



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

.....
วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม

.....
วิทยาศาสตร์

สาขา

สายวิชา

เรื่อง ผลของไคโตซานบีดส์ที่เชื่อมโยงด้วยอีพิกลอร์ไฮดริน และเอ็น-คาร์บอกซีเมทิล ต่อการดูดซับไอออนของตะกั่ว และสังกะสี ในสารละลาย และน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ

Effects of Cross-linked Chitosan Beads with Epichlorohydrin and *N*-carboxymethyl on Adsorption of Lead(II) and Zinc(II) Ions from Aqueous Solutions and Electroplating Wastewater

นามผู้วิจัย นางสาวณิชชา อารุณโรจน์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ฐิติยา แซ่ปึ้ง, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์กมลทิพย์ ขัตติยะวงศ์, วท.ค.)

รักษาราชการแทนหัวหน้าสายวิชา

(อาจารย์อนามัย คำเนตร, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

ผลของไคโตซานบีดส์ที่เชื่อมโยงด้วยอีพิคลอโรไฮดริน และเอ็น-คาร์บอกซีเมทิล
ต่อการดูดซับไอออนของตะกั่ว และสังกะสี ในสารละลาย และน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ

Effects of Cross-linked Chitosan Beads with Epichlorohydrin and *N*-carboxymethyl on
Adsorption of Lead(II) and Zinc(II) Ions from Aqueous Solutions and Electroplating Wastewater

โดย

นางสาวณิชชา อารุณโรจน์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2557

ณิชา อารุณโรจน์ 2557: ผลของไคโตซานบีดส์ที่เชื่อมโยงด้วยอีพิกลอโรไฮดริน และ
เอ็น-คาร์บอกซีเมทิลต่อการดูดซับไอออนของตะกั่ว และสังกะสี ในสารละลาย
และน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ ปรินญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์และ
เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม) สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม สาขาวิชา
วิทยาศาสตร์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ฐิติยา แซ่ปึง, Ph.D.
103 หน้า

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียม สมบัติทางกายภาพและเคมีของไคโตซานบีดส์ (CH)
ไคโตซานบีดส์เชื่อมโยงด้วยอีพิกลอโรไฮดริน (ECH) และไคโตซานบีดส์เชื่อมโยงที่มีการดัดแปลง
ด้วยเอ็น-คาร์บอกซีเมทิล (ECH-NC) ลักษณะของไคโตซานบีดส์ทั้งสามชนิดที่เตรียมได้เป็นทรง
กลม มีขนาด 0.20 เซนติเมตร ซึ่ง CH ละลายในกรด ในขณะที่ ECH และ ECH-NC มีความทนกรด
CH ECH และ ECH-NC ที่เตรียมได้นำมาศึกษาสภาวะที่เหมาะสม และประสิทธิภาพการดูดซับ
ไอออนของตะกั่ว และสังกะสีจากสารละลาย พบว่าสภาวะที่เหมาะสม คือ ปริมาณของบีดส์ เท่ากับ
0.50 กรัม ความเข้มข้นของไอออนโลหะ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 5 และ
เวลาในการดูดซับ 4 ชั่วโมง ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วสูงสุดด้วย CH ECH และ ECH-
NC เท่ากับ 1553.68 ± 5.24 649.70 ± 7.90 และ 1452.00 ± 29.21 ไมโครกรัมต่อกรัม ตามลำดับ
ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนสังกะสีสูงสุด เท่ากับ 1213.44 ± 33.13 180.25 ± 36.47 และ
 1431.40 ± 17.38 ไมโครกรัมต่อกรัม ตามลำดับ จลนศาสตร์ของ CH ECH และ ECH-NC ในการ
ดูดซับไอออนโลหะสัมพันธ์กับสมการจลนพลศาสตร์อันดับสองเทียม โดยสมมูลการดูดซับคิดผิว
เป็นไปตามไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ จากผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับไอออน
ของตะกั่ว และสังกะสีด้วยระบบไม่ต่อเนื่องในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะแห่งหนึ่ง พบว่า
ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วด้วย ECH และ ECH-NC สามารถดูดซับได้ทั้งหมด เท่ากับ
190 ไมโครกรัมต่อกรัม และประสิทธิภาพการดูดซับไอออนสังกะสี เท่ากับ 996.58 ± 41.30 และ
 1364.58 ± 15.62 ไมโครกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Nidcha Aroonrote 2014: Effects of Cross-linked Chitosan Beads with Epichlorohydrin and *N*-carboxymethyl on Adsorption of Lead(II) and Zinc(II) Ions from Aqueous Solutions and Electroplating Wastewater. Master of Science (Environmental Science and Technology), Major Field: Environmental Science and Technology, Department of Science. Thesis Advisor: Assistant Professor Thitiya Pung, Ph.D. 103 pages.

The preparation, physical and chemical properties of chitosan beads (CH) epichlorohydrin cross-linked chitosan beads (ECH) and modified cross-linked with *N*-carboxymethyl chitosan beads (ECH-NC) were studied. All type of chitosan beads were sphere and sizes were 0.20 cm. The CH was soluble in acidic solution while ECH and ECH-NC were insoluble. The CH, ECH and ECH-NC were tested for optimum conditions and adsorption capacity for Pb(II) and Zn(II) ions from aqueous solutions. Results showed that amounts of beads were 0.50 g, metal ions concentrations of 200 mg/L at pH 5 for 4 hours. The maximum adsorption capacities for Pb(II) and Zn(II) ions on CH, ECH and ECH-NC were 1553.68 ± 5.24 , 649.70 ± 7.90 and 1452.00 ± 29.21 $\mu\text{g/g}$ and 1213.44 ± 33.13 , 180.25 ± 36.47 and 1431.40 ± 17.38 $\mu\text{g/g}$, respectively. The kinetics adsorptions of CH, ECH and ECH-NC for metal ions were related with the pseudo second-order kinetic equation. The adsorption equilibrium isotherms were followed the Langmuir isotherm. Adsorption capacities for Pb(II) and Zn(II) ions on CH, ECH and ECH-NC from electroplating wastewater under batch conditions showed that ECH and ECH-NC can adsorbed all for Pb(II) ions of 190 $\mu\text{g/g}$. The adsorption capacity for Zn(II) ions on ECH and ECH-NC were 996.58 ± 41.30 and 1364.58 ± 15.62 $\mu\text{g/g}$, respectively.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ดิฉันขอขอบคุณอาจารย์ดร. จุฑิษา แซ่ปึง ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ
อาจารย์ดร. กมลทิพย์ ขัตติยะวงศ์ กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาใน
การเรียน การค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ และ
ขอขอบพระคุณ ดร. ทศนี ต้นดี ผู้ทรงคุณวุฒิ อาจารย์ดร. ประภา โഴ๊ะสลาม ประธานกรรมการการ
สอบวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ดร. อาทร ลอยสรวงสินที่กรุณาตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์
ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณอาจารย์นวลจันทร์ มัจฉริยกุล เจ้าหน้าที่ และห้องปฏิบัติการสาขาวิชาเคมี
คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ที่ให้ความ
ช่วยเหลือและคำแนะนำต่างๆ ตลอดจนอำนวยความสะดวกในการทดลองและเครื่องมือวิเคราะห์
ตัวอย่าง

ด้วยความดีหรือคุณประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแต่บิดา มารดา
อาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน ที่ได้อบรมและให้กำลังใจดิฉันมาตลอดในทุกเรื่อง

ณิชา อารุณโรจน์
มิถุนายน 2557

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	31
อุปกรณ์	31
วิธีการ	32
ผลและวิจารณ์	40
ผล	40
วิจารณ์	78
สรุปและข้อเสนอแนะ	86
สรุป	86
ข้อเสนอแนะ	88
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	89
ภาคผนวก	95
ภาคผนวก ภาพประสิทธิภาพในการดูดติดไอออนของตะกั่ว และสังกะสีของ CH ECH และ ECH-NC ตามแบบจำลอง ไอโซเทอมการดูดติดผิวของแลงเมียร์ และฟรุนดลิช	96
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	103

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	แหล่งกำเนิดสารที่เป็นพิษจากกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า	20
2	มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งของโรงงานชุบโลหะ	22
3	สมบัติการละลายของ CH ECH และ ECH-NC	41
4	การคงรูปของ CH ECH และ ECH-NC	43
5	ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วของ CH ที่ปริมาณ 0.25 0.5 0.75 และ 1 กรัม ที่ความเข้มข้นของสารละลายไอออนตะกั่ว 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 5 มิลลิลิตร (ค่าเฉลี่ย \pm SE)	47
6	ผลของการดูดซับไอออนตะกั่วที่ความเข้มข้น 10 50 100 200 300 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ด้วย CH ปริมาณ 0.50 กรัมที่เวลา 4 ชั่วโมง (ค่าเฉลี่ย \pm SE)	48
7	ผลของการดูดซับไอออนตะกั่วที่ความเข้มข้น 10 50 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ด้วย CH ปริมาณ 0.50 กรัมที่เวลา 2 4 และ 8 ชั่วโมง (ค่าเฉลี่ย \pm SE)	49
8	ผลของการดูดซับไอออนตะกั่วที่ความเข้มข้น 10 50 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ด้วย ECH ปริมาณ 0.50 กรัม ที่เวลา 2 4 และ 8 ชั่วโมง (ค่าเฉลี่ย \pm SE)	50
9	ผลของการดูดซับไอออนตะกั่วที่ความเข้มข้น 10 50 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ด้วย ECH-NC ปริมาณ 0.50 กรัมที่เวลา 2 4 และ 8 ชั่วโมง (ค่าเฉลี่ย \pm SE)	51
10	ผลของการดูดซับไอออนสังกะสีที่ความเข้มข้น 10 50 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ด้วย CH ปริมาณ 0.50 กรัมที่เวลา 2 4 และ 8 ชั่วโมง (ค่าเฉลี่ย \pm SE)	53
11	ผลของการดูดซับไอออนสังกะสีที่ความเข้มข้น 10 50 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ด้วย ECH ปริมาณ 0.50 กรัมที่เวลา 2 4 และ 8 ชั่วโมง (ค่าเฉลี่ย \pm SE)	54

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
12	ผลของการดูดซับไอออนสังกะสีที่ความเข้มข้น 10 50 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 5 มิลลิตร ด้วย ECH-NC ปริมาณ 0.50 กรัมที่ เวลา 2 4 และ 8 ชั่วโมง (ค่าเฉลี่ย \pm SE)	55
13	ผลของความแตกต่างต่อการดูดซับไอออนตะกั่วด้วย CH ECH และ ECH-NC (ค่าเฉลี่ย \pm SE)	57
14	ผลของความแตกต่างต่อการดูดซับไอออนสังกะสีด้วย CH ECH และ ECH-NC (ค่าเฉลี่ย \pm SE)	58
15	ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงเมียร์ และฟรุนดลิช และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ในการดูดติดไอออนตะกั่วด้วย CH ECH และ ECH-NC	61
16	ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงเมียร์ และฟรุนดลิช และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ในการดูดติดไอออนสังกะสี CH ECH และ ECH-NC	62
17	ผลปัจจัยของการแยกต่อรูปร่างไอโซเทอมแบบแลงเมียร์	63
18	ผลปัจจัยของการแยกต่อรูปร่างไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ในการดูดซับไอออนตะกั่วด้วย CH ECH และ ECH-NC ที่ความเข้มข้นของสารละลายไอออนตะกั่ว เท่ากับ 10 50 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร	64
19	ผลปัจจัยของการแยกต่อรูปร่างไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ในการดูดซับไอออนสังกะสีด้วย CH ECH และ ECH-NC ที่ความเข้มข้นของสารละลายไอออนตะกั่ว เท่ากับ 10 50 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร	64
20	ผลของการดูดซับไอออนตะกั่วด้วย CH ECH และ ECH-NC ที่เวลาต่างๆ ความเข้มข้นของสารละลายไอออนตะกั่ว 200 มิลลิกรัมต่อลิตร (ค่าเฉลี่ย \pm SE)	66
21	ผลของการดูดซับไอออนสังกะสีด้วย CH ECH และ ECH-NC ที่เวลาต่างๆ ความเข้มข้นของสารละลายไอออนสังกะสี 200 มิลลิกรัมต่อลิตร (ค่าเฉลี่ย \pm SE)	68
22	จลนศาสตร์การดูดซับไอออนตะกั่วด้วย CH ECH และ ECH-NC	70

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
23	จลนศาสตร์การดูดซับไอออนสังกะสีด้วย CH ECH และ ECH-NC	70
24	ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่ว และไอออนสังกะสีในสารละลายแบบผสมด้วย CH ECH และ ECH-NC (ค่าเฉลี่ย \pm SE)	72
25	ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่ว และไอออนสังกะสีในสารละลายแบบผสมด้วย CH ECH และ ECH-NC อุณหภูมิ 30 และ 40 องศาเซลเซียส (ค่าเฉลี่ย \pm SE)	73
26	ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่ว และไอออนสังกะสีในสารละลายแบบผสมเปรียบเทียบกับในสารละลายเดี่ยวด้วย CH ECH และ ECH-NC (ค่าเฉลี่ย \pm SE)	74
27	ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักเริ่มต้นในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ	75
28	ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่ว และไอออนสังกะสีด้วย ECH และ ECH-NC ในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ (ค่าเฉลี่ย \pm SE)	76
29	ผลของการดูดซับไอออนสังกะสีด้วย ECH ความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 3 และ 5 ปรับด้วย 5% โดยปริมาตร กรดอะซิติก (ค่าเฉลี่ย \pm SE)	77

สารบัญภาพ

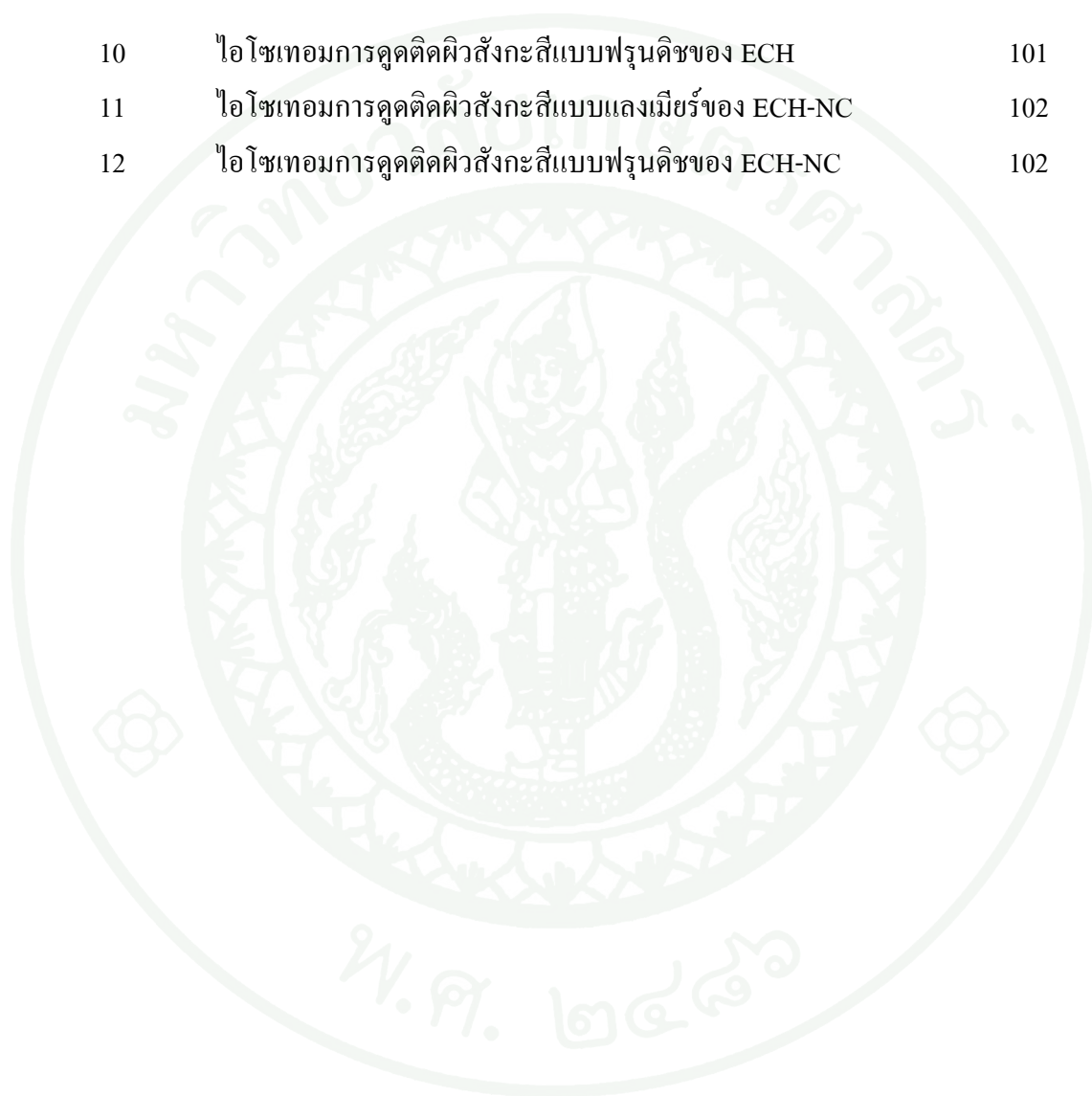
ภาพที่		หน้า
1	โครงสร้างทางเคมีของ (ก) เซลลูโลส (ข) ไคติน (ค) ไคโตซาน	7
2	ลักษณะบีดส์ของ (ก) CH (ข) ECH (ค) ECH-NC	40
3	สมบัติการละลายของ CH ในสารละลายต่างๆ (ก) 5% โดยปริมาตร กรดอะซิติก (ข) โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5 โมลต่อลิตร และ (ค) น้ำปราศจากไอออน	41
4	การคงรูปของ CH ในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (ก)-(ข) 3-10 ตามลำดับ	42
5	ภาพถ่ายพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ก่อนการดูดซับไอออนโลหะ (ก) ภายนอก (ข) ภายนอก (ค) ภายใน ของ CH (ง) ภายนอก (จ) ภายนอก (ฉ) ภายใน ของ ECH (ช) ภายนอก (ซ) ภายนอก (ฌ) ภายใน ของ ECH-NC (ก) (ง) (ช) กำลังขยาย 40 เท่า (ข) (จ) (ซ) กำลังขยาย 2000 เท่า และ (ค) (ฉ) (ฌ) กำลังขยาย 10000 เท่า	44
6	FTIR spectra ของ (a) CH (b) ECH และ (c) ECH-NC	45
7	โครงสร้างทางเคมีของ (ก) CH (ข) ECH (ค) ECH-NC และปฏิกิริยาการสังเคราะห์ ECH และ ECH-NC	46
8	ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วด้วย CH ECH และ ECH-NC ที่ความเข้มข้นสารละลาย 200 มิลลิกรัมต่อลิตรเป็นเวลา 2 4 และ 8 ชั่วโมง	52
9	ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนสังกะสีด้วย CH ECH และ ECH-NC ที่ความเข้มข้นสารละลาย 200 มิลลิกรัมต่อลิตรเป็นเวลา 2 4 และ 8 ชั่วโมง	56
10	ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วที่อุณหภูมิต่างๆ ด้วย CH ECH และ ECH-NC	59
11	ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนสังกะสีที่อุณหภูมิต่างๆ ด้วย CH ECH และ ECH-NC	59
12	ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วที่เวลาต่างๆ ด้วย CH ECH และ ECH-NC	65

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
13	ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนสังกะสีที่เวลาต่างๆ ด้วย CH ECH และ ECH-NC	67
14	ภาพถ่ายพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ก่อนและหลังการดูดซับ (ก) ภายนอกก่อนการดูดซับ (ก1) ภายนอกหลังการดูดซับไอออนตะกั่ว และ(ก2) ภายนอกหลังการดูดซับไอออนสังกะสี กำลังขยาย 2000 เท่า (ข) ภายในก่อนการดูดซับ (ข1) ภายในหลังการดูดซับไอออนตะกั่ว และ(ข2) ภายในหลังการดูดซับไอออนสังกะสี กำลังขยาย 10000 เท่า ของ ECH (ค) ภายนอกก่อนการดูดซับ (ค1) ภายนอกหลังการดูดซับไอออนตะกั่ว และ(ค2) ภายนอกหลังการดูดซับไอออนสังกะสี กำลังขยาย 2000 เท่า (ง) ภายในก่อนการดูดซับ (ง1) ภายในหลังการดูดซับไอออนตะกั่ว และ(ง2) ภายในหลังการดูดซับ กำลังขยาย 10000 เท่า ของ ECH-NC	82
ภาพผนวกที่		หน้า
1	ไอโซเทอมการดูดติดผิวตะกั่วแบบแลงเมียร์ของ CH	97
2	ไอโซเทอมการดูดติดผิวตะกั่วแบบฟรุนดิชของ CH	97
3	ไอโซเทอมการดูดติดผิวตะกั่วแบบแลงเมียร์ของ ECH	98
4	ไอโซเทอมการดูดติดผิวตะกั่วแบบฟรุนดิชของ ECH	98
5	ไอโซเทอมการดูดติดผิวตะกั่วแบบแลงเมียร์ของ ECH-NC	99
6	ไอโซเทอมการดูดติดผิวตะกั่วแบบฟรุนดิชของ ECH-NC	99
7	ไอโซเทอมการดูดติดผิวสังกะสีแบบแลงเมียร์ของ CH	100
8	ไอโซเทอมการดูดติดผิวสังกะสีแบบฟรุนดิชของ CH	100
9	ไอโซเทอมการดูดติดผิวสังกะสีแบบแลงเมียร์ของ ECH	101

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
10	ไอโซเทอมการดูดติดผิวสังกะสีแบบฟรุติซของ ECH	101
11	ไอโซเทอมการดูดติดผิวสังกะสีแบบแลงเมียร์ของ ECH-NC	102
12	ไอโซเทอมการดูดติดผิวสังกะสีแบบฟรุติซของ ECH-NC	102



ผลของไคโตซานบีดส์ที่เชื่อมโยงด้วยอีพิคลอโรไฮดริน และเอ็น-คาร์บอกซีเมทิล
ต่อการดูดซับไอออนของตะกั่ว และสังกะสี ในสารละลาย
และน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ

**Effects of Cross-linked Chitosan beads with Epichlorohydrin and
N-carboxymethyl on Adsorption of Lead(II) and Zinc(II) Ions
from Aqueous Solutions and Electroplating Wastewater**

คำนำ

โลหะหนักที่ปนเปื้อนของภาคอุตสาหกรรมในประเทศไทย ส่วนใหญ่อยู่ในกระบวนการชุบโลหะด้วยกระแสไฟฟ้า เช่น สังกะสี ตะกั่ว แคลเดียม ทองแดง โครเมียม และนิกเกิล การชุบโลหะมีหลายขั้นตอน เช่น การเตรียมผิวชิ้นงานก่อนชุบ การชุบเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า และการทำความสะอาดผิวหลังการชุบ เป็นต้น ซึ่งในแต่ละกระบวนการมีการใช้กรด เบส และสารเคมีต่างๆ เป็นส่วนประกอบ ดังนั้นน้ำทิ้งที่ออกจากกระบวนการชุบโลหะจึงมีสารพิษปนเปื้อน ลักษณะน้ำทิ้งแบ่งเป็น 3 ประเภท คือ 1. น้ำทิ้งประเภทกรดและเบส ประกอบด้วยโลหะหนัก 2. น้ำทิ้งประเภทไซยาไนด์ มาจากน้ำยาชุบทองแดง น้ำยาชุบสังกะสีแบบไซยาไนด์ และ 3. น้ำทิ้งประเภทโครเมียม มาจากน้ำยาชุบโครเมียม ซึ่งโครเมียมในรูปเฮกซะวาเลนซ์ (Cr^{6+}) มีความเป็นพิษ โดยวิธีการบำบัดน้ำทิ้งที่ใช้กันมีอยู่หลายวิธี ได้แก่ การรีดิวซ์ด้วยสารเคมีให้อยู่ในสถานะที่ไม่เป็นพิษ การปรับสภาพความเป็นกรด-เบสเพื่อให้ตกตะกอน การสกัดด้วยตัวทำละลาย และการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ ถึงแม้ว่าการบำบัดมีหลายวิธีแต่ยังคงมีปัญหาในด้านการควบคุมการปล่อยน้ำทิ้ง ถ้าหากว่าโรงงานชุบโลหะไม่ได้จัดการบำบัดอย่างถูกต้องหรือไม่ได้มาตรฐานจะทำให้ น้ำทิ้งที่ปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ สาธารณะมีการปนเปื้อนของโลหะหนักในน้ำและดินได้ ในบางครั้งระดับการปนเปื้อนสูงทำให้มีผลต่อมนุษย์ สัตว์ และพืช (วัลย์รัตน์, 2549)

งานวิจัยและผลงานตีพิมพ์เกี่ยวกับการใช้ไคตินและไคโตซานเพื่อปรับปรุงคุณภาพของน้ำเสียเริ่มเป็นที่แพร่หลาย ไคตินและไคโตซานเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่มีอยู่มากในพวกสัตว์เปลือกแข็งและในกระดองของสัตว์ เช่น แกนหมึก เปลือกกุ้ง และกระดองปู ปัจจุบันแหล่งวัตถุดิบที่ใช้ในการสังเคราะห์ไคตินราคาถูกที่สุด คือ กากเหลือทิ้งในอุตสาหกรรมห้องเย็น เนื่องจากมีวัสดุเหลือใช้

ปริมาณมาก (หัวกุ้งและเปลือกกุ้ง) ดังนั้นทางเลือกใหม่ของการใช้ของเสียเหล่านี้เป็นวัตถุดิบเพื่อแยกไคตินและนำมาเตรียมเป็นไคโตซานจึงนับว่ามีประโยชน์อย่างยิ่ง เพราะนอกจากเป็นการช่วยกำจัดของเสียจากอุตสาหกรรมอาหารแล้วยังสามารถนำมาใช้บำบัดน้ำเสียได้อีกด้วย ในประเทศไทยนับเป็นแหล่งผลิตสารไคตินและไคโตซานที่สำคัญแหล่งหนึ่ง แต่การใช้ประโยชน์นั้นยังมีปริมาณน้อย และยังไม่มีการวิจัยเกี่ยวกับวิธีการใช้และแผนการใช้สำหรับการบำบัดน้ำเสียที่เป็นระบบที่ถูกต้องเหมาะสมและมากเพียงพอ (จารุวรรณ และ โกวิทย์, 2550) ไคโตซานสามารถจับกับไอออนโลหะหนักได้หลายชนิด เนื่องจากหมู่อะมิโนบนสายไคโตซานสามารถจับกับไอออนโลหะหนักได้ แต่เนื่องจากไคโตซานสามารถละลายในกรดได้ทำให้มีข้อจำกัดในการนำไปประยุกต์ใช้ จึงมีการปรับปรุงคุณสมบัติของไคโตซานโดยการเชื่อมโยงด้วยสารเคมีที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ง่าย เช่น อีพิกโลโรไฮดริน กลูทาร์ลดีไฮด์ เป็นต้น (อนุชา, 2549) เพื่อให้ไคโตซานสามารถทนในสภาวะที่เป็นกรดได้ แต่จากการปรับปรุงไคโตซานโดยการเชื่อมโยงทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนโลหะหนักลดลงซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าตำแหน่งที่ใช้ในการดูดซับไอออนโลหะหนักถูกใช้ไปในการเชื่อมโยง (Schmuhl *et al.*, 2001) จากปัญหาดังกล่าวจึงมีงานวิจัยในการประยุกต์ใช้หมู่เคมี เช่น alkyl หรือ carboxymethyl แทนที่หมู่อะมิโนของไคโตซานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนโลหะหนัก (An *et al.*, 2009)

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงต้องการนำไคโตซานมาทำการสังเคราะห์เป็นไคโตซานบีดส์เชื่อมโยงและดัดแปลงโครงสร้างของไคโตซานบีดส์เชื่อมโยง เพื่อดูดซับโลหะหนักในสารละลาย และนำเสียจากโรงงานชุบโลหะ ได้แก่ ตะกั่ว และสังกะสี ทั้งนี้จะได้ทำการวิจัยถึงสภาวะที่เหมาะสม และปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับโลหะหนักด้วยไคโตซานบีดส์ ไคโตซานบีดส์เชื่อมโยง และไคโตซานบีดส์เชื่อมโยงที่มีการดัดแปลง

