บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

ผลการทดลองการกำจัดสารหนูในรูปของอาร์ซิเนต [As(V)] ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ไคโตแซนแบบเม็ด ซึ่งทำการศึกษา 4.1) สมบัติทางกายภาพของไคโตแซนแบบเม็ด อาทิ ทดสอบการละลายในสารละลายชนิดต่างๆ คำนวณเปอร์เซ็นต์ความชื้น (Moisture content, %) ของไคโตแซนแบบเม็ด หาพื้นที่ผิวและเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน 4.2) ศึกษาภาวะและกลไกที่เหมาะสมในการใช้ไคโตแซนแบบเม็ดดูดซับสารหนู 4.3) เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับของไคโตแซนแบบเม็ดระหว่างน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียที่มีสารหนูปนเปื้อน 4.4) ศึกษาวิธีการกำจัดไคโตแซนที่ใช้งานแล้วโดยวิธี Leaching test ผลการทดลองมีดังนี้

4.1 สมบัติทางกายภาพของไคโตแซนแบบเม็ด

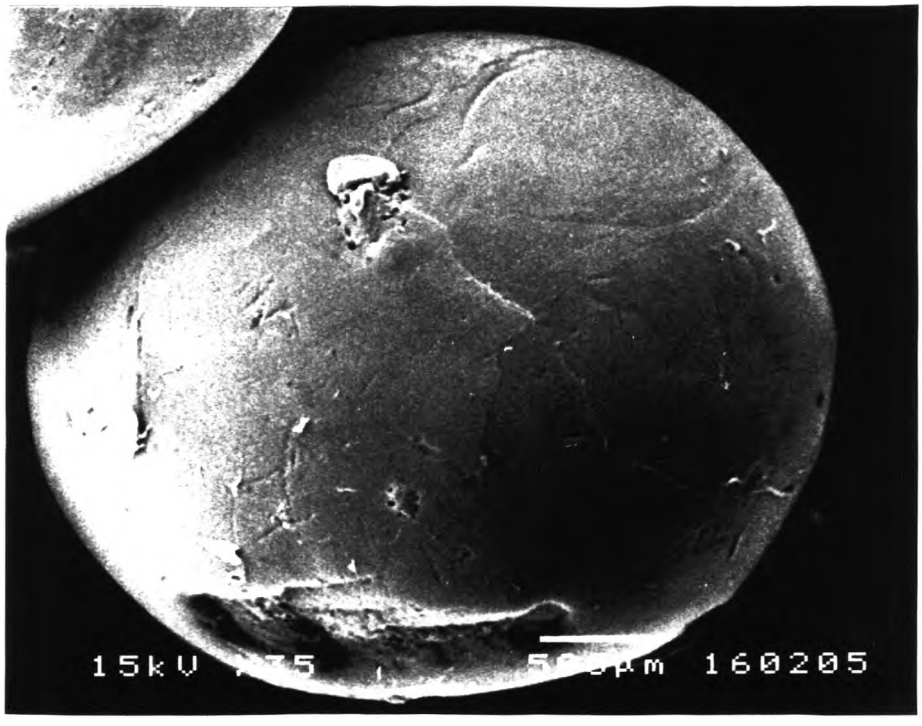
การเตรียมไคโตแซนให้อยู่ในรูปแบบเม็ดมีคุณสมบัติในการใช้งานที่ดี เนื่องจากโครงสร้างของสายพอลิเมอร์ไคโตแซนขดตัวเป็นทรงกลม (sphere) อย่างหนาแน่น มีลักษณะการขดตัวเป็นแบบวง (random coil) และแบบแท่ง (rod) เมื่อนำมาละลายในสารละลายกรดที่ พีเอชน้อยกว่า 6 พันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่อะมิโนและหมู่ฟังก์ชั่นอื่นจะแตกตัวออก หมู่อะมิโนในสายโมเลกุลจะรับโปรตรอน (protonation) แล้วอยู่ในรูปประจุบวก (protonated, $-NH_3^+$) ทำให้สายพอลิเมอร์ที่ขดตัวกันเป็นวงคลายตัวออก และมีความยืดหยุ่นมากขึ้น เมื่อหยดสารละลายไคโตแซนที่มีความเข้มข้น 4 % โดยน้ำหนัก ลงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 1 N จะได้เม็ดไคโตแซนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2-3 มิลลิเมตร ซึ่งใช้ในการทดลองได้ง่ายกว่าไคโตแซนแบบผง เนื่องจากไคโตแซนแบบผงจะลอยอยู่ที่ผิวน้ำและบางส่วนติดอยู่ตามผิวเครื่องแก้วขณะทำการทดลอง ส่วนไคโตแซนแบบเม็ดจะลอยอยู่ในสารละลายและง่ายต่อการแยกออกจากสารละลายเมื่อใช้งานเสร็จแล้ว ดังแสดงลักษณะที่แตกต่างของไคโตแซนแบบผงและไคโตแซนแบบเม็ดในภาพถ่ายจากกล้องถ่ายรูป และภาพจากเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ในรูปที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ

ไคโตแซนแบบผง

ไคโตแซนแบบเม็ด

รูปที่ 4.1 ลักษณะที่แตกต่างของไคโตแซนแบบผงและไคโตแซนแบบเม็ด
ในภาพถ่ายจากกล้องถ่ายรูป

ไคโตแซนแบบผง



ไคโตแซนแบบเม็ด

รูปที่ 4.2 ลักษณะที่แตกต่างของไคโตแซนแบบผงและไคโตแซนแบบเม็ด ในภาพถ่ายจากเครื่อง SEM

4.1.1 การละลาย

ผลการทดลองการละลายของไคโตแซนแบบเม็ด พบว่าไคโตแซนแบบเม็ดสามารถละลายได้ในสารละลายกรดที่ความเข้มข้นต่างๆ อาทิ กรดอะซิติก กรดไนตริก กรดไฮโดรคลอริก ซึ่งสารละลายที่ได้มีลักษณะใสเป็นเนื้อเดียวกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และพบว่าไคโตแซนแบบเม็ดละลายน้ำเพียงเล็กน้อย เมื่อในน้ำมีสารละลายกรดที่พีเอชน้อยกว่า 6 ซึ่งทดสอบการละลายโดยใช้เครื่อง Total Organic Carbon (แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ข) นอกจากนี้พบว่า ไคโตแซนแบบเม็ดไม่ละลายใน กรดซัลฟุริก กรดฟอสฟอริก ด่างทั้งเจือจางและเข้มข้น (NaOH) เอทานอล อะซิโตน และ คลอโรฟอร์ม

ตารางที่ 4.1 ผลการละลายของไคโตแซนแบบเม็ดในสารละลายชนิดต่างๆ

ชนิดของสารละลาย	ความเข้มข้นของสารละลาย (w/w)				
	1 %	5 %	10 %	50 %	> 50 %
กรดอะซิติก	+	+	+	+	+
กรดไนตริก	+	+	+	+	
กรดไฮโดรคลอริก	+	+	+		

หมายเหตุ + หมายถึง ละลายได้

จากผลการละลายของไคโตแซนแบบเม็ดในสารละลายชนิดต่างๆที่ได้นี้ จึงนำผลมาใช้ในการเลือกชนิดของสารละลายกรดและสารละลายด่าง เพื่อทำการปรับพีเอชที่ภาวะต่างๆ ในการทดลอง โดยเลือกใช้สารละลายของกรดซัลฟุริกเจือจางที่มีความเข้มข้น 1 N เพื่อปรับให้สารละลายมีค่าพีเอชเป็นกรด และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 1 N เพื่อปรับให้สารละลายมีค่าพีเอชเป็นด่าง เนื่องมาจากไคโตแซนแบบเม็ดไม่ละลายในสารละลายของกรดซัลฟุริกเจือจางและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

4.1.2 เปอร์เซ็นต์ความชื้นของไคโตแซนแบบเม็ด (Moisture content, %) หาพื้นที่ผิวและเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน

ผลการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นของไคโตแซนแบบเม็ด (Moisture content, %) ด้วยวิธีทำเม็ดไคโตแซนให้แห้งโดยใช้ความเย็น (freeze drying) มีค่าเท่ากับ 91 % และจากการหาพื้นที่ผิวของไคโตแซนแบบเม็ดโดยใช้เครื่อง BET พบว่า มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 163 ตารางเมตรต่อกรัมของเม็ดไคโตแซน และ มีค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน เท่ากับ 102 อังสตรอม (Å) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเม็ดไคโตแซนสามารถเก็บกักน้ำไว้ในช่องว่างได้ 91 % ซึ่งความชื้นและการพองตัวของเม็ดไคโตแซนมีความสัมพันธ์กัน หากพบว่ามีความชื้นสูงแสดงว่าเม็ดไคโตแซนจะเก็บกักน้ำไว้ในช่องว่างได้มาก ในทางตรงกันข้ามถ้ามีความชื้นต่ำแสดงว่าเม็ดไคโตแซนเก็บกักน้ำไว้ช่องว่างได้น้อย ความสามารถในการเก็บน้ำไว้ในตัวเม็ดไคโตแซนจะเห็นได้จากการพองตัวขึ้นเล็กน้อยในขณะใช้งาน การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นแสดงในสมการที่ 4.1 และรายละเอียดแสดงในตารางที่ 4.2

$$\% \text{ Moisture content} = (W1 - W2) \times 100 / W1 \qquad (4.1)$$

โดยที่ W1 = น้ำหนักเปียกของไคโตแซนแบบเม็ด (กรัม)

W2 = น้ำหนักแห้งของไคโตแซนแบบเม็ด (กรัม)

ตารางที่ 4.2 เปอร์เซ็นต์ความชื้นของไคโตแซนแบบเม็ด

น้ำหนักเปียก (กรัม)	น้ำหนักแห้ง (กรัม)	ความชื้น, %
2.250	0.187	91.68

สรุป สมบัติทางกายภาพของไคโตแซนแบบเม็ด โดยศึกษาความสามารถในการละลายในสารละลายชนิดต่างๆ เปอร์เซ็นต์ความชื้นของไคโตแซนแบบเม็ด (Moisture content, %) และการหาพื้นที่ผิวของไคโตแซนแบบเม็ด พบว่ามีความสัมพันธ์กันโดยไคโตแซนแบบเม็ดสามารถละลายได้ใน กรดอะซิติก กรดไนตริก กรดไฮโดรคลอริก และละลายน้ำเพียงเล็กน้อย เมื่อ

ในน้ำมีพีเอชน้อยกว่า 6 นอกจากนี้พบว่าไคโตแซนแบบเม็ดไม่ละลายกรดซัลฟุริก ด่างทั้งเจือจางและเข้มข้น (NaOH) เอทานอล อะซิโตน และ คลอโรฟอร์ม

เนื่องจากไคโตแซนมีสมบัติด้านการชอบน้ำ (hydrophilicity) ดังนั้นจึงสามารถดูดน้ำหรือของเหลวรอบตัวได้ ทำให้เม็ดไคโตแซนเกิดการพองตัวขึ้นเล็กน้อย เพื่อลดความเข้มข้นภายในตัวให้เกิดความสมดุลกับความเข้มข้นภายนอก ซึ่งทำให้ช่องว่างภายในหรือรูพรุน (porous) ขยายมากขึ้น เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวภายในให้มากขึ้น ในทางตรงกันข้าม เมื่อไคโตแซนแบบเม็ดอยู่ในคลอโรฟอร์ม เม็ดไคโตแซนจะหดตัวลงเล็กน้อย เพื่อปรับความเข้มข้นภายในตัวให้เกิดความสมดุลกับสารละลายภายนอกที่มีความเข้มข้นสูงกว่า ผลการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นของไคโตแซนแบบเม็ด แสดงให้เห็นว่าเม็ดไคโตแซนสามารถเก็บกักน้ำไว้ในช่องว่างได้ประมาณ 91 % ซึ่งการที่เม็ดไคโตแซนสามารถเก็บน้ำไว้ในช่องว่างได้จะมีความสำคัญต่อกลไกการดูดซับไอออนโลหะ เนื่องจากน้ำจะเป็นตัวพาสารละลายไอออนโลหะเคลื่อนที่ผ่านเข้า-ออกภายในรูพรุนได้ ทำให้ไอออนต่างๆที่ละลายอยู่ในน้ำสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับหมู่อะมิโนอิสระที่อยู่ภายในรูพรุนได้

