

# การบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียโดยการประยุกต์ใช้พอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุล Heavy Metal Treatment in Wastewater by Applying Molecularly Imprinted Polymer

ศศิธร ธิลปภิรมย์สุข<sup>1\*</sup> อมรรัตน์ รูปทอง<sup>1</sup> และ วีรนุช คฤหานนท์<sup>2</sup>

Sopittaporn Sillapapiromsuk<sup>1\*</sup> Amornrat Roobthong<sup>1</sup> and Weeranuch Karuehanon<sup>2</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

<sup>2</sup>สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลที่มีความจำเพาะเจาะจงกับตะกั่วในการดูดซับตะกั่วและแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำทิ้งของโรงงานเซรามิก โดยทำการทดสอบประสิทธิภาพของพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลในระบบบำบัดน้ำเสียจำลองจำนวน 4 ระบบ ผลการทดสอบประสิทธิภาพของพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลในการบำบัดตะกั่วและแคดเมียม ความเข้มข้น 5 พีพีเอ็ม ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้เวลาในการดักจับตะกั่วและแคดเมียมเป็นเวลา 3 ชั่วโมงในระบบบำบัดน้ำเสีย 4 ระบบ พบว่าระบบที่ 2 มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 41% ส่วนผลการทดสอบประสิทธิภาพของพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลในการบำบัดตะกั่วในน้ำเสียจากโรงงานเซรามิกเฉลี่ยทั้ง 4 ระบบ พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันโดยมีค่าอยู่ในช่วง 51-57% นอกจากนี้ยังพบว่าการกวนและไม่กวนน้ำเสียสังเคราะห์ที่ทำการทดสอบที่ความเข้มข้น 5 พีพีเอ็ม จาก 4 สภาวะการทดลอง มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดตะกั่วและแคดเมียม โดยการกวนน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าประสิทธิภาพการบำบัดอยู่ในช่วง 5-33% และหากไม่มีการกวน ประสิทธิภาพการบำบัดมีค่าอยู่ในช่วง 2-24% ซึ่งการกวนน้ำเสียสังเคราะห์ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดของพอลิเมอร์ดีกว่าการไม่กวนในทั้ง 4 สภาวะการทดลอง

**คำสำคัญ:** การบำบัดโลหะหนัก พอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุล ตะกั่ว

### Abstract

This study examined the use of a Pb ion-imprinted polymer in the absorption of Pb and Cd in wastewater coming from synthetic processes and from ceramics factories. Four simulated wastewater treatments were constructed to test the binding rate of the molecularly-imprinted polymer. A 5 ppm concentration of synthetic wastewater gave an optimum adsorption time of 3 hours in the 4 simulated wastewater treatments. The results revealed that the percent bound was highest (41%) in the second simulated wastewater treatment. The efficiency of the molecularly-imprinted polymer in adsorbing Pb in ceramic factory wastewater showed that the percent bound in the 4 simulated wastewater treatments were all similar, and lay in the range of 51-57%. The effect of stirring the synthetic wastewater was examined in 4 experimental conditions. When the wastewater was stirred, the percent bound ranged from 5-33%, while in the no-stirring treatment, this ranged from 2-24% and so the adsorption efficiency of the molecularly-imprinted polymer was higher in the stirring synthetic wastewater treatment in all 4 experimental conditions.

**Keywords:** heavy metal treatment, molecularly Imprinted polymer, lead

## บทนำ

การพัฒนาโครงสร้างทางเศรษฐกิจของประเทศไทยตามแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ได้มีการมุ่งเน้นส่งเสริมการพัฒนาอุตสาหกรรมภายในประเทศเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้โรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ เกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก การเพิ่มขึ้นของโรงงานอุตสาหกรรมแสดงให้เห็นถึงการพัฒนาโครงสร้างทางเศรษฐกิจที่เป็นรูปธรรม แต่ผลกระทบที่ตามมาจากการพัฒนาของภาคอุตสาหกรรมคือแหล่งกำเนิดทางมลพิษที่เพิ่มมากขึ้นไม่ว่าจะเป็นมลพิษทางน้ำ มลพิษทางอากาศ มลพิษทางเสียง มลพิษที่เกิดจากของเสียอุตสาหกรรม (คงยุติ, 2551)

อุตสาหกรรมเซรามิก เป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีความสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจของประเทศไทย ซึ่งจัดเป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานที่เชื่อมโยงกับอุตสาหกรรมอื่นๆ อย่างกว้างขวางและยังมีการใช้วัตถุดิบภายในประเทศเป็นส่วนใหญ่ โดยทั่วไปแล้วอุตสาหกรรมเซรามิกของประเทศไทยส่วนใหญ่ตั้งอยู่ในพื้นที่ภาคเหนือ โดยเฉพาะในจังหวัดลำปาง เนื่องจากจังหวัดลำปางมีความอุดมสมบูรณ์ของทรัพยากรแร่ดินขาวซึ่งถือเป็นส่วนประกอบสำคัญในการทำเซรามิกและเป็นแหล่งแร่ดินขาวที่มีมากที่สุด จึงเป็นแหล่งผลิตเซรามิกที่สำคัญของประเทศไทย และในพื้นที่ภาคเหนือยังมีค่าจ้างแรงงานที่ไม่สูงมากนัก แรงงานมีทักษะฝีมือในงานหัตถกรรมที่ดีและมีการคมนาคมขนส่งที่สะดวก นอกจากนี้ยังมีศูนย์พัฒนาอุตสาหกรรมเซรามิกที่ให้คำแนะนำในการพัฒนาผลิตภัณฑ์และส่งเสริมการทำเซรามิก (สถาบันวิจัยสังคม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2545) ซึ่งในกระบวนการผลิตเซรามิกนั้นมีการใช้สารเคมีที่มีส่วนผสมของโลหะหนัก เช่น ตะกั่ว จึงอาจเป็นที่มาของการปนเปื้อนสารตะกั่วในน้ำทิ้งจากโรงงานเซรามิก กฎหมายจึงกำหนดให้ต้องมีการบำบัดน้ำเสียให้เป็นไปตามมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม โดยทั่วไปการบำบัดน้ำเสียมีหลายวิธี แต่การประยุกต์ใช้พอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุล (Molecularly Imprinted Polymers: MIPs) ในการบำบัดน้ำเสียเป็นวิธีหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลมีความจำเพาะเจาะจงต่อสารที่ต้องการบำบัดและสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

