บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

สรุปผลการทดลองการดูดซับตะกั่ว โดยใช้ซิลิกาเจลเคลือบด้วยโพลีเอทธิลีนไอมีน มีดังนี้

1. การเตรียมตัวกลางโดยใช้ซิลิกาเจลเคลือบด้วยโพลีเอทธิลีนไอมีน สามารถเตรียมได้ด้วยวิธีอิมแพรกเนชั่นแบบแห้ง (Dry Impregnation) ซึ่งจะเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดของตัวกลางได้ดี พบว่าการเตรียมตัวกลางโดยวิธีนี้สามารถเคลือบโพลีเอทธิลีนเข้าไปภายในรูพรุนได้ดี โดยพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนจะลดลงชัดเจน นอกจากนี้ยังเป็นวิธีที่ประหยัดปริมาณสารที่เคลือบ

2. อัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการเคลือบโพลีเอทธิลีนไอมีนลงบนซิลิกาเจล คือ ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของสารละลายโพลีเอทธิลีนไอมีนในเมทานอล ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดของตัวกลางที่เตรียมได้ดีที่สุด เนื่องจากพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนไม่ลดน้อยลงเกินไป จนมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด

3. ผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับตะกั่ว ของซิลิกาเจลเคลือบด้วยโพลีเอทธิลีนไอมีนที่พีเอช 4-7 พบว่าพีเอชและความเข้มข้นเริ่มต้นมีผลต่อความสามารถในการดูดซับตะกั่ว โดยที่พีเอช 4 และพีเอช 5 ไม่สามารถดูดซับตะกั่วได้ แต่ที่พีเอช 6 พบว่าความสามารถในการดูดซับตะกั่วของซิลิกาเจลเคลือบด้วยโพลีเอทธิลีนไอมีน มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นจากซิลิกาเจลอย่างชัดเจน ส่วนที่พีเอช 7 มีความสามารถในการดูดซับมากขึ้นจากพีเอช 6 แต่พบว่าความสามารถในการดูดซับตะกั่วที่ความเข้มข้นต่ำ (น้อยกว่า 10 มิลลิกรัมต่อลิตร) ซิลิกาเจลเคลือบด้วยโพลีเอทธิลีนไอมีนมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับซิลิกาเจล ดังนั้นเมื่อพิจารณาถึงความสามารถในการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับซิลิกาเจลนั้น สรุปได้ว่าซิลิกาเจลเคลือบด้วยโพลีเอทธิลีนไอมีนสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในช่วงความเข้มข้นต่ำดีที่สุดที่พีเอชเท่ากับ 6 โดยที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถกำจัดตะกั่วได้ 6.72 มิลลิกรัมต่อตัวกลาง 1 กรัม คิดเป็นร้อยละ 59.18 ในขณะที่ซิลิกาเจลสามารถกำจัดตะกั่วได้ 3.02 มิลลิกรัมต่อตัวกลาง 1 กรัม คิดเป็นร้อยละ 26.71

สำหรับการวิเคราะห์ผลการทดลองที่เกิดขึ้น หากพิจารณาถึงรูปของตะกั่วในน้ำตามข้อมูลในภาคผนวก ซ พบว่าที่พีเอช 6 ตะกั่วจะอยู่ในรูป Pb^{2+} เกือบทั้งหมด (97.3%) ส่วนที่พีเอช 7 ตะกั่วจะมีรูปบวกลดลงโดยอยู่ในรูป Pb^{2+} (60.6%) รูป $PbCO_3$ (25.3%) รูป $Pb(OH)^+$ (11.8%) และ $Pb(HCO3)^+$ (2.3%) แต่อย่างไรก็ตามตะกั่วก็ยังอยู่ในรูปบวกเป็นส่วนใหญ่ และจากผลการทดลองพบว่าเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นเป็น 7 ตัวกลางทั้ง 2 ชนิดมีแนวโน้มของความสามารถในการกำจัดมากขึ้น