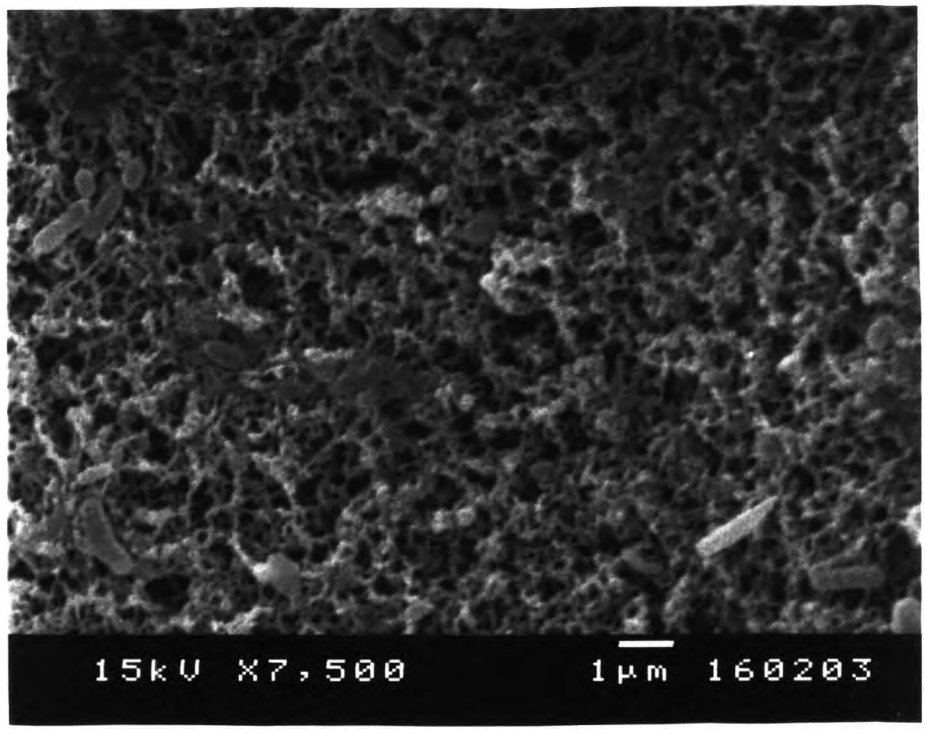
การนำไคโตแซนในรูปแบบเม็ดมาใช้ในการวิจัยครั้งนี้ สอดคล้องกับการอธิบายของ Rorrer *et al.* (1993) ซึ่งได้อธิบายว่าไคโตแซนที่อยู่ในรูปแบบผงหรือแบบเกล็ดมีคุณสมบัติไม่เหมาะสม ในการนำมาใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียหรือบำบัดน้ำใต้ดิน เนื่องจากไคโตแซนทั้งสองรูปไม่มีความพรุน (nonporous) และละลายได้ง่ายในสารละลายที่มีความเป็นกรด ซึ่งการที่ไม่มีรูพรุนทำให้มีพื้นที่ผิวในการเกิดการดูดซับภายในได้น้อย นอกจากนี้ไคโตแซนในรูปแบบผงและแบบเกล็ดสามารถแตกได้ง่าย เมื่อนำมา pack-column หรือ นำมาใช้ในกระบวนการดูดซับที่ใช้แรงอัด (pump-and-treat adsorption processes) ส่วนการเตรียมไคโตแซนแบบเม็ดให้มีความพรุน (porous beads) จะช่วยทำให้เกิดการดูดซับไอออนโลหะที่ผิวภายใน (internal surface area) ของเม็ดไคโตแซนได้ อีกทั้งไคโตแซนแบบเม็ดสามารถนำมาเตรียมเป็นโครงร่างตาข่าย (crosslink) หรืออนุพันธ์อื่นได้ง่าย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนโลหะต่างๆ

อีกทั้ง Guibal (1999)ได้อธิบายเพิ่มเติมว่า เมื่อนำไคโตแซนมาทำให้อยู่ในรูปเม็ดเจล (gel bead) ทำให้สายพอลิเมอร์ที่พันกันอยู่คลายตัวออก ซึ่งจะลดความเป็นผลึก (crystallinity) และช่วยเพิ่มความสามารถในการแพร่ (diffusion) ทำให้ไอออนต่างๆและน้ำสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับหมู่อะมิโนที่อยู่ภายในเม็ดเจลไคโตแซนได้ดี

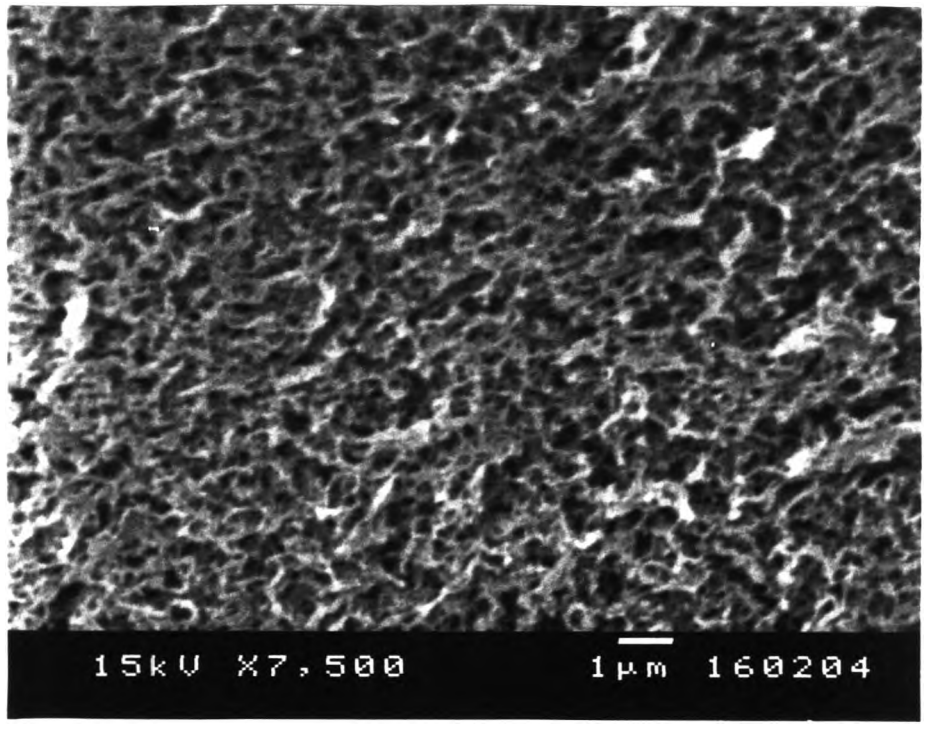
4.2 ศึกษาภาวะและกลไกที่เหมาะสมในการใช้ไคโตแซนแบบเม็ดดูดซับสารหนู [As(V)]

ภาวะและกลไกที่เหมาะสมในการใช้ไคโตแซนแบบเม็ดดูดซับสารหนูในรูปของอาร์ซิเนต [As(V)] พบว่า มีความสัมพันธ์กันระหว่าง เวลาสัมผัส พีเอช ความเข้มข้นของอาร์ซิเนต [As(V)] และปริมาณไคโตแซนที่เหมาะสมในการดูดซับ ซึ่งกลไกการดูดซับ (Sorption Kinetic) ระหว่างไคโตแซนและไอออนโลหะมี 3 ขั้นตอน ดังนี้ ขั้นแรกเกิดการแพร่ (diffusion) ของไอออนโลหะจากสารละลายมาที่ฟิล์มที่ล้อมรอบอยู่ที่อนุภาคไคโตแซน (film surrounding the particle) ซึ่งขั้นตอนแรกนี้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ขั้นตอนที่ 2 เกิดการแพร่จากฟิล์มมาที่ผิวหน้าของอนุภาคไคโตแซน (particle surface or external diffusion) และขั้นตอนที่ 3 เกิดการแพร่จากผิวหน้าของอนุภาคเข้ามาที่ผิวภายในอนุภาค หรือภายในรูพรุนของไคโตแซน (surface diffusion or pore diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับที่ภายในรูพรุนของไคโตแซน

จากภาพถ่ายของเครื่อง Scanning Electron Microscope : SEM (ดังแสดงในรูปที่ 4.3) ยืนยันถึงความสามารถการดูดซับระหว่างไคโตแซนแบบเม็ดและไอออนของอาร์ซิเนต โดยเกิดการดูดซับทั้งที่พื้นผิวภายนอกและภายในรูพรุนของไคโตแซนแบบเม็ด ซึ่งจากภาพถ่าย SEM ของไคโตแซนแบบเม็ดก่อนนำไปทดลองการดูดซับอาร์ซิเนต มีลักษณะพื้นผิวเป็นรูพรุนมาก และหลังจากนำไคโตแซนแบบเม็ดไปดูดซับอาร์ซิเนตแล้ว ลักษณะพื้นผิวมีความพรุนลดลง ซึ่งอธิบายได้ว่า เมื่อใช้เวลา 24 ชั่วโมงในขณะทำการทดลอง เม็ดไคโตแซนจะพองตัวขึ้นเล็กน้อยขณะใช้งาน เนื่องมาจากไคโตแซนมีสมบัติด้านการชอบน้ำ (hydrophilicity) จึงสามารถดูดน้ำหรือของเหลวรอบตัวได้ ทำให้เม็ดไคโตแซนเกิดการพองตัวขึ้นเพื่อลดความเข้มข้นภายในตัวให้เกิดความสมดุลกับความเข้มข้นภายนอก ช่องว่างภายในหรือรูพรุนของเม็ดไคโตแซนก็เกิดการขยายตัว เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวภายในให้มากขึ้น โดยน้ำที่ถูกดูดเข้าไปจะเป็นตัวพาสารละลายไอออนของอาร์ซิเนตเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปภายในรูพรุนได้ และถูกดูดซับอยู่ตรงบริเวณหมู่อะมิโนภายในของเม็ดไคโตแซน รวมทั้งเกิดการดูดซับตรงบริเวณพื้นผิวของเม็ดไคโตแซนได้อีกด้วย



ไคโตแซนแบบเม็ดก่อนนำไปทดลองดูดซับอาร์ซิเนต



ไคโตแซนแบบเม็ดหลังการทดลองที่มีการดูดซับอาร์ซิเนต

รูปที่ 4.3 ภาพถ่าย SEM ของไคโตแซนแบบเม็ดก่อนนำไปทดลองดูดซับอาร์ซิเนต และไคโตแซนแบบเม็ดหลังการทดลองที่มีการดูดซับอาร์ซิเนต

4.2.1 ผลของเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับ

การศึกษาผลของเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับ ที่ความเข้มข้นของสารละลายอาร์ซิเนตเริ่มต้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ต่อ ไคโตแซนแบบเม็ด 0.1 กรัม และปรับให้สารละลายอาร์ซิเนตมีพีเอช 6 ในตอนเริ่มต้น ซึ่งใช้สารละลายของกรดซัลฟุริก(H_2SO_4) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้น 1 N ในการปรับค่าพีเอช ตามผลการทดลองการละลายของไคโตแซนแบบเม็ดในสารละลายชนิดต่างๆ ในข้อ 4.1.1 ใช้ความเร็วในการเขย่า 150 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง ผลการทดลองการละลายของไคโตแซนแบบเม็ด กรณีศึกษาผลของเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับ พบว่า ไคโตแซนแบบเม็ดละลายน้ำน้อยมาก เพียง 0.03 % เมื่อสารละลายมีพีเอชเท่ากับ 6 ซึ่งผลการละลายของไคโตแซนแบบเม็ดวัดจากเครื่อง TOC (แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ข ตารางที่ ข-1)

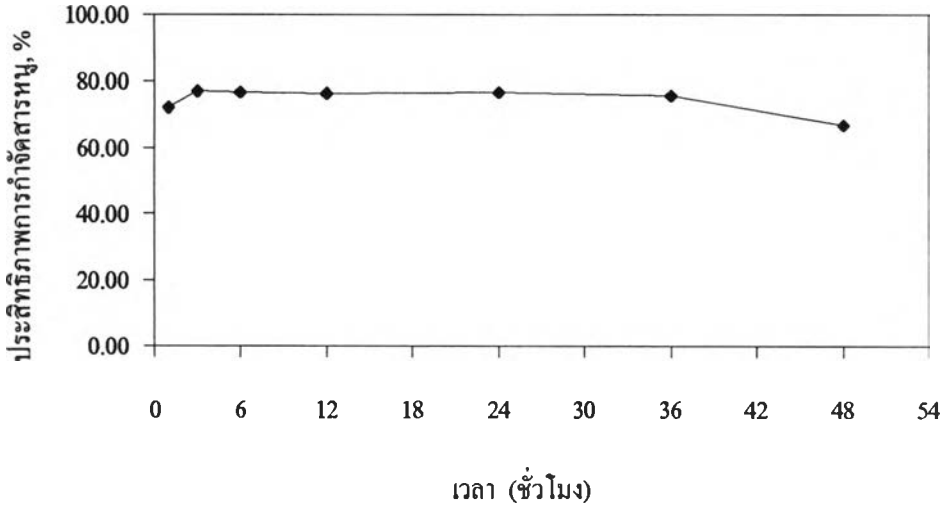
ผลการศึกษาเวลาสัมผัสที่เหมาะสม ที่เวลา 1 , 3 , 6 , 12 , 24 , 36 และ 48 ชั่วโมง พบว่าในช่วงเวลา 1-3 ชั่วโมง ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนู (Arsenic Removal, %) เพิ่มขึ้นจาก 72.20 % - 77.10 % ส่วนในช่วงเวลา 6 , 12 , 24 และ 36 ชั่วโมง ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูมีค่า 76.60 %, 76.40 %, 76.50 % และ 77.60 % ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสารหนูมีค่าใกล้เคียงกันในช่วงเวลาดังกล่าว และเมื่อใช้เวลานานถึง 48 ชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูลดลงอยู่ที่ 66.70 % (ดังแสดงในรูป 4.4) รายละเอียดประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูแสดงในภาคผนวก ค ตารางที่ ค-1

นอกจากนี้ได้ทำการเปรียบเทียบระหว่างความสามารถในการดูดซับของไคโตแซน (Adsorption capacity of chitosan : q) และ เวลาสัมผัส พบว่าที่เวลา 1 ชั่วโมง ความสามารถในการดูดซับของไคโตแซนแบบเม็ดมีค่าเท่ากับ 0.5232 มิลลิกรัมของสารหนูต่อน้ำหนักของไคโตแซนแบบเม็ด (mg/g) ที่เวลา 3 ชั่วโมง ความสามารถในการดูดซับของไคโตแซนแบบเม็ด มีค่าลดลงเท่ากับ 0.4958 มิลลิกรัมต่อกรัม ในขณะที่เมื่อใช้เวลาสัมผัสที่ 6, 12, 24 และ 36 ชั่วโมง พบว่าความสามารถในการดูดซับของไคโตแซนแบบเม็ดมีค่าเท่ากับ 0.5699, 0.5697, 0.5800 และ 0.5531 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าความสามารถในการดูดซับมีค่าใกล้เคียงกันในช่วงเวลาดังกล่าว และที่เวลา 48 ชั่วโมง พบว่าความสามารถในการดูดซับของไคโตแซนแบบเม็ดลดลง โดยมีค่าเท่ากับ 0.4681 มิลลิกรัมต่อกรัม ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (รายละเอียดผลของเวลาสัมผัสที่เหมาะสมแสดงในภาคผนวก ค ตารางที่ ค-1)