เทคนิคการลอกแบบโมเลกุล เป็นเทคนิคหนึ่งในการสร้างตัวรับเฉพาะสังเคราะห์ภายในเมทริกซ์พอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างซับซ้อน โดยจะได้พอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลที่มีคุณสมบัติทางวัสดุศาสตร์ที่ดีเยี่ยมหลายอย่าง โดยเฉพาะคุณสมบัติความจำเพาะกับสารที่หลากหลาย พอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลจะถูกสังเคราะห์ขึ้นจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันผ่านกลไกแบบอนุโมลิสระในระหว่งมอนอเมอร์หมู่ฟังก์ชันและครอสลิงก์ในโมเลกุลต้นแบบที่ละลายอยู่ในตัวทำละลาย โดยมีการสังเคราะห์พอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุล 2 แบบ คือ การทำให้โมเลกุลต้นแบบเกิดปฏิกิริยาแบบนอน-โควาเลนต์และแบบโควาเลนต์กับหมู่ฟังก์ชันของมอนอเมอร์ที่เหมาะสม (Simon et al., 2007) และเนื่องจากคุณสมบัติเด่นของพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลคือ ความจำเพาะเจาะจงต่อสารต้นแบบหรือสารที่ต้องการวิเคราะห์ ทำให้พอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลเป็นวัสดุหรือนวัตกรรมที่น่าสนใจและสามารถนำไปใช้งานที่หลากหลาย ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงมีความสนใจในการนำพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลมาประยุกต์ใช้ในระบบบำบัดน้ำเสียจำลองรูปแบบต่างๆ เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดตะกั่วและแคดเมียมในน้ำเสียของพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุล

## วัตถุประสงค์ในการศึกษา

1. เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของระบบบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียโดยใช้พอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลที่มีความจำเพาะเจาะจงกับตะกั่วในการดูดซับตะกั่วและแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมเซรามิก
2. เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลที่มีความจำเพาะเจาะจงกับตะกั่วในระบบการกวนและไม่กวนน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วและแคดเมียม

## วิธีดำเนินการวิจัย

### 1. การหาสภาวะที่เหมาะสมในการทดสอบประสิทธิภาพของพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุล ที่มีความจำเพาะเจาะจงกับตะกั่ว

ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลในการดักจับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ของสารละลายตะกั่วที่มีความเข้มข้น 1, 5, 10, 50 และ 100 พีพีเอ็ม โดยนำพอลิเมอร์ปริมาณ 5 มิลลิกรัม แช่ในน้ำเสียสังเคราะห์เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการดักจับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ของสารละลายตะกั่วที่มีความเข้มข้น 5 พีพีเอ็ม โดยนำพอลิเมอร์ปริมาณ 5 มิลลิกรัม แช่ในน้ำเสียสังเคราะห์เป็นเวลา 15, 30 นาที และ 1, 3, 5, 9 และ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำน้ำเสียสังเคราะห์ไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของตะกั่วด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer; AAS) และคำนวณหาค่าประสิทธิภาพในการบำบัดในหน่วยเปอร์เซ็นต์ (%Bound) ดังสมการ (Pattarawarapan et al., 2008)

$$\%Bound = \left( \frac{A - B}{A} \right) \times 100$$

เมื่อ A คือ ความเข้มข้นของสารละลายก่อนการจับกับพอลิเมอร์

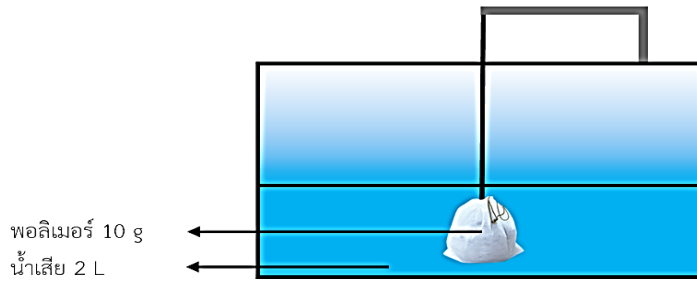
B คือ ความเข้มข้นของสารละลายหลังการจับกับพอลิเมอร์

### 2. แบบจำลองระบบบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียโดยใช้พอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุล

ทำการสร้างระบบบำบัดโลหะหนักจำลอง จำนวน 5 ระบบ เพื่อใช้ทดสอบประสิทธิภาพของพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลที่มีความจำเพาะเจาะจงกับตะกั่วในการดักจับตะกั่วและแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจากโรงงานเซรามิก ซึ่งมีการนำพอลิเมอร์ที่ใช้ในการบำบัดแล้วมาทดสอบการใช้ซ้ำจำนวน 2 ครั้งด้วย โดยผ่านกระบวนการล้างก่อนนำไปใช้

