืดหดของหมู่ฟังก์ชัน Si-O-Si แบบไม่สมมาตร ในช่วงเลขคลื่น 1040 และ 760 ต่อเซนติเมตร และเกิดการสั่นแบบงอของหมู่ฟังก์ชัน Si-O-Si ที่เลขคลื่นประมาณ 460 ต่อเซนติเมตร ซึ่ง Al-Mt1 และ Al-Mt2 ให้แถบสเปกตรัมที่มีความเข้มลดลงและเกิดการเลื่อนตำแหน่งไปที่ 1053-1056 ต่อเซนติเมตร เมื่อเทียบกับ Mt-K10 ที่เกิดจากการรบกวนของอะลูมิเนียมในชั้นซิลิกาและเกิดจากการก่อตัวของอะลูมิเนียมฟิลลาร์ ในโครงสร้างของแร่ดินเหนียวเมื่อนำไปเผา ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่ได้อธิบายการเลื่อนตำแหน่งของหมู่ฟังก์ชัน Si-O-Si เมื่อเกิดการรบกวนของพื้นผิว [12, 17] นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบความเข้มของแถบการสั่น



แบบยึดหดของหมู่ฟังก์ชัน Si-O-Si ระหว่าง Al-Mt1 และ Al-Mt2 พบว่า Al-Mt2 มีความเข้มต่ำกว่า เนื่องจากในขั้นตอนการเตรียม Al-Mt2 มีการเติม OH<sup>-</sup> และ Al<sup>3+</sup> ลงไปในปริมาณที่มากกว่า ทำให้มีโอกาสเกิดฟิลลาร์ของ Si-O-Al ได้มาก ความเข้มของสัญญาณจากหมู่ฟังก์ชัน Si-O-Si จึงลดลงอย่างเห็นได้ชัด สเปกตรัมของแร่ดินเหนียว Mt-K10, Al-Mt1 และ Al-Mt2 แสดงดังภาพที่ 4

#### วิธีบรูนเนอร์ เอ็มเมทท์ และเทลเลอร์

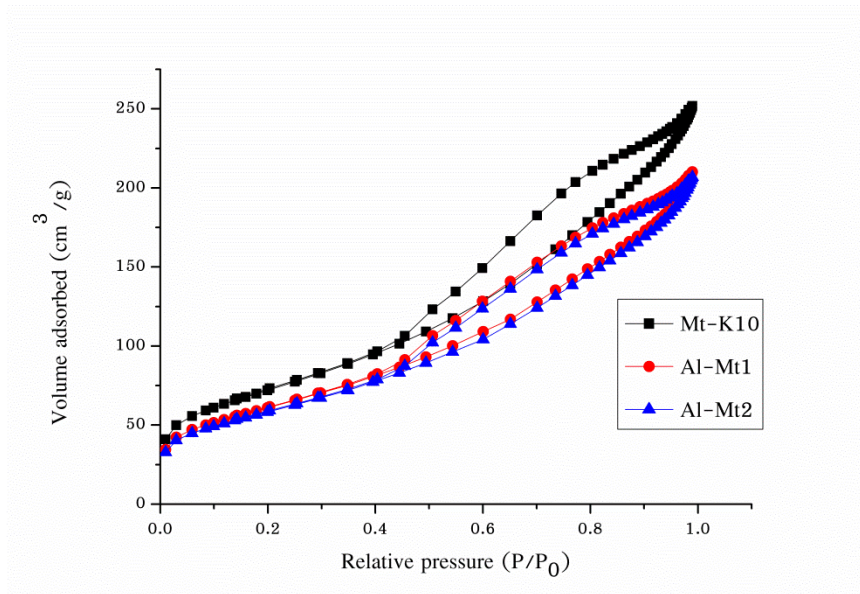
Al-Mt1 ให้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ( $S_{BET}$ ) มากกว่า Al-Mt2 แต่เมื่อเทียบกับ Mt-K10 พบว่า Al-Mt ทั้ง 2 สภาวะให้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนรวม ( $V_{total}$ ) น้อยกว่า Mt-K10 ทั้งนี้เป็นผลมาจากปริมาณของอะลูมิเนียมออกไซด์ที่เติมเข้าไปทำให้รูพรุนที่มีอยู่เดิมถูกปิดขนะเผา นอกจากนี้ยังพบว่า ปริมาณของอะลูมิเนียมออกไซด์ไม่มีผลต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนอื่น ๆ ( $I_p$ ) ที่ไม่ได้ถูกปิด เนื่องจากเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนทั้ง 3 ตัวอย่างให้ค่าต่างกันเล็กน้อย ดังตารางที่ 2 และเมื่อพิจารณากราฟปริมาณของแก๊สที่ถูกดูดซับในภาพที่ 5 พบว่าเกิด Hysteresis loop ที่มีลักษณะเป็น Type IV ของ IUPAC สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้า [12, 18-20] แสดงว่า Mt-K10, Al-Mt1 และ Al-Mt2 มีรูพรุนขนาดใหญ่กว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุลที่ถูกดูดซับมาก และเป็นรูพรุนขนาดกลาง (Mesoporous) ที่มีขนาดระหว่าง 2-50 นาโนเมตร