เช่นเดียวกัน ดังนั้นรูปของตะกั่วในน้ำไม่น่าจะมีผลต่อความสามารถของตัวกลาง น่าจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของตัวกลางมากกว่า คือเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นความเป็นบวกของตัวกลางจะลดลง ทำให้โอกาสที่จะเกิดการดูดซับมีมากขึ้น ส่วนจากผลการทดลองที่พบว่าในช่วงความเข้มข้นต่ำ (น้อยกว่า 10 มิลลิกรัมต่อลิตร) ซิลิกาเจลเคลือบด้วยโพลีเอทธิลีนไอมีนมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นจากซิลิกาเจลมากที่สุดที่พีเอช 6 ในขณะที่พีเอช 7 ทำให้ความสามารถในการดูดซับของตัวกลางเพิ่มขึ้นแต่กลับมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับซิลิกาเจล ทั้งนี้อาจเพราะสาเหตุมาจากผลของค่า pHpzc ของตัวกลาง ซึ่งจากรูปที่ 4.27 พบว่า ซิลิกาเจลเคลือบด้วยโพลีเอทธิลีนไอมีนมีค่า pHpzc ประมาณ 8.1 ส่วนซิลิกาเจลที่ใช้ทดลองครั้งนี้มีค่า pHpzc ประมาณ 6.4 แสดงว่าที่พีเอช 6 ซิลิกาเจลเคลือบด้วยโพลีเอทธิลีนไอมีนสามารถเพิ่มความสามารถดูดซับได้มากกว่าซิลิกาเจลทั้งที่ตัวกลางทั้ง 2 ชนิดยังคงมีลักษณะประจุบวกเช่นกัน ส่วนที่พีเอช 7 ตัวกลางทั้ง 2 มีความสามารถดูดซับเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีความเป็นประจุบวกลดลง จึงมีโอกาสเกิดปฏิกิริยาหรือดูดซับได้ดีขึ้น ซึ่งในขณะที่ซิลิกาเจลมีลักษณะประจุเปลี่ยนเป็นลบ แต่ซิลิกาเจลเคลือบด้วยโพลีเอทธิลีนไอมีนยังคงมีประจุเป็นบวกอยู่ จึงคาดว่าเป็นสาเหตุที่ทำให้ซิลิกาเจลมีความสามารถดูดซับได้ดีกว่าเดิมมาก จนมีค่าใกล้เคียงกับซิลิกาเจลเคลือบด้วยโพลีเอทธิลีนไอมีน

4. การศึกษาผลของความแรงไอออนต่อความสามารถในการดูดซับตะกั่ว ของซิลิกาเจลเคลือบด้วยโพลีเอทธิลีนไอมีน ในช่วงความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถทดลองได้ในแต่ละพีเอช พบว่าปริมาณไอออนในน้ำตั้งแต่ช่วง 0 - 0.1 โมลต่อลิตร ไม่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับตะกั่ว ซึ่งบ่งบอกถึงความสามารถเลือกจับโลหะตะกั่วของตัวกลาง เมื่อในน้ำมีไอออนของสารอื่นเช่น Na^+ จะไม่ทำให้ความสามารถกำจัดลดลง

5. การศึกษาความสามารถดูดซับตะกั่ว ของซิลิกาเจลเคลือบด้วยโพลีเอทธิลีนไอมีนโดยการทดลองแบบคอลัมน์ ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 6 โดยการใช้อัตราการไหล 5 มิลลิลิตรต่อนาที มีความสามารถในการดูดซับ 5.64 มิลลิกรัมต่อตัวกลาง 1 กรัม และการใช้อัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที มีความสามารถในการดูดซับ 5.41 มิลลิกรัมต่อตัวกลาง 1 กรัม แต่ความสามารถในการกำจัดก็มากกว่าซิลิกาเจลอย่างเด่นชัด คือที่อัตราการไหล 5 มิลลิลิตรต่อนาที ซิลิกาเจลมีความสามารถในการดูดซับ 1.91 มิลลิกรัมต่อตัวกลาง 1 กรัม และที่อัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที มีความสามารถในการดูดซับ 1.94 มิลลิกรัมต่อตัวกลาง 1 กรัม และเมื่อเปรียบเทียบความสามารถกับการทดลองแบบแบตช์พบว่ามีความสามารถต่ำกว่าแบบแบตช์