วัตถุประสงค์

1. เตรียมและศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของไคโตซานบีดส์ ไคโตซานบีดส์เชื่อมโยงด้วยอีพิคลอโรไฮดริน (epichlorohydrin) และไคโตซานบีดส์เชื่อมโยงที่มีการดัดแปลงด้วยเอ็น-คาร์บอกซีเมทิล (*N*-carboxymethyl)

2. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพของไคโตซานบีดส์ ไคโตซานบีดส์เชื่อมโยงด้วยอีพิคลอโรไฮดริน (epichlorohydrin) และไคโตซานบีดส์เชื่อมโยงที่มีการดัดแปลงด้วยเอ็น-คาร์บอกซีเมทิล (*N*-carboxymethyl) ต่อการดูดซับไอออนตะกั่ว และสังกะสีในสารละลาย และน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ

การตรวจเอกสาร

1. การบำบัดน้ำเสีย (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2545)

ปัญหาน้ำเสียเกิดขึ้นพร้อมๆ กับการเจริญเติบโตของชุมชน เนื่องจากน้ำเสียเกิดขึ้นจากการใช้น้ำเพื่อวัตถุประสงค์ต่างๆ ในสมัยก่อนปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นมีจำนวนไม่มาก เมื่อระบายลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ ชุมชนจะสามารถทำความสะอาดน้ำเสียได้ทัน อย่างไรก็ตามเมื่อมีการขยายตัวของชุมชนและมีการพัฒนาอุตสาหกรรมมากขึ้น น้ำเสียก็มีปริมาณเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่ทำความสะอาดน้ำเสียเกิดขึ้นตามวิธีการทางธรรมชาติไม่ได้ผล การเน่าเหม็นของน้ำเสียก็ปรากฏขึ้นทำให้จำเป็นต้องมีการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีต่างๆ

กระบวนการบำบัดน้ำเสียสามารถแบ่งออกเป็นประเภทใหญ่ๆ ได้ 3 ประเภท คือ

1.1 การบำบัดทางกายภาพ (physical treatment) เป็นวิธีการแยกเอาสิ่งเจือปนออกจากน้ำเสีย เช่น ของแข็งขนาดใหญ่ ทราย กรวด เศษอาหาร กรวด ทราย ไขมันและน้ำมัน โดยใช้อุปกรณ์ในการบำบัดทางกายภาพ คือ ตะแกรงคัดขยะ ถังคัดกรวดทราย ถังคัดไขมันและน้ำมัน และถังตกตะกอน ซึ่งจะเป็นการลดปริมาณของแข็งทั้งหมดที่มีในน้ำเสียเป็นหลัก

1.2 การบำบัดทางเคมี (chemical treatment) เป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียโดยใช้กระบวนการทางเคมี เพื่อทำปฏิกิริยากับสิ่งเจือปนในน้ำเสีย วิธีการนี้จะใช้สำหรับน้ำเสียที่มีส่วนประกอบอย่างใดอย่างหนึ่งดังต่อไปนี้ คือ ค่า pH สูงหรือต่ำเกินไป มีสารพิษ มีโลหะหนัก มีของแข็งแขวนลอยที่ตกตะกอนยาก มีไขมันและน้ำมันที่ละลายน้ำ มีไนโตรเจนหรือฟอสฟอรัสที่สูงเกินไป และมีเชื้อโรค ทั้งนี้อุปกรณ์ที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางเคมี ได้แก่ ถังกวนเร็ว ถังกวนช้า ถังตกตะกอน ถังกรอง และถังฆ่าเชื้อโรค

1.3 การบำบัดทางชีวภาพ (biological treatment) เป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียโดยใช้กระบวนการทางชีวภาพหรือใช้จุลินทรีย์ ในการกำจัดสิ่งเจือปนในน้ำเสียโดยเฉพาะสารอินทรีย์ ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส โดยความสกปรกเหล่านี้จะถูกใช้เป็นอาหารและเป็นแหล่งพลังงานของจุลินทรีย์ในถังเลี้ยงเชื้อเพื่อการเจริญเติบโต ทำให้น้ำเสียมีค่าความสกปรกลดลง โดยจุลินทรีย์เหล่านี้อาจเป็นแบบใช้ออกซิเจน (aerobic organisms) หรือไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic organisms)

2. ไคติน-ไคโตซาน

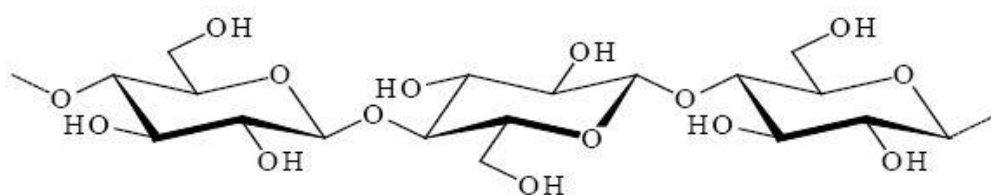
ไคติน-ไคโตซานเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติ ที่มีความคล้ายคลึงกับเซลลูโลสซึ่งเป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์ แต่ไคตินนั้นเป็นพอลิเมอร์ที่พบในสัตว์ พบมากเป็นอันดับสองรองจากเซลลูโลส (ขวัญเรือน และ ปิยนุช, 2547) พอลิเมอร์ทั้งสองนี้ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างป้องกันและสร้างความแข็งแรงให้แก่ผนังเซลล์ของสิ่งมีชีวิตโดยพบในส่วนประกอบอินทรีย์ของโครงสร้างภายนอกที่เป็นเปลือกแข็ง และกระดูกของสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังจำพวกครัสเตเชียน เช่น เปลือกกุ้ง กระดองปู เป็นต้น (จารุวรรณ และ โกวิทช์, 2550)

ไคติน มีชื่อทางเคมีว่า Poly- β -(1 \rightarrow 4)-N-acetyl-D-glucosamine เป็นสารโสมพอลิแซ็กคาไรด์ ประกอบด้วยหน่วยย่อยคือ 2-Deoxy-2-acetamino glucose เชื่อมต่อกันด้วย β -1,4-glucoside Linkage มีโครงสร้างปฐมภูมิ คล้ายเซลลูโลสดังภาพที่ 1 จะเห็นว่าโครงสร้างของไคตินต่างจากเซลลูโลสที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 คือ ไคตินเป็นหมู่อะซิตาไมด์ (-NHCOCH₃) ในขณะที่เซลลูโลสเป็นหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) เมื่อเราพิจารณาสูตร โครงสร้างของไคตินจะพบว่าไคตินเป็นสารโมเลกุลยาวที่ไร้ประจุ ทำให้ไคตินละลายในสารละลายต่างๆ ไปได้ยาก ไคตินเป็นสารสีขาวไม่ละลายน้ำ กรดเจือจาง เบสทั้งเข้มข้นและเจือจาง และตัวทำละลายอินทรีย์ แต่ละลายได้ในกรดเข้มข้น ทำให้การใช้ประโยชน์จากไคตินยังไม่แพร่หลายมากนัก

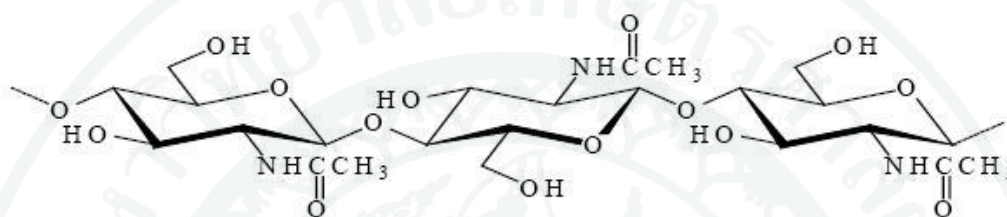
ไคโตซาน มีชื่อทางเคมีว่า Poly- β -(1 \rightarrow 4) 2-amino-2-deoxy-D-glucan เป็นอนุพันธ์ของไคตินที่เกิดจากปฏิกิริยากำจัดหมู่อะเซทิล (Deacetylation) ของไคตินด้วยเบสเข้มข้นทำให้โครงสร้างทางเคมีของไคตินเปลี่ยนไป โดยหมู่อะซิตาไมด์ (-NHCOCH₃) เปลี่ยนเป็นหมู่อะมิโน (-NH₂) จึงทำให้ไคโตซานมีขั้วลบบนหมู่อะมิโน ไคโตซานจึงละลายได้ในตัวทำละลายหลายชนิดที่มีฤทธิ์เป็นกรดอ่อน และเป็นเหตุผลสำคัญที่ทำให้การใช้ประโยชน์จากไคโตซานมากกว่าไคติน โดยทั่วไปไคโตซานจะมีร้อยละของการกำจัดหมู่อะเซทิลประมาณร้อยละ 75-95

ไคโตซานไม่ละลายทั้งในน้ำ เบส และตัวทำละลายอินทรีย์ แต่สามารถละลายได้ในสารละลายที่เป็นกรดอินทรีย์เกือบทุกชนิดที่มี pH น้อยกว่า 6 โดยทั่วไปนิยมใช้ 1% ของกรดอะซิติกและกรดฟอร์มิกในการละลายไคโตซาน ในขณะที่ไคโตซานมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 1×10^5 ถึง 1.2×10^6 ขึ้นอยู่กับขั้นตอนการผลิต สัดส่วนที่อยู่รวมกันของโมโนเมอร์เป็นตัวบ่งชี้ความเป็นไคติน-ไคโตซาน เนื่องจากไคติน-ไคโตซานเป็นโสมพอลิเมอร์ระหว่างสองโมโนเมอร์ของ N-

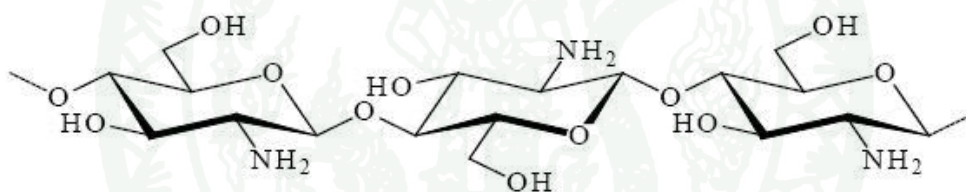
acetyl-D-glucosamine และ D-glucosamine ถ้าสัดส่วนที่อยู่รวมกันของโมโนเมอร์ N-acetyl-D-glucosamine มากกว่าจะแสดงสมบัติเด่นของไคติน แต่ถ้าสัดส่วนของโมโนเมอร์ D-glucosamine มากกว่าจะแสดงสมบัติเด่นของไคโตซาน โดยทั่วไปแล้วความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์จะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แต่ชนิดของกรดที่ใช้และการเปลี่ยนแปลง pH ของสารละลายพอลิเมอร์จะให้ผลความหนืดที่แตกต่างกัน เช่น ความหนืดของไคโตซานในกรดอะซิติกจะเพิ่มขึ้นเมื่อสารละลายมีค่า pH ลดลง ในขณะที่ความหนืดของไคโตซานในกรดไฮโดรคลอริกจะเพิ่มขึ้นเมื่อ pH ของสารละลายเพิ่มขึ้น ไคโตซานเป็นตัวสร้างตะกอนและตัวตกตะกอนที่ดีเนื่องจากการมีหมู่อะมิโนจำนวนมากที่สามารถแตกตัวจับโปรตอนเป็นประจุบวกและจับกับสารที่มีประจุลบได้ เช่น โปรตีน สีย้อม และพอลิเมอร์อื่นๆ ได้ (จารูวรรณ และ โกวิทช์, 2550) จากการวิจัยประสิทธิภาพของไคโตซานในการแยกโปรตีนจาก cheese whey พบว่าความสามารถในการจับโปรตีนเป็นส่วน ผกผันกับน้ำหนักโมเลกุลของไคโตซาน ไคโตซานจะทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน ทำให้ไอออนของโลหะสามารถสร้างพันธะเชิงซ้อนกับหมู่อะมิโนได้ ซึ่งความร้อนมีผลต่อสมบัติทางกายภาพของไคโตซาน (ขวัญเรือน และ ปิยนุช, 2547)



(ก) โครงสร้างของเซลลูโลส



(ข) โครงสร้างของไคติน



(ค) โครงสร้างของไคโตซาน

ภาพที่ 1 โครงสร้างทางเคมีของ (ก) เซลลูโลส (ข) ไคติน (ค) ไคโตซาน

ที่มา: จารุวรรณ และ โกวิทช์ (2550)

เมื่อพิจารณาโครงสร้างของไคตินและไคโตซาน พบว่ามีอะตอมของไนโตรเจนเข้าไปเติมแต่งอยู่ในรูปของหมู่เอมิโน ดังนั้นจะเห็นได้ว่าหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญของไคโตซานมี 3 หมู่ คือ หมู่เอมิโน ($-NH_2$) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 หมู่ primary alcohol ($-CH_2OH$) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 6 และหมู่ secondary alcohol ($-CHOH$) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 3 การดัดแปลงโครงสร้างทางเคมีของหมู่ฟังก์ชันสามารถก่อให้เกิดวัสดุต่างๆ ในการใช้งานที่แตกต่างกันมากมาย โดยความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้อันหลากหลายของไคตินและไคโตซานนั้นเกิดขึ้นจากโครงสร้างทางเคมีของไคตินและไคโตซาน (จารุวรรณ และ โกวิทช์, 2550; Sun-Ok, 1991)

จากการวิจัยพบว่าความร้อนจากเตาอบซึ่งเป็นความร้อนแบบแห้ง (dry heat) ที่อุณหภูมิ น้อยกว่าหรือเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส มีผลทำให้สายโซ่โพลีเมอร์มีความยืดหยุ่นมากขึ้น ส่วนความ ร้อนแบบแห้งที่อุณหภูมิสูงมีผลทำให้ไคโตซานเกิดเปลี่ยนแปลงสีเหลืองจนถึงสีน้ำตาล ขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิและระยะเวลา โดยอุณหภูมิสูงกว่าหรือเท่ากับ 120 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียสเวลานานกว่าหรือเท่ากับ 2 ชั่วโมงจะทำให้ความสามารถในการละลายของไคโตซาน ลดลง ซึ่งไคโตซานจะไม่ละลายในกรดอะซิติก (0.2 M) หรือในโซเดียมอะซิเตต (0.1 M) (ขวัญเรือน และ ปิยนุช, 2547)

2.1 สมบัติพิเศษของไคตินและไคโตซาน

(จารุวรรณ และ โกวิทช์, 2550; ภาวดี และ คณะ, 2544)

2.1.1 หมู่อะมิโน (-NH₂) หรือหมู่อะเซตาไมด์ (-NHC=O-CH₃)

อะตอมไนโตรเจนของหมู่อะมิโนซึ่งมีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว ส่งผลให้ไคโตซาน ที่สร้างพันธะกับไอออนของโลหะ โดยเฉพาะไอออนของโลหะหมู่ที่ 1A 2A และโลหะ ทรานซิชัน พบว่าเมื่อไคโตซานมีปริมาณมากขึ้นเป็นผลทำให้มีปริมาณหมู่อะมิโนมากขึ้น ความสามารถในการดูดซับไอออนของโลหะจึงมีมากขึ้น ดังนั้นจึงมีการนำไคโตซานที่เป็นผง หรือเรซินไปใช้ประโยชน์ในการบำบัดน้ำเสีย และเร่งการตกตะกอนของสารอินทรีย์ในน้ำ

หมู่อะมิโนเป็นหมู่ที่ทำให้ไคโตซานเป็นประจุบวกในสารละลายกรด เนื่องจาก เมื่อไคโตซานถูกละลายในสารละลายกรดจำพวกกรดอะซิติกและกรดฟอร์มิก หมู่อะมิโนจะรับ โปรตอนจากกรดและทำให้เกิดประจุบวก จึงทำให้ไคโตซานมีสมบัติเป็นพอลิเมอร์ประจุบวก

ถึงแม้ว่าไคตินและไคโตซานมีอะตอมไนโตรเจนในโครงสร้างโพลีเมอร์ เหมือนกัน แต่อะตอมไนโตรเจนที่อยู่ในรูปหมู่อะมิโนของไคโตซานได้รับความสนใจมากกว่าที่อยู่ใน หมู่อะเซตาไมด์ของไคติน เนื่องจากสามารถถูกดัดแปลงให้เกิดอนุพันธ์ต่างๆ ได้มากกว่า

2.1.2 หมู่ไฮดรอกซิล (OH)

จากโครงสร้างทางเคมีของไคตินและไคโตซาน จะเห็นได้ว่าในทุกหน่วยของวงไพราโนสประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล 2 ประเภท คือ ประเภทปฐมภูมิที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 6 และประเภททุติยภูมิที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 3 ประเด็นสำคัญคือหมู่ไฮดรอกซิลบนสายโซ่ไคตินและไคโตซานไม่ขึ้นกับร้อยละความเป็นไคโตซาน ทั้งนี้เนื่องจากทุกๆ หน่วยของไคตินและหน่วยของไคโตซานจะมีหมู่ไฮดรอกซิลทั้งสองประเภทนี้เสมอ สมบัติพิเศษของหมู่ไฮดรอกซิลสามารถสรุปได้ดังนี้

ความเป็นขั้วจากหมู่ไฮดรอกซิล การที่มีหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นฐานโครงสร้างเช่นเดียวกับเซลลูโลส ทำให้ไคตินและไคโตซานแสดงโครงสร้างจำเพาะที่เป็นกรดไฮดรอฟิลิก ดังนั้นจึงสามารถนำมาใช้เป็นสารเติมแต่งเกี่ยวกับการรักษาความชุ่มชื้น การเป็นเม็ดเจล หรือเชื่อมแผ่น อย่างไรก็ตามหมู่ไฮดรอกซิลเป็นหมู่หลักในตัวทำละลายทั่วไป และเชื่อมโยงไปสู่ข้อจำกัดในการปรับโครงสร้างทั้งกายภาพและทางเคมีของไคตินและไคโตซาน

อะตอมออกซิเจนในหมู่ไฮดรอกซิลซึ่งมีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว ทำให้สามารถรับประจุบวกได้ นอกจากนี้อิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวบนอะตอมออกซิเจนยังสามารถสร้างสารประกอบเชิงซ้อนกับไอออนของโลหะ พบว่าหมู่ไฮดรอกซิลซึ่งไม่เกิดปฏิกิริยา Phosphorylation สามารถจับกับไอออนโลหะและยังมีส่วนช่วยในการดูดซับให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

แม้ว่าหมู่ไฮดรอกซิลบนสายโซ่ไคติน ไคโตซานจะมีความว่องไวทางเคมีน้อยกว่าหมู่อะมิโนแต่ก็มีนักวิจัยหลายท่านให้ความสนใจในการปรับปรุงโครงสร้างทางเคมีของไคตินและไคโตซานให้เป็นอนุพันธ์ต่างๆ เนื่องจากปริมาณของหมู่ไฮดรอกซิลไม่ได้ขึ้นอยู่กับร้อยละ Degree of deacetylation ดังกล่าวมาข้างต้น ดังนั้นจึงเป็นหมู่ที่น่าสนใจในการปรับโครงสร้างทางเคมีที่ต้องการ Degree of deacetylation สูง

2.2 การดัดแปลงไคโตซาน (อนุชา, 2549)

การดัดแปลงไคโตซานเพื่อให้ไคโตซานมีประสิทธิภาพในการใช้งานได้มากขึ้น อาศัยการดัดแปลงทางเคมีและทางกายภาพ

2.2.1 การดัดแปลงทางเคมี

ไคโตซานสามารถละลายได้ในสารละลายกรดทุกชนิด การดัดแปลงไคโตซานโดยการเชื่อมไขว้ (crosslink) ด้วยสารเคมีที่มีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ง่าย ได้แก่ สารที่มีหมู่ฟังก์ชันสองหมู่ เช่น กรดไคคาร์บอกซิลิก กรดแอนไฮไดรด์ และกลูตารัลดีไฮด์ เป็นต้น โดยไคโตซานมีพันธะอะมีนแบบปฐมภูมิตลอดโครงสร้าง ซึ่งสามารถทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนได้

การใช้กลูตารัลดีไฮด์ เป็นสารเชื่อมไขว้กับหมู่อะมีนแบบปฐมภูมิ พันธะจะเป็นแบบโควาเลนต์ โดยที่โครงสร้างทางเคมีจะแสดงได้ 3 แบบ ขึ้นอยู่กับจำนวนของกลูตารัลดีไฮด์ที่เกิดการเชื่อมไขว้ดังนี้ 1) ไคโตซานจับกับหมู่อัลดีไฮด์หนึ่งหมู่ (Schiff base) ส่วนอัลดีไฮด์อีกหนึ่งหมู่จะละลาย 2) ไคโตซานสองหมู่จับกับอัลดีไฮด์สองหมู่ของกลูตารัลดีไฮด์ 3) พอลิเมอร์เชนของกลูตารัลดีไฮด์หลายๆ ตัว

การนำหมู่ไฮดรอกซิลของไคโตซานมาดัดแปลงเป็นหมู่คาร์บอกซิล มีการศึกษาเป็นเวลานานแล้ว เช่นการเตรียม caboxymethylchitosan โดยให้ไคโตซานทำปฏิกิริยากับกรด chloroacetic แล้วหยดลงในเบสซึ่งเป็นเทคนิคแรกที้นำมาใช้ สำหรับการเตรียม O-carboxymethylchitosan ซึ่งจะนำไคตินมาทำปฏิกิริยากับ dimethylsulfoxide แต่เกิดปัญหาการบวม จึงมีการแก้ปัญหาโดยนำไคโตซานมาทำปฏิกิริยากับกรด monochloroacetic และการกำจัดหมู่อะซีตลในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ขณะร้อน หลักการดัดแปลงจะอยู่ที่การเกิดปฏิกิริยา Schiff (Schiff reaction) ซึ่งเป็นการเกิดปฏิกิริยาระหว่างหมู่คาร์บอกซิลิกที่ละลายในกรดอินทรีย์กับหมู่ $-NH_2$ ของไคโตซานทำให้ได้พันธะคีโตอิมินที่มีเสถียรภาพต่ำ โดยพันธะ $>C=N-$ และมีการใช้ sodium cyanoborohydride หรือ sodium borohydride เพื่อให้ได้ไคโตซานที่คงทน และไม่ละลาย ซึ่งนำมาใช้ดูดซับสารเคมีที่ทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม

การนำหมู่ฟอสเฟตมาตัดแปลงโคโตซานให้เกิดการละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ โดยโคโตซานที่ตัดแปลงด้วยหมู่ฟอสเฟตสามารถเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับนิกเกิล สังกะสี และแคลเซียม

อนุพันธ์เอ็น-อะคริเลชันของโคโตซานสามารถเชื่อมหมู่ไฮโดรคาร์บอนด้านหนึ่ง ซึ่งทำให้เป็นส่วนที่ hydrophobic และหมู่ $-NH_2$ สามารถจับกับไอออนของโลหะได้มากขึ้น

2.2.2 การตัดแปลงทางกายภาพ

การตัดแปลงโคโตซานสามารถทำได้ด้วยวิธีทางกายภาพ เช่น การฉายรังสี หรือ การให้ความร้อน เป็นต้น

การฉายรังสีแกมมา ลำอิเล็กตรอน หรือรังสีเอกซ์ต่อพอลิเมอร์จะทำให้เกิดการดูดซับพลังงานและทำให้เกิดอนุมูลอิสระขึ้นมา การฉายรังสีจะทำให้เกิดกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน 1) แบบเชื่อมไขว้ 2) แบบเสื่อมสลาย และ 3) แบบกราฟต์ โดยกระบวนการพอลิเมอไรเซชันจะเริ่มเกิดเมื่อฉายรังสีสู่วินิลโมเมอร์ การบ่มโดยการฉายรังสีจะทำให้พอลิเมอร์มีการตอบสนองต่อรังสีที่ต่างกัน โดยโครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์มีผลต่อการเชื่อมไขว้หรือการเสื่อมสลาย

การเชื่อมไขว้โดยให้ความร้อนแก่โคโตซาน โดยจะทำให้โคโตซานมีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำ ปฏิริยาจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ เวลา และสารละลายที่ใช้ โดยจะใช้อุณหภูมิในการทำปฏิริยาตั้งแต่ 40-160 องศาเซลเซียส เช่น การใช้ isopropyl alcohol เป็นสารละลาย โดยปฏิริยาการเชื่อมไขว้ที่จะทำที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และใช้เวลา 6-24 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดการเชื่อมไขว้อย่างสมบูรณ์

2.3 การประยุกต์ใช้ไคตินและโคโตซาน (จารูวรรณ และ โกวิทช์, 2550)

เนื่องจากสารไคตินและโคโตซาน มีความหลากหลายและโดดเด่นในทางเคมี โดยเฉพาะอย่างยิ่งประสิทธิภาพของการเกิดปฏิริยาของโลหะหนักด้วยกรรมวิธีเคมีเชิงซ้อน ทำให้มีการนำเอาไคตินและโคโตซานมาใช้ในการจับและดูดซับเพื่อการแยกสิ่งปนเปื้อนต่างๆ ที่ละลายใน

น้ำเสียโดยสามารถแยกตะกอนแล้วนำกลับมาใช้ประโยชน์ในทางอื่นๆ ได้ เช่น อาหารสัตว์ และปุ๋ยชีวภาพ เป็นต้น การประยุกต์ใช้สารไคตินและไคโตซานในผลิตภัณฑ์และอุตสาหกรรมต่างๆ อาจแบ่งได้ดังนี้

ด้านการเกษตร ปัจจุบันไคตินและไคโตซานมีบทบาทอย่างมากในด้านการนำไปใช้ทางการเกษตร เนื่องจากสมบัติที่เด่นในการเป็นตัวกระตุ้นให้พืชสร้างสารป้องกันตัวมันเองขึ้นได้ และยังมียับยั้งเชื้อราบางชนิดที่ทำให้เกิดโรคโคนเน่าในพืชได้ จึงมีการนำมาฉีดพ่นบนพืชผัก พืชดอก พืชผล และนาข้าว นอกจากนี้ยังนำไปใช้ผสมในอาหารสัตว์ ช่วยให้สัตว์เจริญเติบโตแข็งแรง มีสุขภาพดี และยังสามารถนำไปใช้ในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ เช่น ในการเลี้ยงกุ้งช่วยให้กุ้งลอกคราบได้ดีและมีสุขภาพแข็งแรง ซึ่งถ้าหากมีการใช้ไคตินและไคโตซานอย่างเหมาะสมจะเป็นทางเลือกใหม่ให้เกษตรกรลดการใช้สารเคมีไปได้ ซึ่งจะก่อให้เกิดประโยชน์ในด้านการลดมลภาวะ รักษาสิ่งแวดล้อม และลดการนำเข้าของสารเคมีทางการเกษตรจากต่างประเทศ นำไปสู่การลดต้นทุนการผลิตทางการเกษตรได้

ด้านอาหาร ได้มีผลิตภัณฑ์อาหารที่ผสมไคตินและไคโตซานเป็นจำนวนมากออกวางขายในท้องตลาด เนื่องจากสมบัติที่สามารถต่อต้านจุลินทรีย์และเชื้อราบางชนิดได้ จึงได้นำมาใช้เป็นสารกันบูด สารปรุงแต่งเพื่อความคงรูปและสีในอาหารชนิดต่างๆ

ด้านการแพทย์และเภสัชกรรม ไคตินและไคโตซานมีบทบาทในรูปแบบอาหารเสริมที่ใช้ลดไขมันและน้ำหนัก การใช้เป็นผิวเทียม การรักษาแผลไฟไหม้น้ำร้อนลวก การใช้รักษาหenggอกและฟัน การใช้รักษาและเสริมสร้างสุขภาพของกระดูกอ่อน การใช้เป็นสารหล่อลื่นในเยื่อเมือก ตลอดจนเล่นสตัค การช่วยให้เลือดแข็งตัวเร็วขึ้น เป็นต้น

ด้านอุตสาหกรรมสิ่งทอและกระดาษ การใช้ไคตินและไคโตซานผสมในเส้นใยเพื่อพัฒนาเสื้อผ้าและสิ่งทอที่สามารถป้องกันเชื้อโรคได้ นอกจากนี้ยังมีสมบัติเด่นในด้านการเสริมสร้างความเหนียวและแข็งแรงให้แก่เส้นใยและเยื่อกระดาษ ซึ่งสามารถนำมาใช้เพื่อเพิ่มคุณภาพและพัฒนาให้ดียิ่งขึ้น