ภาพที่ 4 สเปกตรัม FT-IR ของ Mt-K10, In-AlMt2, Al-Mt1 และ Al-Mt2

ตารางที่ 2 พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนรวม และเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนของแร่ดินเหนียวชนิดต่าง ๆ

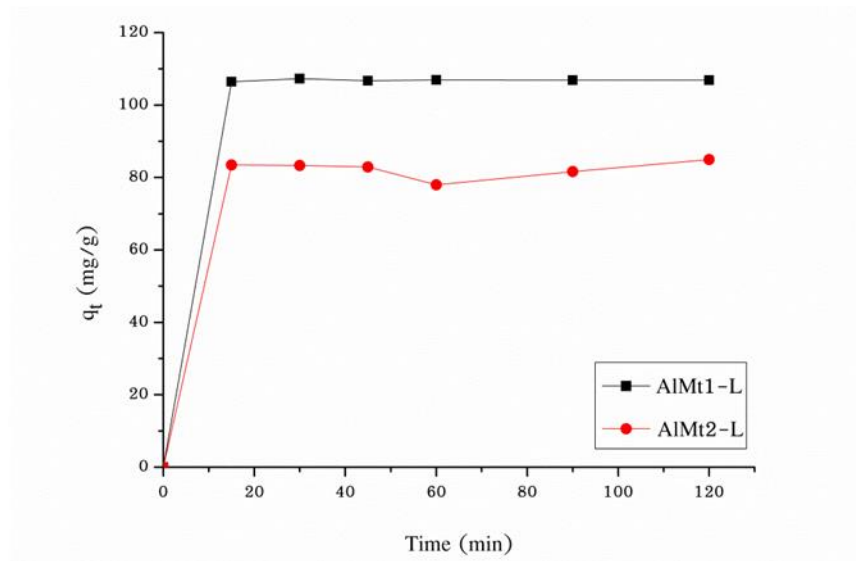
ตัวอย่าง	$S_{BET}$ (ตารางเมตรต่อกรัม)	$V_{total}$ (มิลลิลิตรต่อกรัม)	$I_p$ (นาโนเมตร)
Mt-K10	256.6530	0.3808	5.9342
Al-Mt1	217.3625	0.3167	5.8278
Al-Mt2	203.2639	0.3126	6.0165