#### 2.1 แบบจำลองระบบบำบัดโลหะหนักระบบที่ 1

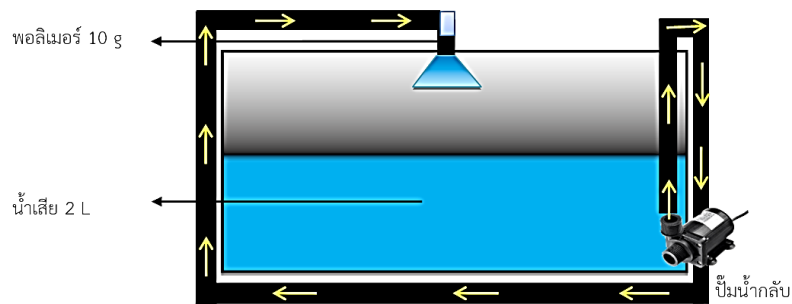
นำพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลที่มีความจำเพาะเจาะจงกับตะกั่ว ปริมาณ 10 กรัม ใส่ในถุงผ้า แล้วนำไปแขวนในอ่างทดลองที่มีน้ำเสีย ปริมาตร 2 ลิตร จากนั้นทิ้งไว้เพื่อให้พอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลจับกับโลหะหนัก (ตะกั่วและแคดเมียม) ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แบบจำลองระบบบำบัดโลหะหนักระบบที่ 1

2.2 แบบจำลองระบบบำบัดโลหะหนักระบบที่ 2

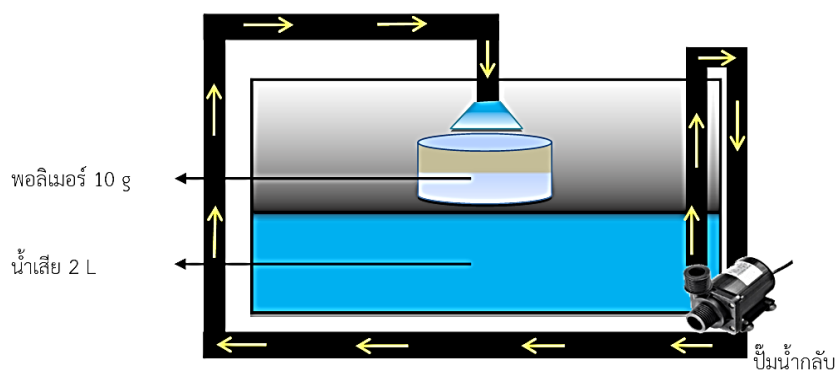
นำพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลที่มีความจำเพาะเจาะจงกับตะกั่ว ปริมาณ 10 กรัม ใส่ในท่อส่งน้ำ โดยให้น้ำเสียปริมาตร 2 ลิตร ไหลผ่านพอลิเมอร์ในท่อ จากนั้นใช้ปั้มนวดน้ำเสียนกลับไปเพื่อให้ไหลผ่านพอลิเมอร์ซ้ำต่อไปเรื่อยๆ ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 แบบจำลองระบบบำบัดโลหะหนักระบบที่ 2

2.3 แบบจำลองระบบบำบัดโลหะหนักระบบที่ 3

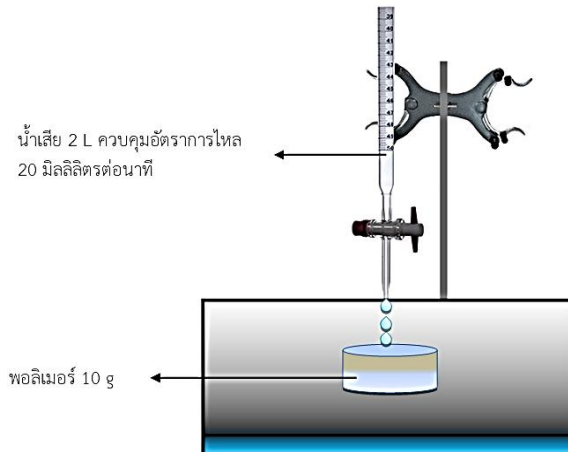
นำพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลที่มีความจำเพาะเจาะจงกับตะกั่ว ปริมาณ 10 กรัม มาแขวนไว้ตรงกลางของอ่างทดลอง โดยให้น้ำเสียปริมาตร 2 ลิตร ไหลผ่านพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุล จากนั้นใช้ปั้มนวดน้ำเสียนกลับไปเพื่อให้ไหลผ่านพอลิเมอร์ซ้ำต่อไปเรื่อยๆ ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 แบบจำลองระบบบำบัดโลหะหนักระบบที่ 3

#### 2.4 แบบจำลองระบบบำบัดโลหะหนักระบบที่ 4

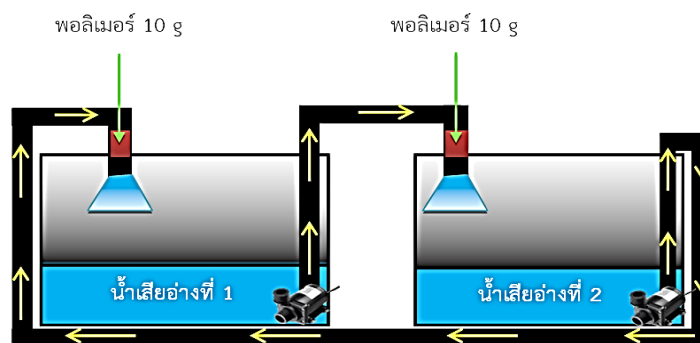
นำพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลที่มีความจำเพาะเจาะจงกับตะกั่ว ปริมาณ 10 กรัม มาแขวนไว้ตรงกลางของอ่างทดลอง จากนั้นหยดน้ำเสียปริมาตร 2 ลิตร โดยควบคุมอัตราการไหลของน้ำเสียที่ 20 มิลลิลิตรต่อนาที เพื่อให้พอลิเมอร์จับกับโลหะหนัก ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 แบบจำลองระบบบำบัดโลหะหนักระบบที่ 4