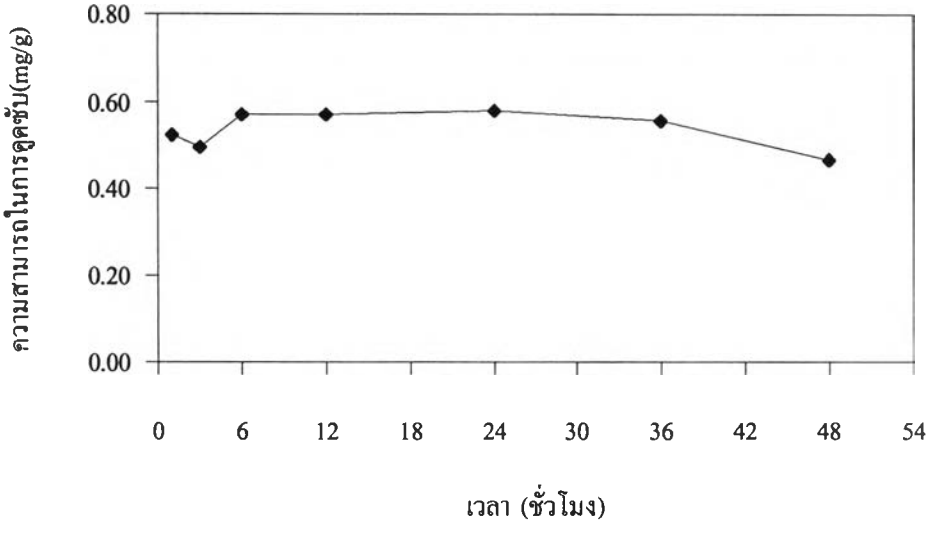
ส่วนผลการเปลี่ยนแปลงของพีเอชระหว่างพีเอชเริ่มต้น และ พีเอชสุดท้ายของแต่ละภาวะการทดลอง พบว่าค่าพีเอชเพิ่มขึ้นทุกภาวะการทดลองของการหาเวลาสัมผัสที่เหมาะสม ดังนี้ ที่ระยะเวลา 1, 3, 6, 12, 24, 36 และ 48 ชั่วโมง เมื่อปรับให้มีพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 6.04 ค่าพีเอชสุดท้ายมีค่า 6.18, 6.17, 6.32, 6.29, 6.31, 6.27 และ 6.82 ตามลำดับ (แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ค ตารางที่ ค-8) ซึ่งในกรณีผลของเวลาสัมผัสที่ 48 ชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูลดลงอยู่ที่ 66.70 % อาจเนื่องมาจากค่าพีเอชสุดท้ายเพิ่มขึ้น

ดังนั้นจึงเลือกใช้เวลาในการทำการทดลองที่ 24 ชั่วโมง ซึ่งเป็นระยะเวลาที่เหมาะสม เนื่องจากบริเวณพื้นผิวของไคโตแซนแบบเม็ดที่เกิดการดูดซับมีอยู่อย่างจำกัด ประสิทธิภาพการดูดซับ และ ความสามารถในการดูดซับของไคโตแซนแบบเม็ดจึงมีค่าคงที่ รวมทั้งเกิดสมดุลของการดูดซับ (adsorption equilibrium) ระหว่างความเข้มข้นของตัวถูกละลายบนพื้นผิวของไคโตแซนแบบเม็ด

และพบว่าผลการทดลองที่ได้มีความสอดคล้องกับการทดลองของ Bassi *et al.* (2000) ซึ่งอธิบายถึงระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับ ระหว่างสารละลายโลหะของ สังกะสี ทองแดง แคดเมียม และตะกั่ว ในรูปสารละลายเดี่ยวที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25 มิลลิลิตร และ ต่อปริมาณไคโตแซนแบบเกล็ด 0.24 กรัม ความเร็วรอบเขย่า 150 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง โดยทำการศึกษาเวลาสัมผัส ที่ระยะเวลา 0, 3, 6, 12, 24, 48 และ 72 ชั่วโมง พบว่าควรใช้เวลามากกว่า 6 ชั่วโมงขึ้นไป เนื่องจากพื้นผิวของไคโตแซนมีอยู่อย่างจำกัดในการเกิดการดูดซับกับไอออนของโลหะ และในช่วงเวลาที่มากกว่า 6 ชั่วโมงจะทำให้ความสามารถในการดูดซับไอออนโลหะของไคโตแซนจะเริ่มเข้าสู่ภาวะสมดุล (adsorption equilibrium) แต่เพื่อให้แน่ใจว่าสมดุลของการดูดซับเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ควรใช้เวลามากกว่า 12 ชั่วโมง



รูปที่ 4.4 ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูและเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับ



รูปที่ 4.5 ความสามารถในการดูดซับสารหนูและเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับ

4.2.2 ผลของพีเอช และความเข้มข้นของสารละลายอาร์ซิเนตที่เหมาะสมในการดูดซับ

โดยนำไคโตแซนแบบเม็ดมาใช้ในการดูดซับสารหนู ซึ่งอยู่ในรูปของสารละลายอาร์ซิเนต [As(V)] ที่ความเข้มข้น 0.00, 0.05, 0.1, 0.5 และ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ทำการปรับพีเอชโดยใช้สารละลายของกรดซัลฟุริก (H_2SO_4) และ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีความเข้มข้น 1 N ตามผลการทดลองการละลายของไคโตแซนแบบเม็ดในสารละลายชนิดต่างๆ ในข้อ 4.1.1 โดยปรับให้สารละลายอาร์ซิเนตในแต่ละความเข้มข้นมีพีเอชเริ่มต้นที่พีเอช 4, 6, 8 และ 10 จากนั้นเติมไคโตแซนแบบเม็ด 0.1 กรัม ลงในแต่ละขวดทุกขวด และนำขวดทั้งหมดไปเขย่าที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้เวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งเป็นเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับ ตามผลการทดลองที่ได้จากข้อ 4.2.1 และทำการเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีเขย่าสารละลายอาร์ซิเนตที่ความเข้มข้นต่างๆ กับผลการทดลองของค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับ

ผลการทดลองการละลายของไคโตแซนแบบเม็ด กรณีศึกษาผลของพีเอช และความเข้มข้นที่เหมาะสมในการดูดซับ พบว่า ที่พีเอช 4 เมื่อสารละลายอาร์ซิเนตมีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 0.05-0.10 มิลลิกรัมต่อลิตร เปอร์เซ็นต์ของการละลายของไคโตแซนแบบเม็ดเท่ากับศูนย์ และเมื่อสารละลายอาร์ซิเนตมีความเข้มข้นเริ่มต้นเพิ่มขึ้นที่ 0.50, 1 และ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า เปอร์เซ็นต์ของการละลายของไคโตแซนแบบเม็ด มีค่าเท่ากับ 0.08 %, 0.09 % และ 0.09 % ตามลำดับ ส่วนผลการทดลองที่พีเอชเท่ากับ 6 พบว่า เปอร์เซ็นต์ของการละลายของไคโตแซนแบบเม็ดมีค่าเท่ากับ 0.02 % และเมื่อสารละลายมีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 8 และ 10 พบว่าไคโตแซนแบบเม็ดไม่ละลาย แสดงให้เห็นถึงไคโตแซนแบบเม็ดละลายน้ำเพียงเล็กน้อย เมื่อน้ำมีค่าพีเอชน้อยกว่าหรือเท่ากับ 6 (รายละเอียดผลการละลายของไคโตแซนแบบเม็ดแสดงในภาคผนวก ข ตารางที่ ข-2)

ผลการทดลองหาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับ พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนู (Arsenic removal, %) ของไคโตแซนแบบเม็ดที่พีเอช 4 ดีกว่าที่ พีเอช 6, 8 และ 10 ทุกความเข้มข้นของสารละลายอาร์ซิเนตเริ่มต้น ในขณะที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายอาร์ซิเนตเท่ากับ 0.05, 0.10 และ 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าที่พีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดสารหนูอยู่ที่พีเอช 8 ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูมีค่าเท่ากับ 74.80 %, 73.50 % และ 90.96 % ตามลำดับ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายอาร์ซิเนตเท่ากับ 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร

ประสิทธิภาพในการกำจัดสารหนูที่พีเอช 8 มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่พีเอช 4 ในทางตรงกันข้ามหากความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายอาร์ซิเนตสูงขึ้น โดยมีค่าความเข้มข้นเท่ากับ 1.00 และ 2.00 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า พีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดสารหนูอยู่ที่พีเอช 6 โดยประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูมีค่าเท่ากับ 78.60 % และ 82.00 % ตามลำดับ ส่วนที่พีเอช 10 เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายอาร์ซิเนตเท่ากับ 0.05, 0.10, 0.50, 1.00 และ 2.00 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูมีค่าน้อยมาก โดยมีค่าเท่ากับ 17.86 %, 14.80 %, 12.40 %, 10.70 % และ 9.53 % ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ค ตารางที่ ค- 2)

จากผลการทดลองยังพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของพีเอชเมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง ซึ่งเมื่อปรับสารละลายอาร์ซิเนตให้มีพีเอช 4 ตอนเริ่มต้น พบว่าค่าพีเอชหลัง 24 ชั่วโมง มีค่าเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 5.21 - 5.53 ในขณะที่ เมื่อปรับสารละลายอาร์ซิเนตให้มีพีเอช 6 ตอนเริ่มต้น หลังจากใช้เวลา 24 ชั่วโมง ค่าพีเอชเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 5.78 - 6.47 และเมื่อปรับสารละลายอาร์ซิเนตให้มีพีเอช 8 ตอนเริ่มต้น เมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง ค่าพีเอชอยู่ในช่วง 5.32 - 6.65 และหากปรับสารละลายอาร์ซิเนตให้มีพีเอช 10 ตอนเริ่มต้น เมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง ค่าพีเอชอยู่ในช่วง 8.16- 8.60 (ดังแสดงรายละเอียดในภาคผนวก ค ตารางที่ ค-9) ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าพีเอชเริ่มต้นที่พีเอช 6 เท่านั้นที่เมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง ค่าพีเอชจะอยู่ในช่วง 5.78 - 6.47 ซึ่งค่อนข้างคงที่

ดังนั้นผลของพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับจึงเลือกพีเอช 6 เนื่องจากค่าพีเอชของแหล่งน้ำในธรรมชาติมีค่าอยู่ในช่วง 6-8.5 และในการทดลองพบว่าที่เมื่อปรับให้สารละลายมีพีเอช 6 เริ่มต้นเมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง ค่าพีเอชสุดท้ายไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก นอกจากนี้ได้ทำการเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีเขย่าสารละลายอาร์ซิเนตที่ความเข้มข้นต่างๆที่พีเอช 6 พบว่าการเขย่ามีอิทธิพลต่อการดูดซับ ซึ่งผลจากการใช้ความเร็วในการเขย่า 150 รอบต่อนาที ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูและความสามารถในการดูดซับของไคโตแซนแบบเม็ดมีค่ามากกว่ากรณีที่ไม่มีการเขย่าสารละลายอาร์ซิเนตที่ความเข้มข้นต่างๆ ที่พีเอช 6 ดังแสดงในรูปที่ 4.7

ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าอิทธิพลจากการเขย่า จะช่วยทำให้ชั้นฟิล์มน้ำที่ล้อมรอบเม็ดไคโตแซนบางลง ทำให้การเคลื่อนที่ของไอออนอาร์ซิเนต สามารถเข้าไปอยู่ใกล้ชิดกับหมู่อะมิโนอิสระที่อยู่ในสายพอลิเมอร์ไคโตแซนและถูกดูดซับที่หมู่อะมิโนได้เร็วยิ่งขึ้น เมื่อใช้เวลาในการดูดซับเท่ากัน ดังแสดงผลการทดลองในตารางสรุปผลการทดลองหาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการ

ดูดซับต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารหนู (Arsenic removal, %) ของไคโตแซนแบบเม็ดในตารางที่ 4.3 (แสดงรายละเอียด ผลการหาค่าพีเอชที่เหมาะสมในภาคผนวก ค ตารางที่ ค-2)

ตารางที่ 4.3 สรุปผลการทดลองหาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารหนู (Arsenic removal, %) ของไคโตแซนแบบเม็ด

[As] เริ่มต้น : Co	Arsenic removal, %				
(มิลลิกรัมต่อลิตร)	pH 4, 24 hr	pH 6, 24 hr	pH 6, 24 hr (ไม่เขย่า)	pH 8, 24 hr	pH 10, 24 hr
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.05	90.24	54.60	43.20	74.80	17.86
0.10	94.00	54.80	45.90	73.50	14.80
0.50	94.22	62.40	55.20	90.96	12.40
1.00	92.48	78.60	70.50	67.80	10.70
2.00	91.84	82.00	72.15	68.60	9.53