ภาพที่ 5  $N_2$  Adsorption-desorption Isotherm ของ Mt-K10 Al-Mt1 และ Al-Mt2

### 3. ศึกษาการดูดซับไอออนทองแดงในน้ำ

การแทรกโมเลกุล L เข้าไปในโครงสร้างของ Al-Mt1 และ Al-Mt2 ทำให้สีของแร่ดินเหนียวที่เดิมมีสีน้ำตาลอ่อนเปลี่ยนเป็นสีชมพูอ่อน ทั้งนี้เนื่องจากโมเลกุล L มีสีส้มแดง โดยได้นำ Al-Mt1 และ Al-Mt2 ไปศึกษาการดูดซับ  $Cu^{2+}$  ในน้ำด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี จากการศึกษาการดูดซับ  $Cu^{2+}$  พบว่าร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดของ AlMt1-L และ AlMt2-L มีค่าประมาณร้อยละ 40 และ 30 ตามลำดับ และปริมาณการดูดซับ  $Cu^{2+}$  ที่เวลาใด ๆ ของ AlMt1-L และ AlMt2-L มีค่าประมาณ 105 และ 80 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 6 ซึ่งสอดคล้องกับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ กล่าวคือค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของ Al-Mt1 มากกว่า Al-Mt2 ส่งผลให้ AlMt1-L มีค่าร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดและปริมาณการดูดซับ  $Cu^{2+}$  ที่เวลาใด ๆ สูงกว่า AlMt2-L



ภาพที่ 6 ปริมาณการดูดซับ  $\text{Cu}^{2+}$  ที่เวลาใด ๆ

### สรุปและอภิปรายผล

เมื่อเผา Mt-K10 ด้วยเตาเผาไฟฟ้าที่จัดสร้างขึ้นด้วยต้นทุนการผลิตที่ต่ำ คือ 50,000 บาท ต่อเครื่อง พบว่าอะลูมิเนียมฟिलเลอร์ถูกแทรกเข้าไปในโครงสร้างของแร่ดินเหนียวได้อย่างสมบูรณ์ โดยพิจารณาจากหมู่ฟังก์ชัน OH ที่มีความเข้มของสัญญาณลดลง และหมู่ฟังก์ชัน Si-O-Si ที่มีการเลื่อนตำแหน่งและมีความเข้มลดลง นอกจากนี้ Al-Mt1 ให้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนรวม เท่ากับ 217.3625 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.3167 มิลลิลิตรต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งมากกว่า Al-Mt2 ที่มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ 203.2639 ตารางเมตรต่อกรัม และปริมาตรรูพรุนรวม 0.3126 มิลลิลิตรต่อกรัม เมื่อนำไปอะลูมิเนียมฟिलเลอร์มอนต์โมริลโลไนต์ที่ผ่านการเผาไปแทรกด้วยโมเลกุล L พบว่า AIMt1-L มีประสิทธิภาพการกำจัดไอออน  $\text{Cu}^{2+}$  สูงกว่า AIMt2-L ประมาณ 4 เท่า

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา พิษณุโลก ที่ให้การสนับสนุนด้านงบประมาณในการออกแบบและสร้างเตาเผาไฟฟ้า และภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่สนับสนุนเครื่องมือในการวิเคราะห์โครงสร้างของแร่ดินเหนียว

### เอกสารอ้างอิง

- [1] Wattanarangsana, A. (2012). *Documentation for workshop training course: Fire Technique and Maintenance*. Supplementary Occupations and Related Techniques Center Project of Her Majesty Queen Sirikit of Thailand, Community Technology Bureau, Department of Science Service, Ministry of Science and Technology.
- [2] Phromphuek, T. (1982). *Furnace and Firing*. Bangkok: Supervisory unit, Department of Teacher Training.
- [3] Leksawat, S. (2005). *Pottery: Elemental Design and Practice*. Bangkok: Chulalongkorn University Press.