ด้านเทคโนโลยีชีวภาพ โครงสร้างของไคตินอาจประกอบด้วยกลุ่มอะมิโนอิสระ ซึ่งสามารถจับกับเอนไซม์ได้และเพิ่มประสิทธิภาพในการจับกับเอนไซม์จึงมีการเตรียมไคตินให้

เหมาะสม เช่น แชนในสารละลายกลูตารัลดีไฮด์หรือสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์ เนื่องจากสาร ไดอัลดีไฮด์หรือพอลิอัลดีไฮด์สามารถทำปฏิกิริยากับกลุ่มอะมิโนอิสระได้ง่าย แล้วทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางสำหรับการจับระหว่างเอนไซม์กับโคโคตินอย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับการตรึงเอนไซม์ด้วยโคโคซาน ไม่จำเป็นต้องใช้สารพวกไดอัลดีไฮด์หรือพอลิอัลดีไฮด์เป็นสะพานเชื่อมระหว่างเอนไซม์กับตัวค้ำจุน เนื่องจากโคโคซานมีกลุ่มอะมิโนอิสระเพียงพอในการจับกับเอนไซม์

ด้านการบำบัดน้ำเสีย ใช้เป็นสารตกตะกอน โคโคซานเป็นพอลิเมอร์โมเลกุลยาวที่มีประจุบวกจึงมีสมบัติที่เหมาะสมในการเป็นสารช่วยตกตะกอนที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย โคโคซานไม่ละลายน้ำจึงมีการใช้โคโคซานในรูปสารละลายกรด เนื่องจากโคโคซานละลายได้ในกรดหลายชนิด โดยปริมาณโคโคซานและสภาวะต่างๆ ในการตกตะกอนจะแตกต่างกันไปตามชนิดของน้ำทิ้งและสารชนิดอื่นที่ใช้ร่วมกับโคโคซานในการตกตะกอน

ใช้กำจัดโลหะหนักและสารพิษ โลหะหนักเป็นสิ่งที่มิพิษต่อร่างกายเมื่อได้รับในปริมาณมากเกินไปและอาจมีฤทธิ์สะสมก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพ ดังนั้นจึงมีการใช้โคโคตินและโคโคซานในการกำจัดโลหะหนัก เช่น Cu^{2+} Cr^{3+} Ni^{2+} Zn^{2+} Fe^{3+} และ Mn^{2+} โคโคตินและโคโคซานสามารถจับกับสารกำจัดแมลงเช่น DDT และสารปนเปื้อนในแหล่งน้ำ เช่น พลูโตเนียม สารเมทิลเมอร์คิวรีอะซิเตทและมีการใช้โคโคซานในการกำจัดปิโตรเลียมและผลิตภัณฑ์ของน้ำมันในน้ำเสีย นอกจากนี้ยังมีการใช้โคโคซานในการกำจัดโลหะหนักในกระบวนการผลิตน้ำบริสุทธิ์

ใช้ในการดูดซับสี โคโคซานได้ถูกวิจัยและพัฒนาเพื่อใช้เป็นตัวดูดซับสีข้อมและไอออนของโลหะต่างๆ จากน้ำเสีย หลังจากขั้นตอนของการดูดซับแล้ว สีข้อม และโลหะที่ถูกดูดซับเหล่านั้นยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

3. การดูดซับ (สุภาพร, 2548)

การดูดซับเกิดขึ้นเป็น 3 ระยะติดต่อกัน ได้แก่ ระยะที่ 1 โมเลกุลของตัวถูกดูดซับในสารละลายจะเคลื่อนที่ไปเกาะอยู่รอบนอกของตัวดูดซับ ระยะที่ 2 โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะแพร่กระจายเข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับ ระยะที่ 3 โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเกิดการดูดติดผิวในรูพรุนของตัวถูกดูดซับ การดูดซับเป็นการทำให้ตัวถูกดูดซับเข้มข้นขึ้นที่ผิวของตัวดูดซับ

ชั้น โมเลกุลของตัวถูกคูดซ์จะเพิ่มขึ้นที่พื้นผิวตัวคูดซ์เนื่องมาจากแรงดึงดูดที่ผิวของตัวคูดซ์กับตัวถูกคูดซ์ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นเมื่อพื้นผิวของตัวคูดซ์สัมผัสกับตัวถูกคูดซ์

3.1 ลักษณะการคูดซ์ (Virtual Amrita Laboratories Universalizing Education, 2014)

การคูดซ์ทางกายภาพ การคูดซ์ประเภทนี้จะไม่มีตำแหน่งของการคูดซ์ที่แน่นอน และสามารถย้อนกลับได้ เป็นการคูดซ์แบบหลายชั้น จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเดือดของตัวถูกคูดซ์ การคูดซ์เกิดขึ้นต้องมีปริมาณของตัวถูกคูดซ์มากกว่าตัวคูดซ์ และความร้อนที่ใช้ในการคูดซ์ 1 กิโลแคลอรีต่อโมล เกิดขึ้นจากแรงดึงดูดระหว่าง โมเลกุลของตัวคูดซ์กับตัวถูกคูดซ์มีค่ามากกว่าแรงดึงดูดระหว่าง โมเลกุลของตัวถูกคูดซ์ในสารละลาย ดังนั้นตัวถูกคูดซ์จะยึดติดแน่นบนผิวของตัวคูดซ์ ถ้าตัวคูดซ์มีความพรุนสูง ของเหลวหรือก๊าซที่ควบแน่นนั้นจะซึมผ่านเข้าสู่ช่องว่างภายในตัวคูดซ์ได้ ถึงแม้ว่าความดันของระบบจะต่ำกว่าความดันไอของระบบก็ตาม ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิต่ำ จะให้ความร้อนออกมามากกว่าความร้อนของการควบแน่น เมื่อลดความดันของระบบหรืออุณหภูมิลงจะทำให้ความสามารถในการคูดซ์ลดลง ทำให้ตัวถูกคูดซ์เคลื่อนที่ออกจากตัวคูดซ์ ปรากฏการณ์ช่วงนี้เรียกว่า การคายซั ซึ่งเป็นการนำตัวคูดซ์กลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง การคูดซ์นี้สารถูกคูดซ์ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมี การคูดซ์ทางกายภาพบางครั้งเรียกว่า การคูดซ์แบบแวนเดอร์วาล แรงดึงดูดของการคูดซ์ทางกายภาพ เช่น แรงแวนเดอร์วาล รวมทั้งแรงไฟฟ้าสถิตย์บริเวณผิวรอบนอกสารประกอบ

การคูดซ์ทางเคมี เป็นการคูดซ์ที่ตัวคูดซ์และตัวถูกคูดซ์สร้างพันธะระหว่างกัน มีตำแหน่งของการคูดซ์ที่แน่นอน จะเป็นการคูดซ์แบบชั้นเดียว เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง การคูดซ์จะเกิดได้ต้องขึ้นอยู่กับอุณหภูมิทั้งตัวคูดซ์ และตัวถูกคูดซ์ ความร้อนที่ใช้ในการคูดซ์ 50-100 กิโลแคลอรีต่อโมล การคูดซ์ทางเคมีแตกต่างจากการคูดซ์ทางกายภาพ คือ จะเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวคูดซ์กับตัวถูกคูดซ์ เกิดการสร้างพันธะระหว่างตัวถูกคูดซ์กับตัวคูดซ์ที่พื้นผิวของตัวคูดซ์ ทำให้พื้นที่ผิวของตัวคูดซ์ลดลง โดยอาจเกิดการแลกเปลี่ยนลิแกนด์ พันธะ โควาเลนต์ และ/หรือพันธะไฮโดรเจน

3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ (Virtual Amrita Laboratories Universalizing Education, 2014)

ธรรมชาติของสารดูดซับ โดยเฉพาะพื้นที่ผิว โครงสร้างของรูพรุน และขนาดของตัวดูดซับ พื้นที่ผิวเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวของสารดูดซับมากขึ้น อย่างไรก็ตามพื้นที่ผิวของสารดูดซับไม่พอที่จะอธิบายความสามารถในการดูดซับได้ดี โครงสร้างของรูพรุนก็มีส่วนช่วยให้พื้นผิวมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น ตัวอย่างเช่น หากปากโพรงของรูพรุนมีขนาดเล็กกว่าโมเลกุลที่ถูกดูดซับ การดูดซับภายในรูพรุนก็จะเกิดขึ้นได้ยาก

ธรรมชาติของตัวถูกดูดซับ ได้แก่ ความสามารถในการละลาย น้ำหนัก ขนาดโมเลกุล และความมีขี้ของโมเลกุล ตัวถูกดูดซับที่มีความสามารถในการละลายสูงจะถูกดูดซับได้น้อย เพราะก่อนที่จะเกิดกระบวนการดูดซับขึ้นจะต้องมีการทำลายพันธะระหว่างตัวถูกละลายและตัวทำละลายก่อน ถ้าน้ำหนักและขนาดโมเลกุลของสารถูกดูดซับเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น ถ้าน้ำหนักโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับสามารถเข้าไปในรูพรุนของสารดูดซับได้ การดูดซับก็จะเพิ่มขึ้น

สภาพแวดล้อม ตัวอย่างเช่น อุณหภูมิ และค่า pH ผลของอุณหภูมิของสารละลาย ถ้าปฏิกิริยาการดูดซับเป็นชนิดคายความร้อนการดูดซับจะมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง pH ของสารละลายมีผลต่อรูปแบบของโลหะ เช่น ไอออนของตะกั่วขึ้นอยู่กับ pH ของสารละลาย ที่ pH ต่ำกว่า 6 ตะกั่วจะอยู่ในรูป Pb^{2+} ซึ่งละลายน้ำได้

3.3 สมดุลและไอโซเทอมของการดูดซับ

การดูดซับด้วยของแข็งที่เกิดขึ้นในสารละลาย (Liquid-solid adsorption) จะสัมพันธ์กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายบนผิวของแข็ง ขณะที่กระบวนการดูดซับดำเนินไปเรื่อยๆ ก็จะเกิดกระบวนการคายซับไปด้วยเช่นกัน จนในที่สุดเมื่ออัตราการดูดซับและอัตราการคายซับเท่ากันหรือระบบเข้าสู่สมดุล เรียกว่า สมดุลของการดูดซับ ที่สภาวะสมดุลของการดูดซับ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับจะไม่เปลี่ยนแปลง ตำแหน่งที่เกิดสมดุลของการดูดซับต่างๆ จะเป็น

คุณสมบัติของระบบนั้นๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับตัวถูกละลาย ตัวดูดซับ ตัวทำละลาย อุณหภูมิ และ pH ของระบบ โดยทั่วไปจะใช้ไอโซเทอมของการดูดซับเป็นตัวแทนในการอธิบายความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้น

3.3.1 สมการแลงเมียร์ (Piero, 2014)

สมการแลงเมียร์ถูกอธิบายโดย Irving Langmuir เพื่ออธิบายการดูดซับก๊าซบนพื้นผิว สมการของแลงเมียร์ใช้ได้ดีที่สุดเมื่ออธิบายการดูดซับที่ความเข้มข้นต่ำเช่นเดียวกับสมการฟรุนดลิช เป็นสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาแบบต่างชนิด สมมติฐานของสมการแลงเมียร์ มีดังต่อไปนี้

1. การดูดซับจะเกิดบนพื้นผิวที่มีพื้นที่ในการดูดซับที่แน่นอน
2. พื้นผิวที่นั้นๆ สามารถดูดซับโมเลกุลได้เพียงชั้นเดียว
3. จะไม่มีการเคลื่อนย้ายหรือเปลี่ยนตำแหน่งของไอออนหรือโมเลกุลที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ
4. พลังงานในการดูดซับจะเท่ากันในทุกๆ พื้นที่ของการดูดซับ และไม่มีปฏิสัมพันธ์ (interaction) ระหว่างไอออนหรือโมเลกุลที่ถูกดูดซับ

สมการแลงเมียร์จะใช้ได้ดีที่สุดกับการดูดซับด้วยตัวดูดซับที่มีพื้นผิวเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) สามารถแสดงได้ตั้งสมการ 1 ซึ่งประยุกต์ใช้กับการดูดซับไอออนของโลหะหนักบนตัวดูดซับโคโคซาน

$$\frac{C_e}{Q_e} = \frac{C_e}{Q_m} + \frac{1}{Q_m b} \quad (1)$$

โดยที่ C_e = ความเข้มข้นของไอออนโลหะหนักในสารละลายที่จุดสมดุล; (มิลลิกรัมต่อกรัม)

Q_e = ประสิทธิภาพการดูดซับ (Adsorption capacity) ไอออนโลหะหนักต่อโคโคซานที่สภาวะสมดุล; (มิลลิกรัมต่อกรัม)

Q_m = ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนโลหะหนักต่อโคโคซานที่มากที่สุด (Maximum adsorption capacity); (มิลลิกรัมต่อกรัม)

b = ค่าคงที่พลังงานของการดูดซับ; (มิลลิลิตรต่อมิลลิกรัม)

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง C_e และ C_e/Q_e จะได้สมการเส้นตรงที่มีความชัน $1/Q_m$ จุดตัดแกน C_e/Q_e เท่ากับ $1/Q_m b$

3.3.2 สมการฟรุนดลิช (Piero, 2014)

คิดค้นโดยนักเคมีฟิสิกส์ ชื่อ เฮร์เบิร์ต ฟรุนดลิช เป็นการดูดซับบนพื้นผิวแบบต่างชนิดกัน เป็นการดูดซับแบบหลายชั้น สมการฟรุนดลิชถูกใช้ครั้งแรกเพื่ออธิบายการดูดซับก๊าซและตัวถูกละลายในสารละลาย เป็นสมการดูดซับที่ได้จากการทดลองซึ่งอธิบายถึงการลดลงของพลังงานในการดูดซับเมื่อการปกคลุมผิวของตัวดูดซับเพิ่มขึ้น สามารถแสดงในสมการ 2

$$\ln Q_e = b_F \ln C_e + \ln K_F \quad (2)$$

โดยที่ C_e = ความเข้มข้นของไอออนโลหะหนักในสารละลายที่จุดสมดุล; (มิลลิกรัมต่อกรัม)

Q_e = ประสิทธิภาพการดูดซับ (Adsorption capacity) ไอออนโลหะหนักต่อไโคโตซานที่สถานะสมดุล; (มิลลิกรัมต่อกรัม)

K_F = ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนโลหะหนักต่อไโคโตซานที่มากที่สุด (Maximum adsorption capacity); (มิลลิกรัมต่อกรัม)

b_F = ค่าคงที่ความสัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับ

จากสมการเมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln Q_e$ กับ $\ln C_e$ มีค่าความชันของกราฟเท่ากับ b_F และที่จุดตัดแกน $\ln Q_e$ มีค่าเท่ากับ $\ln K_F$ สำหรับการดูดซับของสารอินทรีย์บนผิวของสารดูดซับส่วนใหญ่จะมีค่า $\ln K_F$ ต่ำกว่า 1 กราฟที่มีค่า b_F เข้าใกล้ 1 พบว่าความสามารถการดูดซับที่ความเข้มข้นของสารละลายสูงๆ จะมีค่ามากและความสามารถนี้จะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความเข้มข้นของสารละลายลดต่ำลง และในกรณีที่ความชันมีค่าน้อยๆ และค่า b_F จะน้อยกว่า 1 พบว่าความสามารถในการดูดซับจะลดลงเพียงเล็กน้อย เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายให้ต่ำลง จากสมการฟรุนดลิชจึงบ่งชี้ถึงความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับจะมีค่าขึ้นอยู่กับค่าความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลาย

3.4 จลนศาสตร์การดูดซับ (Dabrowski, 2001)

ลักษณะการดูดซับหรือการส่งถ่ายมวลสารที่อยู่ภายในสารละลายไปยังพื้นที่ผิวของของแข็ง ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้กำจัดสารปนเปื้อน มี 3 ขั้นตอน คือ

1) การถ่ายโอนมวลสารของสารที่ถูกดูดซับจากวัฏภาคของเหลวหรือก๊าซเข้าสู่บริเวณรอบนอกที่ใกล้กับพื้นผิวของสารดูดซับหรือที่ทางเข้ารูพรุนของสารดูดซับ

2) การแพร่กระจายของมวลสารที่ถูกดูดซับจากพื้นผิวภายนอกของสารดูดซับสู่ผิวภายในรูพรุนของสารดูดซับ

3) การดูดซับ คือ การที่โมเลกุลที่อยู่ภายในรูพรุนถูกดูดซับจากสารละลายไปติดอยู่วัฏภาคของแข็ง ซึ่งเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับ 2 ขั้นตอนที่ผ่านมา คาดว่าสภาวะสมดุลเกิดขึ้นระหว่างวัฏภาคทั้งสองนี้

การศึกษาอัตราเร็วปฏิกิริยาของการดูดซับ ไอออนของตะกั่ว และสังกะสีในสารละลายด้วยไคโตซานบีดส์ ไคโตซานบีดส์เชื่อมโยง และไคโตซานบีดส์เชื่อมโยงที่มีการดัดแปลง ใช้แบบจำลองอันดับหนึ่งเทียม และอันดับสองเทียม

สมการอันดับหนึ่งเทียม แสดงดังสมการที่ 3

$$\ln(Q_e - Q_t) = \ln Q_e - k_1 t \quad (3)$$

โดยที่ Q_e = ประสิทธิภาพการดูดซับ (Adsorption capacity) ไอออนโลหะหนักต่อไคโตซานที่สภาวะสมดุล; (มิลลิกรัมต่อกรัม)

Q_t = ประสิทธิภาพการดูดซับ (Adsorption capacity) ไอออนโลหะหนักต่อไคโตซานที่เวลาใด ๆ; (มิลลิกรัมต่อกรัม)

k = ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา; (นาที)

t = เวลา; (นาที)

จากสมการเมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง t และ $\ln(Q_c - Q_t)$ ในแกน มีค่าความชันของกราฟเท่ากับ $-k_1$ และที่จุดตัดแกน Y มีค่าเท่ากับ $\ln Q_c$

สมการอันดับสองเทียบ แสดงดังสมการที่ 4

$$t/Q_t = 1/(k_2 Q_c^2) + t/Q_c \quad (4)$$

จากสมการเมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง t/Q_t และ t มีค่าความชันของกราฟเท่ากับ $1/Q_c$ และที่จุดตัดแกน Y มีค่าเท่ากับ $k_2 Q_c^2$

4. การชุบโลหะ (วลัยรัตน์, 2549)

ในกระบวนการชุบโลหะ เช่น โครเมียม สังกะสี ทองแดง ด้วยไฟฟ้ามีหลายขั้นตอน เช่น การเตรียมผิวชิ้นงานก่อนชุบ การชุบเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า และการทำความสะอาดผิวหลังการชุบ เป็นต้น ซึ่งในแต่ละกระบวนการมีการใช้กรด เบส และสารเคมีต่างๆ เป็นส่วนประกอบของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ชุบโลหะ หลังจากชุบโลหะเรียบร้อยแล้วไปล้างทำความสะอาด ดังนั้น น้ำทิ้งที่ออกจากกระบวนการชุบโลหะจะเต็มไปด้วยสารที่เป็นพิษ ซึ่งจำเป็นต้องบำบัดก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ

คุณลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ น้ำเสียส่วนใหญ่มาจากกระบวนการชุบและล้างชิ้นงาน ดังนั้นเพื่อให้วิธีการบำบัดน้ำทิ้งเหล่านี้สะดวกและประหยัดค่าใช้จ่าย น้ำทิ้งที่มีคุณลักษณะทางเคมีต่างกันจะถูกแยกให้ไหลลงบ่อเก็บที่แตกต่างกัน โดยจะแยกน้ำทิ้งออกเป็น 3 ประเภท คือ 1. น้ำทิ้งประเภทกรดและเบส ซึ่งประกอบไปด้วยโลหะหนัก 2. น้ำทิ้งประเภทไซยาไนด์ ซึ่งได้มาจากน้ำยาชุบทองแดง น้ำยาชุบสังกะสีแบบไซยาไนด์ น้ำยาชุบทอง 3. น้ำทิ้งประเภทโครเมียม ซึ่งได้มาจากน้ำยาชุบโครเมียมหรือน้ำยาโครเมตในการชุบโครเมียม สารประกอบของโครเมียมที่ปนอยู่ในน้ำยาชุบเหล่านี้จะอยู่ในรูปเฮกซะวาเลนซ์โครเมียม Cr^{6+} ซึ่งเป็นพิษและไม่ตกตะกอน จึงจำเป็นต้องเปลี่ยน Cr^{6+} ให้อยู่ในรูป Cr^{3+} จึงจะตกตะกอนได้

ตารางที่ 1 แหล่งกำเนิดสารที่เป็นพิษจากกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

	สารที่เป็นพิษ	แหล่งกำเนิด	วิธีบำบัด
น้ำมัน	สารประเภทไขมัน	การเตรียมชิ้นงานก่อนชุบ	การแยกไขมัน
ของแข็ง	ยาขัด ทราบ	การขัด	การตกตะกอน
กรด	กำมะถัน เกลือ ไนตริก กรดกัดแก้ว ฟอส ฟอริก กรดน้ำส้ม	การจุ่มกรดเพื่อกระตุ้นผิว การขัดเงาด้วยสารเคมี	ทำให้เป็นกลาง
เบส	โซดาไฟ โซเดียม คาร์บอเนต โซเดียมซลิ เกต โซเดียมฟอสเฟต	ต้มล้างไขมัน ทำให้เป็น กลาง การกัดผิวอลูมิเนียม	ทำให้เป็นกลาง
ไซยาไนด์	สารประกอบไซยาไนด์ ต่างๆ	ล้างด้วยไฟฟ้าหรือจากถัง ชุบ	ทำการออกซิเดชันโดย ใช้สารประเภทคลอรีน
กรดโครมิก	กรดโครมิก	น้ำยาชุบ การทำโครเมต	ทำการรีดักชันแล้ว ตกตะกอน
ไอออน เชิงซ้อน	ไอออนเชิงซ้อนของ ทองแดง นิกเกิล	น้ำยาชุบ	ทำให้สารประกอบ เชิงซ้อนเกิดการ แยกตัวทำให้เป็นกลาง แล้วตกตะกอน
โลหะหนักใน รูปของไอออน	ทองแดง นิกเกิล เหล็ก โครเมียม สังกะสี ตะกั่ว	ในน้ำยาชุบและการเตรียม ก่อนชุบ	ใช้เบส

ที่มา: วลัยรัตน์ (2549)

ในน้ำเสียแต่ละประเภท สารปนเปื้อนที่เป็นพิษเป็นสารคนละชนิดมีสมบัติทางเคมีแตกต่างกัน จำเป็นจะต้องใช้วิธีการทางเคมีที่แตกต่างกันในน้ำเสียแต่ละประเภทดังนี้

1. ไซยาไนด์ อยู่ในรูปที่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต จำเป็นต้องเปลี่ยนให้อยู่ในรูปที่เป็นพิษน้อยลง คือ ไซยาเนต (CNO^-) โดยใช้โซเดียมไฮโปคลอไรท์ ($NaClO$) เปลี่ยน CN^- ไปเป็น CNO^- ก่อนแล้วทำปฏิกิริยาต่อไปเป็นก๊าซไนโตรเจน

2. เฮกซะวาเลนต์โครเมียม (Cr^{6+}) กำจัดโดยใช้โซเดียมไบซัลไฟต์ (NaHSO_3) จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันเปลี่ยน Cr^{6+} ให้อยู่ในรูป Cr^{3+} เพื่อช่วยในการตกตะกอนของโครเมียมแล้วกำจัด Cr^{3+} ต่อไปโดยการตกตะกอนเป็น $\text{Cr}(\text{OH})_3$

3. โลหะหนักอื่นๆ กำจัดโดยทำให้ตกตะกอนเป็น $\text{M}(\text{OH})_x$ โดยใช้โซดาไฟ (NaOH) โลหะหนักแต่ละชนิดจะตกตะกอนที่ pH ต่างๆ กัน

4. กรดต่าง กำจัดโดยการปรับค่าความเป็นกรด-เบส (pH) โดยใช้กรดกำมะถัน (H_2SO_4) และโซดาไฟ (NaOH)

ไซยาไนด์ในน้ำที่มาจากโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้ามีความเข้มข้นประมาณ 40-100 พีพีเอ็ม (ppm) ไซยาไนด์ในน้ำที่เป็นสารพิษ จำเป็นต้องกำจัดให้อยู่ในรูปที่เป็นพิษน้อยลง คือ ไซยาเนตด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรต์ (NaOCl) ไซยาเนตมีความเป็นพิษน้อยกว่าไซยาไนด์ถึง 1000 เท่า แต่ถ้าต้องการให้ปลอดภัยขึ้นก็ต้องกำจัดไซยาเนตต่อไป ด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรด์ จะได้สารผลิตภัณฑ์คือ คาร์บอนไดออกไซด์ และไนโตรเจนซึ่งเป็นสารที่ไม่มีพิษเลย ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีดังนี้

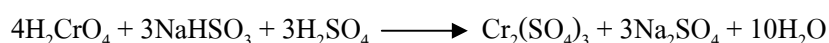


ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นที่ค่า pH = 12



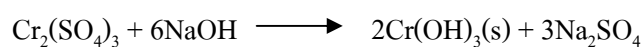
ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นที่ค่า pH = 7 – 8

โครเมียมในน้ำที่ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของกรดโครมิก (H_2CrO_4) จากนั้นยาชุบโครเมียมหรือโซเดียมไดโครเมต ($\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) ซึ่งโครเมียมอยู่ในรูป Cr^{6+} (aq) ต้องเปลี่ยนให้เป็น Cr^{3+} ซึ่งสามารถตกตะกอนได้ โดยใช้โซเดียมไบซัลไฟต์ (NaHSO_3) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังนี้



ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นที่ค่า pH = 2

ต่อจากนั้นจึงทำการตกตะกอน Cr^{3+} ดังปฏิกิริยา



ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นที่ค่า $\text{pH} = 8 - 9$

โลหะหนักในน้ำทิ้งมาจากการกัดผิวโลหะ เพื่อกำจัดสนิมหรือกระตุ้นผิวก่อนการชุบหรือการขัดเงาชิ้นงานอลูมิเนียมด้วยโซดาไฟ โลหะหนักเหล่านี้ได้แก่ เหล็ก (Fe^{2+}) ทองแดง (Cu^{2+}) สังกะสี (Zn^{2+}) นอกจากนี้ยังมีโลหะจากน้ำยาชุบโดยตรงซึ่งเกิดจากการล้างชิ้นงานด้วยน้ำ ได้แก่ ทอง (Au^{3+}) นิกเกิล (Ni^{2+}) โครเมียม (Cr^{6+}) โลหะหนักเหล่านี้จะถูกกำจัดออกไป โดยการทำให้ตกตะกอนในรูปสารประกอบไฮดรอกไซด์โดยใช้โซดาไฟเป็นตัวทำให้ตกตะกอน ดังปฏิกิริยา



การกำจัดกรดและเบสจะควบคู่กันไป พร้อมกับการกำจัดไซยาไนด์ โครเมียม และโลหะหนัก น้ำที่ผ่านการกำจัดไซยาไนด์และโครเมียมแล้วจะไหลมารวมกัน หลังจากนั้นเติมโซดาไฟเพื่อปรับค่า $\text{pH} = 9.5 - 10.5$ ในน้ำทิ้ง และเมื่อทำการตกตะกอนโลหะหนักออกไป น้ำทิ้งจะมีค่า pH เป็นเบส ($\text{pH} = 10$) เติมกรดลงไปเพื่อปรับสภาพ pH ให้เป็นกลาง (Neutralization) ก่อนที่จะปล่อยทิ้งไป

ตารางที่ 2 มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งของโรงงานชุบโลหะ