และได้ทำการเปรียบเทียบระหว่างความสามารถในการดูดซับของไคโตแซน (Adsorption capacity of chitosan : q) กับค่าพีเอชที่ความความเข้มข้นเริ่มต้นสารละลายอาร์ซิเนตต่างๆกัน พบว่า ความสามารถในการดูดซับของไคโตแซนแบบเม็ดที่พีเอช 4 ดีกว่าที่พีเอช 6, 8 และ 10 ทุกความเข้มข้นของสารละลายอาร์ซิเนตเริ่มต้น เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายอาร์ซิเนตต่ำๆ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 0.05 และ 0.10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ทุกค่าพีเอช พบว่าความสามารถในการดูดซับของไคโตแซนน้อยมาก และเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายอาร์ซิเนตมีเพิ่มขึ้น ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 0.50, 1.00 และ 2.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ความสามารถในการดูดซับของไคโตแซนเพิ่มขึ้นตามลำดับในแต่ละค่าพีเอช ดังแสดงในรูปที่ 4.8

ส่วนในกรณีเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างการใช้ความเร็วในการเขย่า 150 รอบต่อนาที ที่พีเอช 6 พบว่า ความสามารถในการดูดซับของไคโตแซนสูงกว่าการไม่ใช้ความเร็วในการเขย่า ที่พีเอช 6 ในทุกความเข้มข้นเริ่มต้นเริ่มต้นของสารละลายอาร์ซิเนต ดังแสดงในรูปที่ 4.9

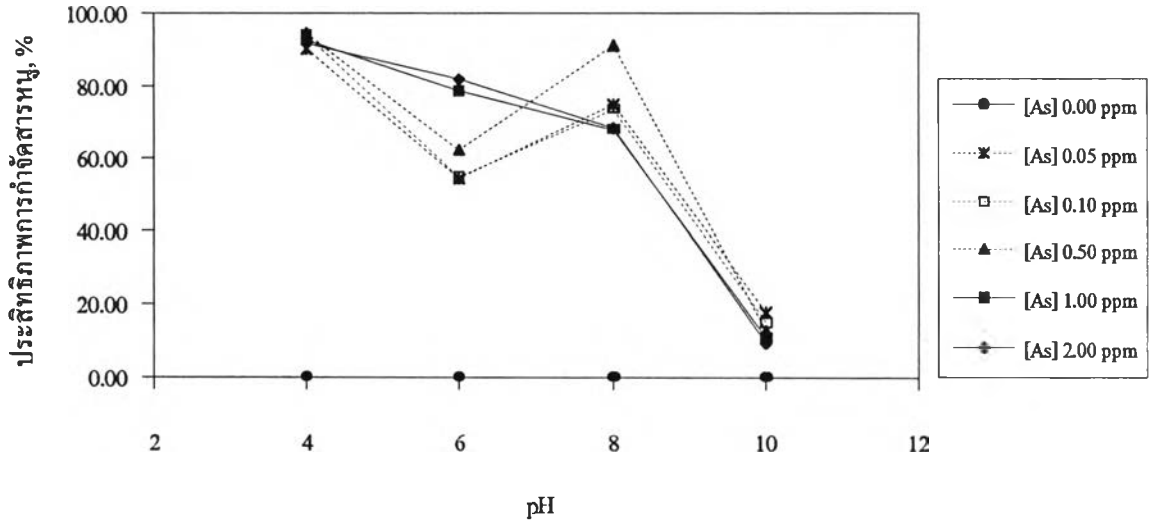
และตารางที่ 4.4 ซึ่งแสดงสรุปผลการทดลองหาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับต่อความสามารถในการดูดซับของไคโตแซนแบบเม็ด ซึ่งการที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายอาร์ซิเนตเพิ่มขึ้นทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการแพร่สารละลายอาร์ซิเนตจากชั้นฟิล์มที่ล้อมรอบอยู่ที่อนุภาคของ ไคโตแซนมาที่ผิวหน้าของอนุภาคไคโตแซน (external diffusion) น้อยลง และเกิดการแพร่จากผิวหน้าของอนุภาคไคโตแซนเข้ามาที่ผิวภายในหรือภายในรูพรุนของเม็ดไคโตแซน (intraparticular diffusion) เพิ่มขึ้น เพื่อปรับให้ความเข้มข้นภายในตัวเม็ดไคโตแซนมีความสมดุลกับความเข้มข้นของสารละลายอาร์ซิเนต ซึ่งมีความเข้มข้นสูงกว่า ดังนั้นไอออนอาร์ซิเนตจึงถูกดูดซับเข้าไปภายในรูพรุนของเม็ดไคโตแซนตรงบริเวณหมู่อะมิโนได้เพิ่มขึ้นเมื่อสารละลายอาร์ซิเนตมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.4 สรุปผลการทดองหาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับต่อความสามารถในการดูดซับของไคโตแซนแบบเม็ด

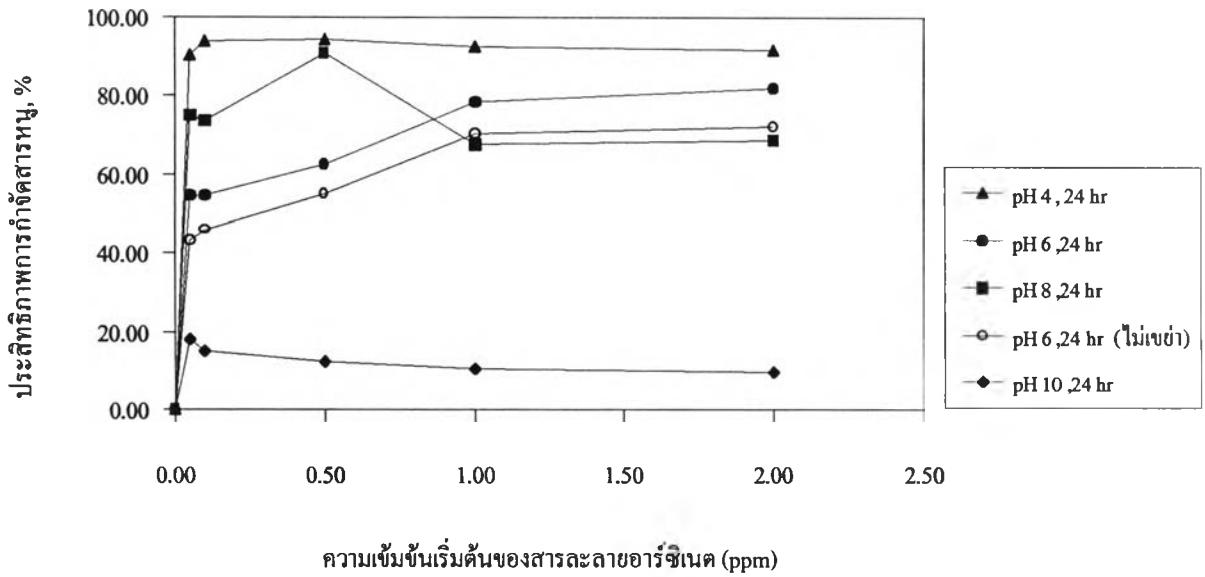
[As] เริ่มต้น : Co (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความสามารถในการดูดซับของไคโตแซนแบบเม็ด (มิลลิกรัมต่อกรัม)				
	pH 4, 24 hr	pH 6, 24 hr	pH 6, 24 hr (ไม่เขย่า)	pH 8, 24 hr	pH 10, 24 hr
0.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.05	0.0366	0.0179	0.0153	0.0262	0.0061
0.10	0.0662	0.0372	0.0357	0.0546	0.0107
0.50	0.3130	0.1852	0.1542	0.3267	0.0521
1.00	0.6084	0.5185	0.4270	0.6108	0.0832
2.00	1.3167	1.1294	0.8740	0.9397	0.1486

ผลการทดลองความสามารถในการดูดซับสารหนูในรูปของสารละลายอาร์ซิเนต [As(V)] โดยใช้ไคโตแซนแบบเม็ดมีค่าประมาณ 0.0061 -1.3167 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งจากการเปรียบเทียบกับความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับชนิดต่างๆในการนำมาดูดซับสารหนู (รายละเอียดแสดงในบทที่ 2 ตารางที่ 2.3) พบว่า ไคโตแซนแบบเม็ดมีความสามารถในการดูดซับ

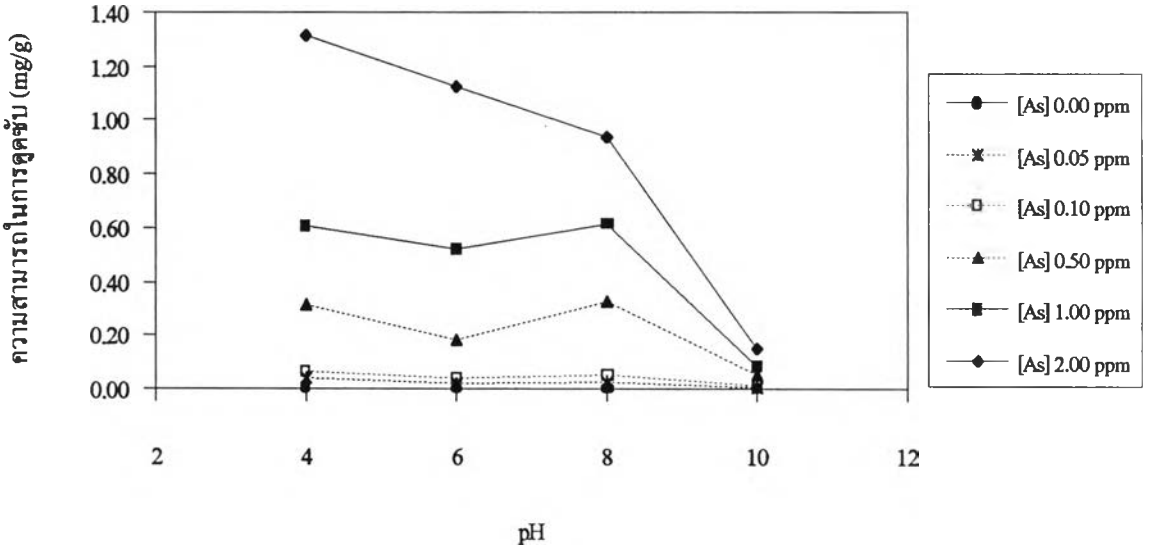
สารหนูใกล้เคียงกับและหากทำการปรับปรุงคุณภาพของไคโตแซน อาทิ การทดลองของ Guibal *et al* (1999) นำ Molybdate - impregnated chitosan beads (MICB) มาดูดซับสารหนู พบว่าสามารถดูดซับสารหนูได้ถึง 37 มิลลิกรัมของสารหนูต่อกรัมของไคโตแซนแบบเม็ด ซึ่ง MICB มีความสามารถในการดูดซับสูงกว่า แอคติเวตเตดคาร์บอน, แอคติเวตเตดอลูมินา และตัวดูดซับชนิดอื่นๆ ดังแสดงในบทที่ 2 (ตารางที่ 2.3)



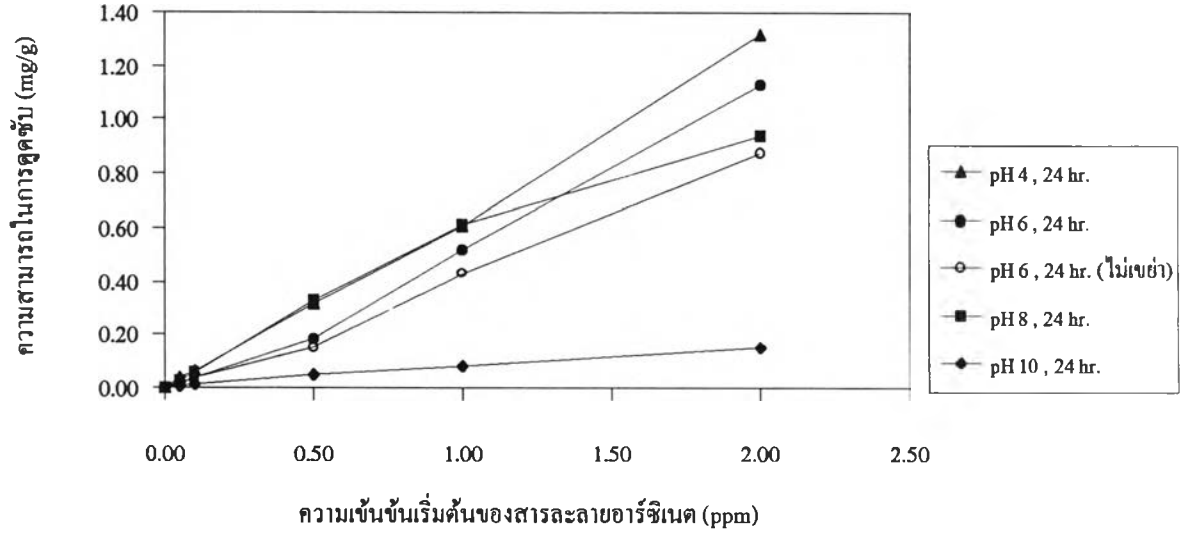
รูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูและพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับ



รูปที่ 4.7 ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูระหว่างการใช้ความเร็วในการเขย่า 150 รอบต่อนาที ทุกค่าพีเอช และกรณีที่ไม่มีการเขย่าที่พีเอช 6



รูปที่ 4.8 ความสามารถในการดูดซับสารหนูและ พีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับ



รูปที่ 4.9 ความสามารถในการดูดซับสารหนูระหว่างการใช้ความเร็วในการเขย่า 150 รอบต่อนาที ทุกค่าพีเอช และกรณีที่ไม่มีการเขย่าที่ พีเอช 6