- [4] Alibaba. (2018). *Electric Kiln*. Retrived January 7, 2019, from [https://www.alibaba.com/trade/search?fsb=y&IndexArea=product\\_en&CatId=&SearchText=electric+kiln&viewtype](https://www.alibaba.com/trade/search?fsb=y&IndexArea=product_en&CatId=&SearchText=electric+kiln&viewtype)
- [5] Jeon, E.; Ryu, S.; Park, S.; Wang, L.; Tsang, D.C.W., & Baek, K. (2018). Enhanced Adsorption of Arsenic onto Alum Sludge Modified by Calcination. *Journal of Cleaner Production*, 176, 54-62.
- [6] Kim, B.K.; Lee, D.Y.; Gwak, G.H.; Han, Y.S., & Oh, J.M. (2019). Zn-Fe Mixed Metal Oxides from Metal Hydroxide Precursor: Effect of Calcination Temperature on Phase Evolution, Porosity, and Catalytic Acidity. *Journal of Solid State Chemistry*, 269, 454–458.
- [7] Fan, H.; Zhou, L.; Jiang, X.; Huang, Q., & Lang, W. (2014). Adsorption of  $\text{Cu}^{2+}$  and Methylene Blue on Dodecyl Sulfobetaine Surfactant-modified Montmorillonite. *Applied Clay Science*, 95, 150-158.
- [8] Li, J.; Jiang, B.; Liu, Y.; Qiu, C.; Hu, J.; Qian, G.; Guo, W., & Ngo, H. (2017). Preparation and Adsorption Properties of Magnetic Chitosan Composite Adsorbent for  $\text{Cu}^{2+}$  Removal. *Journal of Cleaner Production*, 158, 51-58.
- [9] Thongkum, D.; Punaray, J.; Sanguankul, W.; Ratchakom, V., & Kumplong, P. (2015). Alkylamine Anthraquinone Chemical Sensors to Detect Nickel and Copper Ions. *Srinakharinwirot Science Journal*, 31(1), 51-64.
- [10] Kaur, N., & Kumar, S. (2008). A Differential Receptor for Selective and Quantitative Multi-ion Analysis for  $\text{Co}^{2+}$  and  $\text{Ni}^{2+}/\text{Cu}^{2+}$ . *Tetrahedron Letters*, 49, 5067-5069.
- [11] Pereza, R.; Molinab, I.; Lopeza, J.; Jalil, R.; Sapagc, K.; Sapagc, E., & Castellona, R. (2012). Al-pillared Montmorillonite as a Support for Catalysts Based on Ruthenium Sulfide in HDS Reactions. *Catalysis Today*, 187, 88-96.
- [12] Molu B.Z., & Yurdakoc, K. (2010). Preparation and Characterization of Aluminum Pillared K10 and KSF for Adsorption of Trimethoprim. *Microporous and Mesoporous Materials*, 127, 50-60.
- [13] Yu, R.; Wang, S.; Wang, D.; Ke, J.; Xing, X.; Kumada, N., & Kinomura, N. (2008). Removal of  $\text{Cd}^{2+}$  from Aqueous Solution with Carbon Modified Aluminum-pillared Montmorillonite. *Catalysis Today*, 139, 135-139.
- [14] Achma, B.; Ghorbel, A.; Dafinov, A., & Medina, F. (2012). Synthesis of Stable Cu-supported Pillared Clays for Wettyros Oloxidation with  $\text{H}_2\text{O}_2$ . *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 73, 1524-1529.
- [15] Qin, Z.; Yuan, P.; Zhu, J.; He, H.; Liu, L., & Yang, S. (2010). Influences of Thermal Pretreatment Temperature and Solvent on the Organosilane Modification of  $\text{Al}_{13}$ -intercalated/Al-pillared Montmorillonite. *Applied Clay Science*, 50, 546-553.
- [16] Datta, D.; Uslu, H., & Kumar, S. (2015). Adsorptive Separation of  $\text{Cu}^{2+}$  from an Aqueous Solution Using Trioctylamine Supported Montmorillonite. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 60, 3193-3200.

- [17] Gao, H.; Zhao, B.; Luo, J.; Wub, D.; Ye, W.; Wang, Q., & Zhang, X. (2014). Fe–Ni–Al Pillared Montmorillonite as a Heterogeneous Catalyst for the Catalytic Wet Peroxide Oxidation Degradation of Orange Acid II: Preparation Condition and Properties Study. *Microporous and Mesoporous Materials*, 196, 208-215.
- [18] Wang, G.; Hua, Y.; Suc, X.; Komarneni, S.; Ma, S., & Wang, Y. (2016). Cr(VI) Adsorption by Montmorillonite Nanocomposites. *Applied Clay Science*, 124-125, 111-118.
- [19] Gao, Y.; Li, W.; Sun, H.; Zheng, Z.; Cui, X.; Wang, H., & Meng, F. (2014). A Facile in situ Pillaring method-the Synthesis of Al-pillared Montmorillonite. *Applied Clay Science*, 88-89, 228-232.
- [20] Liu, C.; Cai, W., & Liu, L. (2018). Hydrothermal Carbonization Synthesis of Al-pillared Montmorillonite@carbon Composites as High Performing Toluene Adsorbents. *Applied Clay Science*, 162, 113-120.