ประเภทของสาร	ค่าที่กำหนด	หน่วย
ความเป็นกรด-เบส (pH)	5-9	-
ไซยาไนด์	ไม่เกิน 0.2	มิลลิกรัม/ลิตร
สังกะสี	ไม่เกิน 5	มิลลิกรัม/ลิตร
ตะกั่ว	ไม่เกิน 0.2	มิลลิกรัม/ลิตร
นิกเกิล	ไม่เกิน 0.2	มิลลิกรัม/ลิตร
โครเมียม	ไม่เกิน 0.5	มิลลิกรัม/ลิตร

5. โลหะหนัก

โลหะหนักที่เกิดขึ้นในธรรมชาติไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม เพราะจะปรากฏปริมาณเพียงเล็กน้อย แต่โลหะหนักจะมีอันตรายยิ่งขึ้นถ้ามีในปริมาณมาก อันเนื่องมาจากอุตสาหกรรม โลหะหนักที่เป็นอันตราย ได้แก่ปรอท สารหนู ทองแดง แบเรียม แคดเมียม โครเมียม ตะกั่ว และสังกะสี เป็นต้น

ธาตุโลหะหนัก (heavy metal) หมายถึง ธาตุที่มีความหนาแน่นมากกว่า 5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีเลขเชิงอะตอม (atomic number) ในช่วง 23-92 ธาตุโลหะหนักจัดเป็นธาตุพิษที่สามารถก่อให้เกิดมลพิษเมื่อมีการปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม ในการวิจัยจะกล่าวถึง 2 ธาตุที่ทำการศึกษาในการปนเปื้อนจากน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะ

สังกะสี (Zinc, Zn) เป็นโลหะชนิดหนึ่งที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ส่วนใหญ่พบในรูปของสินแร่ sphalerite (ZnS) เมื่อนำสังกะสีมาถลุงจะได้โลหะที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้ เช่น การชุบโลหะ ภาชนะเคลือบสี ยารักษาโรคผิวหนัง

การแพร่กระจายของสังกะสีออกสู่สิ่งแวดล้อมได้มากมาย จากการเปลี่ยนแปลงทางธรรมชาติและกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การถลุงแร่สังกะสีถ้าหากขาดการจัดการที่ดีจะส่งผลให้มีสังกะสีในรูปสารประกอบเป็นพิษมากกว่าในรูปธาตุหรือไอออนบวกตามธรรมชาติ

ความเป็นพิษของสังกะสีโดยส่วนใหญ่ร่างกายมนุษย์ได้รับสังกะสีจากการใช้ภาชนะที่ชุบสังกะสีมาใส่อาหาร และถ้าอาหารมีสภาพเป็นกรดก็จะกัดกร่อนสังกะสีออกจากภาชนะปะปนอยู่ในอาหาร ส่งผลต่อการทำงานของระบบควบคุมหรือระบบเมแทบอลิซึมในร่างกาย เกิดอาการปวดท้อง อาเจียน คลื่นไส้ ซีด และก่อให้เกิดมะเร็งได้ (สิริกร, 2550)

ตะกั่ว (Lead, Pb) เป็นโลหะที่มีสีเงินแกมฟ้า สามารถพบได้ตามธรรมชาติ โดยปกติมักพบตะกั่วปะปนอยู่กับกำมะถัน ตะกั่วมักจะนำไปใช้ในการผลิตสินค้าอุปโภคบริโภคหลากหลายชนิดที่มนุษย์ใช้ในชีวิตประจำวัน เช่น สีทาบ้าน สีป้องกันสนิม แบตเตอรี่รถยนต์ เครื่องใช้ไฟฟ้า

การแพร่กระจายของตะกั่วออกสู่สิ่งแวดล้อมได้มากมาย จากการเปลี่ยนแปลงทางธรรมชาติและกิจกรรมของมนุษย์ เช่น จากน้ำทิ้งของโรงงานชุบโลหะที่เกินมาตรฐานน้ำทิ้งของกรมควบคุมมลพิษ ทำให้ตะกั่วมีการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม

เนื่องจากตะกั่วเป็นที่ส่งผลกระทบต่ออย่างรุนแรงต่อมนุษย์ ทั้งการสัมผัส การสูดดม และการรับรส โดยที่ตะกั่วจะไม่แสดงความเป็นพิษต่อมนุษย์ในทันทีทันใด ตะกั่วจะสะสมอยู่ในร่างกาย และแสดงความเป็นพิษออกมาเมื่อตะกั่วได้สะสมอยู่ในร่างกายจนถึงขนาดที่แสดงอาการเป็นพิษ จากการวิจัยพบว่า หากผู้ใหญ่ได้รับตะกั่วมากเกินไป จะทำให้สมองทำงานบกพร่องและสติปัญญาเสื่อมถอย แต่ถ้าเด็กได้รับสารตะกั่วมากเกินไป จะทำให้สมองไม่พัฒนา ร่างกายไม่เจริญเติบโต และระบบการรับฟังบกพร่อง (ปราโมทย์ และ รินทวัฒน์, ม.ป.ป.)

6. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากคุณสมบัติพิเศษของไคตินและไคโตซาน จึงมีการศึกษาการเตรียมไคโตซานด้วยวิธีต่าง ๆ เพื่อนำมาใช้ประโยชน์

Ashoka and Fereidoon (2007) ศึกษาการใช้ไคโตซานสำหรับการกำจัดการปนเปื้อนของไอออนโลหะและโปรตีนจากน้ำ โดยการนำไคตินที่แยกมาจากเปลือกปูนำมากำจัดหมู่อะเซทิลด้วยเวลาที่ต่างกัน ได้ไคโตซาน 3 ชนิด คือ 20 ชั่วโมง 10 ชั่วโมง และ 4 ชั่วโมง โดยไอออนโลหะมีการปนเปื้อนในน้ำเสียจากการทำเหมืองสังกะสี ซึ่งมีการตรวจวัดไอออนโลหะโดยเครื่อง ICP-MS ที่ pH ต่างกัน พบว่าไคโตซานเป็นสารจับก่อนในการกำจัดโปรตีนได้ดีเช่นเดียวกับการกำจัดไอออนโลหะ ซึ่งไคโตซานทั้ง 3 ชนิดกำจัดปรอทได้ดีที่สุดในทุกๆ pH ที่ทำการทดสอบ และไคโตซาน 20 ชั่วโมงตกตะกอนโปรตีนได้ดีที่สุด มีความคล้ายคลึงกับงานวิจัยของ Bassi *et al.* (1997) ซึ่งได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของเกล็ดไคโตซานในการดูดซับโลหะหนักและสารพิษในน้ำทิ้งซึ่งมีไอออนของตะกั่ว สังกะสี ทองแดง และแคดเมียม ปนอยู่ที่ pH 5.5 พบว่าประสิทธิภาพของเกล็ดไคโตซานในการดูดซับไอออนของโลหะตะกั่ว สังกะสี ทองแดง และแคดเมียม มีค่าเท่ากับ 0.06 0.02 0.003 และ 5.87 โมลต่อลิตร ตามลำดับ โดยการศึกษาความสามารถในการดูดซับโลหะหนักและสีข้อมด้วยเกล็ดไคโตซานและเม็ดไคโตซานที่เตรียมได้จากของเสียจากการประมง มีตัวแปรที่ศึกษา คือ ชนิดของไคโตซาน (เม็ด เกล็ด) ชนิดของของเสียจากการประมง (เปลือกกุ้ง เปลือกกุ้งมังกร เปลือกปู) พบว่า เมื่อนำไคตินและไคโตซานไปวัดค่าพื้นที่ผิว เกล็ดไคโตซานและเม็ด

ไคโตซานมีพื้นที่ผิว 4-6 และ 30-40 ตารางเมตรต่อกรัมตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบพื้นที่ผิวของไคโตซานที่ได้จากเปลือกปู เปลือกกุ้งมังกร และเปลือกกุ้ง มีค่าลดลงตามลำดับ เป็นผลให้ไคโตซานเม็ดมีประสิทธิภาพในการดูดซับดีกว่าไคโตซานเกล็ด และไคโตซานเม็ดที่เตรียมได้จากเปลือกปูจะมีประสิทธิภาพมากกว่าไคโตซานเม็ดชนิดอื่นๆ รวมทั้งการดูดซับไอออนทองแดงและการดูดซับสีข้อม (Feng *et al.*, 2000) และการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักด้วยไคโตซานที่สกัดจากเปลือกกุ้งกุลาดำและเปลือกกุ้งก้ามกราม พบว่าไคโตซานที่สกัดได้จากเปลือกกุ้งก้ามกรามจะมี %DD เท่ากับ 93.80 และที่สกัดได้จากเปลือกกุ้งกุลาดำจะมี %DD เท่ากับ 92.50 เมื่อนำไคโตซานที่สกัดได้จากเปลือกกุ้งก้ามกรามมาดูดซับโลหะหนัก ซึ่งได้แก่ Pb^{2+} Hg^{2+} Mn^{2+} และ Cr^{3+} ไคโตซานสามารถดูดซับโลหะหนักได้ในปริมาณที่ต่างกัน คือ 41.56% 37.40% 50.40% และ 57.54% ตามลำดับ (จวันเรื่อน และ ปิยนุช, 2547) จากงานวิจัยดังกล่าวจะเห็นได้ว่าไคโตซานสามารถใช้เป็นตัวดูดซับสารต่างๆ ได้ดี แต่ยังมีการศึกษาและปรับปรุงสมบัติของไคโตซานเพื่อเพิ่มความแข็งแรงมากยิ่งขึ้น โดยนำไคโตซานมาทำการเชื่อมขวางด้วยกรูทาร์ลดีไฮด์ เพื่อทำเป็นเม็ดเจลที่มีความแข็งแรงและมีความสามารถในการควบคุมการปล่อยสารของตัวยาได้ (Negai and Sawayanagi, 1991) การทดสอบประสิทธิภาพของไคโตซานที่ผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติแล้วมาใช้บำบัดไอออนของทองแดงในสารละลายด้วยกระบวนการดูดซับ โดยดินเหนียวเบนโทไนท์เป็นวัสดุร่วมกับไคโตซานแสดงความสามารถในการดูดซับไอออนทองแดงได้มากกว่าการใช้ดินเหนียวคาโอลิไนท์ หลังจากนั้นทำการศึกษาผลของสารเชื่อมขวางในการสังเคราะห์ไคโตซาน-เบนโทไนท์คอมโพสิตที่ถูกเชื่อมขวางด้วยเอธิลีนไกลคอลไดโกลซิซิลอีเทอร์ และอีพิกโลโรไฮดริน สามารถเพิ่มความสามารถในการดูดซับไอออนทองแดงได้มากขึ้น ซึ่งมากกว่าการใช้กลูตารัลดีไฮด์ (สิริพร, 2551)

จากงานวิจัยของ Graciela *et al.* (2005) แสดงให้เห็นว่าไคโตซานซึ่งเตรียมได้จากเปลือกกุ้งสามารถนำมาใช้เป็นตัวดูดซับโลหะได้ โดยเมื่อนำไปทำการเชื่อมขวางจะไม่ละลายในกรด โดยการดูดซับโครเมียมบนไคโตซานที่มีการเชื่อมขวางจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ ค่า pH ขนาดของเม็ด น้ำหนักของตัวดูดซับ ความเข้มข้น และ oxidation state คล้ายกับการศึกษาการเลือกดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์จากการชุบโลหะ โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะและแบบคอลัมน์ เรซินไคโตซานที่ดัดแปลงทางเคมีถูกเลือกเป็นตัวดูดซับ จากการศึกษาอันดับปฏิกิริยาดูดซับ พบว่าเป็นแบบปฏิกิริยาอันดับสองเทียมและไอโซเทอมของการดูดซับเป็นแบบแลงเมียร์ไอโซเทอม ปริมาณการดูดซับไอออนทองแดง 0.7569 มิลลิกรัมต่อมิลลิกรัมกลูตารัลดีไฮด์เรซินไคโตซาน และดูดซับไอออนตะกั่วได้ 0.6210 มิลลิกรัมต่อมิลลิกรัมกลูตารัลดีไฮด์เรซิน

ไคโตซาน โดยการเลือกการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วบนตัวดูดซับเรซินไคโตซานที่ ถูกดัดแปลงทางเคมีขึ้นอยู่กับค่า pH ของน้ำเสียและชนิดของเรซินไคโตซานที่ถูกดัดแปลง (สุภาพร, 2548) ซึ่ง Tan *et al.* (1993) ได้ศึกษาการเตรียมไคโตซานเรซินที่มีไอออนโลหะอยู่ในโครงสร้าง ของไคโตซาน เป็นการเตรียมวิธีใหม่โดยใส่สารเชื่อมขวาง ได้แก่ Epichlorohidrin และ Ethylene glycol diglycidyl ether ทำให้โครงสร้างของไคโตซานมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น และสามารถนำ กลับมาใช้ใหม่ได้หลายครั้ง การเตรียมไคโตซานวิธีนี้สามารถเพิ่มปริมาณการดูดซับและจำเพาะ เจาะจงต่อไอออนโลหะที่ไคโตซานที่ดูดซับได้ Hirano *et al.* (1996) ได้ทำการศึกษาความสามารถ ของไคโตซานและไคโตซานดัดแปลงให้อยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อนกับพอลิเมอร์ คือ สารประกอบเชิงซ้อนไคโตซาน-กลูแคนและทำการเชื่อมขวางได้ Crosslink – Glycine Chitosan สามารถจับทองแดงเพิ่มสูงขึ้นถึง 22 เท่า เมื่อเทียบกับไคโตซานเอง และสูงมากกว่า 4 เท่าเมื่อเทียบ กับสารประกอบเชิงซ้อนไคโตซาน – กลูแคน นอกจากนี้ยังใช้ไคโตซานเป็นตัวดูดซับในการแยก สารกัมมันตรังสีออกจากน้ำเสียและดักจับยูเรเนียม จากการศึกษาการดูดซับไอออนของ โลหะบาง ตัว ได้แก่ เหล็ก (III) นิกเกิล (II) และทองแดง (II) บนผงไคโตซานและไคโตซานดัดแปลงด้วย กลูตารัลดีไฮด์ การวิเคราะห์ปริมาณไอออนเหล็กทำได้วิธีสเปกโทรโฟเมตรีแบบ 1,10-ฟีแนนโทรี ลิน ส่วนการวิเคราะห์ปริมาณไอออนนิกเกิลและไอออนทองแดงทำได้วิธีอะตอมมิกแอบซอร์พ ชันสเปกโทรเมตรี พบว่าปริมาณการดูดซับสูงสุดบนผงไคโตซานและไคโตซานดัดแปลงของ ไอออนเหล็ก เท่ากับ 3.35 และ 1.45 มิลลิกรัมต่อกรัม ไอออนนิกเกิล เท่ากับ 2.40 และ 0.60 มิลลิกรัม ต่อกรัม ไอออนทองแดง เท่ากับ 4.40 และ 13.4 มิลลิกรัมต่อกรัม (อนุชา, 2548) ต่อมาเจริญศรี (2549) ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ Cr(VI) และ Cr(III) ไอออนในสารละลายน้ำโดยใช้ไคโตซาน เชิงการค้า ไคโตซานที่เตรียมจากกระดองปูนา และไคโตซานที่เตรียมจากกระดองปูนาที่ปรับ โครงสร้างด้วยกรดอะมิโนไกลซีนเป็นตัวดูดซับ ทำการทดลองแบบกะ ศึกษาปัจจัยต่างๆ คือ pH เวลา และความเข้มข้นของ Cr(VI) และ Cr(III) ไอออน พบว่า การศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ จะสอดคล้องกับไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ ซึ่งประสิทธิภาพในการดูดซับ Cr(VI) ไอออนของ ไคโตซานเชิงการค้าเท่ากับ 24.21 38.31 และ 15.38 มิลลิกรัมต่อกรัมไคโตซาน ไคโตซานที่เตรียม จากกระดองปูนาเท่ากับ 30.67 53.19 และ 24.21 มิลลิกรัมต่อกรัมไคโตซาน และไคโตซานที่เตรียม จากกระดองปูนาที่ปรับโครงสร้างด้วยกรดอะมิโนไกลซีนเท่ากับ 43.67 30.96 และ 30.86 มิลลิกรัม ต่อกรัมไคโตซาน ทำที่อุณหภูมิ 20 30 และ 40 องศาเซลเซียส สำหรับประสิทธิภาพในการดูดซับ Cr(III) ไอออนของไคโตซานเชิงการค้าเท่ากับ 23.20 15.39 และ 20.16 มิลลิกรัมต่อกรัมไคโตซาน ไคโตซานที่เตรียมจากกระดองปูนาเท่ากับ 13.07 4.41 และ 1.20 มิลลิกรัมต่อกรัมไคโตซาน และ

ไคโตซานที่เตรียมจากกระดองปูนาที่ปรับโครงสร้างด้วยกรดอะมิโนไกลซีนเท่ากับ 27.03 13.79 และ 13.04 มิลลิกรัมต่อกรัมไคโตซาน โดยทำที่อุณหภูมิ 20 30 และ 40 องศาเซลเซียส

จากการศึกษาการเปรียบเทียบปริมาณ ไคตินในเปลือกของกุ้งก้ามกราม กุ้งกุลาดำ กุ้งขาว และตักแตน และเปลี่ยนไคตินเป็นไคโตซานแล้วทำเป็นเม็ดเจล (CB) จากนั้นนำไคโตซานมาทำการเชื่อมขวางด้วยสารละลาย Glutardialdehyde (GCB) และ Benzaldehyde (BGCB) ซึ่งได้นำมาทดสอบความสามารถในการดูดซับสารเคมีบางชนิดของอนุพันธ์ CB GCB BGCB โดยแบ่งกลุ่มโลหะไอออนประจุบวก ได้แก่ Cu^{2+} Ni^{2+} $^{232}\text{Th}^{2+}$ ไอออนประจุลบ PO_4^{3-} และสีอินทรีย์ Rhodamine B พบว่าอนุพันธ์ไคโตซานทั้งสามชนิดสามารถดูดซับโลหะไอออนได้อย่างรวดเร็วและไม่แตกต่างกัน ส่วนการดูดซับ PO_4^{3-} BGCB สามารถดูดซับได้ดีกว่า GCB และ CB อย่างชัดเจน และการดูดซับสีอินทรีย์ Rhodamine B นั้นแม้ให้ผลการดูดซับที่ไม่แตกต่างกันมากนักแต่มีแนวโน้มที่ BGCB จะดูดซับได้ดีกว่า GCB และ CB ตามลำดับ (สราวุธ, 2549) Chen *et al.* (2008) ศึกษาเปรียบเทียบการดูดซับไอออนโลหะทองแดง สังกะสี และตะกั่ว ในสารละลายโดยไคโตซานที่มีการเชื่อมโยงด้วยอีพิฮาโลไฮดริน ผลการทดลองพบว่า การดูดซับไอออนโลหะทั้งสามชนิดมีความสัมพันธ์กับสมการแลงเมียร์ และประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนโลหะทองแดงมากกว่า ไอออนโลหะตะกั่ว และไอออนโลหะสังกะสี และจากการทดลองการดูดซับไอออนโลหะทองแดง สังกะสี นิเกิล และตะกั่ว โดยการเชื่อมโยงการฝังโลหะในไคโตซานด้วยอีพิฮาโลไฮดริน โดยมีการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วย FTIR ^{13}C NMR และ X-ray diffraction ผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพไอออนโลหะทองแดง สังกะสี นิเกิล และตะกั่ว เพิ่มขึ้นจาก 25 เป็น 74% 13 เป็น 46% 41 เป็น 57% และ 12 เป็น 43% ตามลำดับ สัมพันธ์กับสมการแลงเมียร์ไอโซเทอม

แต่จากงานวิจัยของ Tariq *et al.* (2011) ศึกษาการดัดแปลงทางเคมีของไคโตซานสำหรับการกำจัดไอออนโลหะ โดยการนำมาดัดแปลงด้วยสารประกอบอินทรีย์ เช่น แอลดีไฮด์ และกรดอินทรีย์ และในอีกด้านหนึ่งนำไคโตซานมาผสมด้วยคาร์โบไฮเดรต พบว่าการดัดแปลง ไคโตซานด้วยแอลดีไฮด์สามารถใช้ในการกำจัดไอออนเหล็กและทองแดงได้ และการเชื่อมโยงด้วยการดัดแปลงทางเคมีของไคโตซานทำให้ความสามารถของไคโตซานในการดูดซับไอออนโลหะลดลง เช่นเดียวกับศึกษาการเตรียมไคโตซานโดยใช้สารเชื่อมขวาง เพื่อให้โครงสร้างของไคโตซานมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น พบว่าไคโตซานที่มีการเชื่อมขวางสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้หลายครั้ง แต่ประสบปัญหาคือ ความจุของไอออนลดลงเมื่อเทียบกับไคโตซานที่ไม่ได้เชื่อมขวาง เพราะเกิดการเชื่อมขวางกับหมู่ $-\text{NH}_2$ ซึ่งใช้ในการเกิดคีเลตกับไอออนและทำให้ความจำเพาะเจาะจงของ

ไคโตซานลดลง (Kawamura *et al.*, 1999) จารูวรรณ และ โกวิทช์ (2550) ศึกษาการดูดซับน้ำเสียขุบโลหะโครเมียม(VI) โดยใช้ไคโตซานเรซินไคโตซานที่มีการเชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์เรซินและไคโตซานผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เรซินเป็นตัวดูดซับ ผลการเปรียบเทียบตัวดูดซับ พบว่าไคโตซานเรซินมีความสามารถในการดูดซับน้ำเสียขุบโลหะโครเมียม (VI) ได้ดีที่สุดในที่ pH 2 ปริมาณ 47.9 มิลลิกรัมต่อกรัม มีการนำแบบจำลองการดูดซับของสมการแลงเมียร์และสมการฟรุนดลิชมาอธิบายไอโซเทอมของการดูดซับและค่าคงที่ของไอโซเทอม ซึ่งไอโซเทอมของการดูดซับมีความสอดคล้องกับสมการแลงเมียร์ เมื่อนำแบบจำลอง Pseudo-first order และ Pseudo-second order มาใช้ในการอธิบายจลนศาสตร์การดูดซับ พบว่าเป็นแบบ Pseudo-second order และการศึกษาการใช้ไคโตซานในการดูดซับทองแดงและโครเมียม โดยใช้ไคโตซานที่ใช้มีทั้งที่ทำการเชื่อมขวางและไม่ได้ทำการเชื่อมขวาง สารเชื่อมขวางที่ใช้คือ อีพิสโลไคโกลลินเข้มข้น 0.01 โมลาร์ พบว่าไคโตซานสามารถดูดซับโลหะหนักได้ดีที่สุดในที่ pH 5 และความสามารถในการดูดซับลดลงเมื่อ pH เปลี่ยนไป เมื่อทำการเชื่อมขวางไคโตซานด้วยอีพิสโลไคโกลลินทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลงซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าตำแหน่งที่ใช้ในการดูดซับโลหะหนักถูกใช้ไปในการเชื่อมขวาง ไคโตซานที่ไม่ได้ทำการเชื่อมขวางสามารถดูดซับได้ 78 มิลลิกรัมต่อกรัมไคโตซาน และไคโตซานที่ทำการเชื่อมขวางสามารถดูดซับได้ 50 มิลลิกรัมต่อกรัมไคโตซาน (Schmuhl *et al.*, 2001) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Ngah *et al.* (2002) ได้ศึกษาการดูดซับไอออนโลหะทองแดงด้วยไคโตซานและไคโตซานที่มีการเชื่อมโยง ซึ่งไคโตซานบีดส์ที่ถูกเชื่อมโยงด้วยกลูตารัลดีไฮด์ อีพิสโลไคโกลลิน และเอททิลีนไกลคอล ไดโกลซิซิล อีเทอร์ จะไม่ละลายในสารละลายกรดและเบส การทดลองการดูดซับเป็นแบบไม่ต่อเนื่อง โดยมีการทดสอบ pH ระยะเวลาในการดูดซับ และความเข้มข้นของไอออนโลหะทองแดง การทดลองพบว่า ที่ pH 6 มีการดูดซับไอออนโลหะทองแดงได้สูงสุด และมีความสัมพันธ์กับสมการแลงเมียร์ ค่าการดูดซับไอออนของโลหะทองแดง เท่ากับ 80.71 มิลลิกรัมต่อกรัมไคโตซาน 59.67 มิลลิกรัมต่อกรัมไคโตซานที่มีการเชื่อมโยงด้วยกลูตารัลดีไฮด์ 62.47 มิลลิกรัมต่อกรัมไคโตซานที่มีการเชื่อมโยงด้วยอีพิสโลไคโกลลิน และ 45.94 มิลลิกรัมต่อกรัมไคโตซานที่มีการเชื่อมโยงด้วยเอททิลีน ไกลคอล ไดโกลซิซิล อีเทอร์

จากปัญหาดังกล่าวจึงมีงานวิจัยที่มีการศึกษาการปรับปรุงโครงสร้างของไคโตซานด้วยการเชื่อมขวาง carboxymethyl-chitosan เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับที่ดีขึ้น ดังงานวิจัยของ Jayakumar *et al.* (2010) ไคตินและไคโตซานเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติ ซึ่งนักวิจัยมีความสนใจในการประยุกต์ใช้หมู่เคมีของไคตินหรือโครงสร้างของไคโตซาน เช่น alkyl หรือ carboxymethyl groups โดยการแทนที่หมู่ $-NH_2$ ด้วย carboxyl groups ซึ่งจะเพิ่มคุณสมบัติของ polyampholytic ได้

อนุพันธ์ carboxymethyl ของไคตินและไคโตซานสามารถดูดซับไอออนโลหะ ด้านแรกที่เรีย ด้านวิศวกรรมเนื้อเยื่อ เครื่องสำอาง และด้านอาหาร ในงานวิจัยของ Jayakumar *et al.* (2010) ศึกษาวิธีการเตรียมและการประยุกต์ของ carboxymethyl และอนุพันธ์ succinyl ของไคตินและไคโตซาน เพื่อเป็นวัสดุสำหรับการประยุกต์ใช้ทางยา Yan *et al.* (2011) นำ chitosan hydrogel beads มาดัดแปลงด้วย chloroacetic acid และมาดูดซับ Cu (II) ion ทำการศึกษาผลของ pH อุณหภูมิ สมดุลการดูดซับ และการดูดซับทางจลนศาสตร์ ซึ่งพฤติกรรมการดูดซับสอดคล้องกับสมการแลงเมียร์ และจลนศาสตร์การดูดซับเป็นแบบ pseudo-second order equation ค่าประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 58.0 มิลลิกรัมต่อกรัมที่ pH เท่ากับ 5 จากการศึกษาการแทนที่ N ของอนุพันธ์ไคโตซาน โดยปฏิกิริยา deacetylated ด้วย monochloroacetic acid ที่ pH 8 และอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส โครงสร้างของ N-carboxymethyl chitosan และ chitosan ซึ่งวินิจฉัยลักษณะด้วย IR ^1H ^{13}C และ ^1H - ^{13}C NMR HSQC-NMR spectra พบว่าอนุพันธ์ N-carboxymethylchitosan เกิดขึ้นจริงและสามารถใช้ในการดูดซับ Cu (II) ion จากสารละลาย ผลพบว่า สภาวะที่ดีที่สุดในการดูดซับ Cu (II) ion ในสารละลายคอปเปอร์ในเตรต ที่ pH 6.5 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เวลา 60-90 นาที และการแทนที่ $\text{DS}_{\text{N-mono}}$ 0.16 และ $\text{DS}_{\text{N,N-di}}$ 0.81 มีประสิทธิภาพในการดูดซับได้ 192 มิลลิกรัม Cu (II) ion ต่อกรัม N-carboxymethyl chitosan (An *et al.*, 2009) ต่อมา Sun and Wang (2006) ทำการเตรียม N,O-carboxymethyl-chitosan (N,O-CMC) ด้วยการแทนที่ที่ต่างกัน โดยใช้ chitosan (CTS) และ monochloroacetic acid ภายใต้สภาวะต่างๆ ผลพบว่า N,O-CMC สามารถเป็นตัวดูดซับ Cu (II) ion โดยการดูดซับสอดคล้องกับสมการแลงเมียร์ และการดูดซับทางจลนศาสตร์สอดคล้องกับ pseudo-second order ปัจจัยในการดูดซับขึ้นอยู่กับ pH การแทนที่ของตัวอย่าง และ ionic strength ซึ่งประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุด เท่ากับ 162.5 มิลลิกรัม และได้ทำการศึกษาผลของ pH การแทนที่ของ carboxymethyl-chitosan (CMC) และ dose ของการ cross-linked ในการดูดซับ Zn^{2+} และมีการฝัง Zn^{2+} ด้วยการ cross-linked CMC ผลพบว่ามี การดูดซับ Zn^{2+} ได้ดี และกลไกการดูดซับอธิบายด้วย X-ray photoelectron spectroscopy IR spectra และ SEM จากการศึกษาตัวดูดซับตัวใหม่ของ chitosan ด้วยการปรับปรุงการดูดซับสำหรับการดูดซับโลหะหนัก ดังนั้นการฝัง Pb (II) ion ด้วยการเชื่อมขวาง N,O-carboxymethyl-chitosan resin และมีการสังเคราะห์ขึ้น โดยใช้ chitosan ดูดซับ Pb (II) ions ด้วยการเชื่อมขวาง glutaraldehyde ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ เช่น ปริมาณการเชื่อมขวาง ระดับการแทนที่ของ chitosan pH และเวลาในการดูดซับ ผลการทดลองพบว่า การเชื่อมขวาง chitosan ทำให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับ Pb (II) ion สูง ทั้งในสารละลายที่มีโลหะเดียวหรือในโลหะผสมทั้ง 3 ชนิด คือ Cu(II) Zn(II) และ Pb (II) ions และศึกษากลไกการ