6. การหาปริมาณไนโตรเจนบนตัวกลาง พบว่าซิลิกาเจลมีปริมาณไนโตรเจน 1.15 มิลลิกรัม/กรัมตัวกลาง และการเคลือบซิลิกาเจลด้วยโพลีเอทธิลีนไอมีนในเมทานอล อัตราส่วนร้อยละ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีปริมาณไนโตรเจน 7.63 มิลลิกรัมต่อตัวกลาง 1 กรัม อัตราส่วนร้อยละ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีปริมาณไนโตรเจน 27.02 มิลลิกรัมต่อตัวกลาง 1 กรัม และอัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีปริมาณไนโตรเจน 36.48 มิลลิกรัมต่อตัวกลาง 1 กรัม และพบว่าซิลิกาเจลเคลือบด้วยโพลีเอทธิลีนไอมีนในเมทานอลอัตราส่วนร้อยละ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เมื่อผ่านการทดลองจากคอลัมน์อัตราการไหล 5 มิลลิลิตรต่อนาที มีปริมาณไนโตรเจน 28.46 มิลลิกรัมต่อตัวกลาง 1 กรัม และที่ผ่านการทดลองจากคอลัมน์อัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที มีปริมาณไนโตรเจน 27.36 มิลลิกรัมต่อตัวกลาง 1 กรัม ส่วนที่ผ่านการทดลองจากแบตช์มีปริมาณไนโตรเจน 24.86 มิลลิกรัมต่อตัวกลาง 1 กรัม ซึ่งจะพบว่าเมื่อทดลองแบบคอลัมน์ปริมาณไนโตรเจนยังคงมีค่าใกล้เคียงกับก่อนการทดลอง ส่วนเมื่อทดลองแบบแบตช์แล้วปริมาณไนโตรเจนจะลดลงจากเดิมประมาณร้อยละ 7.99

7. การวิเคราะห์หาตะกั่วบนซิลิกาเจลเคลือบด้วยโพลีเอทธิลีนไอมีนที่ทำการดูดซับตะกั่วแล้ว พบพีคของตะกั่วอย่างชัดเจนในกราฟการวิเคราะห์ของซิลิกาเจลที่เคลือบด้วยโพลีเอทธิลีนไอมีนที่ทำการดูดซับตะกั่ว ส่วนซิลิกาเจลที่เคลือบด้วยโพลีเอทธิลีนไอมีนที่ยังไม่ได้ใช้ทดลอง พบพีคของตะกั่วน้อยมากในกราฟการวิเคราะห์ แสดงว่าตะกั่วที่ถูกกำจัดดูดซับอยู่ในตัวกลาง แต่จากความสามารถของเครื่องมือจะไม่สามารถระบุได้ว่าตะกั่วที่พบอยู่ในรูปใด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.2 ความสำคัญและการนำไปใช้ประโยชน์

1. การเคลือบซิลิกาเจลด้วยโพลีเอทธิลีนไอมีน โดยวิธีการเตรียมด้วยวิธีอิมแพรกเนชั่นแบบแห้ง (Dry Impregnation) เป็นวิธีที่ใช้สารโพลีเอทธิลีนไอมีนในปริมาณน้อยกว่า และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้ดี เนื่องจากวิธีนี้ใช้หลักการเคลือบสารเข้าไปในรูพรุนโดยอาศัยสภาวะสุญญากาศ จึงสามารถเคลือบสารเข้าไปในรูพรุนของตัวกลางได้ดีมากกว่าการเคลือบโดยการกวนผสมตัวกลางในสารละลาย ส่วนการเชื่อมยึดจะส่งผลทำให้ตัวกลางมีประสิทธิภาพลดลงไปอีก และจะต้องศึกษาอัตราส่วนการเชื่อมยึดที่เหมาะสม จึงจะเตรียมตัวกลางได้อย่างมีประสิทธิภาพ ยิ่งต้องใช้กำจัดที่ความเข้มข้นต่ำจึงไม่เหมาะสม เพราะประสิทธิภาพจะด้อยลงกว่าเดิมไปอีก และจากที่ได้ทดลองเตรียมตัวกลางแบบที่มีขั้นตอนการถ่ายเทตัวกลางออกจากสารละลายเดิม เพื่อไปทำขั้นตอนต่อไป พบว่ามีปัญหาเกี่ยวกับการควบคุมปริมาณตัวกลางต่อสารละลาย เนื่องจากตัวกลางจะติดอยู่กับภาชนะเดิม ยากต่อการควบคุมอัตราส่วนตัวกลางกับสารละลายที่เคลือบหรือเชื่อมยึดให้คงที่ได้ ดังนั้น การเตรียมตัวกลางแบบวิธีอิมแพรกเนชั่นแบบแห้งจึงเป็นวิธีที่เหมาะสมในการที่จะนำมาเตรียมตัวกลางเพื่อใช้ในการทดลอง แต่อย่างไรก็ตามการไม่ได้เชื่อมยึดเมื่อใช้งานในสภาวะที่ไม่หมาะสม อาจทำให้สารละลายที่เคลือบไว้หลุดออกมาบ้าง การเตรียมตัวกลางด้วยวิธีนี้จึงเหมาะกับการกำจัดน้ำเสียที่มีสภาวะการใช้งานและพีเอชที่เหมาะสม ซึ่งสามารถใช้ได้ครั้งเดียวไม่สามารถทำการฟื้นฟูสภาพกลับมาใช้ได้อีก

