# บทที่ 5
# สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

## สรุปผลการวิจัย

การวิจัยการบำบัดสารหนูที่ปนเปื้อนในน้ำด้วยดินขาวและแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ปรับสภาพด้วยวิธีทางกายภาพร่วมกับเคมี ผลการทดลองสรุปดังนี้

- การใช้ดินมอนต์มอริลโลไนต์ปรับสภาพทางกายภาพโดยการบด-เผาที่อุณหภูมิ100 องศาเซลเซียสและตามด้วยปรับสภาพทางเคมีด้วยโปรแตสเซียมไฮดรอกไซด์ 2 M (M-G-F100-R-KOH 2 M) มีประสิทธิภาพการดูดซับสารหนู (V) ได้สูงถึงร้อยละ 100 และเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ดินขาวปรับสภาพทางกายภาพโดยการบด-เผาที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสและตามด้วยปรับสภาพทางเคมีด้วยโปรแตสเซียมไฮดรอกไซด์ 2 M (K-G-F100–G-R-KOH) ประสิทธิภาพการดูดซับสารหนู (V) ได้เพียงร้อยละ 38.09

- ชนิดของสารเคมีที่ใช้ในการการปรับสภาพทางเคมีของดินขาวและแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยสารเคมีที่แตกต่างกันมีผลต่อการดูดซับสารหนู โดยผลการทดลองพบว่าการปรับสภาพทางเคมีด้วยโปรแตสเซียมไฮดรอกไซด์ 2 M จะทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับสารหนูสูงสุดเป็น 100% รองลงมาได้แก่ปรับสภาพทางเคมีด้วย แคลเซียมคลอไรด์ กรดไฮโรคลอริก และกรดซัลฟูริกตามลำดับ และความเข้มข้นของสารเคมีที่ใช้ก็มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารหนูในน้ำเช่นกัน โดยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของการปรับสภาพ จาก 0.2 เป็น 1 และ 2 M ของสารโปรแตสเซียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมคลอไรด์ ประสิทธิภาพการบำบัดสารหนูเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารเคมีที่ใช้ปรับสภาพเพิ่มขึ้นแต่สำหรับการปรับสภาพเคมีด้วยกรดซัลฟูริกและกรดไฮโดรคลอริกพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารเคมีในการปรับสภาพประสิทธิภาพการบำบัดสารหนูลดลง

- สภาวะที่เหมาะสมของการดูดซับสารหนูด้วยดินมอนต์มอริลโลไนต์ปรับสภาพทางกายภาพโดยการบด- เผาที่อุณหภูมิ100 องศาเซลเซียสและตามด้วยปรับสภาพทางเคมีด้วยโปรแตสเซียมไฮดรอกไซด์ 2 M (M-G-F100-R-KOH 2 M) และดินขาวปรับสภาพทางกายภาพโดยการบด-เผาที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสและตามด้วยปรับสภาพทางเคมีด้วยโปรแตสเซียมไฮดรอกไซด์ 2 M ($K\text{-}F_{100}$–G-R-KOH) เมื่อใช้ ปริมาณตัวดูดซับ (Dose) เท่ากับ 20 g/l ระยะเวลาการดูดซับเท่ากับ 24 ชั่วโมง และพีเอชของสารละลายสารหนู (pH solution) เท่ากับ 4 จะทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดสารหนูในน้ำสูงที่สุด

- การทดลองพบว่าสัดส่วนของ Al:Si ในตัวดูดซับมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับสารหนู (As (V) ในน้ำ โดยสัดส่วนที่ดีที่สุด Al:Si เท่ากับ 0.345 ที่ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดสารหนูในน้ำได้ 100 % เมื่อใช้ M-G-F100-R-KOH 2 M เป็นตัวดูดซับ และเมื่อ Al:Si 0.347 เมื่อใช้ M-G-F100-R-KOH 1 M เป็นตัวดูดซับได้ประสิทธิภาพการบำบัดสารหนูในน้ำ 70.41 % และจากผลการทดลองพบว่า Al:Si มีผลต่อประสิทธิภาพในตัวดูดซับสารหนูโดยถ้ามากกว่าหรือน้อยกว่า 0.345 ประสิทธิภาพการบำบัดสารหนู (V)ก็จะมีค่าต่ำลงจาก 100% แสดงว่าสัดส่วนของ Al:Si ในตัวดูดซับมีผลต่อประสิทธิภาพประสิทธิภาพการดูดซับสารหนู (As (V) ในน้ำนอกเหนือจากปริมาณรูพรุน (BET surface area) ของตัวดูดซับ

- ไอโซเทอมตามสมการแลงเมอร์ของการดูดซับสารหนู (V) ด้วยดินมอนต์มอริลโลไนต์มาปรับสภาพทางกายภาพด้วยการบด- เผาที่อุณหภูมิ100 องศาเซลเซียสและปรับสภาพทางเคมีด้วยโปรแตสเซียมไฮดรอกไซด์ 2 M (M-G-F100-R-KOH 2 M ) จะทำให้ปริมาณความจุของสารหนู (V) ($q_{max}$) มีค่าสูงสุดคือมีค่าเท่ากับ 1.330 มิลลิกรัมของ As (V) /กรัมของตัวดูดซับเมื่อเปรียบเทียบกับ ดินขาวปรับสภาพทางกายภาพด้วยการบด- เผาที่อุณหภูมิ100 องศาเซลเซียสและปรับสภาพทางเคมีด้วยโปรแตสเซียมไฮดรอกไซด์ 2 M (M-G-F100-R-KOH 2 M ) ใช้ดินมอนต์มอริลโลไนต์บด (M-G) และดินขาวบด (K-G)

- จากการศึกษาการแยกชะ (Desorption) พบว่าการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5 M ในการแยกชะสารหนูในแร่ดินมอนมอริลโลไนต์ชนิด M-G-F100–G-R-KOH 2 M และดินขาวชนิด K-G-F100-R-KOH 2 M พบว่ามีประสิทธิภาพการแยกชะสูงที่สุด เท่ากับร้อยละ 99.20±0.40 และ 98.72±0.45 ตามลำดับ และน้ำปราศจากอิออน (DI) ที่ใช้เป็นตัวแยกชะก็สามารถแยกชะสารหนูได้ร้อยละ 21.94±0.50 และ 21.94±0.50 สำหรับ M-G-F100-R-KOH 2 M และดินขาวชนิด K-G-F100-R-KOH 2 M ตามลำดับ แสดงกลไกการดูดซับสารหนู (V) ด้วยดินมอนต์มอริลโลไนต์ชนิด M-G-F100-R-KOH 2 M และดินขาวชนิด K-G-F100-R-KOH 2 M น่าจะเป็นการดูดซับประเภทกายภาพ-เคมี (physiochemical adsorption) โดยส่วนใหญ่จะเป็นการดูดซับทางเคมีและบางส่วนจะดูดซับทางกายภาพ โดยกลไกการดูดซับระหว่างสารหนู กับตัวดูดซับ น่าจะเป็น

$$Al_s\text{-}OH_2^+ + H_2AsO_4^- \longrightarrow Al_s\text{-}H_2AsO_4 + OH_2^+$$

- โดย $Al_s\text{-}OH_2^+$ คือ alumino site ของตัวดูดซับมีประจุเป็นบวก จึงสามารถจับ (Bond) กับสารหนูที่อยู่ในรูป $H_2AsO_4^-$

- ผลของ FTIR ของขาว ปรับสภาพทางกายภาพด้วยการบด- เผาที่อุณหภูมิ100 องศาเซลเซียสและปรับสภาพทางเคมีด้วยโปรแตสเซียมไฮดรอกไซด์ 2 M (M-G-F100–R-KOH 2 M) และ

ดินมอนต์มอริลโลไนต์ปรับสภาพทางกายภาพด้วยการบด- เผาที่อุณหภูมิ100 องศาเซลเซียสและปรับสภาพทางเคมีด้วยโปรแตสเซียมไฮดรอกไซด์ 2 M (K-G-F100-R-KOH 2 M) พบว่าหลังดูดซับสารหนู (V) พบว่า peak intensity ของหมู่ OH ที่เชื่อมกับ Al-OH ลดลงและพีคยังเคลื่อน (Shift) จากเดิมแสดงให้เห็นว่าหมู่ Al-OH น่าจะมีบทบาทในการดูดซับสารหนูในน้ำ

**อภิปรายผล**

- เมื่อดินขาวและดินมอนต์มอริลโลไนต์ปรับสภาพทางกายภาพด้วยการบด-เผาที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสและตามด้วยปรับสภาพทางเคมีปรับสภาพด้วยสารเคมีชนิดที่แตกต่างกันได้แก่ กรดซัลฟูริก ($H_2SO_4$) กรดไฮโดรคลอริก (HCl) แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($CaCl_2$) และโปรแตสเซียมไฮดรอกไซด์ ( KOH) ของดินขาวและแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ จะเห็นว่าเมื่อใช้กรดซัลฟูริก 2 M เป็นสารเคมีในการปรับสภาพ จะทำให้มีค่าพื้นที่ผิว (BET surface area) สูงที่สุดในดินขาวและแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ ทั้งนี้เนื่องจากการปรับสภาพดินขาวและแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยกรดที่แรงจะทำองค์ประกอบ $Al_2O_3$ ในโครงสร้างลดลง เนื่องจาก $Al_3^+$ ในชั้น Octahedral sheet ถูกชะ (Leaching) ออกจากโครงสร้าง จึงทำให้พื้นที่ผิวมีค่าเพิ่มขึ้น (Panda et al., 2010; Aung et al., 2014)

-การปรับสภาพทางเคมีด้วยโปรแตสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 Mของดินมอนต์มอริลโลไนต์ (M-G-F100-R-KOH 2 M) มีประสิทธิภาพการบำบัดสารหนูสูงถึง 100 % ถึงแม้ผลของค่าพื้นที่ผิว เพียง 132.37 $m^2/g$ ซึ่งมีพื้นที่ผิวค่าต่ำกว่าแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ปรับสภาพทางเคมีด้วยกรดซัลฟูริก 2 M (M-G-F100-R-$H_2SO_4$ 2 M) (215.17 $m^2/g$) แสดงให้เห็นว่าการดูดซับสารหนู ในน้ำไม่ได้ขึ้นกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเพียงอย่างเดียว แต่จะขึ้นกับสัดส่วนของปริมาณ $Al^{3+}$ ในองค์ประกอบของตัวดูดซับด้วย เนื่องจากปริมาณของอลูมิเนียมของตัวดูดซับมีผลต่อการดูดซับสารหนู (Shevade and Ford., 2004) โดยดินมอนริลโลไนต์ชนิด M-G-F100-R-$H_2SO_4$ 2 M จะมีปริมาณ $Al_2O_3$ น้อยกว่าแร่ดินมอนต์มอนริลโลไนต์ ชนิด M-G-F100-R-KOH 2 M เนื่องจาก $Al_3^+$ ถูกชะ (Leaching) ออกจากโครงสร้างจากการปรับสภาพด้วยกรด

- สัดส่วนที่ดีที่สุด Al:Si เท่ากับ 0.345 ที่ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดสารหนู (V)ในน้ำได้ 100 % และถ้ามากกว่าหรือน้อยกว่า 0.345 ประสิทธิภาพการบำบัดสารหนู (V)ก็จะมีค่าต่ำลง แสดงว่าสัดส่วนของ Al:Si ในตัวดูดซับมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับสารหนู (As (V) ในน้ำนอกเหนือจากปริมาณรูพรุน (BET Surface area) ของตัวดูดซับ ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Yazdani et al. (2016) ที่ศึกษาการใช้หินฟันม้า (Feldspars) ในการกำจัดสารหนู (V) ในน้ำ โดยใช้หินฟันม้า 2 ชนิด

หินฟันม้า Aและหินฟันม้าชนิด B ที่มีสัดส่วน Si:Al แตกต่างกัน คือ 3.33 และ 2.7ตามลำดับ และพบว่าประสิทธิการบำบัดสารหนู (V) ในน้ำของหินฟันม้าชนิด B มีสูงกว่าชนิด A เนื่องจาก มีปริมาณอลูมิเนียม (Al) ในองค์ประกอบสูงกว่า แต่อย่างไรก็ตามการทดลองของ Yazdani et al. (2016) ใช้สัดส่วนของ Si:Al ในการศึกษาผลของประสิทธิภาพการดูดซับสารหนูในน้ำขณะที่การทดลองนี้ใช้สัดส่วนของ Al:Si ในการดูผลของประสิทธิภาพการดูดซับสารหนู และShevade and Ford (2004) พบว่าปริมาณอลูมิเนียมในองค์ประกอบของตัวดูดซับมีผลต่อการดูดซับสารหนูในน้ำโดยเชื่อว่ามีกลไกการดูดซับระหว่าง Al กับสารหนู (V) ในน้ำเป็นดังนี้

$$Al_s\text{-}OH + H_2AsO_4^- \longrightarrow Al_s\text{-}H_2AsO_4 + OH^-$$

โดยที่ $Al_s$-OH คือพื้นที่ผิวของตัวดูดซับที่มีอลูมิเนียม (Aluminol site) และการดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีเมื่อ Alumino site มีประจุเป็นบวก (Protonation status)

**ข้อเสนอแนะ**

1. ควรมีการเพิ่มเติมการปรับสภาพทางเคมีด้วย $FeCl_3$ เพื่อเปรียบเทียบกับการปรับสภาพด้วยโปรแตสเซียมไฮดรอกไซด์