ดูดซับโดย FTIR spectra และ XPS ผลพบว่าการดูดซับ Pb (II) ion เป็นแบบ chelation process
(Sun *et al.*, 2006)



อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. อุปกรณ์การทดลอง

- 1.1 เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง รุ่น ML/ML-E ยี่ห้อ METTLER TOLEDO
- 1.2 เครื่องกวนผสม รุ่น STIRRER ES ยี่ห้อ VELP scientific
- 1.3 เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH meter) รุ่น PC 510 ยี่ห้อ OAKLON
- 1.4 ชุดเครื่องกวนแม่เหล็ก (stirrer)
- 1.5 กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42
- 1.6 เครื่อง Atomic Adsorption Spectrophotometer (AAS) รุ่น Spectra AA 220 F3 ยี่ห้อ

VARIAN

- 1.7 ชุดเครื่องแก้วทางเคมี
- 1.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) รุ่น MX2000 ยี่ห้อ CamScan
- 1.9 FTIR รุ่น Spectrum Software Version 10 ยี่ห้อ PerkinElmer Spectrum

2. ไลโคซานและสารเคมี

- 2.1 ไลโคซานสั่งซื้อจากบริษัท Ta Ming Enterprise Co., LTD ประเทศไทย เบอร์เซ็น การกำจัดหมู่อะซีติล เท่ากับ 94.90
- 2.2 สารเคมี NaOH 37% HCl NaHCO₃ Zn(NO₃)₂·6H₂O 99.99% monochloroacetic acid epichlorohydrin และ PbCl₂ จาก Sigma-Aldrich
- 2.3 น้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะแห่งหนึ่ง กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย

วิธีการ

1. การเตรียมเม็ดปิดส์ของไคโตซานปิดส์ ไคโตซานปิดส์เชื่อมโยง และไคโตซานปิดส์เชื่อมโยงที่มี การตัดแปลง

1.1 การเตรียมไคโตซานปิดส์ (CH)

โดยเตรียมจากการนำไคโตซาน 15.00 กรัมละลายในกรดอะซีติก ความเข้มข้น 1% โดยปริมาตร ปริมาตร 1 ลิตร กวนทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องจนละลายหมด เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร ปริมาตร 500 มิลลิลิตร แล้วบรรจุสารละลายไคโตซานในเข็มฉีดยาด้วยเข็มเบอร์ 24 หยดสารละลายไคโตซานลงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร ในระดับความสูงที่สม่ำเสมอประมาณ 10 เซนติเมตร จะได้ ไคโตซานปิดส์ (wet chitosan beads) กรองและล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน จนเป็นกลาง แล้วเก็บไว้ในน้ำปราศจากไอออน ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

1.2 การเตรียมไคโตซานปิดส์เชื่อมโยง Epichlorohydrin cross-linked chitosan beads (ECH)

นำไคโตซานปิดส์ที่ได้จากข้อ 1 มา 50.00 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตร นำสารละลายอีพิคลอโรไฮดริน (Epichlorohydrin, ECH 99% AR grade) ใส่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.067 โมลต่อลิตร เติมไคโตซานปิดส์ และ สารละลายอีพิคลอโรไฮดรินในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ อัตราส่วน 1:1 โมล ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที โดยเขย่าต่อเนื่องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจาก 2 ชั่วโมงนำไคโตซานปิดส์มากรองและล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน จนเป็นกลาง แล้วเก็บไว้ในน้ำปราศจากไอออน ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส (Ngah *et al.*, 2002)

1.3 การเตรียมไคโตซานบีดส์เชื่อมโยงที่มีการดัดแปลง Modified cross-linked with N-Carboxymethyl chitosan beads (ECH-NC)

นำไคโตซานบีดส์ที่ได้จากข้อ 1.2 มาเติม โมโนคลอโรอะซีติก (Monochloroacetic acid 99% AR grade) อัตราส่วน 1:6 โมล ปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 8 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และกวนผสมต่อเนื่องด้วยเครื่องกวนผสม หลังจาก 3 ชั่วโมง นำบีดส์มากรอง ปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 6 ด้วยกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 1% กรอง ล้างด้วย เอทิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้น 90% และล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน จนเป็นกลาง แล้วเก็บไว้ในน้ำปราศจากไอออน ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส (An *et al.*, 2009)

2. การศึกษาสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของ CH ECH และ ECH-NC

2.1 การทดสอบสมบัติการละลาย

ตัวทำละลายที่ใช้ทดสอบการละลายมีดังนี้ 1. สารละลายกรดอะซีติกความเข้มข้น 5% โดยปริมาตร 2. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร และน้ำปราศจากไอออน

ชั่ง CH 0.50 กรัม ใส่ลงในหลอดทดลองที่ภายในบรรจุสารละลายกรดอะซีติกความเข้มข้น 5% โดยปริมาตร ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง สังเกตการละลายของ CH ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนจากสารละลายกรดอะซีติก เป็นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร และน้ำปราศจากไอออน ตามลำดับ โดยทำการทดลองจำนวน 5 ซ้ำ และทำการทดลองเช่นเดียวกันแต่เปลี่ยนชนิดของไคโตซานบีดส์เป็น ECH และ ECH-NC (Ngah *et al.*, 2002)

2.2 การทดสอบการคงรูปของ CH ECH และ ECH-NC

เตรียมสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 3-10 ด้วยสารละลายกรดอะซีติก ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร ชั่ง

CH 0.50 กรัมใส่ลงในหลอดทดลอง เติมสารละลายข้างต้นปริมาตร 5 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 4 ชั่วโมง สังเกตลักษณะเม็ดของ CH ทำการทดลองจำนวน 5 ซ้ำ และทำการทดลองเช่นเดียวกันแต่เปลี่ยนชนิดของโคโคซานปิดส์เป็น ECH และ ECH-NC

2.3 การวิเคราะห์พื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

นำตัวอย่าง CH ECH และ ECH-NC ก่อนและหลังการทดสอบการละลายมาชุปทอง เพื่อให้เกิดการนำไฟฟ้า จากนั้นนำมาส่องดูการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวของตัวอย่าง ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Chen *et al.*, 2008)

2.4 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared (FTIR)

นำตัวอย่าง CH ECH และ ECH-NC มาดูลักษณะโดยใช้ FTIR spectrophotometer ในช่วงความถี่ $400-4000\text{ cm}^{-1}$ (Ngah *et al.*, 2008)

3. การศึกษาสถานะที่เหมาะสม และประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนของตะกั่ว และสังกะสีด้วย CH ECH และ ECH-NC

เตรียมสารละลายไอออนของโลหะหนัก คือ สารละลายตะกั่วคลอไรด์ (PbCl_2) สารละลายสังกะสีไนเตรต ($\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) และสารละลายผสมของตะกั่วคลอไรด์และสังกะสีไนเตรต ความเข้มข้นขึ้นกับแต่ละการทดลอง และปรับค่าความเป็นกรด-ด่างด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร

3.1 การศึกษาปริมาณปิดส์ที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนตะกั่ว

ชั่ง CH 0.25 0.50 0.75 และ 1.00 กรัมใส่ในหลอดทดลอง เติมสารละลายไอออนตะกั่วที่ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 5 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็ว

รอบ 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เก็บสารละลายไอออนตะกั่วมาวิเคราะห์ปริมาณไอออนตะกั่วก่อนและหลังการดูดซับ โดยทำการทดลองจำนวน 5 ซ้ำ เพื่อคำนวณหาประสิทธิภาพการดูดซับโดยเฉลี่ย ดังสมการที่ 5 และค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน

$$\text{ประสิทธิภาพการดูดซับ} \quad Q_e = \frac{(C_o - C_e)V}{W} \quad (5)$$

เมื่อ Q_e (Adsorption capacity) คือ ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนโลหะหนัก C_o คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไอออนโลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อลิตร) C_e คือ ความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลายไอออนโลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อลิตร) V คือ ปริมาตรของสารละลายไอออนโลหะหนัก (5 มิลลิลิตร) และ W คือ น้ำหนัก CH (0.50 กรัม) (Ngah *et al.*, 2008)

3.2 การศึกษาเวลา และความเข้มข้นที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนตะกั่ว และสังกะสี

ซึ่งไคโตซานบีดส์ปริมาณที่เหมาะสมจากข้อ 3.1 ใส่ในหลอดทดลอง เดิมสารละลายไอออนตะกั่วที่ความเข้มข้น 10 50 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 5 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 4 และ 8 ชั่วโมง เก็บสารละลายไอออนตะกั่วมาวิเคราะห์ปริมาณไอออนตะกั่วก่อนและหลังการดูดซับ โดยทำการทดลองจำนวน 5 ซ้ำ เพื่อคำนวณหาประสิทธิภาพการดูดซับโดยเฉลี่ย (ดังสมการที่ 5) และค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน และทำการทดลองเช่นเดียวกันแต่เปลี่ยนชนิดของไคโตซานบีดส์เป็น ECH และ ECH-NC และทำการทดลองเช่นเดียวกันทั้งหมดแต่เปลี่ยนจากสารละลายไอออนตะกั่วเป็นสารละลายไอออนสังกะสี

3.3 การศึกษาค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายไอออนของตะกั่ว และสังกะสีที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนตะกั่วและสังกะสี

นำไคโตซานบีดส์ปริมาณที่เหมาะสมจากข้อ 3.1 ใส่ในหลอดทดลอง เดิมสารละลายไอออนตะกั่วโดยปรับค่าความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 3-6 ที่ความเข้มข้นที่เหมาะสมจากข้อ 3.2 ปริมาตร 5 มิลลิลิตร เขย่าสารละลายไอออนตะกั่วด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที เป็นเวลาที่เหมาะสมจากข้อ 3.2 เก็บสารละลายไอออนตะกั่วมาวิเคราะห์ปริมาณไอออนตะกั่วก่อนและหลังการดูดซับ โดยทำการทดลองจำนวน 5 ซ้ำ เพื่อคำนวณหาประสิทธิภาพการดูดซับโดย

เฉลี่ย (ดังสมการที่ 5) และค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน ทำการทดลองเช่นเดียวกันแต่เปลี่ยนชนิดของไคโตซานบีดส์เป็น ECH และ ECH-NC และทำการทดลองเช่นเดียวกันทั้งหมดแต่เปลี่ยนจากสารละลายไอออนตะกั่วเป็นสารละลายไอออนสังกะสี

3.4 การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับของ CH ECH และ ECH-NC

นำไคโตซานบีดส์ปริมาณที่เหมาะสมจากข้อ 3.1 ใส่ในหลอดทดลอง เดิมสารละลายไอออนตะกั่วโดยปรับค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมจากข้อ 3.3 ความเข้มข้นที่เหมาะสมจากข้อ 3.2 ปริมาตร 5 มิลลิลิตร เขย่าสารละลายไอออนตะกั่วด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที เป็นเวลาที่เหมาะสมจากข้อ 3.2 เปลี่ยนอุณหภูมิคือ 30 40 และ 50 องศาเซลเซียส เก็บสารละลายน้ำเสียสังเคราะห์มาวิเคราะห์ปริมาณไอออนตะกั่วก่อนและหลังการดูดซับ โดยทำการทดลองจำนวน 5 ซ้ำ เพื่อคำนวณหาประสิทธิภาพการดูดซับโดยเฉลี่ย (ดังสมการที่ 5) และค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน ทำการทดลองเช่นเดียวกันแต่เปลี่ยนชนิดของไคโตซานบีดส์เป็น ECH และ ECH-NC และทำการทดลองเช่นเดียวกันทั้งหมดแต่เปลี่ยนจากสารละลายไอออนตะกั่วเป็นสารละลายไอออนสังกะสี

3.5 การศึกษาพฤติกรรมในการดูดติดไอออนของตะกั่ว และสังกะสีของ CH ECH และ ECH-NC ด้วยการหาค่าไอโซเทอมการดูดติดผิว โดยใช้สมการของแลงเมียร์ และฟรุนดลิช

นำไคโตซานบีดส์ปริมาณที่เหมาะสมจากข้อ 3.1 ใส่ในหลอดทดลอง เดิมสารละลายไอออนตะกั่วโดยปรับค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมจากข้อ 3.3 ความเข้มข้นที่เหมาะสมจากข้อ 3.2 ปริมาตร 5 มิลลิลิตร เขย่าสารละลายไอออนตะกั่วด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที เป็นเวลาที่เหมาะสมจากข้อ 3.2 เก็บสารละลายไอออนตะกั่วมาวิเคราะห์ปริมาณไอออนตะกั่วก่อนและหลังการดูดซับ โดยทำการทดลองจำนวน 5 ซ้ำ เพื่อคำนวณหาประสิทธิภาพการดูดซับโดยเฉลี่ย ดังสมการที่ 5 ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน และประสิทธิภาพในการดูดติดผิวด้วยการหาค่าไอโซเทอมการดูดติดผิวของไอออนตะกั่ว โดยศึกษาเปรียบเทียบกับสมการแลงเมียร์ และฟรุนดลิช เพื่ออธิบายพฤติกรรมในการดูดติดผิวของไอออนบนผิวไคโตซานบีดส์ชนิดต่างๆ โดยที่แนวโน้มพฤติกรรมการดูดติดผิวจะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Coefficient of Determination, R^2) (Chen *et al.*, 2011) ทำการทดลองเช่นเดียวกันแต่เปลี่ยนชนิดของไคโตซานบีดส์เป็น ECH

และ ECH-NC และทำการทดลองเช่นเดียวกันทั้งหมดแต่เปลี่ยนจากสารละลายไอออนตะกั่วเป็นสารละลายไอออนสังกะสี

3.6 การศึกษาทางจลนศาสตร์ของ CH ECH และ ECH-NC ในการดูดซับไอออนโลหะ โดยการลงจุดข้อมูลตามสมการจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียม และอันดับสองเทียม

นำ CH ปริมาณที่เหมาะสมจากข้อ 3.1 ใส่ลงในหลอดทดลอง เต็มสารละลายไอออนตะกั่วความเข้มข้นที่เหมาะสมจากข้อ 3.2 ปริมาตร 5 มิลลิลิตร เขย่าสารละลายไอออนตะกั่วด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 10 15 20 25 30 60 90 120 150 180 210 และ 240 นาที เก็บสารละลายไอออนตะกั่วมาวิเคราะห์ปริมาณ ไอออนตะกั่วก่อนและหลังการดูดซับ โดยทำการทดลองจำนวน 5 ซ้ำ เพื่อคำนวณหาประสิทธิภาพการดูดซับ โดยเฉลี่ย (ดังสมการที่ 5) ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน และประสิทธิภาพในการดูดซับ ไอออนตะกั่วทางจลนศาสตร์ของ ไคโตซานชนิดต่างๆ ด้วยการลงจุดข้อมูลตามสมการจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียม และอันดับสองเทียม โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเป็นอันดับหนึ่งเทียมหรืออันดับสองเทียมให้พิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Coefficient of Determination, R^2) ข้อมูลตาม Chen *et al.* (2011) ถ้าค่า R^2 ที่ได้มีค่าต่ำสุดที่ 0 แสดงว่าจุดข้อมูลไม่สัมพันธ์ตามสมการ และค่าสูงสุดเท่ากับ 1 จุดข้อมูลมีความสัมพันธ์ตามสมการมากที่สุด ทำการทดลองเช่นเดียวกันแต่เปลี่ยนชนิดของไคโตซานบีดส์เป็น ECH และ ECH-NC และทำการทดลองเช่นเดียวกันทั้งหมดแต่เปลี่ยนจากสารละลายไอออนตะกั่วเป็นสารละลายไอออนสังกะสี

4. การศึกษาการดูดซับไอออนของตะกั่ว และสังกะสีในสารละลายผสม

เตรียมสารละลายผสมของตะกั่ว และสังกะสี ที่ความเข้มข้นที่เหมาะสมจากข้อ 3.2 ผสมในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร เต็ม CH จำนวน 10.00 กรัม (คำนวณจากการทดลองปริมาณที่เหมาะสมปริมาตร 5 มิลลิลิตร) ลงในสารละลายผสมของตะกั่ว และสังกะสี เขย่าสารละลายด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที เป็นเวลาที่เหมาะสมจากข้อ 3.2 เก็บสารละลายมาวิเคราะห์ปริมาณ ไอออนโลหะหนักก่อนและหลังการดูดซับ โดยทำการทดลองจำนวน 5 ซ้ำ เพื่อคำนวณหาประสิทธิภาพการดูดซับ โดยเฉลี่ย (ดังสมการที่ 5) และค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน และทำการทดลองเช่นเดียวกันแต่เปลี่ยนชนิดของไคโตซานบีดส์เป็น ECH และ ECH-NC

5. การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่ว และไอออนสังกะสีด้วย ECH และ ECH-NC ในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะโดยทำการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง

นำน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะแห่งหนึ่งในกรุงเทพมหานครฯ ประเทศไทย มาวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนัก คือ ไอออนตะกั่ว และไอออนสังกะสี และใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับ

ความเข้มข้นที่ใช้ในการทดลองจะใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร เติม ECH 20.00 กรัม เขย่าน้ำเสียด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที เป็นเวลาที่เหมาะสมจากข้อ 3.2 เก็บน้ำเสียมาวิเคราะห์ปริมาณไอออนโลหะหนักก่อนและหลังการดูดซับ โดยทำการทดลองจำนวน 5 ซ้ำ เพื่อคำนวณหาประสิทธิภาพการดูดซับโดยเฉลี่ย (ดังสมการที่ 5) และค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน และทำการทดลองเช่นเดียวกันแต่เปลี่ยนชนิดของโคโตะซานบีดส์เป็น ECH-NC

6. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

นำข้อมูลในการทดลองมาวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างกลุ่มโดยใช้วิธี Analysis of Variance (ANOVA) แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่ม ด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

7. สถานที่ทำการวิจัย

ห้องปฏิบัติการ โครงการจัดตั้งสายวิชาเคมี และห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สิ่งแวดล้อม คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

8. ระยะเวลาทำการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เริ่มตั้งแต่เดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2556 ถึงเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2557

9. ทูลสนับสนุนการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากทุนอุดหนุนและค้ำจุนวิจัยประเภทวิทยานิพนธ์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และทุนอุดหนุนวิจัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

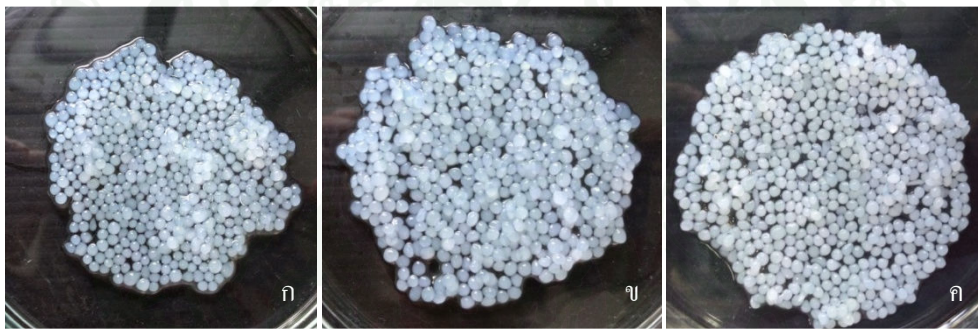


ผลและวิจารณ์

ผล

1. ลักษณะทางกายภาพของ CH ECH และ ECH-NC

CH ที่ได้มีลักษณะคล้ายวุ้น สีใส ECH มีลักษณะคล้ายวุ้นเช่นกัน แต่มีสีขาวขุ่น และ ECH-NC มีลักษณะคล้ายวุ้นเช่นเดียวกัน มีสีขาวขุ่นมากกว่า ECH ไคโตซานบีดส์ทั้งสามชนิดมีลักษณะเป็นทรงกลม ขนาด 0.20 เซนติเมตร ดังภาพที่ 2

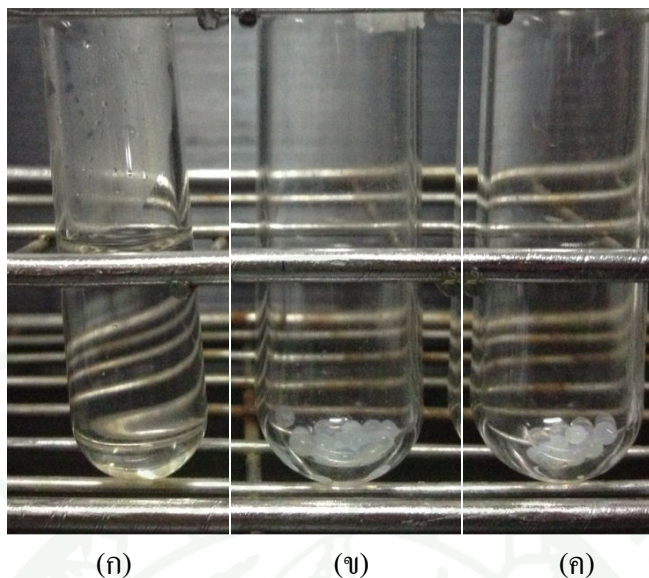


ภาพที่ 2 ลักษณะบีดส์ของ (ก) CH (ข) ECH (ค) ECH-NC

2. สมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของ CH ECH และ ECH-NC

2.1 สมบัติการละลาย

จากการทดสอบสมบัติการละลายด้วยสารละลายกรด เบส และน้ำปราศจากไอออน จากการสังเกตด้วยสายตา พบว่า ไคโตซานบีดส์ละลายในสารละลาย 5% โดยปริมาตร กรดอะซิติก ไม่ละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5 โมลต่อลิตร และไม่ละลายในน้ำปราศจากไอออน (ภาพที่ 3) ในขณะที่ไคโตซานบีดส์ที่มีการเชื่อมโยงทั้งสองชนิด (ECH และ ECH-NC) ไม่ละลายในสารละลายทั้งสามประเภท คือ สารละลาย 5% โดยปริมาตร กรดอะซิติก สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5 โมลต่อลิตร และน้ำปราศจากไอออน ดังตารางที่ 3



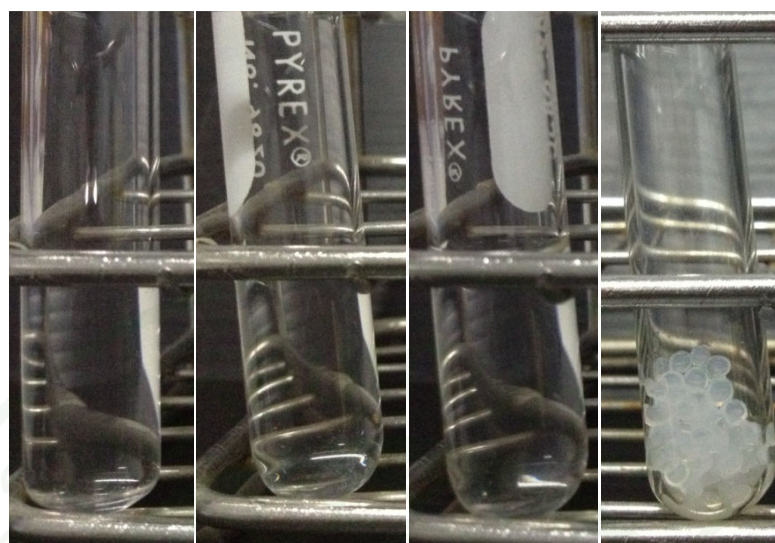
ภาพที่ 3 สมบัติการละลายของ CH ในสารละลายต่างๆ (ก) 5% โดยปริมาตร กรดอะซิติก
(ข) โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5 โมลต่อลิตร และ (ค) น้ำปราศจากไอออน

ตารางที่ 3 สมบัติการละลายของ CH ECH และ ECH-NC

สารละลายที่ทดสอบ	CH	ECH	ECH-NC
1. 5% v/v กรดอะซิติก	ละลาย	ไม่ละลาย	ไม่ละลาย
2. 0.5 M โซเดียมไฮดรอกไซด์	ไม่ละลาย	ไม่ละลาย	ไม่ละลาย
3. น้ำปราศจากไอออน	ไม่ละลาย	ไม่ละลาย	ไม่ละลาย

2.2 การคงรูปของ CH ECH และ ECH-NC

จากการสังเกตด้วยสายตา พบว่า CH จะไม่คงรูปในสารละลายที่เป็นกรด คือ ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 3-5 ลักษณะเม็ดในสารละลายที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 3-5 เม็ดบีดส์ไคโตซานจะละลาย แต่คงรูปในสารละลายที่เป็นเบส คือ ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 6-10 (ภาพที่ 4) แต่ไคโตซานบีดส์เชื่อมโยงทั้งสองชนิด (ECH และ ECH-NC) จะคงรูป คือ มีลักษณะเม็ดบีดส์และผิวของเม็ดบีดส์ปกติเหมือนก่อนการทดสอบในสารละลายทุกๆ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่ทำการทดสอบ ดังตารางที่ 4



4 (ก) pH 3

4 (ข) pH 4

4 (ค) pH 5

4 (ง) pH 6



4 (จ) pH 7

4 (ฉ) pH 8

4 (ช) pH 9

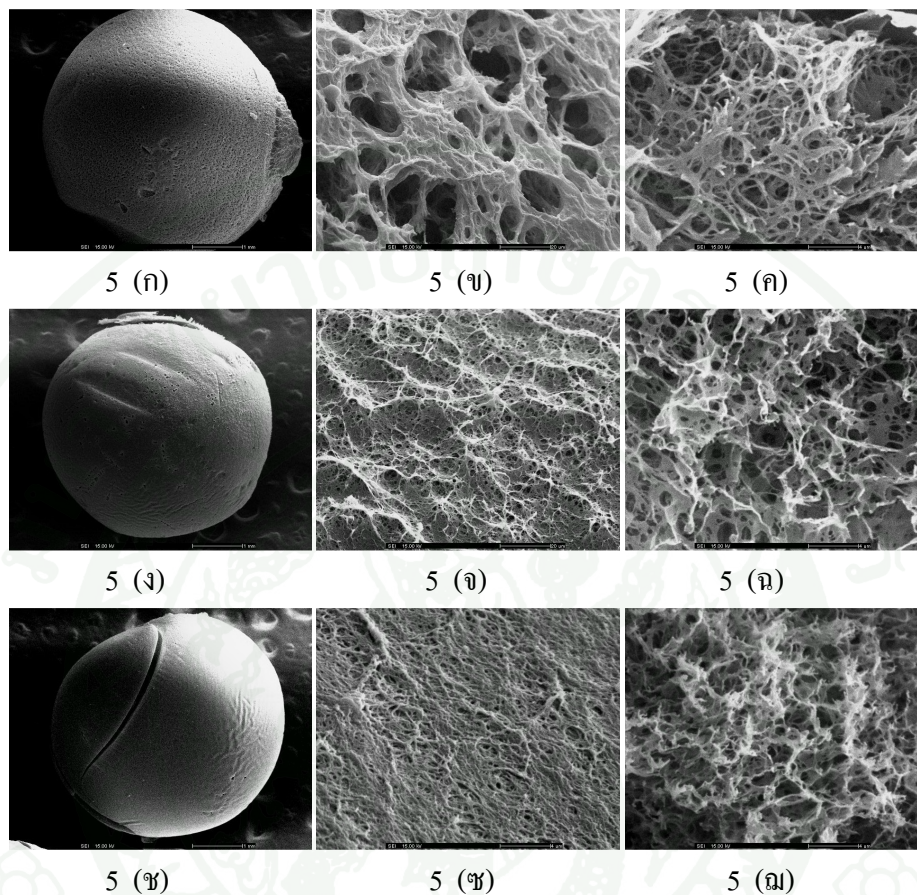
4 (ซ) pH 10

ภาพที่ 4 การคงรูปของ CH ในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (ก)-(ซ) 3-10 ตามลำดับ