จากผลการทดลองสามารถอธิบายได้ว่า การแตกตัวของอาร์ซิเนต [As(V)] ที่อยู่ในน้ำจะอยู่ในรูป H_3AsO_4, $H_2AsO_4^-$, $HAsO_4^{2-}$ และ AsO_4^{3-} ในช่วงพีเอช < 2, 3-6, 8-10 และ > 12 ตามลำดับ (Lackovic, 2000 ; Namasivayam, 1998 และ Raven, 1998) ดังสมการ 4.3-4.5

$$H_3AsO_4 + H_2O \rightleftharpoons H_2AsO_4^- + H_3O^+ \quad : \quad pKa = 2.20 \qquad (4.3)$$

$$H_2AsO_4^- + H_2O \rightleftharpoons HAsO_4^{2-} + H_3O^+ \quad : \quad pKa = 6.97 \qquad (4.4)$$

$$HAsO_4^{2-} + H_2O \rightleftharpoons AsO_4^{3-} + H_3O^+ \quad : \quad pKa = 11.53 \qquad (4.5)$$

ซึ่งจากการทดลองเมื่อปรับให้สารละลายอาร์ซิเนตมีพีเอชเริ่มต้น 4, 6, 8 และ 10 ดังนั้นอาร์ซิเนต [As(V)] ที่อยู่ในสารละลายจะอยู่ในรูปของ $H_2AsO_4^-$ และ $HAsO_4^{2-}$ เป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นค่าพีเอช และ ความเข้มข้นของสารละลายอาร์ซิเนตเริ่มต้น จึงมีผลต่อกลไกการดูดซับของไคโตแซนแบบเม็ด ซึ่งจากการที่ไคโตแซนมีคุณสมบัติเป็นพอลิเมอร์ประจุบวก (cationic polymer) หมู่อะมิโน ($-NH_2$) อิสระที่อยู่บนสายพอลิเมอร์จะเป็นบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาเคมีกับไอออนโลหะ ดังสมการที่ 4.6

$$R_cNH_2 + H^+ \rightleftharpoons R_cNH_3^+ \qquad (4.6)$$

หมู่อะมิโนในไคโตแซนมีสมบัติเป็นด่างอ่อน มีอิเล็กตรอนคู่ว่าง (unshared pair of electron) อยู่ในรูปไม่มีประจุ (unprotonated, $-NH_2$) ทำให้สามารถสร้างพันธะกับโปรตรอน (H^+) หรือดูดซับกับไอออนโลหะที่มีประจุบวกได้ ในทางตรงกันข้ามหากไคโตแซนอยู่ในรูปมีประจุ (protonated, $-NH_3^+$) ทำให้ไคโตแซนสามารถดูดซับไอออนโลหะหนักที่มีประจุเป็นลบได้เช่นกัน อีกทั้ง Guilbal (2000) ได้อธิบายว่า เมื่อสารละลายมีค่าพีเอชน้อยกว่าหรือเท่ากับ 3 หมู่อะมิโนที่อยู่ในสายพอลิเมอร์ของไคโตแซนจะอยู่ในรูปประจุบวก (protonated, $-NH_3^+$) ถึง 99.9 %

ไคโตแซนสามารถสร้างพันธะกับโลหะทรานซิชันหมู่ III ได้ดีกว่าโลหะหมู่ I และ II เนื่องจากการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน (complex compound) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าสารประกอบโคออร์ดิเนต (coordination compound) จะมีโมเลกุลประกอบด้วยอะตอมหรือไอออนของโลหะอยู่ตรงกลาง ส่วนใหญ่เป็นโลหะทรานซิชัน (transition element) ซึ่งโลหะทรานซิชันมีโครง

สร้างทางอิเล็กตรอนพิเศษจากโลหะอื่น คือ มีออร์บิทัล (orbital) ที่ยังว่างอยู่ล้อมรอบด้วยกลุ่มของไอออนหรือโมเลกุลต่างๆ ไอออนหรือโมเลกุลที่ล้อมรอบอยู่เรียกว่าลิแกนด์ (ligand) ลิแกนด์จะต้องมีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว (lone pair electron) อย่างน้อยที่สุดหนึ่งคู่ ซึ่งจะนำมาใช้ร่วมกับโลหะศูนย์กลางเกิดพันธะโคออร์ดิเนต พันธะระหว่างไอออนโลหะกับลิแกนด์ที่ล้อมรอบอยู่นั้นเป็นแบบไฟฟ้าสถิต (electrostatic) บางลิแกนด์สามารถเกิดพันธะโคออร์ดิเนตมากกว่าหนึ่งแห่ง จึงเรียกลิแกนด์เหล่านี้ว่า คีเลต (chelate) ซึ่งการเกิดคีเลตชัน (chelation) มีผลต่อระดับพลังงานของ d-orbital ของไอออนโลหะทรานซิชัน มากกว่าระดับพลังงานของ s และ p orbital ในโลหะหมู่ I และ II เนื่องจาก s-orbital ซึ่งมีรูปร่างเป็นทรงกลม และ p-orbital มีรูปร่างคล้ายดัมเบล การเกิดปฏิกิริยาระหว่าง s, p-orbital ต่อลิแกนด์ จึงมีขนาดเท่ากันทุกทิศทาง ไม่เกิดการแยกระดับพลังงาน ทำให้ไม่สามารถสร้างพันธะกับลิแกนด์ได้

ดังนั้นเมื่อนำน้ำเสียสังเคราะห์มาปรับให้มีพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4 หมู่อะมิโนจะอยู่ในรูปประจุบวก (protonated, $-NH_3^+$) จึงสามารถดูดซับแอนไอออนของอาร์ซิเนต ($H_2AsO_4^-$ และ $HAsO_4^{2-}$) ได้ดีที่สุด นอกจากนี้ยังสามารถอธิบายได้ในกรณีของประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายอาร์ซิเนตที่พีเอช 6 น้อยกว่าพีเอช 4 เนื่องมาจากในช่วงที่สารละลายมีค่าพีเอชเป็นกลาง หมู่อะมิโนจะอยู่ในรูปประจุบวก (protonated, $-NH_3^+$) น้อยลง ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายอาร์ซิเนตลดลง ส่วนในกรณีเมื่อปรับให้สารละลายอาร์ซิเนตที่ความเข้มข้นเริ่มต้นน้อยๆ มีพีเอช 8 พบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายอาร์ซิเนตมีค่าสูงกว่าที่พีเอช 6 ยังไม่สามารถอธิบายสาเหตุที่เกิดขึ้นได้ และสุดท้ายเมื่อปรับให้สารละลายอาร์ซิเนตที่ความเข้มข้นมีพีเอช 10 พบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายอาร์ซิเนตลดลงอย่างมาก เนื่องจากหมู่อะมิโนจะอยู่ในรูปไม่มีประจุ (unprotonated, $-NH_2$) เป็นจำนวนมาก ดังนั้นจึงดูดซับไอออนประจุลบของอาร์ซิเนตได้น้อยมาก

ดังนั้นจึงขอเสนอความคิดเห็นว่าน่าจะมีการเตรียมอนุพันธ์ของไคโตแซนที่สามารถทนทานต่อสารละลายกรดในช่วงที่พีเอชน้อยกว่า 4 ได้ เนื่องจากไคโตแซนเมื่ออยู่ในสารละลายที่มีความเป็นกรดหมู่อะมิโนจะอยู่ในรูปมีประจุบวก (protonated, $-NH_3^+$) ซึ่งจะสามารถดูดซับไอออนประจุลบ เช่น อาร์ซิเนตได้ดี อีกทั้งในกรณีนำไคโตแซนมาดูดซับไอออนประจุบวก อาทิ ทองแดง (Cu^{2+}) แคดเมียม (Cd^{2+}) และตะกั่ว (Pb^{2+}) โครเมียม (Cr^{3+},Cr^{6+}) สังกะสี (Zn^{2+}) และอื่นๆ พบว่า ค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนบวกจะอยู่ในช่วงพีเอช 6-7 และหากทดลองในเรื่องการคายไอออนประจุบวก (Desorption) หรือ การฟื้นสภาพของไคโตแซน (Regeneration)

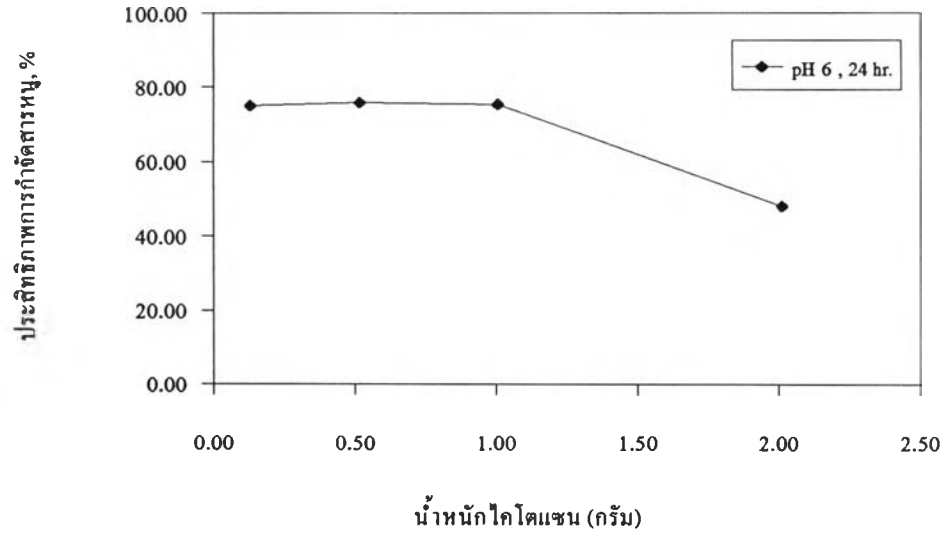
จะต้องปรับให้สารละลายมีความเป็นกรด โดยมีพีเอชน้อยกว่า 2 ไฮโดรเนียมไอออนจะเข้าไปแทนที่ไอออนประจุบวกที่บริเวณหมู่อะมิโน ทำให้สามารถนำไอออนโลหะกลับมาใช้ได้ใหม่ หรือ นำไคโตแซนกลับมาใช้ได้ใหม่ ซึ่ง Rorrer (1993) ได้อธิบายเพิ่มเติมว่า เมื่อสารละลายมีความเป็นกรด (พีเอชน้อยว่า 2) ไฮโดรเนียมไอออนจะเข้าไปแทนที่ไอออนประจุบวกที่บริเวณหมู่อะมิโน ทำให้หมู่อะมิโนอยู่ในรูปมีประจุบวก (protonated, $-NH_3^+$) ซึ่งกระบวนการคายสาร (Desorption processs) และ การฟื้นฟูสภาพของไคโตแซนแบบเม็ดที่ช่วงพีเอชใดจะเหมาะสมกับไอออนชนิดใดนั้นยังต้องทำการศึกษาต่อไป

4.2.3 ปริมาณไคโตแซนที่เหมาะสมต่อการดูดซับ

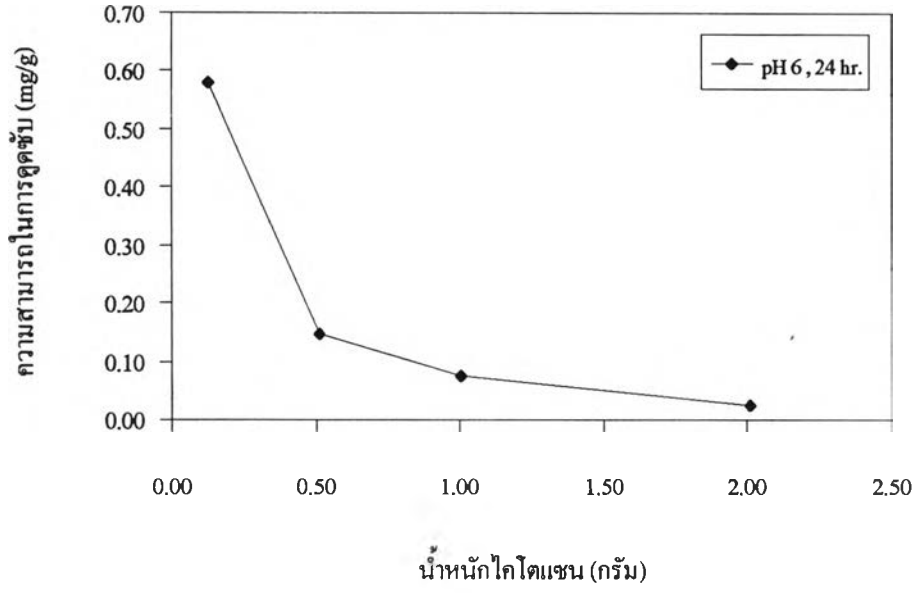
การศึกษาปริมาณไคโตแซนที่เหมาะสมในการดูดซับ ที่ความเข้มข้นของสารละลายอาร์ซิเนตเริ่มต้นเท่ากับ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร นำมาปรับให้สารละลายอาร์ซิเนตมีพีเอช 6 ในตอนเริ่มต้น (ด้วยสารละลายของกรดซัลฟุริก และ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 1 N) ตามผลการหาพีเอชที่เหมาะสม จำนวน 4 ชุดการทดลอง เติมไคโตแซนแบบเม็ด 0.1, 0.5, 1 และ 2 กรัม ในแต่ละขวด นำมาเขย่าเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ตามผลการทดลองหาเวลาสัมผัสที่เหมาะสม ใช้ความเร็วในการเขย่า 150 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง

ผลการทดลองเปอร์เซ็นต์ของการละลายของไคโตแซนแบบเม็ด ที่ปริมาณไคโตแซนแตกต่างกัน 0.1, 0.5, 1 และ 2 กรัม มีค่าเท่ากับ 0.02 %, 0.006 %, 0.006 % และ 0.005 % ตามลำดับ ซึ่งแสดงว่าในสารละลายของอาร์ซิเนตที่พีเอช 6 ไคโตแซนแบบเม็ดละลายออกมาน้อยมาก (แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ข ตารางที่ ข-3) และจากผลการทดลองยังพบว่า มีการเปลี่ยนแปลงของพีเอชที่มีปริมาณไคโตแซน 0.1, 0.5, 1 และ 2 กรัม ซึ่งเมื่อปรับสารละลายอาร์ซิเนตให้มีพีเอช 6.12 ในตอนเริ่มต้น เมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง ค่าพีเอชเพิ่มขึ้นเป็น 6.23, 6.41, 6.39 และ 6.64 ตามลำดับ (แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ค ตารางที่ ค-10)

ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนู (Arsenic removal, %) ของไคโตแซนแบบเม็ด ที่ปริมาณไคโตแซน 0.1, 0.5 , 1 และ 2 กรัม มีค่าเท่ากับ 75.20 %, 76.00 %, 75.44 % และ 47.91 % ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.10 (แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ค ตารางที่ ค-3) อีกทั้งเมื่อทำการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับของไคโตแซนแบบเม็ด (Adsorption capacity of chitosan : q) ต่อปริมาณไคโตแซนที่เหมาะสม พบว่า เมื่อไคโตแซนแบบเม็ดมีปริมาณมากขึ้นความสามารถในการดูดซับจะลดลง ดังรูปที่ 4.11 (แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ค) เนื่องจากประสิทธิภาพการกำจัดสารหนู มีค่าคงที่อยู่ในช่วง 0.1 - 1 กรัม ดังนั้นจึงเลือกใช้ปริมาณไคโตแซนแบบเม็ด 0.5 กรัม เป็นผลของการหาปริมาณไคโตแซนที่เหมาะสมในการดูดซับ ส่วนในกรณีที่ใช้ปริมาณไคโตแซนแบบเม็ดมากถึง 2 กรัม แล้วทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับลดลง ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการมีเม็ดไคโตแซนในสารละลายมากขึ้นและการใช้ความเร็วในการเขย่า มีอิทธิพลต่อการดูดซับ ซึ่งจากการสังเกตพบว่าเม็ดไคโตแซนจะมารวมอยู่ตรงกลางเป็นส่วนใหญ่ ไม่เคลื่อนที่แบบกระจายตัวอยู่ในสารละลายมากนัก ซึ่งแตกต่างจากภาวะอื่นๆเนื่องจากมีพื้นที่จำกัด ทำให้ชั้นฟิล์มที่ห่อหุ้มเม็ดไคโตแซนแต่ละเม็ดบางลงไม่เท่ากัน ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลง



รูปที่ 4.10 ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูและ ปริมาณไคโตแซนแบบเม็ดที่เหมาะสม ในการดูดซับ



รูปที่ 4.11 ความสามารถในการดูดซับสารหนูและ ปริมาณไคโตแซนแบบเม็ดที่เหมาะสม ในการดูดซับ

4.2.4 อิทธิพลของ Ionic strength ต่อความสามารถในการดูดซับ

โดยเตรียมสารละลายอาร์ซิเนตที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร และเติมสารละลายโซเดียมไนเตรทให้มีความเข้มข้น 0.00 , 0.02 , 0.04 , 0.06 , 0.08 และ 0.10 โมลต่อลิตร ให้ปริมาตรสุทธิแต่ละความเข้มข้นเท่ากับ 100 มิลลิลิตร ปรับให้สารละลายมีพีเอช 6 และ เติมไคโตแซน 0.5 กรัม และนำไปเขย่าด้วยความเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ตามผลที่ได้จากการหาเวลาสัมผัส พีเอช และปริมาณไคโตแซนที่เหมาะสมในข้อ 4.2.1 , 4.2.2 และ 4.2.3 ตามลำดับ

ผลการทดลองเปอร์เซ็นต์ของการละลายของไคโตแซนแบบเม็ด เมื่อมีสารละลายโซเดียมไนเตรทที่ความเข้มข้น 0.00 , 0.02 , 0.04 , 0.06 , 0.08 และ 0.10 โมลต่อลิตร พบว่าเปอร์เซ็นต์ของการละลายของไคโตแซนแบบเม็ดมีค่าเท่ากับ 0.006 % , 0.01 % , 0.008 % , 0.016 % , 0.014 % และ 0.014 % ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่ามีการละลายของไคโตแซนแบบเม็ดเพียงเล็กน้อยเท่านั้น รายละเอียดเปอร์เซ็นต์ของการละลายของไคโตแซนแบบเม็ดแสดงในภาคผนวก ข ตารางที่ ข-4 และจากผลการทดลองยังพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของพีเอช ซึ่งเมื่อเตรียมสารละลายอาร์ซิเนตมีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร และเติมสารละลายโซเดียมไนเตรทให้มีความเข้มข้น 0.00 , 0.02 , 0.04 , 0.06 , 0.08 และ 0.10 โมลต่อลิตร ปรับให้สารละลายผสมมีค่าพีเอช 6 ตอนเริ่มต้น เมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง พบว่าค่า พีเอช เพิ่มขึ้นทุกภาวะการทดลอง โดยอยู่ในช่วง 6.50-7.33 (แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ค ตารางที่ ค-11)

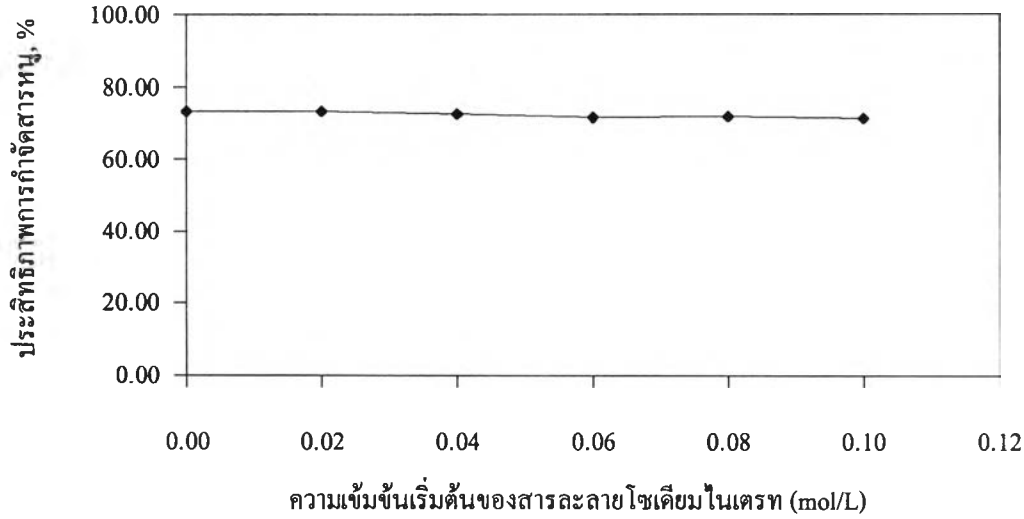
ผลการทดลองประสิทธิภาพการกำจัดสารหนู (Arsenic removal, %) พบว่า เมื่อมีสารละลายโซเดียมไนเตรทที่ความเข้มข้น 0.00, 0.02, 0.04 , 0.06 , 0.08 และ 0.10 โมลต่อลิตร ในสารละลายอาร์ซิเนต ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนู (Arsenic removal, %) มีค่าเท่ากับ 73.46 ± 1.80 % , 73.31 ± 0.92 % , 72.63 ± 2.47 % , 71.65 ± 1.86 % , 71.80 ± 1.23 % และ 71.22 ± 3.16 % ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.12 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ค ตารางที่ ค-4)

ส่วนความสามารถในการดูดซับของไคโตแซน (Adsorption capacity of chitosan : q) เมื่อมีสารละลายโซเดียมไนเตรทที่ความเข้มข้น 0.00 , 0.02 , 0.04 , 0.06 , 0.08 และ 0.10 โมลต่อลิตร พบว่า ความสามารถในการดูดซับของไคโตแซนแบบเม็ด มีค่าเท่ากับ 0.1435± 0.0021 ,

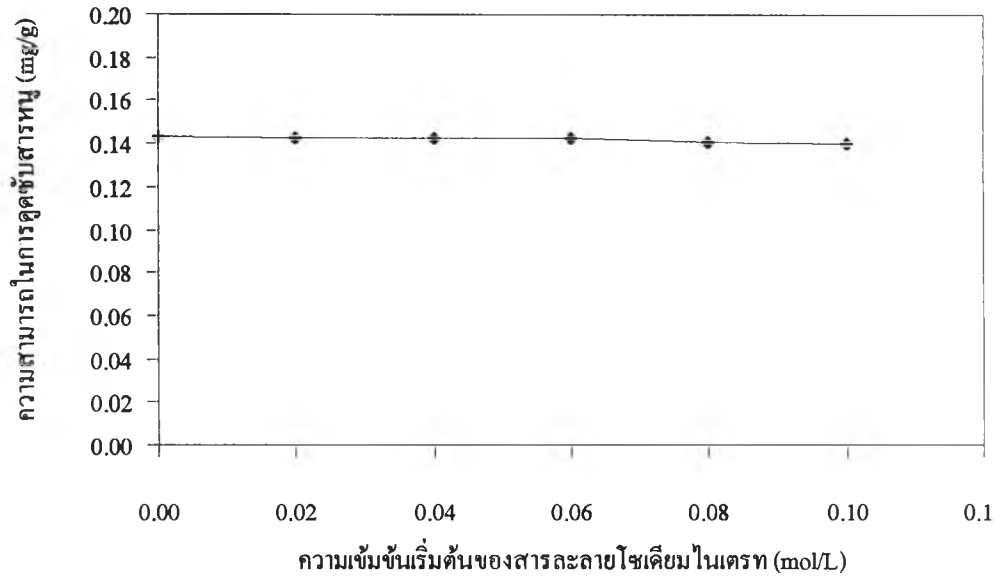
0.1424 ± 0.0024 , 0.1422 ± 0.0030 , 0.1422 ± 0.0043 , 0.1412 ± 0.0005 และ 0.1400 ± 0.0056 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.13 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ค ตารางที่ ค-4)

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อมีสารละลายโซเดียมไนเตรทที่ความเข้มข้นต่างๆในช่วง 0.00 – 0.10 โมลต่อลิตร อยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์ ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนู และความสามารถในการดูดซับของไดโตแซนแบบเม็ดมีค่าไม่แตกต่างกัน ดังนั้นอิทธิพลของ Ionic strength จึงไม่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับสารละลายอาร์ซิเนตของไดโตแซนแบบเม็ด

ผลการทดลองเรื่องอิทธิพลของ Ionic strength นี้ พบว่ามีความสอดคล้องกับการทดลองของ Lee *et al.* (1998) ได้อธิบายว่า เมื่อมีความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไนเตรท 0.00 - 1.00 โมลต่อลิตร ไม่มีผลทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วของเปลือกปูลดลง ส่วนในกรณีที่มีความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไนเตรทเข้มข้นมากๆ ในช่วง 1.00-3.00 โมลต่อลิตร ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วลงลง เนื่องมาจากเกิดแรงดึงดูดระหว่างประจุ (electrostatic attraction) ซึ่งมีความสำคัญต่อการดูดซับ อีกทั้งยังสอดคล้องกับการทดลองของ Guibal *et al.* (1999) ซึ่งได้อธิบายว่า ประสิทธิภาพการกำจัดแพทตินัมของไดโตแซนมีค่าคงที่ เมื่อมีแอนไอออนอื่น (Cl^- และ NO_3^-) มาแข่งขันในการนำไดโตแซนแบบเม็ดมาดูดซับแพทตินัม (Pt)



รูปที่ 4.12 ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูเมื่อมีสารละลายโซเดียมไนเตรท ที่ความเข้มข้นต่างๆ



รูปที่ 4.13 ความสามารถในการดูดซับสารหนูเมื่อมีสารละลายโซเดียมไนเตรท ที่ความเข้มข้นต่างๆ

4.2.5 อิทธิพลของแอนไอออน (SO_4^{2-}) ต่อความสามารถในการดูดซับ

โดยเตรียมสารละลายอาร์ซิเนตที่ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร และเติมสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่มีความเข้มข้นของซัลเฟต (SO_4^{2}) เท่ากับ 0.0 , 0.5 , 1 และ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้ปริมาตรสุทธิแต่ละความเข้มข้นเท่ากับ 100 มิลลิลิตร ซึ่งจะได้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างอาร์ซิเนต ต่อ ซัลเฟต ดังนี้ 1:0 , 1:0.5 , 1:1 และ 1:2 ปรับให้สารละลายมีพีเอช 6 โดยใช้เฉพาะสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 1 N เท่านั้น (ซึ่งค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายผสมมีค่าพีเอชประมาณ 3) เติมไคโตแซน 0.5 กรัม และนำไปเขย่าด้วยความเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ตามผลที่ได้จากการหาเวลาสัมผัส พีเอช และปริมาณไคโตแซนที่เหมาะสมในข้อ 4.2.1 , 4.2.2 และ 4.2.3 ตามลำดับ