#### 2.5 แบบจำลองระบบบำบัดโลหะหนักระบบที่ 5

นำพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลที่มีความจำเพาะเจาะจงกับตะกั่ว มาใส่ในท่อน้ำที่ 1 และท่อที่ 2 ท่อละ 10 กรัม แล้วเทน้ำเสียปริมาตร 2 ลิตร ผ่านพอลิเมอร์ในท่อที่ 1 ไหลลงสู่อ่างที่ 1 จากนั้นใช้ปั๊มดูดน้ำเสียจากอ่างที่ 1 ให้ไหลผ่านพอลิเมอร์ในท่อที่ 2 น้ำเสียจะไหลลงสู่อ่างที่ 2 และใช้ปั๊มดูดน้ำเสียวน กลับไปเพื่อให้ไหลผ่านพอลิเมอร์ซ้ำต่อไปเรื่อยๆ โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียในอ่างที่ 2 ไปวิเคราะห์ ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 แบบจำลองระบบบำบัดโลหะหนักระบบที่ 5

ในงานวิจัยนี้จะทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบบำบัดโลหะหนัก จำนวน 4 ระบบ (ระบบที่ 1-4) โดยใช้พอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลที่มีความจำเพาะเจาะจงกับตะกั่วในการดูดซับตะกั่วและแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมเซรามิก ปริมาณ 10 กรัม สำหรับระบบที่ 5 สร้างขึ้นมาเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดโลหะหนักของพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุล เมื่อใช้ปริมาณพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นจากระบบที่ 1-4 จำนวน 2 เท่า คือใช้ปริมาณ 20 กรัม โดยให้น้ำเสียผ่านพอลิเมอร์ครั้งละ 10 กรัม จำนวน 2 ครั้ง

### 3. การหาประสิทธิภาพของพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุล โดยใช้ระบบการกวนและไม่กวนน้ำเสียสังเคราะห์

การทดสอบประสิทธิภาพของพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลที่มีความจำเพาะเจาะจงกับตะกั่ว โดยใช้ระบบการกวนและไม่กวนน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของตะกั่วและแคดเมียม 5 พีพีเอ็ม โดยใช้ปริมาณของพอลิเมอร์และปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ไม่เท่ากัน ซึ่งทำการทดสอบ 4 สภาวะ ดังนี้ 1) พอลิเมอร์ 0.5 กรัม ในน้ำเสียสังเคราะห์ 50 มิลลิลิตร 2) พอลิเมอร์ 1 กรัม ในน้ำเสียสังเคราะห์ 50 มิลลิลิตร 3) พอลิเมอร์ 10 กรัม ในน้ำเสียสังเคราะห์ 100 มิลลิลิตร และ 4) พอลิเมอร์ 10 กรัม ในน้ำเสียสังเคราะห์ 2,000 มิลลิลิตร โดยทำการทดสอบการกวนน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยแท่งแม่เหล็ก (magnetic bar) และไม่กวนน้ำเสียสังเคราะห์ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำน้ำเสียสังเคราะห์ไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของตะกั่วและแคดเมียมด้วยเครื่อง AAS เพื่อหาค่าประสิทธิภาพในการบำบัด

### 4. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การวิจัยครั้งนี้วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ทางสถิติสำเร็จรูป โดยข้อมูลที่ได้นำมาวิเคราะห์โดยใช้สถิติเชิงพรรณนาในการหาเปอร์เซ็นต์ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน การทดสอบสมมุติฐานการวิจัยใช้สถิติเชิงอนุมาน ได้แก่ ANOVA เป็นต้น

### ผลการวิจัยและอภิปรายผล

#### 1. สภาวะที่เหมาะสมในการทดสอบประสิทธิภาพของพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลที่มีความจำเพาะเจาะจงกับตะกั่ว

ประสิทธิภาพของพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลในการบำบัดตะกั่วในสารละลายเข้มข้น 1, 5, 10, 50 และ 100 พีพีเอ็ม แสดงดังตารางที่ 1 ซึ่งพบว่าหากความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์มีค่ามาก พอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดตะกั่วได้ดีมากขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากยิ่งความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วมีค่ามาก แสดงว่ามีเนื้อสาร (ตะกั่ว) อยู่มาก ในปริมาณของสารละลายที่เท่ากัน จึงทำให้พอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลมีโอกาสในการดักจับกับตะกั่วในสารละลายได้มาก นอกจากนี้จะสังเกตเห็นว่าพอลิเมอร์สามารถบำบัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ 5-100 พีพีเอ็ม ได้มากกว่า 85% (87-98%) ซึ่งจากค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม กำหนดให้มีค่าความเข้มข้นของตะกั่วไม่เกิน 0.2 พีพีเอ็ม (ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม, 2560) ประกอบกับค่าความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำทิ้งที่ปล่อยออกจากโรงงานอุตสาหกรรมเซรามิกขนาดกลางส่วนใหญ่มีค่าประมาณไม่เกิน 5 พีพีเอ็ม ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วที่ 5 พีพีเอ็ม เพื่อใช้ในการทดสอบระยะเวลาที่เหมาะสมของพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลในการจับกับตะกั่วต่อไป

#### ตารางที่ 1 ประสิทธิภาพของพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลในการบำบัดตะกั่วที่มีความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นของตะกั่ว (ppm)	ประสิทธิภาพในการบำบัด (%)
1	29
5	87
10	94
50	96
100	98

การศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการดักจับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ของสารละลายตะกั่วที่มีความเข้มข้น 5 พีพีเอ็ม โดยการนำพอลิเมอร์ปริมาณ 5 มิลลิกรัม แขน้ำในน้ำเสียสังเคราะห์เป็นเวลา 15, 30 นาที และ 1, 3, 5, 9 และ 24 ชั่วโมง แล้วนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของตะกั่วด้วยเครื่อง AAS และคำนวณหาค่าประสิทธิภาพในการบำบัด ได้ผลแสดงดังตารางที่ 2 ซึ่งพบว่าระยะเวลาในการดักจับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 15, 30 นาที และ 1, 3, 5, 9 และ 24 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพในการบำบัดได้มากกว่า 80% โดยมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 81-84% ซึ่งจะเห็นว่าพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลสามารถจับกับตะกั่วได้ดีตั้งแต่ 15 นาที แรก อย่างไรก็ตาม ณ เวลา 15 นาที เป็นเวลาที่น้อยเกินไปสำหรับการจับกันของพอลิเมอร์และตะกั่ว จึงอาจเป็นเพียงการจับกันอยู่บนพื้นผิวของพอลิเมอร์เท่านั้น และยังไม่สามารถเข้าไปจับอยู่ในช่องว่างของพอลิเมอร์ได้อย่างเฉพาะเจาะจง รวมถึงอาจยังไม่เข้าสู่ภาวะสมดุลที่จะทำให้มีผลต่อประสิทธิภาพของพอลิเมอร์ (วีรนุช และคณะ, 2559) ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงเลือกระยะเวลาในการทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดตะกั่วและแคดเมียมในการศึกษาขั้นต่อไปที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง ซึ่งเป็นเวลาที่เหมาะสมมากที่สุดที่พอลิเมอร์และตะกั่วสามารถจับกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

**ตารางที่ 2** ประสิทธิภาพในการบำบัดตะกั่ว ณ ระยะเวลาต่างๆ ในการดักจับตะกั่วของพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุล

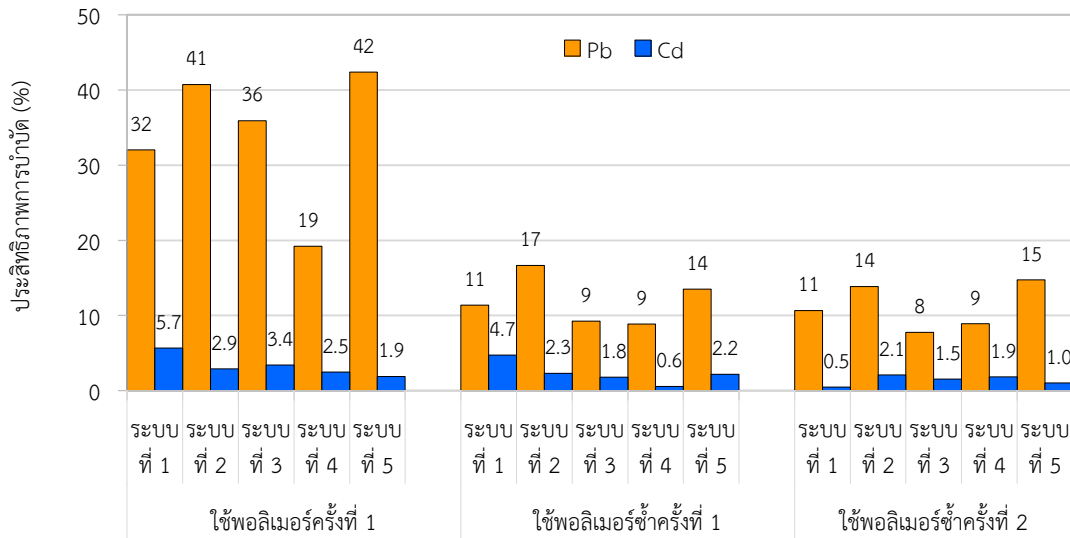
เวลาที่ใช้ในการดักจับตะกั่ว	ประสิทธิภาพในการบำบัด (%)
15 นาที	81
30 นาที	83
1 ชั่วโมง	81
3 ชั่วโมง	84
5 ชั่วโมง	83
9 ชั่วโมง	81
24 ชั่วโมง	82

## 2. ประสิทธิภาพของพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลที่มีความจำเพาะเจาะจงกับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วและแคดเมียมโดยใช้แบบจำลอง

การทดสอบประสิทธิภาพของพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลที่มีความจำเพาะเจาะจงกับตะกั่วในการดักจับตะกั่วและแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้แบบจำลอง 4 ระบบ แต่ละระบบใช้พอลิเมอร์ 10 กรัมต่อสารละลายตะกั่วและแคดเมียมที่มีความเข้มข้น 5 พีพีเอ็ม ปริมาตร 2 ลิตร แล้วตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างน้ำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของตะกั่วและแคดเมียมด้วยเครื่อง AAS ประสิทธิภาพการบำบัดตะกั่วและแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์เข้มข้น 5 พีพีเอ็ม ในแบบจำลองระบบบำบัดโลหะหนักทั้ง 4 ระบบ แสดงดังภาพที่ 6 พบว่าพอลิเมอร์ที่นำมาใช้ครั้งแรกหลังจากสังเคราะห์มีประสิทธิภาพการบำบัดตะกั่วดีที่สุด (19.21-40.72%) รองลงมาคือการใช้พอลิเมอร์ซ้ำครั้งที่ 1 (8.88-16.65%) และใช้ซ้ำครั้งที่ 2 (7.74-13.86%) ตามลำดับ โดยการใช้พอลิเมอร์ซ้ำครั้งที่ 1 และซ้ำครั้งที่ 2 ประสิทธิภาพการบำบัดตะกั่วไม่แตกต่างกันมาก นอกจากนี้จะเห็นว่าประสิทธิภาพการบำบัดตะกั่วของระบบบำบัดทั้ง 4 ระบบ เมื่อใช้พอลิเมอร์ครั้งที่ 1 ใช้พอลิเมอร์ซ้ำครั้งที่ 1 และใช้ซ้ำครั้งที่ 2 มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่า ระบบบำบัดระบบที่ 2 สามารถบำบัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ดีที่สุด อาจเนื่องมาจากพอลิเมอร์มีการสัมผัสกับสารละลาย 100% ประกอบกับมีการใช้ป้อนในการควบคุมการไหลของสารละลายให้สัมผัสกับพอลิเมอร์อย่างสม่ำเสมอ ทำให้ตะกั่วสามารถเข้าไปจับอยู่ในช่องว่างของพอลิเมอร์ได้อย่างเฉพาะเจาะจง ส่งผลให้พอลิเมอร์ในระบบที่ 2 มีประสิทธิภาพการบำบัดตะกั่วได้ดีที่สุด



สำหรับประสิทธิภาพของพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลที่มีความจำเพาะเจาะจงกับตะกั่วในการดักจับแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ทั้ง 4 ระบบพบว่า พอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลสามารถบำบัดแคดเมียมได้ แต่มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้อยมาก ซึ่งน้อยกว่าการบำบัดตะกั่วประมาณ 2-22 เท่า โดยในการใช้พอลิเมอร์ครั้งที่ 1 ใช้พอลิเมอร์ซ้ำครั้งที่ 1 และใช้พอลิเมอร์ซ้ำครั้งที่ 2 มีประสิทธิภาพในการบำบัดแคดเมียมได้ใกล้เคียงกัน ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 2.50-5.69%, 0.57-4.75% และ 0.48-2.12% ตามลำดับ



ภาพที่ 6 ประสิทธิภาพการบำบัดตะกั่วและแคดเมียมทั้ง 5 ระบบในน้ำเสียสังเคราะห์

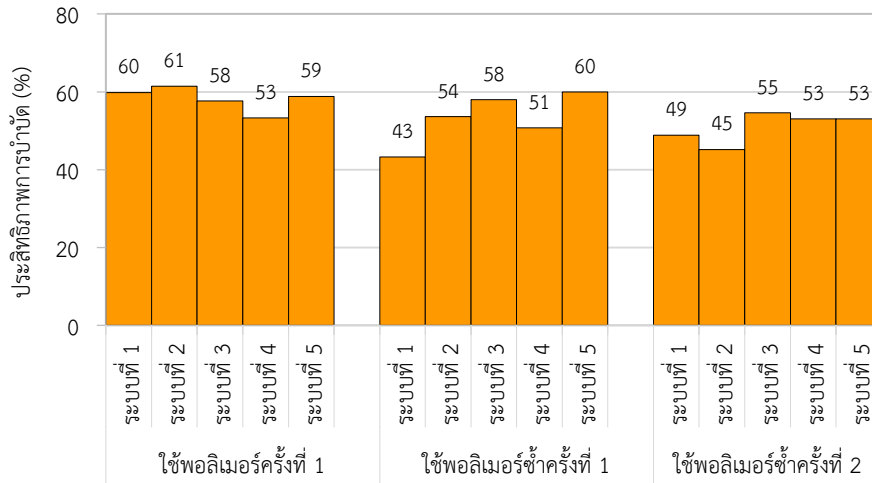
สำหรับประสิทธิภาพของพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลที่มีความจำเพาะเจาะจงกับตะกั่วในการดักจับตะกั่วและแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ในระบบที่ 5 ซึ่งใช้พอลิเมอร์ปริมาณ 20 กรัม มากกว่าระบบที่ 1-4 ที่ใช้พอลิเมอร์ปริมาณ 10 กรัม พบว่าในระบบที่ 5 ใช้ปริมาณพอลิเมอร์มากกว่าระบบที่ 1-4 ถึง 2 เท่า แต่ประสิทธิภาพของพอลิเมอร์ในการบำบัดตะกั่วและแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ในระบบที่ 5 มากกว่าประสิทธิภาพเฉลี่ยในระบบที่ 1-4 เพียง 0.5-1.4 เท่า เท่านั้น

### 3. ประสิทธิภาพของพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลที่มีความจำเพาะเจาะจงกับตะกั่วในน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมเซรามิกโดยใช้แบบจำลอง

ประสิทธิภาพของพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลในการบำบัดตะกั่วในน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมเซรามิกทั้ง 4 ระบบ แสดงดังภาพที่ 7 พบว่าการบำบัดตะกั่วของพอลิเมอร์ที่นำมาใช้ครั้งแรกหลังจากสังเคราะห์พอลิเมอร์ใช้ซ้ำครั้งที่ 1 และพอลิเมอร์ใช้ซ้ำครั้งที่ 2 มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกันทั้ง 5 ระบบ โดยมีค่าอยู่ในช่วง 53.34-61.47%, 43.30-57.98% และ 45.17-54.59% ตามลำดับ อาจกล่าวได้ว่าพอลิเมอร์มีประสิทธิภาพในการจับกับตะกั่วได้ระดับหนึ่ง และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อย่างน้อย 3 ครั้ง

สำหรับประสิทธิภาพของพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลที่มีความจำเพาะเจาะจงกับตะกั่วในการดักจับตะกั่วในน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมเซรามิกในระบบที่ 5 ซึ่งใช้พอลิเมอร์ปริมาณ 20 กรัม มากกว่าระบบที่ 1-4 ที่ใช้พอลิเมอร์ปริมาณ 10 กรัม พบว่าในระบบที่ 5 ใช้ปริมาณพอลิเมอร์มากกว่าระบบที่ 1-4 ถึง 2 เท่า แต่ประสิทธิภาพของพอลิเมอร์ในการบำบัดตะกั่วในน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมเซรามิกในระบบที่ 5 มากกว่าประสิทธิภาพเฉลี่ยในระบบที่ 1-4 เพียง 1.0-1.2 เท่า เท่านั้น

หากนำค่าประสิทธิภาพการบำบัดตะกั่วของทั้ง 5 ระบบ มาหาค่าเฉลี่ยพบว่ามีความอยู่ในช่วง 51-57% ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าประสิทธิภาพการบำบัดตะกั่วของทั้ง 5 ระบบไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ( $p \geq 0.05$ ) (ตารางที่ 3)



ภาพที่ 7 ประสิทธิภาพการบำบัดตะกั่วทั้ง 5 ระบบในน้ำทิ้งของโรงงานเซรามิก

ตารางที่ 3 ประสิทธิภาพการบำบัดตะกั่วเฉลี่ยทั้ง 5 ระบบในน้ำทิ้งของโรงงานเซรามิก

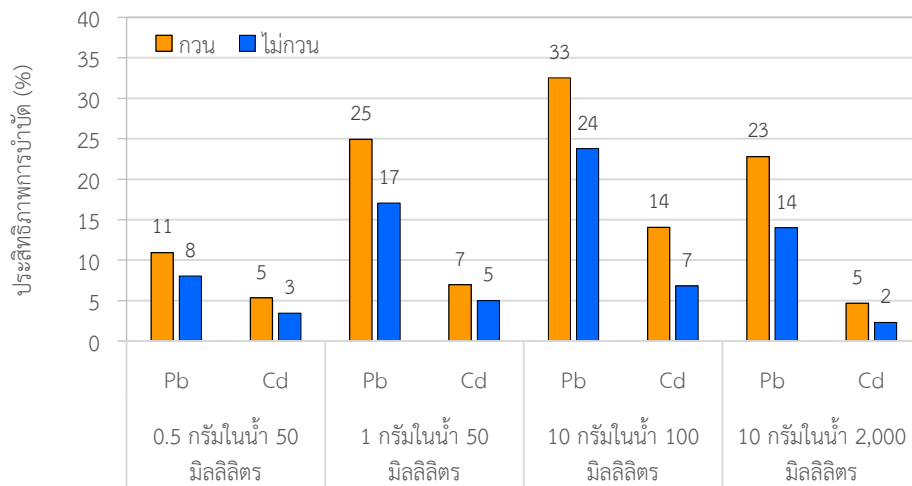
ระบบบำบัดโลหะหนัก	ประสิทธิภาพการบำบัดเฉลี่ย (%)
ระบบที่ 1	50.67 <sup>a</sup> ± 8.40
ระบบที่ 2	53.42 <sup>a</sup> ± 8.15
ระบบที่ 3	56.74 <sup>a</sup> ± 1.87
ระบบที่ 4	52.37 <sup>a</sup> ± 1.41
ระบบที่ 5	57.30 <sup>a</sup> ± 3.69

อย่างไรก็ตามจะสังเกตเห็นว่าประสิทธิภาพของพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลที่มีความจำเพาะเจาะจงกับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์และในน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมเซรามิกมีค่าแตกต่างกัน อาจเป็นเพราะความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์และในน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมเซรามิกมีค่าไม่เท่ากัน อีกทั้งในน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมเซรามิกมีสารปนเปื้อนอยู่มากกว่าในน้ำเสียสังเคราะห์ จึงส่งผลต่อประสิทธิภาพของพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลในการบำบัดตะกั่ว แต่จะพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดตะกั่วทั้ง 5 ระบบในน้ำเสียสังเคราะห์และในน้ำทิ้งของโรงงานเซรามิกส่วนใหญ่มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยเฉพาะในการใช้พอลิเมอร์ครั้งที่ 1 และใช้ซ้ำครั้งที่ 1

#### 4. ประสิทธิภาพของพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุล โดยใช้ระบบการกวนและไม่กวนน้ำเสียสังเคราะห์ ตะกั่วและแคดเมียม

ค่าประสิทธิภาพของพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลในการบำบัดตะกั่วและแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีตะกั่วและแคดเมียมเข้มข้น 5 พีพีเอ็ม โดยใช้ระบบการกวนและไม่กวนน้ำเสียสังเคราะห์ แสดงดังภาพที่ 8 พบว่าพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลที่มีความจำเพาะเจาะจงกับตะกั่วมีประสิทธิภาพในการบำบัดตะกั่วได้ดีกว่าแคดเมียมทั้งในระบบการกวนและไม่กวนน้ำเสียสังเคราะห์ใน 4 สภาวะการทดลอง และพบว่าการกวนและไม่กวนน้ำเสียสังเคราะห์มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดตะกั่วและแคดเมียม การกวนและไม่กวนน้ำเสียสังเคราะห์มีประสิทธิภาพในการบำบัดตะกั่วอยู่ในช่วง 10.93-32.51% และ 8.04-23.78% ตามลำดับ สำหรับ

ประสิทธิภาพการบำบัดแคดเมียม มีค่าอยู่ในช่วง 4.67-14.04% และ 2.31-6.82% ตามลำดับ โดยการกวนน้ำเสียสังเคราะห์มีประสิทธิภาพในการบำบัดตะกั่วและแคดเมียมมากกว่าการไม่กวนประมาณ 1-2 เท่า ซึ่งประสิทธิภาพในการบำบัดตะกั่วและแคดเมียมทั้งในระบบการกวนและไม่กวนน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่ามากที่สุด ในสถานะที่ 3 คือ พอลิเมอร์ 10 กรัม ในน้ำเสียสังเคราะห์ 100 มิลลิลิตร รองลงมาคือ สถานะที่ 2 คือ พอลิเมอร์ 1 กรัม ในน้ำเสียสังเคราะห์ 50 มิลลิลิตร ตามลำดับ อาจกล่าวได้ว่าการกวนน้ำเสียเป็นการเพิ่มโอกาสให้โลหะหนักได้เข้าไปจับกับพอลิเมอร์ ไม่เพียงแต่การจับอยู่บนพื้นผิวของพอลิเมอร์เท่านั้น ยังรวมถึงการเข้าไปจับในช่องว่างของพอลิเมอร์ได้อย่างเฉาะเจาะจงอีกด้วย ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพของพอลิเมอร์



ภาพที่ 8 ประสิทธิภาพการบำบัดตะกั่วและแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีตะกั่วและแคดเมียมเข้มข้น 5 พีพีเอ็ม โดยใช้ระบบการกวนและไม่กวนน้ำเสียสังเคราะห์

### สรุปผลการวิจัย

สถานะที่เหมาะสมในการทดสอบประสิทธิภาพของพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลที่มีความจำเพาะเจาะจงกับตะกั่วในงานวิจัยนี้คือ การนำพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลมาทดสอบในสารละลายตะกั่วและแคดเมียมเข้มข้น 5 พีพีเอ็ม เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง ในระบบบำบัดน้ำเสียจำลองที่แตกต่างกันจำนวน 4 ระบบ โดยเมื่อนำพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลที่มีความจำเพาะเจาะจงกับตะกั่วมาทดสอบประสิทธิภาพในน้ำเสียสังเคราะห์ของตะกั่วและแคดเมียมพบว่าพอลิเมอร์ที่นำมาใช้ครั้งแรกหลังจากสังเคราะห์มีประสิทธิภาพการบำบัดตะกั่วที่ดีที่สุด และมีประสิทธิภาพมากกว่าการใช้พอลิเมอร์ซ้ำครั้งที่ 1 และใช้ซ้ำครั้งที่ 2 แต่การใช้พอลิเมอร์ซ้ำครั้งที่ 1 และซ้ำครั้งที่ 2 มีประสิทธิภาพการบำบัดตะกั่วไม่แตกต่างกันมาก โดยระบบบำบัดน้ำเสียจำลองที่ออกแบบให้พอลิเมอร์มีการสัมผัสกับสารละลายมากและมีการใช้ปัมในการควบคุมอัตราการไหลของสารละลายให้สัมผัสกับพอลิเมอร์อย่างสม่ำเสมอ จะส่งผลให้พอลิเมอร์มีประสิทธิภาพในการบำบัดโลหะหนักได้ดี นอกจากนี้พอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลที่มีความจำเพาะเจาะจงกับตะกั่วสามารถบำบัดแคดเมียมได้ แต่มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้อยมาก ซึ่งน้อยกว่าการบำบัดตะกั่วประมาณ 2-22 เท่า สำหรับผลการศึกษาประสิทธิภาพของพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลที่มีความจำเพาะเจาะจงกับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์และในน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมเซรามิกพบว่ามีค่าแตกต่างกัน แต่มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยเฉพาะในการใช้

พอลิเมอร์ครั้งที่ 1 และใช้ซ้ำครั้งที่ 1 อีกทั้งยังสามารถสรุปได้ว่าการกวนน้ำเสียมีผลทำให้พอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลมีประสิทธิภาพในการดักจับตะกั่วและแคดเมียมในน้ำเสียได้ดีขึ้น โดยการกวนน้ำเสียทำให้ประสิทธิภาพของพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลในการบำบัดตะกั่วและแคดเมียมดีกว่าการไม่กวนประมาณ 1-2 เท่า

### กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปางที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง ที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือและอุปกรณ์วิทยาศาสตร์ รวมทั้งสถานที่ในการทำงานวิจัย จนทำให้งานวิจัยชิ้นนี้เสร็จสมบูรณ์ตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ทุกประการ

### เอกสารอ้างอิง

- คงยุติ ยอดพยุง. 2551. การจัดการของเสียอุตสาหกรรมของโรงงานอุตสาหกรรมเคมีในนิคมอุตสาหกรรมบางปู กรณีศึกษา บริษัทแอ็กโกร (ประเทศไทย) จำกัด. [สารนิพนธ์]. [กรุงเทพฯ]. สถาบันบัณฑิตพัฒนาบริหารศาสตร์.
- ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม. 2560. เรื่องกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงาน. เล่ม 134 ตอนพิเศษ 153 ง. ประกาศ ณ วันที่ 30 พฤษภาคม พ.ศ. 2560. [ออนไลน์]. แหล่งข้อมูล: <http://www.diw.go.th>. สืบค้นเมื่อวันที่ 27 กันยายน 2562.
- วีรนุช คฤหานนท์, อีราภรณ์ พรหมอนันต์, ดวงกมล หน้านวล และภัทรา ตาโว. 2559. การสังเคราะห์และหาประสิทธิภาพของพอลิเมอร์ลอกแบบที่จำเพาะเจาะจงต่อตะกั่ว. วารสารวิจัย คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง ฉบับที่ 1 ปีที่ 1 กรกฎาคม-ธันวาคม, 69-79.
- สถาบันวิจัยสังคม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2545. โครงการจัดทำแผนแม่บทอุตสาหกรรมรายสาขา (สาขาเซรามิกและแก้ว). กระทรวงอุตสาหกรรม: กรุงเทพฯ.
- Pattarawarapan, M., Komkham, S. and Karuehanon, W. 2008. Synthesis of nicotinamide-imprinted polymers and their binding performances in organic and aqueous media. E-Polymers 91, 1-9.
- Simon, R., Collins, M.E. and Spivak, D.A. 2007. Shape selectivity versus functional group pre-organization in molecularly imprinted polymers. Analytica Chimica Acta. 591: 7-16.