ตารางที่ 4 การคงรูปของ CH ECH และ ECH-NC

ค่าความเป็นกรด-ด่าง	CH	ECH	ECH-NC
3	ไม่คงรูป	คงรูป	คงรูป
4	ไม่คงรูป	คงรูป	คงรูป
5	ไม่คงรูป	คงรูป	คงรูป
6	คงรูป	คงรูป	คงรูป
7	คงรูป	คงรูป	คงรูป
8	คงรูป	คงรูป	คงรูป
9	คงรูป	คงรูป	คงรูป
10	คงรูป	คงรูป	คงรูป

2.3 ผลการวิเคราะห์พื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)



ภาพที่ 5 ภาพถ่ายพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ก่อนการดูดซับ ไอออนโลหะ (ก) ภายนอก (ข) ภายนอก (ค) ภายใน ของ CH (ง) ภายนอก (จ) ภายนอก (ฉ) ภายใน ของ ECH (ซ) ภายนอก (ฅ) ภายนอก (ณ) ภายใน ของ ECH-NC (ก) (ง) (ซ) กำลังขยาย 40 เท่า (ข) (จ) (ฅ) กำลังขยาย 2000 เท่า และ (ค) (ฉ) (ณ) กำลังขยาย 10000 เท่า

จากภาพที่ 5 จากการถ่ายพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) พื้นผิวภายนอกและภายในของ CH จะมีลักษณะร่างแหตาข่ายโปร่ง รูปพรุนกว้างกว่า ECH และ ECH-NC ซึ่งพื้นผิวภายนอกและภายในของ ECH-NC มีร่างแหตาข่ายชิดและแน่นกว่า CH และ ECH

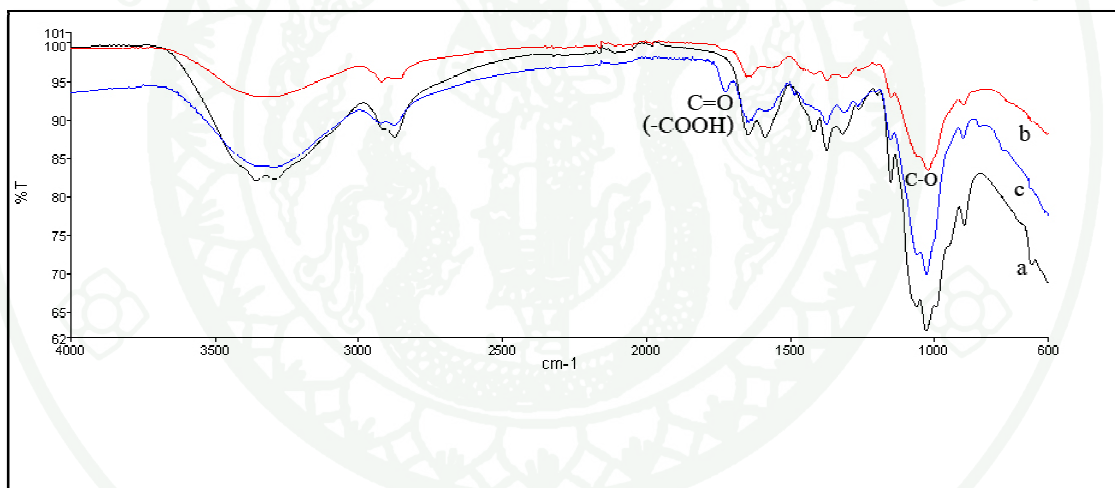
2.4 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared (FTIR)

FTIR spectrum ของ CH และไลโคโตซานบีดส์เชื่อมโยงทั้งสองชนิด (ECH และ ECH-NC)

ไลโคโตซานบีดส์มีพีคที่ $3000-4000\text{ cm}^{-1}$ คือ หมู่ฟังก์ชัน $-OH$ และ $-NH_2$ พีคที่ 2943 cm^{-1} คือ $-CH$ และพีคที่ 1659 cm^{-1} คือ $C=O$ ที่เป็นส่วนหนึ่งของการกำจัดหมู่อะซีดิลของไลโคโตซาน

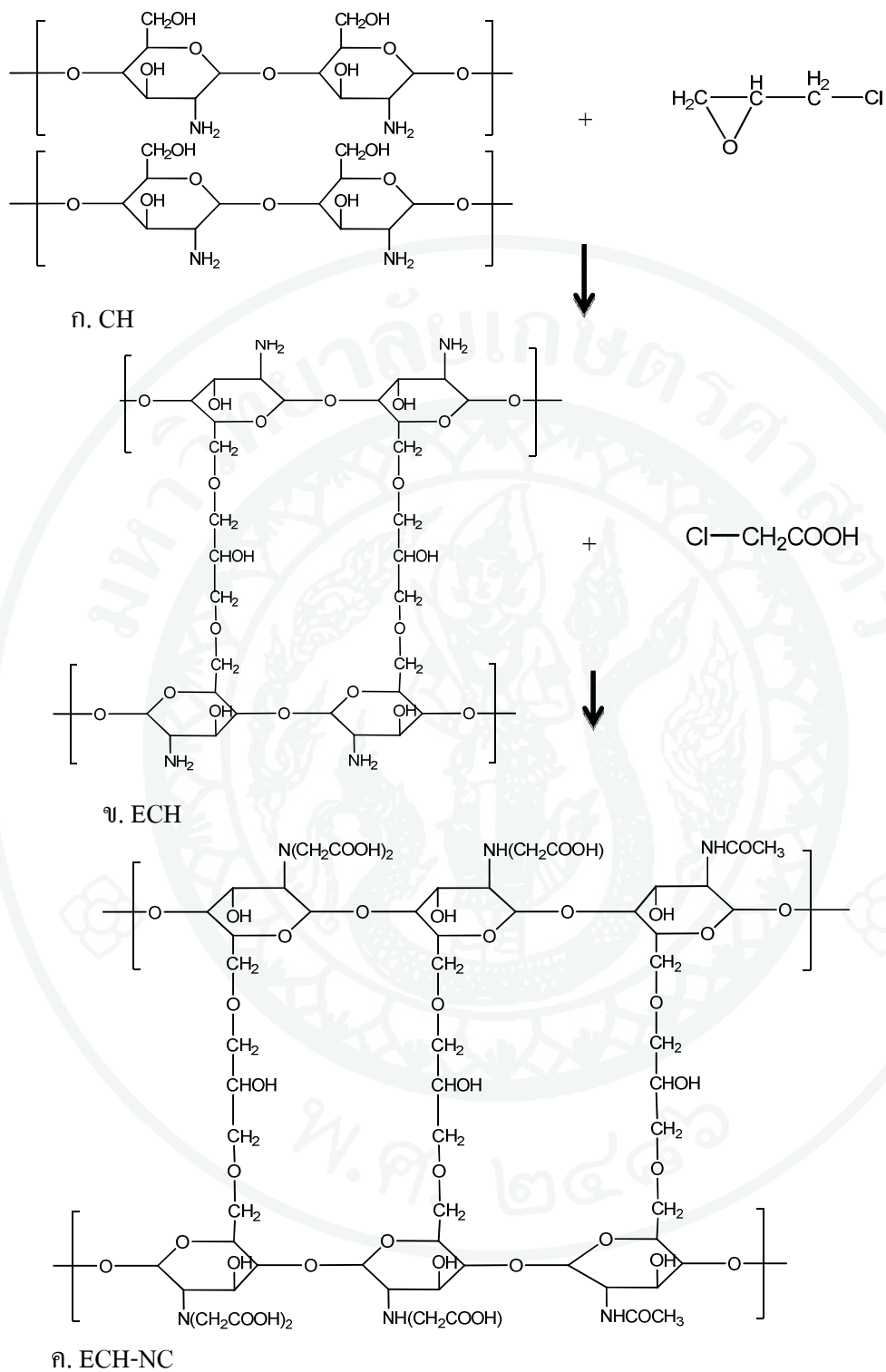
ECH และ ECH-NC มีพีคดังกล่าวข้างต้นเหมือน CH ยกเว้นพีคที่ 1071 cm^{-1} คือ $C-O$ ของพันธะ $C-O-C$ ซึ่งเป็นการเชื่อมโยงของอีพิกลอโรไฮดริน (Kannamba *et al.*, 2010)

และพีคที่ 1742 cm^{-1} แสดงหมู่ฟังก์ชัน $C=O$ ของหมู่ $-COOH$ คือ สเตครัมของ *N*-carboxymethyl ที่ปรากฏหมู่คาร์บอกซิเกิดขึ้นที่หมู่เอมีโนของไลโคโตซาน พบเฉพาะใน ECH-NC (An *et al.*, 2009) ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 FTIR spectra ของ (a) CH (b) ECH และ (c) ECH-NC

ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของ CH ECH และ ECH-NC ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 โครงสร้างทางเคมีของ (ก) CH (ข) ECH (ค) ECH-NC และปฏิกิริยาการสังเคราะห์ ECH และ ECH-NC

3. การศึกษาสถานะที่เหมาะสม และประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนโลหะหนักด้วย CH ECH และ ECH-NC

1.1 ปริมาณบีดส์ที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนตะกั่ว

การศึกษาปริมาณที่เหมาะสม ทำการทดลองโดยใช้ปริมาณบีดส์ 0.25 0.50 0.75 และ 1.00 กรัม และสารละลายไอออนตะกั่ว ที่ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการศึกษา พบว่า CH ปริมาณ 0.50 กรัม มีประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนตะกั่วสูงสุด เท่ากับ 836.38 ± 11.29 ไมโครกรัมต่อกรัม CH ดังตารางที่ 5 จึงเลือกใช้ปริมาณ CH และไคโตซานบีดส์เชื่อมโยงทั้งสองชนิด (ECH และ ECH-NC) เท่ากับ 0.50 กรัม ในการทำการทดลองขั้นต่อไป ใช้ปริมาณ CH และไคโตซานบีดส์เชื่อมโยงทั้งสองชนิด (ECH และ ECH-NC) เท่ากับ 0.50 กรัม ในการดูดซับไอออนสังกะสี เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนทั้งสองชนิดด้วย CH ECH และ ECH-NC

ตารางที่ 5 ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วของ CH ที่ปริมาณ 0.25 0.5 0.75 และ 1.00 กรัม ที่ความเข้มข้นของสารละลายไอออนตะกั่ว 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 5 มิลลิลิตร (ค่าเฉลี่ย \pm SE)

ปริมาณไคโตซานบีดส์ (กรัม)	ประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่ว (ไมโครกรัมต่อกรัม)
0.25	758.66 ± 13.34^b
0.50	836.38 ± 11.29^a
0.75	623.99 ± 20.36^c
1.00	497.44 ± 13.34^d

หมายเหตุ ^{a, b, c, d} ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่มีอักษรแตกต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

3.2 ความเข้มข้น และเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนโลหะหนัก

3.2.1 ความเข้มข้น และเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนตะกั่ว

จากผลการทดลองการศึกษาผลของความเข้มข้นที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการดูดซับไอออนโลหะหนัก โดยศึกษาในสารละลายมีความเข้มข้นของไอออนตะกั่ว เท่ากับ 10 50 100 200 300 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ผลของประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วด้วย CH แสดงในตารางที่ 6

เมื่อความเข้มข้นของไอออนตะกั่วเพิ่มขึ้นจาก 10 เป็น 50 เป็น 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนตะกั่วมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ (ตารางที่ 6) แต่ที่ความเข้มข้น 300 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วลดลง ดังนั้นความเข้มข้นของไอออนตะกั่วมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ จึงเลือกความเข้มข้นที่เหมาะสม คือ 10 50 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตรในการทดลองต่อไป

ตารางที่ 6 ผลของการดูดซับไอออนตะกั่วที่ความเข้มข้น 10 50 100 200 300 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ด้วย CH ปริมาณ 0.50 กรัมที่เวลา 4 ชั่วโมง (ค่าเฉลี่ย \pm SE)

ความเข้มข้นของไอออนตะกั่ว (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่ว (ไมโครกรัมต่อกรัม)
10	128.80 \pm 3.46 ^a
50	391.40 \pm 3.64 ^{ab}
100	960.13 \pm 3.93 ^c
200	1553.68 \pm 5.24 ^d
300	588.83 \pm 7.96 ^{bc}
500	596.67 \pm 8.77 ^{bc}

หมายเหตุ ^{a, b, c, d} ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่มีอักษรแตกต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากผลการทดลองการศึกษาผลของความเข้มข้นและเวลาที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการดูดซับไอออนโลหะหนัก โดยศึกษาในสารละลายที่มีความเข้มข้นของไอออนตะกั่วเท่ากับ 10 50 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 2 4 และ 8 ชั่วโมง ผลของประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วด้วย CH ECH และ ECH-NC แสดงในตารางที่ 7 8 และ 9 ตามลำดับ

เมื่อความเข้มข้นของไอออนตะกั่วเพิ่มขึ้นจาก 10 เป็น 50 เป็น 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนตะกั่วมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ และประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วที่เวลา 2 4 และ 8 ชั่วโมง พบว่าเวลาในการดูดซับไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนตะกั่ว ยกเว้นที่ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตรที่ความสัมพันธ์ไม่แน่นอน (ตารางที่ 7)

ตารางที่ 7 ผลของการดูดซับไอออนตะกั่วที่ความเข้มข้น 10 50 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ด้วย CH ปริมาณ 0.50 กรัมที่เวลา 2 4 และ 8 ชั่วโมง (ค่าเฉลี่ย \pm SE)

ความเข้มข้นของไอออนตะกั่ว (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ประสิทธิภาพการดูดซับด้วย CH (ไมโครกรัมต่อกรัม)		
	2 ชั่วโมง	4 ชั่วโมง	8 ชั่วโมง
10	109.01 \pm 4.41 ^{a,A}	128.80 \pm 3.46 ^{a,B}	120.02 \pm 4.16 ^{a,AB}
50	393.65 \pm 4.82 ^{b,A}	391.40 \pm 3.64 ^{b,A}	400.62 \pm 4.56 ^{b,A}
100	984.69 \pm 3.79 ^{c,A}	960.13 \pm 3.93 ^{c,B}	980.05 \pm 2.11 ^{c,A}
200	1618.78 \pm 5.97 ^{d,B}	1553.68 \pm 5.24 ^{d,A}	1733.48 \pm 4.50 ^{d,C}

หมายเหตุ ^{a, b, c, d} ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่มีอักษรแตกต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และ ^{A, B, C} ค่าเฉลี่ยในแถวเดียวกันที่มีอักษรแตกต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากการทดลองการศึกษาค้นคว้าผลของความเข้มข้นและเวลาที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วด้วย ECH พบว่า เมื่อความเข้มข้นไอออนตะกั่วเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนโลหะหนักตะกั่วด้วย ECH เพิ่มขึ้นตามลำดับ เช่นเดียวกับ CH ยกเว้นประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนตะกั่วที่ความเข้มข้น 100 และ 200 มิลลิกรัมจะลดลงที่เวลา 8 ชั่วโมง (ตารางที่ 8)

ตารางที่ 8 ผลของการดูดซับไอออนตะกั่วที่ความเข้มข้น 10 50 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ด้วย ECH ปริมาณ 0.50 กรัม ที่เวลา 2 4 และ 8 ชั่วโมง (ค่าเฉลี่ย \pm SE)

ความเข้มข้นของไอออนตะกั่ว (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (ไมโครกรัมต่อกรัม)		
	2 ชั่วโมง	4 ชั่วโมง	8 ชั่วโมง
10	60.04 \pm 9.55 ^{a,A}	53.95 \pm 6.41 ^{a,A}	95.60 \pm 7.71 ^{a,B}
50	204.07 \pm 8.74 ^{b,A}	231.23 \pm 8.36 ^{b,B}	271.01 \pm 6.30 ^{b,C}
100	316.24 \pm 11.59 ^{c,A}	473.79 \pm 4.67 ^{c,B}	465.41 \pm 7.71 ^{c,B}
200	558.44 \pm 13.76 ^{d,A}	649.70 \pm 7.90 ^{d,B}	439.02 \pm 7.72 ^{d,C}

หมายเหตุ ^{a,b,c,d} ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่มีอักษรแตกต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และ ^{A,B,C} ค่าเฉลี่ยในแถวเดียวกันที่มีอักษรแตกต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

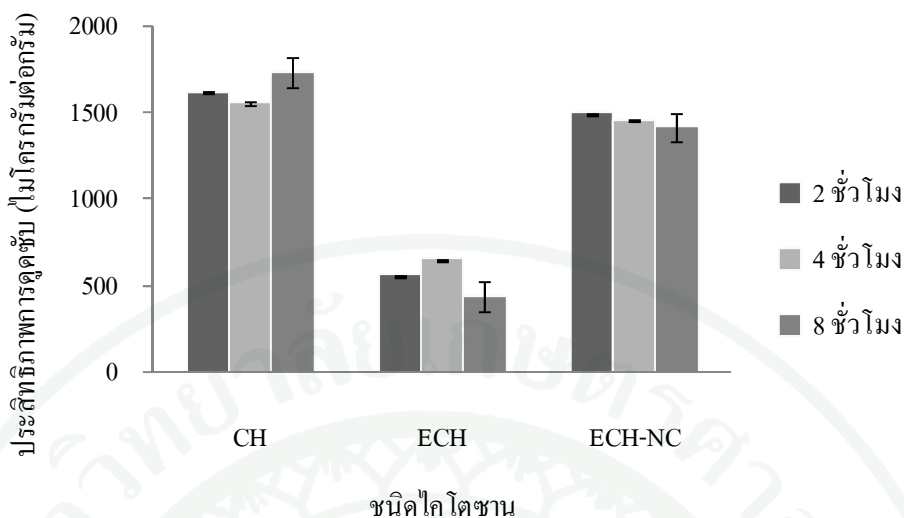
สำหรับประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนตะกั่วของ ECH-NC เมื่อความเข้มข้นไอออนตะกั่วเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนตะกั่วจะมีลักษณะเช่นเดียวกับ CH และ ECH โดยที่เวลาในการดูดซับไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ (ตารางที่ 9)

ตารางที่ 9 ผลของการดูดซับไอออนตะกั่วที่ความเข้มข้น 10 50 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 5 มิลลิตร ด้วย ECH-NC ปริมาณ 0.50 กรัมที่เวลา 2 4 และ 8 ชั่วโมง (ค่าเฉลี่ย \pm SE)

ความเข้มข้นของ ไอออน ตะกั่ว (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ประสิทธิภาพการดูดซับด้วย ECH-NC (ไมโครกรัมต่อกรัม)		
	2 ชั่วโมง	4 ชั่วโมง	8 ชั่วโมง
10	79.00 \pm 3.95 ^{a,A}	67.52 \pm 7.55 ^{a,A}	77.33 \pm 4.14 ^{a,A}
50	327.77 \pm 41.03 ^{b,A}	349.75 \pm 38.89 ^{b,A}	318.18 \pm 42.92 ^{b,A}
100	896.59 \pm 39.27 ^{c,A}	919.76 \pm 38.62 ^{c,A}	819.42 \pm 83.24 ^{c,A}
200	1492.38 \pm 66.20 ^{d,A}	1452.00 \pm 29.21 ^{d,A}	1415.59 \pm 34.08 ^{d,A}

หมายเหตุ ^{a, b, c, d} ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่มีอักษรแตกต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และ ^A ค่าเฉลี่ยในแถวเดียวกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วด้วย CH สูงกว่า ECH และใกล้เคียงกับ ECH-NC (ภาพที่ 8) ประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนตะกั่วสูงสุดที่ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่เวลา 8 ชั่วโมง CH มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุด เท่ากับ 1733.48 \pm 4.50 ไมโครกรัมต่อกรัม แต่ ECH ที่เวลา 4 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วสูงสุด เท่ากับ 649.70 \pm 7.90 ไมโครกรัมต่อกรัม ตามลำดับ โดยประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วด้วย ECH-NC ที่เวลา 2 และ 4 ชั่วโมงไม่แตกต่างจาก 8 ชั่วโมง ดังภาพที่ 8 จึงเลือกใช้ความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลาย เท่ากับ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร และเวลาที่เหมาะสม คือ 4 ชั่วโมง และเนื่องจากมีงานวิจัยอื่นใช้ที่เวลา 4 ชั่วโมง (Chen *et al.*, 2008) เพื่อนำไปใช้ในการทดลองต่อไป



ภาพที่ 8 ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วด้วย CH ECH และ ECH-NC ที่ความเข้มข้นสารละลาย 200 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 2 4 และ 8 ชั่วโมง

3.2.2 ความเข้มข้น และเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนสังกะสี

จากผลการทดลองการศึกษาผลของความเข้มข้นและเวลาที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการดูดซับไอออนสังกะสี เท่ากับ 10 50 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 2 4 และ 8 ชั่วโมง ผลของประสิทธิภาพการดูดซับไอออนสังกะสีด้วย CH ECH และ ECH-NC แสดงในตารางที่ 10 11 และ 12 ตามลำดับ

ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนสังกะสีด้วย CH เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มขึ้นตามลำดับ และเวลาในการดูดซับไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับไอออนสังกะสี ($p < 0.05$) (ตารางที่ 10)

ตารางที่ 10 ผลของการดูดซับไอออนสังกะสีที่ความเข้มข้น 10 50 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ด้วย CH ปริมาณ 0.50 กรัมที่เวลา 2 4 และ 8 ชั่วโมง (ค่าเฉลี่ย \pm SE)

ความเข้มข้นของไอออนสังกะสี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ประสิทธิภาพการดูดซับด้วย CH (ไมโครกรัมต่อกรัม)		
	2 ชั่วโมง	4 ชั่วโมง	8 ชั่วโมง
10	101.00 \pm 7.35 ^{a,A}	108.14 \pm 18.07 ^{a,A}	128.86 \pm 19.22 ^{a,A}
50	336.11 \pm 10.90 ^{b,A}	316.96 \pm 12.15 ^{b,A}	344.89 \pm 7.98 ^{b,A}
100	708.57 \pm 15.71 ^{c,A}	689.32 \pm 15.91 ^{c,A}	716.18 \pm 11.35 ^{c,A}
200	1368.12 \pm 36.93 ^{d,A}	1213.44 \pm 33.13 ^{d,A}	1291.60 \pm 120.32 ^{d,A}

หมายเหตุ ^{a, b, c, d} ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่มีอักษรแตกต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และ ^A ค่าเฉลี่ยในแถวเดียวกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนสังกะสีด้วย ECH พบว่า ที่เวลา 2 และ 4 ชั่วโมง ประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของไอออนสังกะสีเพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อทดสอบทางสถิติพบว่าที่ความเข้มข้น 10 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร เวลาในการเขย่าไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ ($p < 0.05$) (ตารางที่ 11)

ตารางที่ 11 ผลของการดูดซับไอออนสังกะสีที่ความเข้มข้น 10 50 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ด้วย ECH ปริมาณ 0.50 กรัมที่เวลา 2 4 และ 8 ชั่วโมง (ค่าเฉลี่ย \pm SE)

ความเข้มข้นของไอออนสังกะสี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ประสิทธิภาพการดูดซับด้วย ECH (ไมโครกรัมต่อกรัม)		
	2 ชั่วโมง	4 ชั่วโมง	8 ชั่วโมง
10	63.32 \pm 22.76 ^{a, A}	48.31 \pm 13.42 ^{a, A}	18.10 \pm 16.02 ^{a, A}
50	78.86 \pm 3.47 ^{a, A}	105.53 \pm 6.82 ^{b, B}	47.75 \pm 6.01 ^{a, C}
100	89.32 \pm 14.36 ^{a, A}	69.91 \pm 25.93 ^{a, A}	86.74 \pm 12.66 ^{b, A}
200	189.29 \pm 42.81 ^{b, A}	180.25 \pm 36.47 ^{b, A}	98.11 \pm 10.30 ^{b, A}

หมายเหตุ ^{a, b} ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่มีอักษรแตกต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และ ^{A, B, C} ค่าเฉลี่ยในแถวเดียวกันที่มีอักษรแตกต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

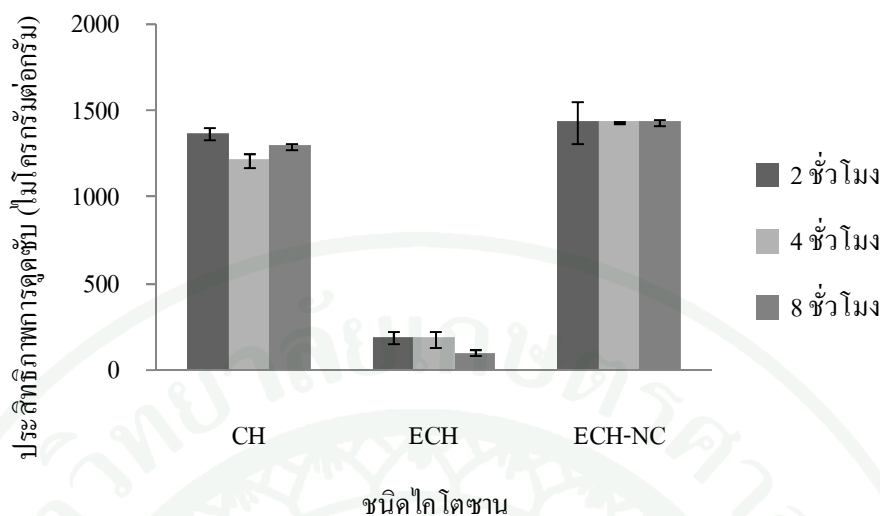
ประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนสังกะสีด้วย ECH-NC พบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนสังกะสีเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของไอออนสังกะสีเพิ่มขึ้น และเวลาไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ ($p < 0.05$) แสดงในตารางที่ 12

ตารางที่ 12 ผลของการดูดซับไอออนสังกะสีที่ความเข้มข้น 10 50 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ด้วย ECH-NC ปริมาณ 0.50 กรัมที่เวลา 2 4 และ 8 ชั่วโมง (ค่าเฉลี่ย \pm SE)

ความเข้มข้นของไอออนสังกะสี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ประสิทธิภาพการดูดซับด้วย ECH-NC (ไมโครกรัมต่อกรัม)		
	2 ชั่วโมง	4 ชั่วโมง	8 ชั่วโมง
10	84.18 \pm 11.56 ^{a,A}	84.86 \pm 12.10 ^{a,A}	84.71 \pm 12.41 ^{a,A}
50	368.16 \pm 6.01 ^{b,A}	366.66 \pm 5.58 ^{b,A}	369.59 \pm 5.20 ^{b,A}
100	744.92 \pm 8.00 ^{c,A}	744.51 \pm 6.37 ^{c,A}	746.11 \pm 8.95 ^{c,A}
200	1434.75 \pm 19.96 ^{d,A}	1431.40 \pm 17.38 ^{d,A}	1429.13 \pm 14.10 ^{d,A}

หมายเหตุ ^{a, b, c, d} ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่มีอักษรแตกต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และ ^A ค่าเฉลี่ยในแถวเดียวกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ดังนั้น ผลของประสิทธิภาพการดูดซับด้วย CH ECH และ ECH-NC มีประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนสังกะสีสูงสุดที่ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร CH มีประสิทธิภาพในการดูดซับ เท่ากับ 1293.44 \pm 33.13 ECH เท่ากับ 180.25 \pm 36.47 ไมโครกรัมต่อกรัม และ ECH-NC เท่ากับ 1431.40 \pm 17.38 ไมโครกรัมต่อกรัม ที่เวลา 4 ชั่วโมง ดังภาพที่ 9 จึงเลือกใช้ความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลาย เท่ากับ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร และเวลาที่เหมาะสมคือ 4 ชั่วโมง เพื่อนำไปใช้ในการทดลองต่อไป



ภาพที่ 9 ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนสังกะสีด้วย CH ECH และ ECH-NC ที่ความเข้มข้นสารละลาย 200 มิลลิกรัมต่อลิตรเป็นเวลา 2 4 และ 8 ชั่วโมง

3.3 ความเป็นกรดต่างของสารละลายไอออนโลหะหนักที่เหมาะสมในการดูดซับไอออน

3.3.1 ความเป็นกรดต่างของสารละลายไอออนตะกั่ว

จากการศึกษาผลของค่าความเป็นกรด-ด่าง ในสารละลายไอออนตะกั่วต่อประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนตะกั่ว โดยศึกษาที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 3 4 5 และ 6 เนื่องจากไคโตซานบีดส์ไม่ละลายในสารละลายกรดอินทรีย์ จึงปรับสารละลายด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร ในสารละลายที่มีความเข้มข้นของไอออนโลหะหนักเท่ากับ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อใช้ไคโตซานบีดส์เป็นปัจจัยควบคุมในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับไอออนของตะกั่ว และสังกะสี ผลของประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนของตะกั่ว และสังกะสีแสดงในตารางที่ 13 และ 14

ซึ่งจะเห็นว่าประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนตะกั่วสูงสุดของ CH และ ECH ที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 6 คือ 1491.68 ± 110.34 และ 680.50 ± 168.58 ไมโครกรัมต่อกรัม ตามลำดับ อาจเนื่องมาจากการตกตะกอนมากกว่าการดูดซับ เพราะที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 6 ตะกั่วจะเริ่มตกตะกอนเป็นสารประกอบไฮดรอกไซด์ ($\text{Pb}(\text{OH})_2$ $k_{sp} = 1.2 \times 10^{-15}$)

(Chen *et al.*, 2011)

ตารางที่ 13 ผลของความเป็นกรด-ด่างต่อการดูดซับไอออนตะกั่วด้วย CH ECH และ ECH-NC
(ค่าเฉลี่ย \pm SE)

ความเป็นกรด-ด่าง	ประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่ว (ไมโครกรัมต่อกรัม)		
	CH	ECH	ECH-NC
3	895.30 \pm 7.97 ^{a,A}	308.23 \pm 12.04 ^{a,B}	934.89 \pm 79.31 ^{a,A}
4	1118.02 \pm 9.04 ^{b,A}	467.68 \pm 41.92 ^{ab,B}	957.02 \pm 55.33 ^{a,C}
5	1198.66 \pm 3.68 ^{b,A}	381.24 \pm 16.29 ^{a,B}	998.22 \pm 50.59 ^{a,C}
6	1491.68 \pm 110.34 ^{c,A}	680.50 \pm 168.58 ^{b,B}	970.96 \pm 24.39 ^{a,B}

หมายเหตุ ^{a,b,c} ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่มีอักษรแตกต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และ ^{A,B,C} ค่าเฉลี่ยในแถวเดียวกันที่มีอักษรแตกต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

3.3.2 ความเป็นกรดต่างของสารละลายไอออนสังกะสี

ผลของค่าความเป็นกรด-ด่าง ในสารละลายไอออนสังกะสีต่อประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนสังกะสี พบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนสังกะสีสูงสุดของ CH ECH ที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 3 คือ 1362.45 \pm 38.40 และ 230.84 \pm 32.40 ไมโครกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนสังกะสีสูงสุดของ ECH-NC ที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 5 คือ 1400.78 \pm 4.61 ไมโครกรัมต่อกรัม ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนสังกะสีที่ค่าความเป็นกรด-ด่างต่างๆ แสดงในตารางที่ 14

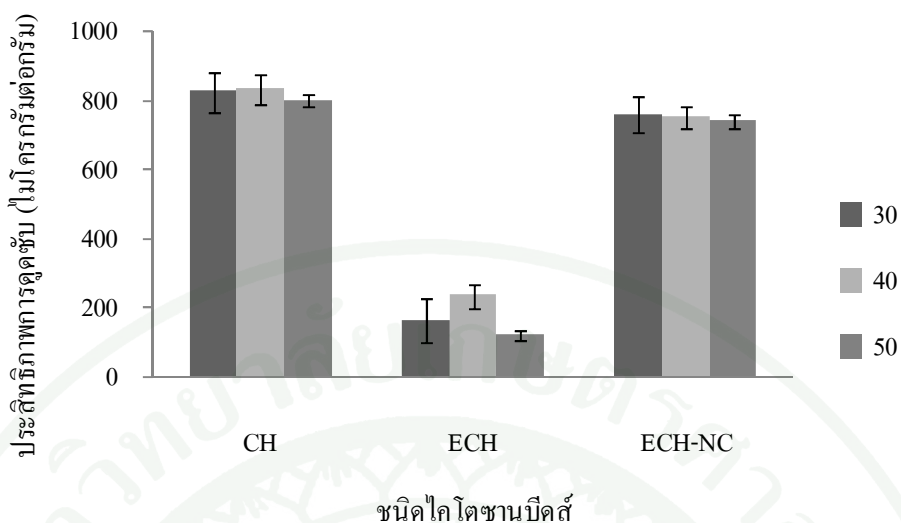
ตารางที่ 14 ผลของความเป็นกรด-ด่างต่อการดูดซับไอออนสังกะสีด้วย CH ECH และ ECH-NC
(ค่าเฉลี่ย \pm SE)

ความเป็นกรด-ด่าง	ประสิทธิภาพการดูดซับสังกะสี (ไมโครกรัมต่อกรัม)		
	CH	ECH	ECH-NC
3	1362.45 \pm 38.40 ^{a,B}	230.84 \pm 32.40 ^{a,A}	1330.52 \pm 18.24 ^{a,B}
4	1071.21 \pm 69.52 ^{b,B}	132.38 \pm 29.20 ^{ab,A}	1369.61 \pm 17.50 ^{ab,C}
5	1296.12 \pm 37.26 ^{a,B}	164.55 \pm 38.47 ^{ab,A}	1400.78 \pm 4.61 ^{b,C}
6	1198.57 \pm 62.73 ^{a,B}	126.54 \pm 26.60 ^{b,A}	1364.17 \pm 8.71 ^{ab,C}

หมายเหตุ ^{a,b} ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่มีอักษรแตกต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และ ^{A,B,C} ค่าเฉลี่ยในแถวเดียวกันที่มีอักษรแตกต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

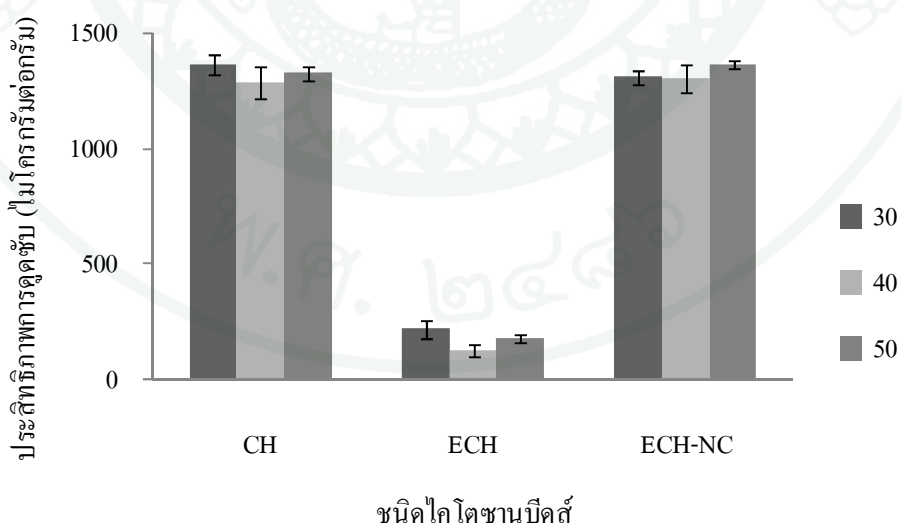
3.4 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการดูดซับของ CH ECH และ ECH-NC

จากการทดลองใช้สภาวะ คือ ปริมาณบีดส์ เท่ากับ 0.50 กรัม ความเข้มข้นของไอออนโลหะหนักที่เหมาะสม คือ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 5 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที เวลาในการดูดซับ 4 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำสภาวะเหล่านี้ไปศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการดูดซับ ที่อุณหภูมิ 30 40 และ 50 องศาเซลเซียส ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 10 พบว่าอุณหภูมิไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนตะกั่วด้วย CH ECH และ ECH-NC ($p < 0.05$) ประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับไอออนตะกั่วด้วย CH ECH และ ECH-NC เท่ากับ 831.80 \pm 65.03 234.22 \pm 34.28 และ 795.99 \pm 17.44 ไมโครกรัมต่อกรัม ตามลำดับ



ภาพที่ 10 ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วที่อุณหภูมิต่างๆ ด้วย CH ECH และ ECH-NC

จากการทดลองประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนสังกะสีด้วย CH ECH และ ECH-NC ที่อุณหภูมิต่างๆ ทำการทดลองเช่นเดียวกับการดูดซับไอออนตะกั่ว ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 11 พบว่า อุณหภูมิไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนสังกะสีด้วย CH และ ECH ($p > 0.05$) ประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุดด้วย CH ECH และ ECH-NC เท่ากับ 1362.21 ± 45.88 218.24 ± 69.59 และ 1360.16 ± 8.01 ไมโครกรัมต่อกรัม ตามลำดับ



ภาพที่ 11 ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนสังกะสีที่อุณหภูมิต่างๆ ด้วย CH ECH และ ECH-NC

3.5 พฤติกรรมในการดูดติดไอออนของตะกั่ว และสังกะสีของ CH ECH และ ECH-NC ด้วยการหาค่าไอโซเทอมการดูดติดผิว โดยใช้สมการของแลงเมียร์ และฟรุนดลิช

ในการทดลองศึกษาความสามารถในการดูดติดผิวนี้ เป็นการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch test) โดยเปรียบเทียบโคโคซาน 3 ชนิด คือ CH ECH และ ECH-NC ปริมาณบีดส์ 0.50 กรัม ในสารละลายที่มีไอออนโลหะหนักแต่ละชนิด คือ สังกะสี และตะกั่ว ที่ความเข้มข้น 10 50 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 5 มิลลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 5 เขย่าด้วยเครื่องเขย่า ที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักก่อนและหลังการดูดซับ

ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดติดไอออนของตะกั่ว และสังกะสีด้วย CH ECH และ ECH-NC ลงจุดข้อมูลในการดูดติดผิวตามแบบจำลองไอโซเทอมการดูดติดผิว ซึ่งในการทดลองนี้ใช้ไอโซเทอมการดูดติดผิว 2 ไอโซเทอม ได้แก่ ไอโซเทอมการดูดติดผิวของแลงเมียร์ และไอโซเทอมการดูดติดผิวของฟรุนดลิช ไอโซเทอมการดูดติดผิวของแลงเมียร์จะทำการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง C_e และ C_e/Q_e ในแกน X และ Y ตามลำดับ ส่วนไอโซเทอมการดูดติดผิวของฟรุนดลิช ทำการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln C_e$ และ $\ln Q_e$ ในแกน X และ Y ตามลำดับ (Chen *et al.*, 2008)

จากนั้นนำข้อมูลมาลงจุดตามไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ และฟรุนดลิช เพื่อคำนวณหาค่าตัวแปรต่างๆ ผลได้แสดงในตารางที่ 15 และ 16 ตามลำดับ

ตารางที่ 15 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ และฟรุนดลิช และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ในการดูดซับไอออนตะกั่วด้วย CH ECH และ ECH-NC

ชนิด ไคโตซานบีดส์	ไอโซเทอม การดูดซับ	ค่าคงที่	ประสิทธิภาพในการ ดูดซับสูงสุด (ไมโครกรัมต่อกรัม)	ค่าสัมประสิทธิ์ สหสัมพันธ์ (R^2)
CH	แลงเมียร์	$\frac{1/Q_m b = 5.4823}{b = 0.1069}$	1707.0	1.0000
	ฟรุนดลิช	$\frac{\ln K_F = -1.6332}{b = 0.5079}$	195.3	0.9257
ECH	แลงเมียร์	$\frac{1/Q_m b = 13.2847}{b = 0.1065}$	706.7	0.9915
	ฟรุนดลิช	$\frac{\ln K_F = -2.4341}{b = 0.4838}$	87.7	0.9532
ECH-NC	แลงเมียร์	$\frac{1/Q_m b = 2.2577}{b = 0.2684}$	1650.2	0.9624
	ฟรุนดลิช	$\frac{\ln K_F = -1.2191}{b = 0.6069}$	295.4	0.6848

จากตารางที่ 15 พบว่า R^2 ของไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ของไคโตซานบีดส์ทั้งสามชนิดมีค่าสูงกว่าไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช แสดงว่าประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนตะกั่วด้วย CH ECH และ ECH-NC เหมาะสมกับไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ โดยประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนตะกั่วสูงสุดด้วย CH ECH และ ECH-NC เท่ากับ 1707.0 706.7 และ 1650.2 ไมโครกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

ตารางที่ 16 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงเมียร์ และฟรุนดลิช และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ในการดูดติดไอออนสังกะสี CH ECH และ ECH-NC

ชนิด ไคโตซานบีดส์	ไอโซเทอม การดูดติดผิว	ค่าคงที่	ประสิทธิภาพในการ ดูดติดสูงสุด (ไมโครกรัมต่อกรัม)	ค่าสัมประสิทธิ์ สหสัมพันธ์ (R^2)
CH	แลงเมียร์	$\frac{1/Q_m b = 3.3032}{b = 0.2159}$	713.2	0.9919
	ฟรุนดลิช	$\frac{\ln K_F = -1.1082}{b = 0.3979}$	330.2	0.8639
ECH	แลงเมียร์	$\frac{1/Q_m b = 88.8276}{b = 0.0550}$	204.7	0.9932
	ฟรุนดลิช	$\frac{\ln K_F = -3.6633}{b = 0.4302}$	25.6	0.8427
ECH-NC	แลงเมียร์	$\frac{1/Q_m b = 0.6412}{b = 0.9286}$	1679.5	0.9980
	ฟรุนดลิช	$\frac{\ln K_F = -0.3820}{b = 0.4270}$	682.5	0.9494

จากตารางที่ 16 พบว่า R^2 ของไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงเมียร์ของไคโตซานบีดส์ทั้งสามชนิดมีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่าไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช แสดงว่าประสิทธิภาพในการดูดติดไอออนสังกะสีด้วย CH ECH และ ECH-NC เหมาะสมกับไอโซเทอมการดูดติดผิวของแลงเมียร์ และประสิทธิภาพในการดูดติดไอออนสังกะสีสูงสุดด้วย CH ECH และ ECH-NC เท่ากับ 713.2 204.7 และ 1679.5 ไมโครกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

ในกรณีใช้สมการการดูดซับแบบแลงเมียร์ ควรคำนวณหาปัจจัยของการแยก หรือค่าตัวแปรที่สภาวะสมดุล (Separation factor or equilibrium parameter, R_L) ซึ่งจะเป็นตัวบอกรูปร่างของไอโซเทอมว่าสอดคล้องหรือไม่สอดคล้องกับการดูดซับ ปัจจัยการแยกคำนวณได้จากสมการ

$$R_L = \frac{1}{1 + bC_0} \quad (6)$$

C_0 หมายถึง ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนโลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อลิตร)

b หมายถึง ค่าคงที่ของประสิทธิภาพการดูดซับที่จุดสมดุลจากสมการแลงเมียร์ (มิลลิลิตรต่อมิลลิกรัม)

ผลที่ได้จากการคำนวณสามารถแปลความหมายโดยใช้ตารางที่ 17 ประกอบการพิจารณา

ตารางที่ 17 ผลปัจจัยของการแยกต่อรูปร่างไอโซเทอมแบบแลงเมียร์

R_L	Type of isotherm
$R_L > 1$	Unfavorable
$R_L = 1$	Linear
$0 < R_L < 1$	Favorable
$R_L = 0$	Irreversible

ผลการคำนวณปัจจัยของการแยกเมื่อใช้สมการแลงเมียร์ พบว่า ในการดูดซับไอออนตะกั่ว และไอออนสังกะสีด้วย CH ECH และ ECH-NC ที่ความเข้มข้นของสารละลายเท่ากับ 10 50 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าอยู่ในช่วง $0 < R_L < 1$ เป็นแบบ Favorable แสดงในตารางที่ 18 และ 19

ตารางที่ 18 ผลปัจจัยของการแยกต่อรูปร่างไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ในการดูดซับไอออนตะกั่วด้วย CH ECH และ ECH-NC ที่ความเข้มข้นของสารละลายไอออนตะกั่ว เท่ากับ 10 50 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร

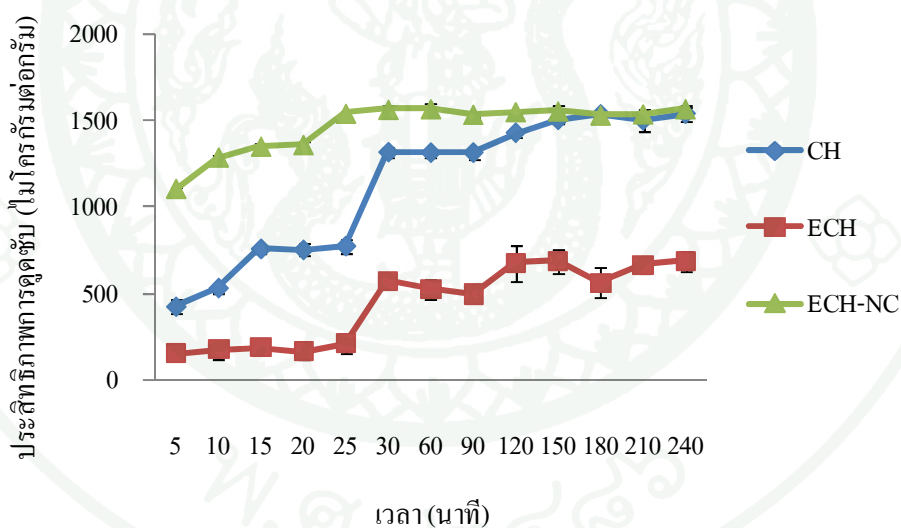
ความเข้มข้นของสารละลายไอออนตะกั่ว (มิลลิกรัมต่อลิตร)	R_L		
	CH	ECH	ECH-NC
10	0.4032	0.5848	0.3418
50	0.1681	0.2452	0.0941
100	0.0742	0.1048	0.0381
200	0.0344	0.0568	0.0212

ตารางที่ 19 ผลปัจจัยของการแยกต่อรูปร่างไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ในการดูดซับไอออนสังกะสีด้วย CH ECH และ ECH-NC ที่ความเข้มข้นของสารละลายไอออนตะกั่ว เท่ากับ 10 50 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร

ความเข้มข้นของสารละลายไอออนสังกะสี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	R_L		
	CH	ECH	ECH-NC
10	0.1156	0.5689	0.0280
50	0.0594	0.3392	0.0140
100	0.0301	0.1988	0.0072
200	0.0547	0.1085	0.1929

3.6 จลนศาสตร์การดูดซับไอออนของตะกั่ว และสังกะสีด้วย CH ECH และ ECH-NC

สภาวะที่ใช้ในการศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับไอออนของตะกั่ว และสังกะสี คือ ปริมาณโคโคซาน เท่ากับ 0.50 กรัม ความเข้มข้นของไอออนโลหะหนักที่เหมาะสม คือ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 5 มิลลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 5 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที และเวลาที่ใช้คือ 5 10 15 20 25 30 60 90 120 150 180 210 และ 240 นาที ผลการทดลอง พบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนตะกั่วด้วย CH จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเมื่อ เวลาเพิ่มขึ้น (5-120 นาที) จนเริ่มอิ่มตัวและเข้าสู่สมดุลในที่สุดที่เวลา 150-240 นาที แต่ ประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนตะกั่วด้วย ECH จะอิ่มตัวและเข้าสู่สมดุลเร็วกว่า CH คือ เข้าสู่ สมดุลเวลา 30-240 นาที และ ECH-NC จะอิ่มตัวและเข้าสู่สมดุล ตั้งแต่เวลาที่ 25-240 นาที ทั้งนี้ใน สภาวะสมดุลประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนตะกั่วด้วย CH และ ECH-NC ใกล้เคียงกัน และ มากกว่าการดูดซับไอออนตะกั่วด้วย ECH (ภาพที่ 12 และตารางที่ 20)



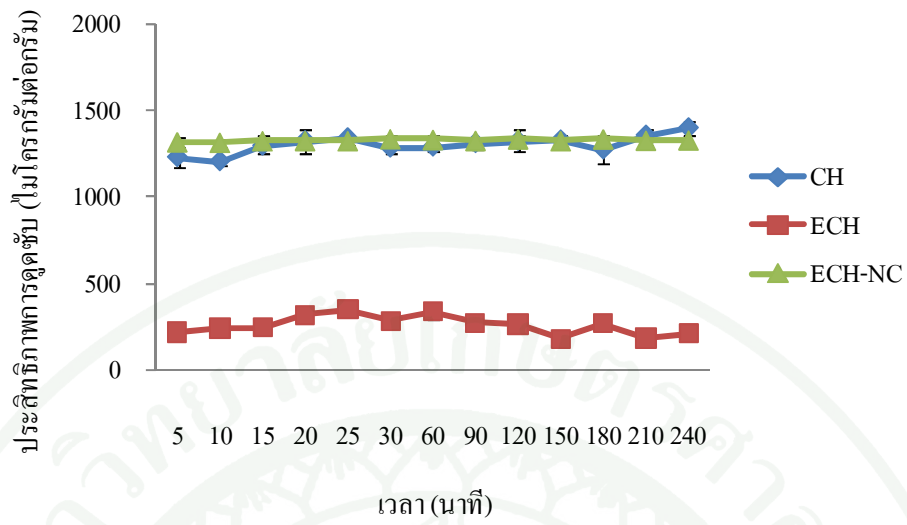
ภาพที่ 12 ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วที่เวลาต่างๆ ด้วย CH ECH และ ECH-NC

ตารางที่ 20 ผลของการดูดซับไอออนตะกั่วด้วย CH ECH และ ECH-NC ที่เวลาต่างๆ ความเข้มข้นของสารละลายไอออนตะกั่ว 200 มิลลิกรัมต่อลิตร (ค่าเฉลี่ย \pm SE)

เวลา (นาที)	ประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่ว (ไมโครกรัมต่อกรัม)		
	CH	ECH	ECH-NC
5	422.83 \pm 41.23 ^{a, A}	151.37 \pm 23.92 ^{a, B}	1100.19 \pm 15.46 ^{a, C}
10	530.23 \pm 29.59 ^{a, A}	172.42 \pm 55.47 ^{a, B}	1283.64 \pm 16.65 ^{b, C}
15	756.95 \pm 20.62 ^{a, A}	181.99 \pm 39.51 ^{a, B}	1347.35 \pm 15.04 ^{c, C}
20	750.95 \pm 34.26 ^{a, A}	163.91 \pm 46.68 ^{a, B}	1356.10 \pm 20.47 ^{c, C}
25	772.67 \pm 38.73 ^{a, A}	210.33 \pm 58.44 ^{a, B}	1539.27 \pm 16.45 ^{d, C}
30	1314.84 \pm 24.48 ^{b, A}	570.08 \pm 18.71 ^{bc, B}	1562.34 \pm 30.78 ^{d, C}
60	1311.67 \pm 22.98 ^{b, A}	525.72 \pm 62.49 ^{bc, B}	1565.69 \pm 33.09 ^{d, C}
90	1312.31 \pm 31.26 ^{b, A}	495.27 \pm 41.59 ^{b, B}	1533.84 \pm 20.25 ^{d, C}
120	1426.88 \pm 25.75 ^{c, A}	674.56 \pm 103.04 ^{bc, B}	1548.70 \pm 7.52 ^{d, A}
150	1501.61 \pm 18.95 ^{d, A}	683.27 \pm 68.45 ^{c, B}	1552.77 \pm 31.99 ^{d, A}
180	1531.95 \pm 12.91 ^{d, A}	562.98 \pm 86.19 ^{b, B}	1528.95 \pm 26.02 ^{d, A}
210	1497.38 \pm 65.20 ^{d, A}	662.60 \pm 44.94 ^{b, B}	1535.63 \pm 33.51 ^{d, A}
240	1537.72 \pm 43.78 ^{d, A}	686.50 \pm 52.10 ^{c, B}	1565.90 \pm 16.35 ^{d, A}

หมายเหตุ^{a, b, c, d} ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่มีอักษรแตกต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และ^{A, B, C} ค่าเฉลี่ยในแถวเดียวกันที่มีอักษรแตกต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากการทดลองประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนสังกะสีด้วย CH ECH และ ECH-NC ที่เวลาต่างๆ ทำการทดลองเช่นเดียวกับการดูดซับไอออนตะกั่ว ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 13 และตารางที่ 21 พบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนสังกะสีของ CH และ ECH จะค่อยๆ เพิ่มขึ้น 5-15 นาที หลังจากนั้นที่ 15 จะเริ่มอิ่มตัวและเข้าสู่สมดุล สำหรับประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนสังกะสีด้วย ECH-NC จะอิ่มตัวและเข้าสู่สมดุล ตั้งแต่ 5 นาที ทั้งนี้ในสภาวะสมดุล ประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนสังกะสีด้วย CH และ ECH-NC ใกล้เคียงกัน และมากกว่าการดูดซับไอออนสังกะสีด้วย ECH



ภาพที่ 13 ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนสังกะสีที่เวลาต่างๆ ด้วย CH ECH และ ECH-NC

ตารางที่ 21 ผลของการดูดซับไอออนสังกะสีด้วย CH ECH และ ECH-NC ที่เวลาต่างๆ ความเข้มข้นของสารละลายไอออนสังกะสี 200 มิลลิกรัมต่อลิตร (ค่าเฉลี่ย \pm SE)

เวลา (นาที)	ประสิทธิภาพการดูดซับสังกะสี (ไมโครกรัมต่อกรัม)		
	CH	ECH	ECH-NC
5	1229.12 \pm 52.77 ^{ab, A}	218.48 \pm 14.78 ^{ab, B}	1316.71 \pm 25.01 ^{a, A}
10	1205.73 \pm 25.95 ^{a, A}	241.23 \pm 39.97 ^{abc, B}	1313.75 \pm 23.07 ^{a, A}
15	1294.47 \pm 38.65 ^{abc, A}	243.52 \pm 16.83 ^{abc, B}	1323.39 \pm 28.06 ^{a, A}
20	1322.68 \pm 64.90 ^{abc, A}	319.42 \pm 28.92 ^{cd, B}	1324.11 \pm 21.80 ^{a, A}
25	1339.07 \pm 20.56 ^{abc, A}	349.98 \pm 35.17 ^{d, B}	1322.95 \pm 22.18 ^{a, A}
30	1283.93 \pm 31.66 ^{abc, A}	284.71 \pm 14.69 ^{bcd, B}	1333.88 \pm 23.70 ^{a, A}
60	1289.90 \pm 25.46 ^{abc, A}	339.10 \pm 40.47 ^{cd, B}	1330.10 \pm 25.61 ^{a, A}
90	1309.51 \pm 30.22 ^{ab, A}	273.65 \pm 32.58 ^{abcd, B}	1333.74 \pm 24.43 ^{a, A}
120	1322.21 \pm 63.74 ^{abc, A}	265.59 \pm 30.73 ^{abcd, B}	1024.39 \pm 24.25 ^{a, A}
150	1326.70 \pm 25.81 ^{abc, A}	178.80 \pm 31.79 ^{a, B}	1332.76 \pm 23.78 ^{a, A}
180	1272.97 \pm 72.87 ^{abc, A}	266.03 \pm 28.85 ^{abcd, B}	1333.36 \pm 24.72 ^{a, A}
210	1355.26 \pm 36.36 ^{bc, A}	184.53 \pm 32.40 ^{a, B}	1325.88 \pm 21.86 ^{a, A}
240	1397.23 \pm 38.63 ^{c, A}	208.40 \pm 27.25 ^{ab, B}	1327.36 \pm 25.95 ^{a, A}