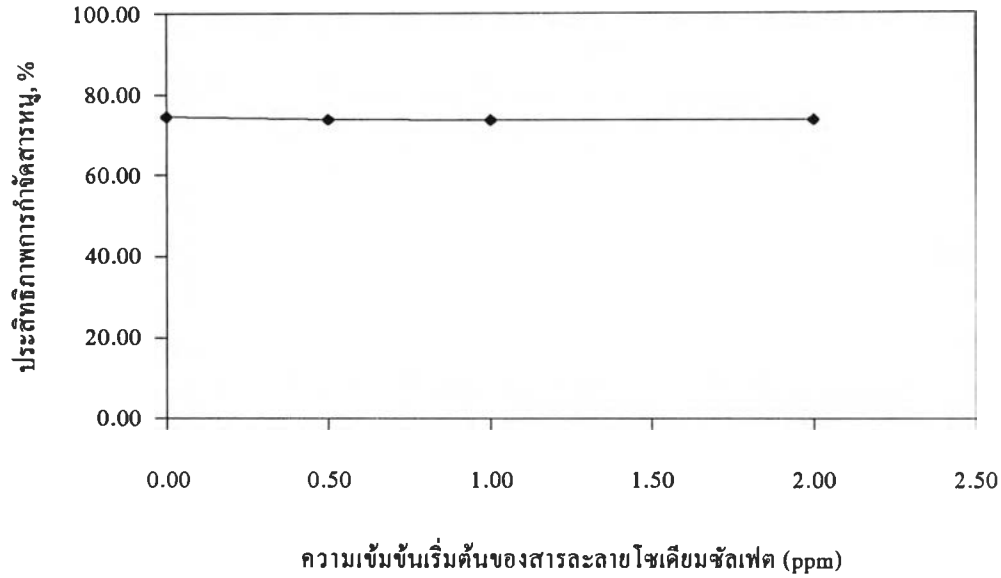
ผลการทดลองเปอร์เซ็นต์ของการละลายของไคโตแซนแบบเม็ด เมื่อในสารละลายมีอัตราส่วนโดยโมลระหว่าง อาร์ซิเนต ต่อ ซัลเฟต เท่ากับ 1:0 , 1:0.5 , 1:1 และ 1:2 พบว่าเปอร์เซ็นต์ของการละลายของไคโตแซนแบบเม็ดมีค่าเท่ากับ 0.008 %, 0.01 %, 0.009 % และ 0.007 % ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่ามีการละลายของไคโตแซนแบบเม็ดเพียงเล็กน้อยเท่านั้น รายละเอียดเปอร์เซ็นต์ของการละลายของไคโตแซนแบบเม็ดแสดงในภาคผนวก ข ตารางที่ ข-5 และจากผลการทดลองยังพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของพีเอช ซึ่งเมื่อปรับให้สารละลายผสมมีค่าพีเอช 6 ตอนเริ่มต้น เมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง พบว่าค่าพีเอชเพิ่มขึ้นทุกภาวะการทดลอง โดยอยู่ในช่วง 6.80-7.05 (แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ค ตารางที่ ค-12)

ผลการทดลองประสิทธิภาพการดูดซับสารหนู (Arsenic removal, %)ในรูปของสารละลายอาร์ซิเนตของไคโตแซนแบบเม็ด เมื่ออัตราส่วนโดยโมลระหว่าง อาร์ซิเนต ต่อ ซัลเฟต ในน้ำเสียสังเคราะห์ มีค่าเท่ากับ 1:0 , 1:0.5 , 1:1 และ 1:2 พบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับสารหนูมีค่าเท่ากับ 74.50 ± 0.96 % , 73.73 ± 0.79 % , 73.66 ± 1.00 % และ 73.48 ± 1.19 % ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.14 (แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ค ตารางที่ ค-5)

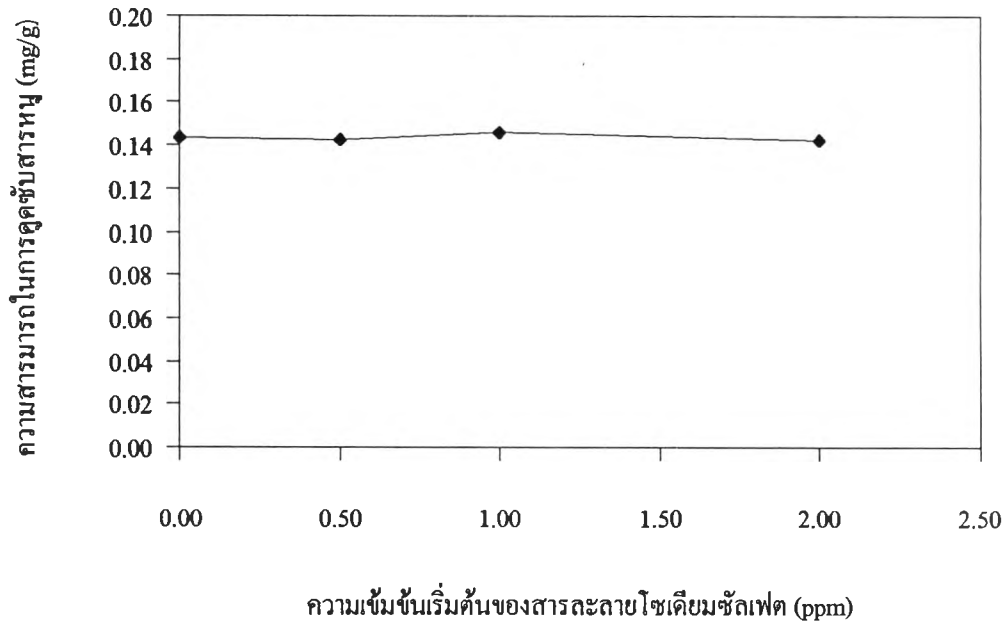
ส่วนความสามารถในการดูดซับของไคโตแซนของไคโตแซนแบบเม็ด (Adsorption capacity of chitosan : q) เมื่อมีอัตราส่วนโดยโมลระหว่าง อาร์ซิเนต ต่อ ซัลเฟต 1:0 , 1:0.5 , 1:1 และ 1:2 พบว่า ความสามารถในการดูดซับของไคโตแซนแบบเม็ด มีค่าเท่ากับ 0.1438 ± 0.0015 ,

0.1428 ± 0.0006 , 0.1458 ± 0.0029 และ 0.1427 ± 0.0031 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.15 (แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ค ตารางที่ ค-5)

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อมีอัตราส่วนโดยโมลระหว่าง อาร์ซิเนต ต่อ ซัลเฟต ในน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าเท่ากับ 1:0 , 1:0.5 , 1:1 และ 1:2 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสารหนู และ ความสามารถในการดูดซับของไคโตแซนแบบเม็ดมีค่าไม่แตกต่างกัน ดังนั้นอิทธิพลของแอนไอออนอื่น (SO_4^{2-}) จึงไม่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับสารละลายอาร์ซิเนตของไคโตแซนแบบเม็ด ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Dambies *et al.* (2000) อธิบายถึงการนำ ไคโตแซนแบบเม็ดที่ผ่านการดูดซับโมลิบดินัม (Molybdate - impregnated chitosan beads : MICB) มาดูดซับสารหนู พบว่าการมีความเข้มข้นของ Cl^- , NO_3^- และ SO_4^{2-} ปริมาณมากอยู่สารละลายอาร์ซิเนตไม่มีอิทธิพลต่อการกำจัดสารหนู



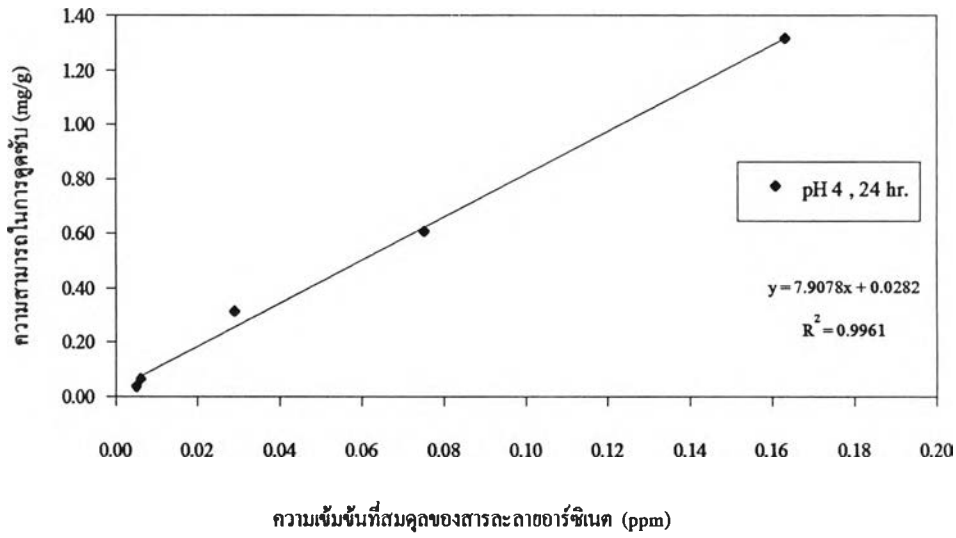
รูปที่ 4.14 ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูเมื่ออัตราส่วนโดยโมลระหว่าง อาร์ซิเนต ต่อ ซัลเฟต มีค่าเท่ากับ 1:0 , 1:0.5 , 1:1 และ 1:2



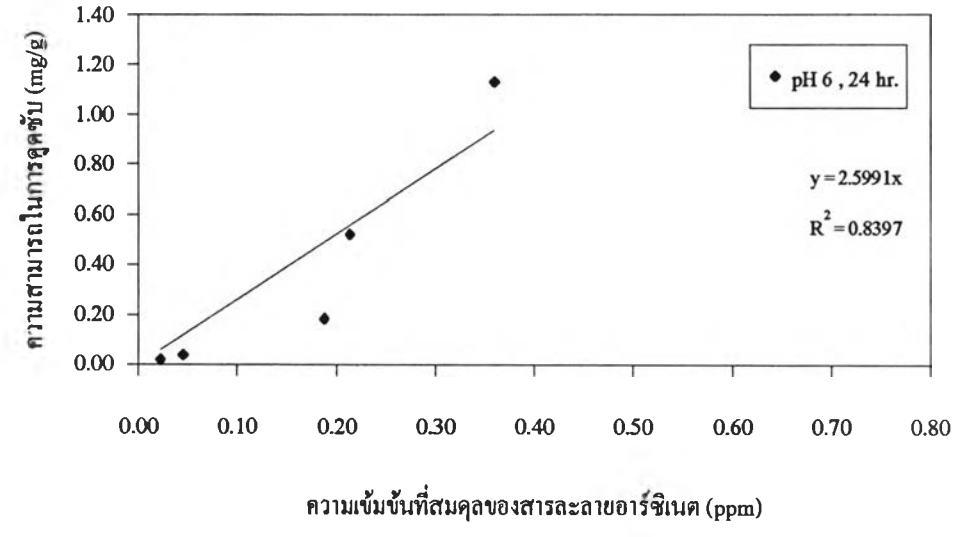
รูปที่ 4.15 ความสามารถในการดูดซับสารหนูเมื่ออัตราส่วนโดยโมลระหว่าง อาร์ซิเนต ต่อ ซัลเฟต มีค่าเท่ากับ 1:0 , 1:0.5 , 1:1 และ 1:2

4.2.6 การหาไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption Isotherm)

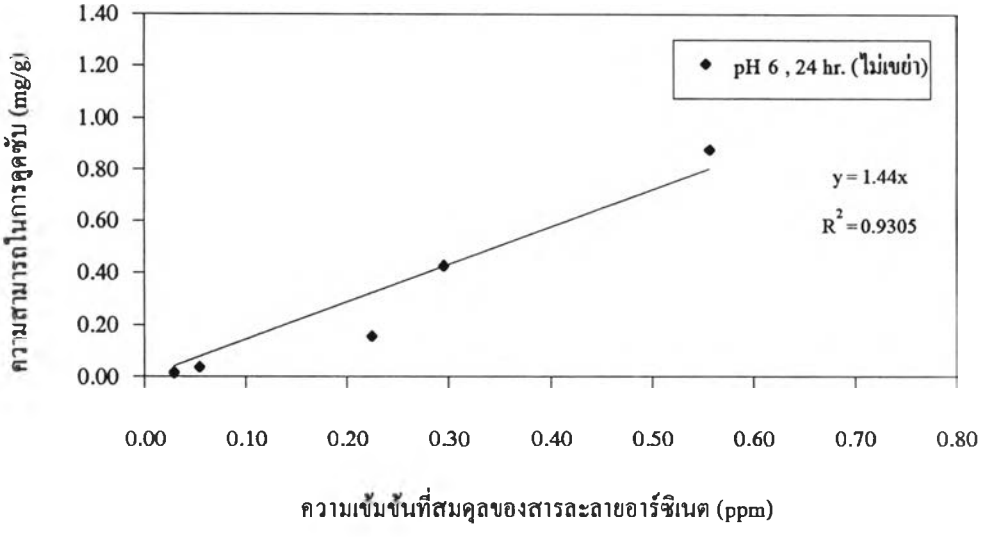
ผลการทดลองพบว่าไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption Isotherm) ที่ภาวะการทดลองที่พีเอช และความเข้มข้นต่างๆ เป็นไอโซเทอมของการดูดซับแบบเส้นตรง (Linear Adsorption Isotherm) เนื่องจากความเข้มข้นของสารละลายอาร์ซิเนตที่ใช้ในการทดลองมีค่าน้อย ดังนั้นจึงไม่สามารถนำมาคำนวณหาไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ (Langmuir Adsorption Isotherm) หรือแบบฟลุนดลิช (Freundlich Isotherm) ได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.16-4.20