2. ตัวกลางที่เตรียมได้มีความสามารถในการกำจัดตะกั่วความเข้มข้นต่ำได้ดีกว่าซิลิกาเจลที่พีเอชเท่ากับ 6 สามารถใช้กับน้ำเสียที่มีปริมาณไอออนของสารอื่นปนอยู่เช่น Na^+ ได้ดีโดยไม่ทำให้ประสิทธิภาพลดลงเนื่องจากพบว่าความแรงไอออนไม่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ แต่ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบผลกับงานวิจัยของ Ghoul, Bacquet และ Morcellet (2003) ซึ่งได้ทำการศึกษาความสามารถของซิลิกาเจลเคลือบด้วยโพลีเอทธิลีนไอมีนที่มีการเชื่อมยึด (Sil/PEI/GA0.5) เอาไว้ที่ความเข้มข้นสูงกว่าการทดลองนี้ (100 มิลลิกรัมต่อลิตร) ที่พีเอช 5-6 ดูดซับตะกั่วได้ประมาณ 20 มิลลิกรัมต่อกรัม เมื่อเทียบกับตัวกลางที่ไม่ได้เชื่อมยึดจะมีความสามารถน้อยกว่าประมาณร้อยละ 20-40 คือตัวกลางที่ไม่ได้เชื่อมยึดจะดูดซับได้ 25-33 มิลลิกรัมต่อกรัม ส่วนความสามารถในการดูดซับของตัวกลางที่เตรียมได้จากการทดลองนี้ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 6 ดูดซับได้ 22.22 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งยังคงต่ำกว่างานวิจัยอื่น อาจเป็นผลมาจากโอกาสที่ไอออนโลหะจะเข้าใกล้หรือสัมผัสกับตัวกลางมีน้อยกว่า ซึ่งโดยปกติมักพบว่าการกำจัดที่ความเข้มข้นสูงจะมีความสามารถในการกำจัดมากกว่าความเข้มข้นต่ำ

3. การนำไปประยุกต์ใช้งานจริงอาจไม่เหมาะสม เนื่องจากไม่คุ้มกับการลงทุนเตรียมตัวกลางเนื่องจากประสิทธิภาพไม่สูงเท่าที่ควรและมีข้อจำกัดในเรื่องพีเอชที่เหมาะสม หากใช้กับน้ำเสียจริงอาจมีปัญหายุ่งยากกับการปรับน้ำให้เหมาะกับความสามารถตัวกลาง

5.3 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาการดูดซับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ซิลิกาเจลเคลือบด้วยโพลีเอทธิลีนไอมีน มีข้อเสนอแนะดังนี้

1. ในการทดลองควรระมัดระวังกับขั้นตอนการเคลือบตัวกลางให้ดีที่สุด เพื่อให้ตัวกลางมีคุณสมบัติการเคลือบที่สม่ำเสมอและเป็นรูปแบบเดียวกันมากที่สุด เพื่อลดความคลาดเคลื่อนในการทดลอง

2. การเพิ่มปริมาณตัวกลางในการทดลองจะทำให้ผลการศึกษาความสามารถในการกำจัดที่ความเข้มข้นมากกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร เพิ่มขึ้น ซึ่งการศึกษานี้ไม่ได้ปรับเปลี่ยนปริมาณตัวกลาง เนื่องจากมีข้อจำกัดคือจะทำการทดลองที่ความเข้มข้นน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ จึงต้องใช้ตัวกลางมากที่สุดเท่ากับการทดลองในครั้งนี้ เพื่อให้สามารถวัดค่าความเข้มข้นคงเหลือได้

3. การหาวิธีประยุกต์การเตรียมตัวกลางแบบอิมแพรกเนชั่น เข้ากับกระบวนการเชื่อมยึด (Crosslink) เพื่อเชื่อมยึดโพลีเอทธิลีนไอมีนกับตัวกลางอาจเป็นแนวคิดที่จะทำให้ความสามารถในการกำจัดของน้ำเสียที่พีเอช 4 และ 5 มีประสิทธิภาพมากขึ้นเนื่องจากจะป้องกันการหลุดของสารที่เคลือบไว้ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อทำการเชื่อมยึดแล้วจะทำให้ขนาดรูพรุนของตัวกลางลดลงไปอีก ซึ่งจะส่งผลให้ความสามารถในการกำจัดลดต่ำลงไปอีก ดังนั้นอาจไม่เหมาะสมกับการศึกษาที่ความเข้มข้นต่ำ และเนื่องจากประสิทธิภาพการกำจัดที่ได้ศึกษามาไม่สูงเท่าที่ควรจึงไม่คุ้มค่าหรือไม่ควรที่จะการทำการศึกษาต่อ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย