บทที่ 5

สรุป วิจารณ์ผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาประสิทธิภาพ การกำจัดสารหนูในน้ำสังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกตะกอนภายใต้สภาวะที่กำหนดขึ้นในห้องปฏิบัติการ สรุปได้ดังนี้

1. การศึกษาผลของพีเอชต่อการตกตะกอน ศึกษาการตกตะกอนในช่วงพีเอชที่อยู่ในเกณฑ์คุณภาพน้ำดื่มขององค์การอนามัยโลก (pH 6.5-8.5) พบว่าสารส้มและเฟอร์ริคคลอไรด์สามารถตกตะกอนได้ดี และที่พีเอชในช่วงดังกล่าวให้ผลการกำจัดสารหนูไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ $\alpha = 0.05$ ($p = 0.085, 0.453$ จากตาราง 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ) แต่เฟอร์ริคซัลเฟตจะตกตะกอนได้ดีในช่วงพีเอชต่ำกว่า คือ กำจัดสารหนูในช่วงพีเอช 6.5-8.0 ได้ดีกว่าพีเอช 8.5 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.001$ จากตาราง 4.3) จึงเหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์กับน้ำธรรมชาติ เพราะมีพีเอชใกล้เป็นกลาง

2. ศึกษาความเข้มข้นของโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมในการกำจัดสารหนู โดยศึกษาในช่วง 20 - 40 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เดซิเมตร ซึ่งไม่ทำให้พีเอชของน้ำเปลี่ยนแปลงมากนัก เมื่อน้ำค่าความเป็นด่าง (alkalinity) ไม่เกิน 200 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เดซิเมตร(ในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต) พบว่า เมื่อใช้สารส้ม และเฟอร์ริคซัลเฟตเป็นโคแอกกูแลนต์ ความเข้มข้นในช่วงที่ศึกษาสามารถกำจัดสารหนูได้ดี และไม่มีความแตกต่างของประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ $\alpha = 0.05$ ($p=0.586, 0.080$ จากตาราง 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ) แต่เมื่อใช้เฟอร์ริคคลอไรด์เป็นโคแอกกูแลนต์ ต้องใช้ในปริมาณมากกว่าโคแอกกูแลนต์อื่น เนื่องจากพบว่า ที่ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เดซิเมตร กำจัดสารหนูได้น้อยกว่าที่ความเข้มข้นอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p= 0.020$ จากตาราง 4.3)

3. การศึกษาเกี่ยวกับรูปของสารหนูที่สามารถกำจัดได้ ในน้ำธรรมชาติมักจะพบสารหนูอนินทรีย์ในรูปอาร์เซไนต์ (As(III)) และอาร์เซเนต (As(V)) ในอัตราส่วนที่ต่างกันไป และอัตราการเปลี่ยนแปลงจากอาร์เซไนต์เป็นอาร์เซเนต หรือในทางกลับกันเกิดขึ้นได้ช้ามาก ในการศึกษานี้จึงทดลองกำจัดทั้งสองรูป พบว่าเมื่อใช้สารส้มเป็นโคแอกกูแลนต์จะกำจัดอาร์เซเนตได้ดีกว่าอาร์เซไนต์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ α=0.05 ($p<0.001$ จากตาราง 4.11) แต่เมื่อใช้เฟอร์ริคคลอไรด์ และเฟอร์ริคซัลเฟตเป็นโคแอกกูแลนต์ จะกำจัดอาร์เซไนต์ได้ดีกว่าอาร์เซเนต ($p = 0.001$, $p<0.001$ จากตาราง 4.12 และ 4.13 ตามลำดับ)

4. การศึกษาเกี่ยวกับระดับความเข้มข้นของสารหนูที่สามารถกำจัดได้ ศึกษาตัวอย่างน้ำสังเคราะห์ที่มีระดับความเข้มข้นของสารหนู 3 ระดับ ในช่วงความเข้มข้นที่พบในน้ำธรรมชาติของประเทศไทย คือ อยู่ระหว่าง 0.01 - 5.00 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เดซิเมตร ปรากฏว่าสารส้มจะกำจัดสารหนูที่ความเข้มข้นปานกลาง (0.10-1.00 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เดซิเมตร) ได้ดีกว่าที่ความเข้มข้นอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ α=0.05 ($p<0.001$ จากตาราง 4.5) ส่วนเฟอร์ริคคลอไรด์ และเฟอร์รัคซัลเฟต จะกำจัดสารหนูที่ความเข้มข้นต่ำได้ดีกว่าความเข้มข้นสูง ($p<0.001$ จากตาราง 4.6 และ 4.7)

5. การศึกษาประสิทธิภาพของการเติมคลอรีนแล้วตกตะกอนด้วยโคแอกกูแลนต์ชนิดต่างๆ พบว่าคลอรีนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูได้ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $\alpha = 0.05$ เมื่อใช้โคแอกกูแลนต์ทั้งสามชนิด (สารส้ม เฟอร์ริคคลอไรด์ และเฟอร์ริคซัลเฟต). ($p<0.001$ จากตาราง 4.8.2, 4.11, 4.9.2, 4.12, 4.10.2 และ 4.13 ตามลำดับ)

6. การศึกษาชนิดของโคแอกกูแลนต์ เมื่อเปรียบเทียบการกำจัดอาร์เซไนต์โดยการตกตะกอนด้วย สารส้ม (พีเอช 8.0 ความเข้มข้นของสารส้ม 30 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เดซิเมตร) เฟอร์ริคคลอไรด์ (พีเอช 7.5 ความเข้มข้นของเฟอร์ริคคลอไรด์ 40 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เดซิเมตร) และเฟอร์ริคซัลเฟต (พีเอช 8.0 ความเข้มข้นของเฟอร์ริคซัลเฟต 40 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เดซิเมตร) พบว่า เฟอร์ริคซัลเฟตมีประสิทธิภาพในการกำจัดได้ดีกว่าสารส้ม และเฟอร์ริคคลอไรด์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $\alpha = 0.05$ ส่วนสารส้มและเฟอร์ริคคลอไรด์มีประสิทธิภาพในการกำจัดอาร์เซไนต์ไม่ต่างกัน ($p < 0.001$ จากตาราง 4.4)

วิจารณ์ผลการศึกษา

จากการศึกษาครั้งนี้ ได้ผลที่น่าสนใจ คือ การตกตะกอนโดยใช้เฟอร์ริคซัลเฟต และสารส้มเป็นโคแอกกูแลนต์สามารถกำจัดสารหนูได้ดีกว่าเฟอร์ริคคลอไรด์ และการเติมคลอรีนก่อนตกตะกอนจะเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูได้

ความสามารถของสารส้มและเฟอร์ริคซัลเฟต ในการกำจัดสารหนูในรูปอาร์เซไนต์และอาร์เซเนตได้ต่างกันคือสารส้มจะกำจัดอาร์เซเนตได้ดี ในหน้าที่เฟอร์ริคซัลเฟตจะกำจัดอาร์เซไนต์ได้ดีกว่าดีกว่า จึงนำไปประยุกต์ได้ตามความเหมาะสม คือ ถ้าน้ำดิบมีสารหนูในรูปอาร์เซไนต์ควรใช้เฟอร์ริคซัลเฟต แต่หากอยู่ในรูปอาร์เซเนตควรใช้สารส้ม หรือในสภาวะธรรมชาติมักพบสารหนูทั้งสองรูป อาจใช้สารทั้งสองชนิดเป็นโคแอกกูแลนต์ร่วมกันได้ เพราะสามารถตกตะกอนได้ในพีเอชใกล้เคียงกัน โดยต้องศึกษาถึงสัดส่วนที่เหมาะสมเพิ่มเติมอีกเล็กน้อย ก็สามารถกำจัดสารหนูที่ปนเปื้อนไม่มากนักได้ แต่หากมีการปนเปื้อนมากอาจใช้วิธีออกซิไดส์ด้วยคลอรีนก่อนตกตะกอนก็จะช่วยกำจัดสารหนูได้ดีขึ้น

เมื่อนำมาประยุกต์กับน้ำธรรมชาติที่มีสารหนูปนเปื้อนพบว่าการใช้เฟอร์ริคซัลเฟตเป็นโคแอกกูแลนต์ สามารถกำจัดสารหนูได้ มากกว่า 90 เปอร์เซนต์ และมีปริมาณสารหนูในน้ำคงเหลือ น้อยกว่า 0.05 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เดซิเมตร โดยไม่จำเป็นต้องเติมคลอรีนก่อน ส่วนสารส้มจะกำจัดสารหนูในน้ำได้ประมาณ 30 เปอร์เซนต์ และการเติมคลอรีนก่อนตกตะกอนด้วยสารส้ม จะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูได้

ในช่วงพีเอชที่ศึกษา (6.5 - 8.5) เฟอร์ริคซัลเฟตสามารถกำจัดอาร์เซไนต์ได้ดีกว่าสารส้ม เนื่องจากใช้ช่วงพีเอชดังกล่าว อาร์เซไนต์มักจะอยู่ในรูป $HAsO_2^-$ ซึ่งไม่แตกตัวออกไป ส่วนเฟอร์ริคซัลเฟตส่วนใหญ่จะแตกตัวอยู่ในรูป $Fe(OH)_4^-$ (Singley et al., 1971) ซึ่งอิออนโลหะที่เกิดการไฮโดรไลซ์ได้ดีนั้นจะมีขนาดใหญ่ และมี hydroxide group มาก (Stumm and Melio, 1968) จึงสามารถดูดซับ $HAsO_2^-$ ได้ดี

ส่วนอาร์เซเนต จะแตกตัวอยู่ในรูป H_3AsO_4 และ $HAsO_4^=$ เป็นส่วนใหญ่ (Gulledge and O'Connor, 1973) และสารส้ม จะแตกตัวอยู่ในรูป $Al(HO)_2(OH)_4^+$ และ $Al(H_2O)_3(OH)_3$ จึงสามารถจับกับอิออนอาร์เซเนตที่มีประจุลบได้ดีสอดคล้องกับการศึกษาของ Logsdon et al. (อ้างถึงใน Sorg and Logsdon, 1978) พบว่าการกำจัดอาร์เซไนต์ 0.3 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เดซิเมตร ในน้ำบ่อ เฟอร์ริคซัลเฟตจะกำจัดสารหนูได้ 40 - 60 เปอร์เซนต์ มีประสิทธิภาพดีกว่า ตกตะกอนด้วยสารส้มซึ่งกำจัดได้

เพียง 5 - 15 เปอร์เซนต์และได้นำผลจาร์เทสต์มาประยุกต์กับ pilot-plant ของ EPA Environmental Research Centre ก็ยังยืนยันผลว่า เฟอร์ริคซัลเฟตสามารถกำจัดอาร์เซไนต์ได้ดีกว่าสารส้ม แต่ไม่ได้ทดลองกำจัดสารหนูโดยการเติมคลอรีนร่วมกับการตกตะกอน

เมื่อมีการเติมคลอรีนก่อนแล้วตกตะกอน จะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูได้ เนื่องจากคลอรีนจะไปออกซิไดส์ อาร์เซไนต์ ให้เป็นอาร์เซเนต ซึ่งอยู่ในรูปที่กำจัดได้ง่าย (Sorg and Logsdon, 1978) หรือคลอรีนอาจไปออกซิไดส์เหล็กให้มีวาเลนซีสูงขึ้น จึงละลายน้ำได้น้อยลง (Shen, 1978) ทำให้มีประสิทธิภาพการกำจัดสารบนเบื้อนได้ดีขึ้น

โคแอกกูแลนต์ทั้งสองชนิดสามารถตกตะกอนได้ดีในน้ำที่มีพีเอชใกล้เคียงกับน้ำธรรมชาติ และมีค่าอยู่ในเกณฑ์คุณภาพน้ำดื่มขององค์การอนามัยโลก (พีเอช 6.5 - 8.5) นอกจากนี้สารส้มและเฟอร์ริคซัลเฟตเป็นสารที่ไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพอนามัย โดยเฉพาะสารส้มและคลอรีนเป็นสารเคมีที่ใช้ในระบบประปาโดยทั่วไปอยู่แล้ว และยังหาซื้อได้ไม่ยากราคาไม่แพง จึงเหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้กับระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำขนาดเล็กได้

ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาต่อไป

1. การศึกษาครั้งนี้ ส่วนใหญ่เป็นตัวอย่างน้ำที่สังเคราะห์ขึ้นในห้องปฏิบัติการ ซึ่งมีการควบคุมปัจจัยต่างๆ เป็นอย่างดีจึงควรนำไปทดลองกับน้ำธรรมชาติ เพื่อให้ทราบข้อมูลมากยิ่งขึ้น

2. ควรศึกษารูปของสารหนูในน้ำธรรมชาติ ว่าอยู่ในรูปใด

3. ควรศึกษาการใช้ Coagulant แบบผสม เพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมในการกำจัดสารหนูรูปต่างๆ

4. ควรทดลองในระบบที่ใหญ่ขึ้น อาจทำเป็นแบบจำลองของระบบประปา

5. ควรศึกษาวิธีการกำจัดสารหนูด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมกับวิธีการอื่น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูและลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ เช่น อาจใช้การตกตะกอนร่วมกับ Reverse Osmosis หรือการใช้ Ion exchange resin เนื่องจากกระบวนการเหล่านี้มีค่าใช้จ่ายสูง ดังนั้นหากลดปริมาณสารหนูมาระดับหนึ่งแล้วจึงผ่านกระบวนการเหล่านี้จะลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการได้

6. ควรศึกษาวิธีการกำจัดกากตะกอนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการตกตะกอน เนื่องจากกากตะกอนที่เกิดขึ้นจะมีสารหนูในปริมาณมาก และมีกากตะกอนปริมาณมากเช่นกัน ดังนั้น จึงควรศึกษาวิธีการที่เป็นไปได้ในการกำจัดกากตะกอน เช่น การทำกากตะกอนให้แห้ง การเก็บกักไว้ในรูปของแข็ง หรือกำจัดโดยกระบวนการเฟอร์ไรต์ เพื่อมิให้แพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อม แล้วก่อให้เกิดปัญหาต่อไป