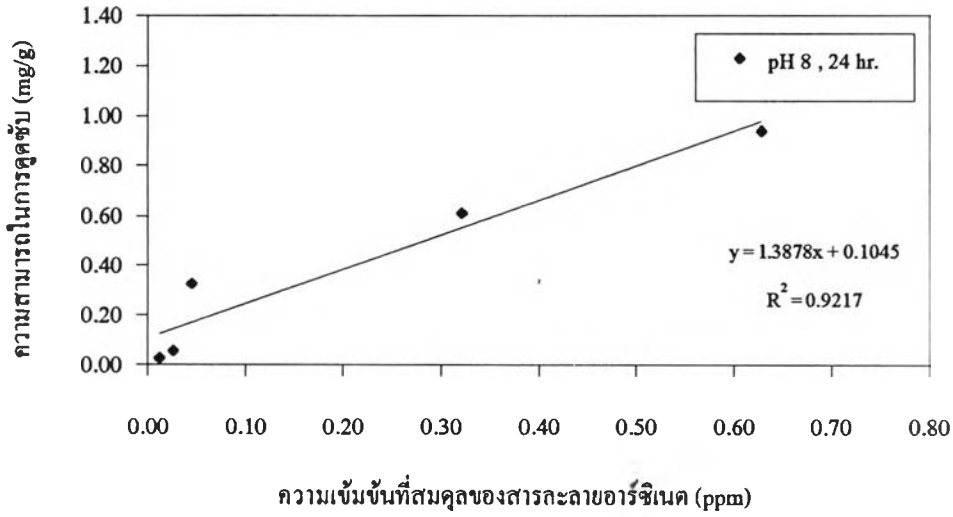
รูปที่ 4.16 ไอโซเทอมของการดูดซับแบบเส้นตรง ที่พีเอช 4, 24 ชั่วโมง



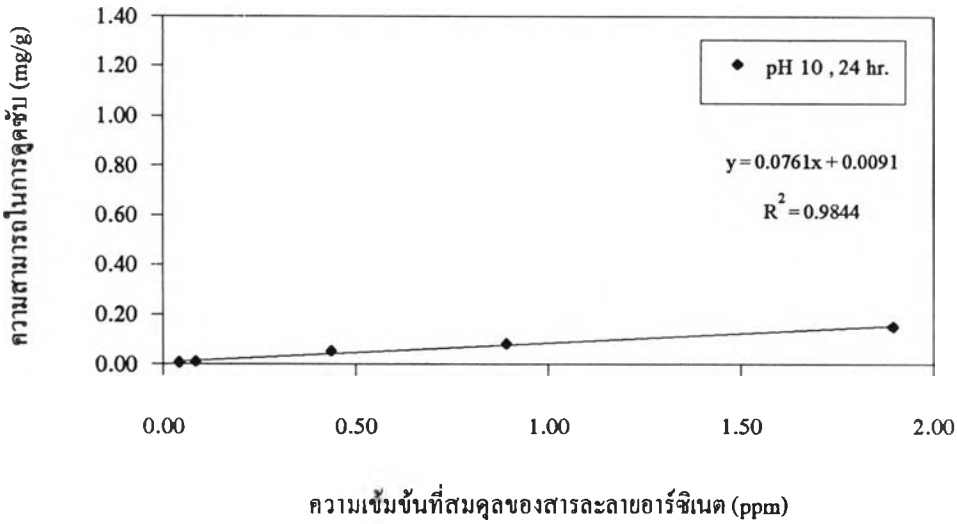
รูปที่ 4.17 ไอโซเทอมของการดูดซับแบบเส้นตรง ที่พีเอช 6 , 24 ชั่วโมง



รูปที่ 4.18 ไอโซเทอมของการดูดซับแบบเส้นตรง ที่พีเอช 6 , 24 ชั่วโมง กรณีไม่มีการเขย่า



รูปที่ 4.19 ไอโซเทอมของการดูดซับแบบเส้นตรง ที่พีเอช 8 , 24 ชั่วโมง



รูปที่ 4.20 ไอโซเทอมของการดูดซับแบบเส้นตรง ที่พีเอช 10 , 24 ชั่วโมง

สรุป ผลการศึกษาภาวะและกลไกที่เหมาะสมในการใช้ไคโตแซนแบบเม็ดดูดซับสารหนูในรูปสารละลายอาร์ซิเนต [As(V)] พบว่า ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับ คือ ใช้เวลา 24 ชั่วโมง ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูที่พีเอช 4 สูงกว่าที่พีเอช 6, 8 และ 10 ตามลำดับ ส่วนพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดสารหนู คือ พีเอช 6 เนื่องจากค่าพีเอชของแหล่งน้ำในธรรมชาติมีค่าอยู่ในช่วง 6-8.5 และในการทดลองพบว่าที่เมื่อปรับให้สารละลายมีพีเอช 6 เริ่มต้นเมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง ค่าพีเอชสุดท้ายไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก รวมถึงประสิทธิภาพในการใช้ไคโตแซนแบบเม็ดกำจัดสารหนูในรูปอาร์ซิเนตมีค่าประมาณ 54.60 % ถึง 82.00 % การใช้ความเร็วในการเขย่า 150 รอบต่อนาที พบว่าสามารถกำจัดสารหนูได้มากกว่าการไม่ใช้ความเร็วในการเขย่า รวมทั้งการเลือกปริมาณไคโตแซน 0.5 กรัมในการทดลอง ซึ่งเป็นปริมาณที่เหมาะสมในการดูดซับสารหนู ดังนั้น เวลาสัมผัส ค่าพีเอช ความเร็วในการเขย่า 150 รอบต่อนาที และ ปริมาณไคโตแซนมีอิทธิพลต่อการดูดซับสารหนูในรูปของสารละลายอาร์ซิเนต [As(V)] ของไคโตแซนแบบเม็ด ในขณะที่ Ionic strength ($NaNO_3$) และ แอนไอออนอื่น (SO_4^{2-}) ไม่มีอิทธิพลต่อการดูดซับสารหนูในรูปของสารละลายอาร์ซิเนต [As(V)] ของไคโตแซนแบบเม็ด ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption Isotherm) ที่ภาวะการทดลองที่พีเอชและความเข้มข้นต่างๆ เป็นไอโซเทอมของการดูดซับแบบเส้นตรง (Linear Adsorption Isotherm) เนื่องจากความเข้มข้นของสารละลายอาร์ซิเนตที่ใช้ในการทดลองมีค่าน้อย

4.3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับของไคโตแซนแบบเม็ดระหว่างน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียที่มีสารหนูปนเปื้อน

ตัวอย่างน้ำเสียที่มีสารหนูปนเปื้อน เป็นน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการบำบัดของโรงงานบำบัดน้ำเสียรวม ในจังหวัดฉะเชิงเทรา ซึ่งในตอนแรกน้ำตัวอย่างมีความขุ่นเล็กน้อย ดังนั้นจึงกรองน้ำตัวอย่างด้วยเยื่อกรอง 1.45 ไมครอน เพื่อหาประมาณโลหะละลายซึ่งก็คือ สารหนูที่ละลายอยู่ในน้ำเสีย จากนั้นปรับค่าพีเอชของน้ำให้มีค่าเท่ากับค่าพีเอชที่เหมาะสมตามผลการทดลองของน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ H_2SO_4 1 N และ NaOH 1 N แบ่งน้ำตัวอย่างส่วนหนึ่งปริมาตร 100 มิลลิลิตร ไปทำการย่อย (digest) นำสารละลายที่ได้มาวัด Hydride Generation Atomic Adsorption Spectroscopy (HG-AAS) เพื่อหาปริมาณอาร์ซิเนตที่มีอยู่ น้ำตัวอย่างอีกส่วนหนึ่งปริมาตร 100 มิลลิลิตร นำมาทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูของไคโตแซนแบบเม็ด โดยปรับคุณภาพน้ำให้มีภาวะตามผลการทดลองของน้ำเสียสังเคราะห์ โดยในการทดลองปรับน้ำเสีย ให้มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 6 ใช้ปริมาณไคโตแซนแบบเม็ด 0.5 กรัม นำมาเขย่าที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง น้ำที่ได้หลังจากการทดลอง นำมาทำการย่อยเหมือนน้ำที่แบ่งไปก่อนการทดลอง เพื่อนำสารละลายที่ได้มาวัด HG-AAS เพื่อหาปริมาณอาร์ซิเนตที่เหลืออยู่

ผลการทดลองหาปริมาณสารหนูปนเปื้อนในน้ำเสีย พบว่า มีปริมาณสารหนูในตอนเริ่มต้นเท่ากับ 0.0058 มิลลิกรัมต่อลิตร และจากการไคโตแซนแบบเม็ดมาใช้ในการกำจัดสารหนูที่ภาวะเดียวกับน้ำเสียสังเคราะห์ โดยปรับน้ำเสียให้มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 6.07 ใช้ปริมาณไคโตแซนแบบเม็ด 0.5 กรัม นำมาเขย่าที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสารหนู (Arsenic removal, %) ของไคโตแซนแบบเม็ดในตัวอย่างน้ำเสียที่มีสารหนูปนเปื้อนมีค่าเท่ากับ 14.37 ± 1.00 % (แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ค ตารางที่ ค-6) อีกทั้งเมื่อทำการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับของไคโตแซนแบบเม็ด (Adsorption capacity of chitosan : q) ต่อปริมาณไคโตแซนที่เหมาะสม พบว่า ความสามารถในการดูดซับมีค่าเท่ากับ 0.0002 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ค ตารางที่ ค-6)

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับของไคโตแซนแบบเม็ดระหว่างน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียที่มีสารหนูปนเปื้อน พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนู (Arsenic removal, %) ของไคโตแซนแบบเม็ด ในตัวอย่างน้ำเสียที่มีสารหนูปนเปื้อนมีค่าน้อยกว่าประสิทธิภาพการ

กำจัดสารหนูของน้ำเสียสังเคราะห์ ทั้งนี้เนื่องมาจากน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการบำบัดของโรงงานบำบัดน้ำเสียรวม มีส่วนประกอบของสารเคมีหลายชนิด และ มีโลหะหนักชนิดอื่นๆปนอยู่ด้วย ดังนั้นจึงมีไอออนโลหะประจุบวกและประจุลบอยู่มากมาย ซึ่งจากการปรับให้น้ำมีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 6.07 หลังจากใช้เวลา 24 ชั่วโมง พบว่า มีการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช โดยพีเอชสุดท้ายมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.64 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ค ตารางที่ ค-13) ซึ่งในช่วงพีเอชดังกล่าว หมู่อะมิโนอิสระจะอยู่ในรูปทั้งมีประจุบวก (protonated, $-NH_3^+$) และไม่มีประจุ (unprotonated, $-NH_2$) ดังนั้นทั้งไอออนประจุบวกและประจุลบ จึงมีการแข่งขันกันดูดซับตรงบริเวณหมู่อะมิโนอิสระของไคโตแซนแบบเม็ด อีกทั้งในน้ำเสียสังเคราะห์จะมีเพียงสารหนูในรูปของสารละลายอาร์ซิเนตเท่านั้น เป็นผลให้ไม่มีการแข่งขันในการดูดซับตรงบริเวณหมู่อะมิโนอิสระของไคโตแซนแบบเม็ด ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับของไคโตแซนแบบเม็ดในน้ำเสียที่มีสารหนูปนเปื้อนมีค่าน้อยกว่าน้ำเสียสังเคราะห์

4.4 ผลการกำจัดไคโตแซนที่ใช้งานแล้วโดยวิธี Leaching test

การกำจัดไคโตแซนที่ใช้งานแล้วโดยวิธี Leaching test ปรับปรุงจากวิธีของกระทรวงอุตสาหกรรม (2540) โดยนำไคโตแซนแบบเม็ดมาบดให้เป็นผง เติมน้ำฝนสังเคราะห์ (synthetic acid rain extraction fluid) ซึ่งประกอบด้วยน้ำกลั่นผสมสารละลายของกรดซัลฟุริก (ในสัดส่วน 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก) ปริมาตร 100 มิลลิลิตร จนส่วนผสมมีค่าพีเอชเท่ากับ 5 และเติมไคโตแซน 5 กรัม (ซึ่งเป็นอัตราส่วนปริมาตรต่อน้ำฝนสังเคราะห์เป็น 20 เท่ามิลลิลิตรของน้ำหนัก (กรัม)ของตัวอย่าง) จากนั้นนำมาเขย่าบนเครื่องเขย่า 50 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง กรองและนำสารละลายที่ได้มาวัด Hydride Generation Atomic Adsorption Spectroscopy (HG-AAS) เพื่อหาปริมาณอาร์ซิเนต

ผลการทดลองการชะละลายของการวิจัยนี้ พบว่า มีการเปลี่ยนแปลงของพีเอช ซึ่งเมื่อปรับน้ำตัวอย่างให้มีพีเอช 5.02 ในตอนเริ่มต้น เมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง ค่าพีเอชเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 7.01 (แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ค ตารางที่ ค-14) และสารละลายที่ได้เมื่อวัดด้วยเครื่อง Hydride Generation Atomic Adsorption Spectroscopy (HG-AAS) เพื่อหาปริมาณอาร์ซิเนตที่ถูกชะออกมา มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.7867 ± 0.31 มิลลิกรัมต่อลิตร (แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ค ตารางที่ ค-7) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับค่ามาตรฐานของท้ายประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ.2540) ที่กำหนดเกณฑ์อาร์ซินิก(ทั้งหมด)ไม่เกิน 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงให้เห็นว่าไคโตแซนที่ผ่านการใช้งานไม่จัดเป็นสารพิษ เนื่องจากผลการทดสอบการชะละลายสารหนูของไคโตแซนแบบเม็ดมีค่าไม่เกินมาตรฐานที่กระทรวงอุตสาหกรรมกำหนด ดังนั้นในการกำจัดไคโตแซนแบบเม็ดหลังจากการใช้งานแล้วจึงสามารถนำไปฝังกลบตามหลักสุขาภิบาลได้