หมายเหตุ^{a, b, c, d} ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่มีอักษรแตกต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และ^{A, B} ค่าเฉลี่ยในแถวเดียวกันที่มีอักษรแตกต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จลนศาสตร์ในการดูดซับ ไอออนของตะกั่ว และสังกะสีด้วย CH ECH และ ECH-NC โดยการลงจุดข้อมูลการดูดซับตามสมการอันดับหนึ่งเทียม และอันดับสองเทียม ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ของแต่ละสมการค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยา (k) ค่าประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนโลหะหนัก (Q) และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ในการดูดซับไอออนตะกั่ว และสังกะสีด้วย CH ECH และ ECH-NC แสดงในตารางที่ 22 และ 23 ตามลำดับ

จากตารางที่ 22 พบว่า R^2 ของสมการอันดับสองเทียม มีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่าอันดับหนึ่งเทียมของโคโตซานบีดส์ทั้งสามชนิด ซึ่งแสดงว่าพฤติกรรมในการดูดซับไอออนโลหะตะกั่วด้วย CH ECH และ ECH-NC สอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับสองเทียม ดังนั้น ประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนตะกั่วด้วย CH ECH และ ECH-NC เท่ากับ 1666.7 769.2 และ 1666.7 ไมโครกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และผลการคำนวณค่าประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนตะกั่วของสมการอันดับสองเทียมนี้มีค่าความใกล้เคียงกับผลการทดลอง (ตารางที่ 20) มากกว่าผลการคำนวณจากสมการอันดับหนึ่งเทียม ดังนั้นจึงเป็นเหตุผลสนับสนุนว่าสอดคล้องกับจลนศาสตร์การดูดซับไอออนตะกั่วของโคโตซานบีดส์ทั้งสามชนิดสัมพันธ์ตามสมการอันดับสองเทียม

จากตารางที่ 23 พบว่า R^2 ของสมการอันดับสองเทียมของโคโตซานบีดส์ทั้งสามชนิด มีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่า แสดงว่าความสามารถในการดูดซับไอออนสังกะสีของ CH ECH และ ECH-NC สัมพันธ์กับสมการอันดับสองเทียม ดังนั้น ประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนสังกะสีด้วย CH ECH และ ECH-NC เท่ากับ 1428.6 270.3 และ 1250 ไมโครกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และการคำนวณค่าประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนสังกะสีของสมการอันดับสองเทียม มีความใกล้เคียงกับผลการทดลอง (ตารางที่ 21) มากกว่าผลการคำนวณจากสมการอันดับหนึ่งเทียม

และเมื่อเปรียบเทียบค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยา (k) จากตารางที่ 22 และ 23 พบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนสังกะสีด้วย CH ECH และ ECH-NC เร็วกว่าประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนตะกั่วด้วย CH ECH และ ECH-NC ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองดังภาพที่ 12 และ 13 ตามลำดับ และ ECH-NC มีค่าคงที่การดูดซับ (k_2) มากกว่า CH และ ECH

ตารางที่ 22 จลนศาสตร์การดูดซับไอออนตะกั่วด้วย CH ECH และ ECH-NC

ชนิดไลโตซาน	อันดับหนึ่งเทียม			อันดับสองเทียม		
	k (min ⁻¹)	Q (μg/g)	R ²	k (g/μg.min)	Q (g/μg)	R ²
CH	0.0223	1044.5	0.8100	3.1304x10 ⁻⁵	1666.7	0.9958
ECH	0.0189	485.4	0.5393	3.1767x10 ⁻⁵	769.2	0.9377
ECH-NC	0.0141	165.7	0.5311	3.6000 x10 ⁻⁴	1666.7	0.9997

ตารางที่ 23 จลนศาสตร์การดูดซับไอออนสังกะสีด้วย CH ECH และ ECH-NC

ชนิดไลโตซาน	อันดับหนึ่งเทียม			อันดับสองเทียม		
	k (min ⁻¹)	Q (μg/g)	R ²	k (g/μg.min)	Q (μg/g)	R ²
CH	0.0015	87.6	0.2165	3.5000x10 ⁻⁴	1428.6	0.9976
ECH	0.0009	33.1	0.0068	3.1114x10 ⁻³	270.3	0.9995
ECH-NC	0.0066	9.8	0.0209	1.1850x10 ⁻⁴	1250.6	0.9726

4. ผลการดูดซับไอออนของตะกั่ว และสังกะสีในสารละลายแบบผสม

จากผลการศึกษาการดูดซับไอออนตะกั่ว และไอออนสังกะสี ปริมาณบีคส์เท่ากับ 10.00 กรัม ในสารละลายแบบผสม ที่ความเข้มข้นของไอออนตะกั่ว และสังกะสี อย่างละ 200 มิลลิกรัม ต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 5 เขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และทำที่อุณหภูมิ 30 และ 40 องศาเซลเซียส ผลการทดลอง แสดงในตารางที่ 24 พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับของ CH ECH และ ECH-NC ดูดซับไอออน ตะกั่วสูงกว่าไอออนสังกะสี และประสิทธิภาพการดูดซับไอออนทั้งสองชนิดด้วย CH ECH-NC ใกล้เคียงกัน และมากกว่า ECH

เมื่อเปรียบเทียบต่างอุณหภูมิ (30 และ 40 องศาเซลเซียส) พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับ ของไอออนตะกั่ว และสังกะสีในสารละลายผสม อุณหภูมิไม่มีผลต่อการดูดซับ (ตารางที่ 25)

และเมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิเดียวกัน (30 องศาเซลเซียส) พบว่าประสิทธิภาพในการ ดูดซับของไอออนตะกั่ว และสังกะสีในสารละลายผสมต่ำกว่าในสารละลายที่มีไอออนชนิดเดียว (ตารางที่ 26) เนื่องจากมีการแข่งขันของไอออนโลหะทั้งสองชนิดทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับ ไอออนแต่ละชนิดจะต่ำกว่าในสารละลายแบบที่มีไอออนชนิดเดียว

ตารางที่ 24 ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนของตะกั่ว และสังกะสีในสารละลายแบบผสมด้วย CH ECH และ ECH-NC (ค่าเฉลี่ย \pm SE)

อุณหภูมิ (เซลเซียส)	ชนิดไอออน โลหะหนัก	ประสิทธิภาพการดูดซับ (ไมโครกรัมต่อกรัม)			ร้อยละการดูดซับ		
		CH	ECH	ECH-NC	CH	ECH	ECH-NC
30	ตะกั่ว	612.87 \pm 43.29 ^{a,A}	115.36 \pm 25.08 ^{a,B}	558.24 \pm 8.91 ^{a,A}	47.35	8.91	41.52
	สังกะสี	215.63 \pm 40.14 ^{b,A}	68.26 \pm 26.12 ^{b,B}	352.60 \pm 49.21 ^{b,A}	12.94	4.04	23.03

หมายเหตุ ^{a,b} ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกัน ที่มีอักษรแตกต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และ ^{A,B} ค่าเฉลี่ยในแถวเดียวกันที่มีอักษรแตกต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 25 ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่ว และไอออนสังกะสีในสารละลายแบบผสมด้วย CH ECH และ ECH-NC อุณหภูมิ 30 และ 40 องศาเซลเซียส (ค่าเฉลี่ย \pm SE)

ชนิดไอออน	อุณหภูมิ (เซลเซียส)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (ไมโครกรัมต่อกรัม)			ร้อยละการดูดซับ		
		CH	ECH	ECH-NC	CH	ECH	ECH-NC
ตะกั่ว	30	612.87 \pm 43.29 ^{a,A}	115.36 \pm 25.08 ^{a,B}	558.24 \pm 8.91 ^{a,A}	47.35	8.91	41.52
	40	814.84 \pm 63.03 ^{a,A}	253.94 \pm 68.07 ^{a,B}	580.28 \pm 32.59 ^{a,A}	62.87	19.54	41.47
สังกะสี	30	215.63 \pm 40.14 ^{a,A}	68.26 \pm 26.12 ^{a,B}	352.60 \pm 49.21 ^{a,A}	12.94	4.04	23.03
	40	170.36 \pm 38.43 ^{a,A}	130.75 \pm 38.72 ^{a,B}	346.20 \pm 33.30 ^{a,A}	9.86	7.54	22.31

หมายเหตุ^a ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกัน (แต่ละไอออน) ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และ ^{A,B} ค่าเฉลี่ยในแถวเดียวกันที่มีอักษรแตกต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 26 ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนของตะกั่ว และสังกะสีในสารละลายแบบผสมเปรียบเทียบกับในสารละลายเดี่ยวด้วย CH ECH และ ECH-NC (ค่าเฉลี่ย \pm SE)

ชนิดไอออนโลหะหนัก	ชนิดสารละลาย	ประสิทธิภาพการดูดซับ (ไมโครกรัมต่อกรัม)			ร้อยละการดูดซับ		
		CH	ECH	ECH-NC	CH	ECH	ECH-NC
ตะกั่ว	เดี่ยว	1553.68 \pm 5.24 ^{a,A}	649.70 \pm 7.10 ^{a,B}	1452.00 \pm 29.21 ^{a,A}	63.96	44.74	85.30
	ผสม	612.87 \pm 43.29 ^{b,A}	115.36 \pm 25.08 ^{b,B}	558.24 \pm 8.91 ^{b,A}	47.35	8.91	41.52
สังกะสี	เดี่ยว	1213.44 \pm 33.13 ^{a,A}	180.25 \pm 36.47 ^{a,B}	1431.40 \pm 17.38 ^{a,C}	81.69	12.19	96.32
	ผสม	215.63 \pm 40.14 ^{b,A}	68.26 \pm 26.12 ^{b,B}	352.60 \pm 49.21 ^{b,C}	12.94	4.04	23.03

หมายเหตุ ^{a,b} ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกัน (แต่ละไอออน) ที่มีอักษรแตกต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และ ^{A,B,C} ค่าเฉลี่ยในแถวเดียวกันที่มีอักษรแตกต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

5. ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนของตะกั่ว และสังกะสีด้วย ECH และ ECH-NC ในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะโดยทำการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง

น้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะที่นำมาศึกษามีค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 3 สภาวะที่ใช้ในการทดลองในน้ำเสีย คือ ปริมาณบีคส์ เท่ากับ 20.00 กรัม ปริมาตรน้ำเสีย เท่ากับ 100 มิลลิลิตร เขย่าด้วยความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ความเข้มข้นของโลหะหนักเริ่มต้นในน้ำเสียแสดงดังตารางที่ 27 พบว่ามีความเข้มข้นของตะกั่ว 0.1900 มิลลิกรัมต่อลิตร และสังกะสี 987.3800 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับไอออนของตะกั่ว และสังกะสีด้วย ECH และ ECH-NC ในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะแห่งนี้ พบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนตะกั่วด้วยไคโตซานบีคส์เชื่อมโยงทั้งสองชนิดสามารถดูดซับตะกั่วได้ทั้งหมด คือ 190.00 ไมโครกรัมต่อกรัม เนื่องจากความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำเสียต่ำ และประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนสังกะสีด้วย ECH และ ECH-NC เท่ากับ 996.58 ± 41.30 และ 1364.58 ± 15.62 ไมโครกรัมต่อกรัม ตามลำดับ (ตารางที่ 28)

ตารางที่ 27 ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักเริ่มต้นในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ

ชนิดของโลหะหนักในน้ำเสียจริง	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)
ตะกั่ว	0.1900
สังกะสี	987.3800
ทองแดง	0.4000
แคดเมียม	0.0030

ตารางที่ 28 ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนของตะกั่ว และสังกะสีด้วย ECH และ ECH-NC ในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ (ค่าเฉลี่ย \pm SE)

ชนิดโลหะหนัก	ค่าความเป็นกรด-ด่างก่อนดูดซับ	ค่าความเป็นกรด-ด่างหลังดูดซับ	ประสิทธิภาพการดูดซับ (ไมโครกรัมต่อกรัม)		ร้อยละการดูดซับ	
			ECH	ECH-NC	ECH	ECH-NC
ตะกั่ว	3	5	190.00	190.00	100	100
สังกะสี	3	5	996.58 \pm 41.30	1364.58 \pm 15.62	20.02	27.60

เนื่องจากประสิทธิภาพการดูดซับไอออนสังกะสีด้วย ECH ในน้ำเสีย (987.3800 มิลลิกรัมต่อลิตร) มีค่าสูงกว่าประสิทธิภาพการดูดซับไอออนสังกะสีในสารละลาย (200 มิลลิกรัมต่อลิตร) จึงทำการทดลองการดูดซับไอออนสังกะสีด้วย ECH ปริมาณ 0.50 กรัม ความเข้มข้นไอออนสังกะสี 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 5 มิลลิลิตร และปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 3 และ 5 โดยปรับความเป็นกรด-ด่างด้วย 5% โดยปริมาตร กรดอะซิติก เขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อดูประสิทธิภาพการดูดซับไอออนสังกะสีในสารละลายที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 3 เปรียบเทียบกับสารละลายที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 5 ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนสังกะสีด้วย ECH แสดงในตารางที่ 29

ตารางที่ 29 ผลของการดูดซับไอออนสังกะสีด้วย ECH ความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 3 และ 5
ปรับด้วย 5% โดยปริมาตร กรดอะซิติก (ค่าเฉลี่ย \pm SE)

ค่าความเป็นกรด-ด่าง	ประสิทธิภาพการดูดซับ (ไมโครกรัมต่อกรัม)
	ECH
3	122.16 \pm 2.46 ^a
5	51.36 \pm 5.71 ^b

หมายเหตุ ^{a, b} ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่มีอักษรแตกต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากตารางที่ 29 พบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนสังกะสีด้วย ECH ที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 3 และ 5 มีค่าเท่ากับ 122.16 \pm 2.46 และ 51.36 \pm 5.71 ไมโครกรัมต่อกรัมตามลำดับ

วิจารณ์

1. ลักษณะทางกายภาพ สมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของ CH ECH และ ECH-NC

CH ที่ได้มีลักษณะคล้ายวุ้น สีใส ECH มีลักษณะคล้ายวุ้นเช่นกัน แต่มีสีขาวขุ่น และ ECH-NC มีลักษณะคล้ายวุ้นเช่นเดียวกัน มีสีขาวขุ่นมากกว่า ECH ไคโตซานบีดส์ทั้งสามชนิดมีลักษณะเป็นทรงกลม ขนาด 0.20 เซนติเมตร จากการทดสอบสมบัติการละลายพบว่า CH ละลายในสารละลาย 5% โดยปริมาตร กรดอะซิติก ไม่ละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5 โมลต่อลิตร และไม่ละลายในน้ำปราศจากไอออน ในขณะที่ไคโตซานบีดส์ที่มีการเชื่อมโยงทั้งสองชนิด (ECH และ ECH-NC) ไม่ละลายในสารละลายทั้งสามประเภท และจากการสังเกตพบว่า CH จะไม่คงรูปในสารละลายที่เป็นกรด คือ ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 3-5 ลักษณะเม็ดในสารละลายที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 3-5 เม็ดบีดส์ไคโตซานจะละลาย แต่คงรูปในสารละลายที่เป็นเบส คือ ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 6-10 แต่ไคโตซานบีดส์เชื่อมโยงทั้งสองชนิด (ECH และ ECH-NC) จะคงรูป คือ มีลักษณะเม็ดบีดส์และผิวของเม็ดบีดส์ปกติเหมือนก่อนการทดสอบในสารละลายทุกๆ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่ทำการทดสอบ ซึ่งสอดคล้องกับรายงานที่ว่า ECH และ ECH-NC เมื่อทำการเชื่อมโยงแล้วทำให้เม็ดมีลักษณะแข็งแรงกว่า CH มีความทนกรดได้ดี (Gracieal *et al.*, 2005) ในขณะที่ CH ละลายในสารละลายกรดอินทรีย์ เนื่องจากในสถานะที่เป็นกรด หมู่อะมิโนอิสระ ($-NH_2$) จะถูกโปรโตเนตไปอยู่ในรูปของหมู่ cationic amino ($-NH_3^+$) (Muzzarelli and Terbojevich, n.d.) เมื่อทำเป็นเม็ดบีดส์ลักษณะเม็ดจึงไม่คงรูปในสารละลายกรดแต่คงรูปในสารละลายเบส

จากภาพถ่ายพื้นผิวภายในและภายนอกของ CH ECH และ ECH-NC ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) จะเห็นได้ว่า ลักษณะพื้นผิวภายในและภายนอกของ CH มีลักษณะโครงร่างแหตาข่ายโปร่ง ส่วนไคโตซานบีดส์เชื่อมโยงทั้งสองชนิดมีโครงร่างแหตาข่ายที่ชิดและแน่นกว่า เนื่องจากมีการเชื่อมโยงทำให้คุณสมบัติของไคโตซานมีความแข็งแรงมากยิ่งขึ้น (Tan *et al.*, 1993) ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วย FTIR ที่แสดงพีคการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของไคโตซานกับ epichlorohydrin ด้วยพันธะของ C-O-C ที่เคยมีรายงานของ Kannamba *et al.* (2010) และพีคที่เกิดหมู่คาร์บอกซิบนสายไคโตซานในตำแหน่งเลขคลื่น 1742 cm^{-1} ของ ECH-NC (An *et al.*, 2009)

2. สภาพที่เหมาะสม และประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนโลหะหนักด้วย CH ECH และ ECH-NC

2.1 ความเข้มข้น และเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนโลหะหนัก

จากการทดลองทำการทดลองความเข้มข้นที่ 10 50 100 200 300 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจาก 10 50 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนโลหะเพิ่มขึ้นตามลำดับ แต่ที่ความเข้มข้น 300 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนต่ำลง เนื่องจากอิเล็คตรอนคู่โดดเดี่ยวในหมู่ $-NH_2$ และ $-OH$ ที่ใช้ในการจับไอออนโลหะจับกับไอออนโลหะได้เต็มทุกตำแหน่งในสายไคโตซาน เมื่อความเข้มข้นที่ 300 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตรมีไอออนโลหะสูง ทำให้อิเล็คตรอนคู่โดดเดี่ยวในหมู่ $-NH_2$ และ $-OH$ ไม่สามารถจับกับไอออนโลหะได้อีก ดังนั้นประสิทธิภาพการดูดซับไอออนสูงสุดที่ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเมื่อทำการดูดซับที่เวลา 2 4 และ 8 ชั่วโมงสามารถอธิบายว่าที่เวลา 2 ชั่วโมงไคโตซานบีดส์ค่อยๆ เกิดการดูดซับไอออนโลหะ และเกิดการสมดุลที่เวลา 4 ชั่วโมงสอดคล้องกับการศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับ ดังนั้นเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับ คือ 4 ชั่วโมง (Kannamba *et al.*, 2010)

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับด้วย CH ECH และ ECH-NC พบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับด้วย CH สูงกว่า ECH แต่ใกล้เคียงกับ ECH-NC เนื่องจาก ECH มีการเชื่อมโยงด้วยปฏิกิริยาทางเคมีของไคโตซานทำให้ความสามารถของไคโตซานในการดูดซับไอออนลดลง (Tariq *et al.*, 2011) เพราะเกิดการเชื่อมโยงกับหมู่ $-OH$ ซึ่งหมู่ไฮดรอกซิล ($-OH$) นี้มีส่วนในการกีดกันไอออนบวก เมื่อทำการเชื่อมโยงด้วย epichlorohydrin ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลงซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าตำแหน่งที่ใช้ในการดูดซับไอออนโลหะหนักถูกใช้ไปในการเชื่อมโยง (Schmuhl *et al.*, 2001) การวิจัยครั้งนี้จึงต้องการให้มีประสิทธิภาพการดูดซับที่ดีขึ้น โดยการเพิ่มหมู่คาร์บอกซิลที่ตำแหน่งหมู่อะมิโนเพื่อให้สามารถจับประจุบวกได้ จึงดัดแปลงโครงสร้างของ ECH ด้วยการเติม carboxymethyl ไปแทนที่โปรตอนที่ตำแหน่งหมู่อะมิโน ($-NH_2$) เกิดเป็น $-NH-CH_2COOH$ และ $N(CH_2COOH)_2$ ทั้งนี้การดูดซับของไคโตซานเชื่อมโยงที่มีการดัดแปลงไม่ได้ขึ้นอยู่กับหมู่คาร์บอกซิล ($-COO^-$) เพียงอย่างเดียว แต่ทั้งนี้หมู่ $-NH_2$ และ $-OH$ ร่วมกันในการจับไอออนโลหะ ซึ่งทำการสังเคราะห์ตามวิธีของ An *et al.* (2009) ที่ได้เคยรายงานไว้

อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าประสิทธิภาพการดูดซับด้วย CH สูงกว่า ECH แต่ ECH ไม่ละลายและคงรูปในสารละลายที่มีสถานะเป็นกรดได้ (Ngah *et al.*, 2002) เมื่อนำ ECH มาดัดแปลงโครงสร้างเป็น ECH-NC พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับไม่แตกต่างจาก CH ดังนั้น ECH-NC จึงมีสมบัติทั้งไม่ละลาย คงรูปในสารละลายกรด และมีประสิทธิภาพการดูดซับสูงที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ต่อไปได้ดี

2.2 ความเป็นกรดต่างของสารละลายไอออนโลหะหนักที่เหมาะสมในการดูดซับไอออน

ในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำ CH และ ECH จะมีประสิทธิภาพในการดูดซับน้อยกว่าสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างสูงขึ้น คือ ประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้น จาก 3-6 สามารถอธิบายได้ว่าในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำ (pH 3) นั้นจะมีปริมาณ H^+ สูง ทำให้เกิดการแข่งขันระหว่าง H^+ กับ ไอออนตะกั่ว (Pb^{2+}) ในการแย่งกันจับหมู่อะมิโน ($-NH_2$) ของไคโตซานซึ่งมีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวที่สามารถจับกับไอออนโลหะหนักได้ จึงเกิดเป็นรูป $-NH_3^+$ (protonated amino group) ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนต่ำลง ในทางตรงกันข้ามสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างสูงขึ้น (4-6) นั้นจะมีปริมาณ H^+ น้อยลง ทำให้การแข่งขันระหว่าง H^+ กับ ไอออนตะกั่ว (Pb^{2+}) น้อยลง หมู่อะมิโน ($-NH_2$) ของไคโตซานที่สามารถจับกับไอออนโลหะหนักมีมากขึ้น จึงจับกับไอออนตะกั่ว ได้มาก ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนสูงขึ้น ส่งผลให้สารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างสูงมีประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนสูงกว่าสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำ

จากการทดลองของ Chen *et al.* (2011) พบว่า ไอออนโลหะหนัก (Cu^{2+} Zn^{2+} Ni^{2+} และ Pb^{2+}) จะเริ่มตกตะกอนเป็นสารประกอบไฮดรอกไซด์ที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง ประมาณ 6-8 ดังนั้นจากการทดลองการศึกษาผลของค่าความเป็นกรด-ด่าง ในสารละลายต่อประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนของตะกั่ว และสังกะสี การเลือกค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมเพื่อนำไปใช้ในการทดลองต่อไปจึงเลือกใช้ที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 5 ซึ่งเป็นช่วงค่าความเป็นกรด-ด่างที่ไอออนโลหะหนักยังไม่ตกตะกอน และไม่ควรเลือกค่าความเป็นกรด-ด่างที่สูงกว่านี้ เพราะประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนตะกั่วสูงขึ้นอาจเนื่องมาจากการตกตะกอนมากกว่าการดูดซับ ดังนั้นค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมที่สุด คือ ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 5

2.3 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการดูดซับของ CH ECH และ ECH-NC

จากการทดลองอุณหภูมิไม่มีผลต่อการดูดซับไอออนของตะกั่ว และสังกะสีด้วย CH ECH และ ECH-NC ในขณะที่ Kannamba *et al.* (2010) พบว่า อุณหภูมิมีผลต่อการดูดซับ คือ ประสิทธิภาพการดูดซับไอออน (Cu^{2+}) เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งแสดงถึงปฏิกิริยาการดูดซับด้วยความร้อน (endothermic) โดยทั่วไปการดูดซับประกอบด้วย 2 กระบวนการ คือ การแพร่อย่างรวดเร็ว และการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนอย่างช้าๆ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอัตราการแพร่ไอออนที่ผิวหน้าของตัวดูดซับในสารละลายไม่ได้เพิ่มขึ้นเพียงอย่างเดียว แต่มีการเพิ่มขึ้นของอัตราการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนด้วยหมู่ฟังก์ชันในตัวดูดซับ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยไม่มีผลต่อการดูดซับ

2.4 พฤติกรรมในการดูดซับไอออนของตะกั่ว และสังกะสีของ CH ECH และ ECH-NC ด้วยการหาค่าไอโซเทอมการดูดซับผิว โดยใช้สมการของแลงเมียร์ และฟรุนดลิช

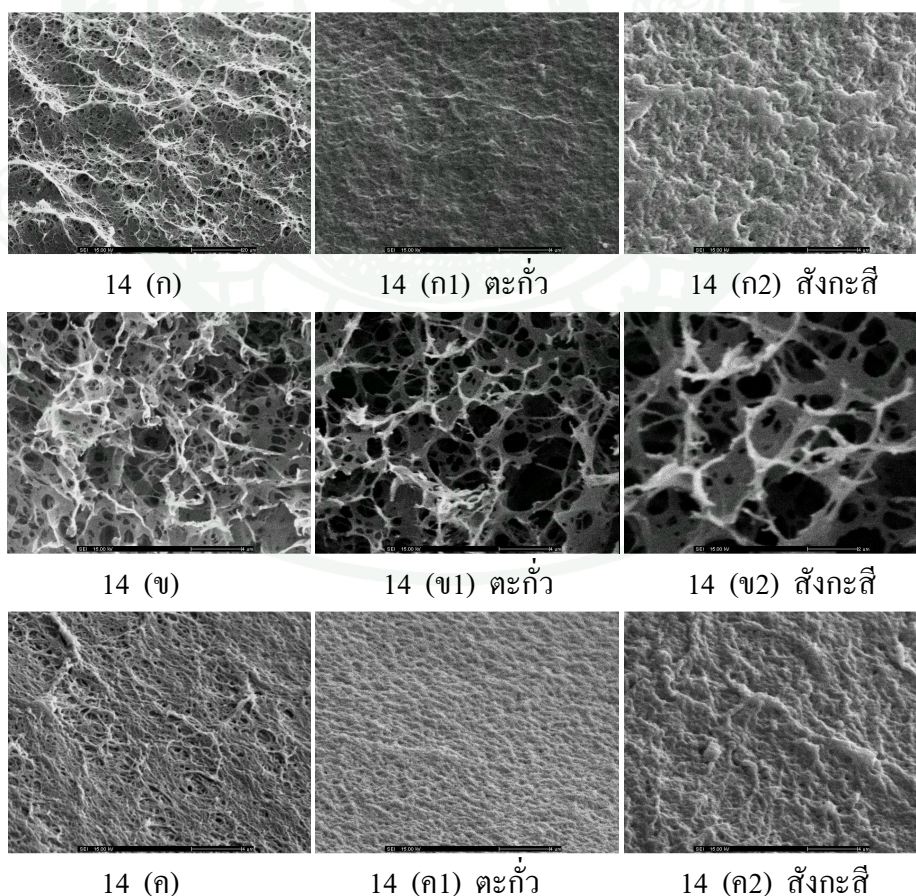
จากการทดลองการดูดซับผิวของ CH ECH และ ECH-NC ผลการทดลองสอดคล้องกับ ไอโซเทอมการดูดซับผิวแบบแลงเมียร์ และสมการของแลงเมียร์ใช้ได้ดีที่สุดเมื่อดูดซับที่ความเข้มข้นต่ำ เกิดการดูดซับไอออนบนพื้นผิวโคโคซานเพียงชั้นเดียว และเกิดในตำแหน่งที่แน่นอน หรือตำแหน่งที่มีหมู่ $-\text{NH}_2$ $-\text{OH}^-$ ในโคโคซานบีดส์ทั้งสามชนิด นอกจากนี้สมการแลงเมียร์จะใช้ได้ดีที่สุดกับการดูดซับด้วยตัวดูดซับที่มีพื้นผิวเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) (Piero, 2014)

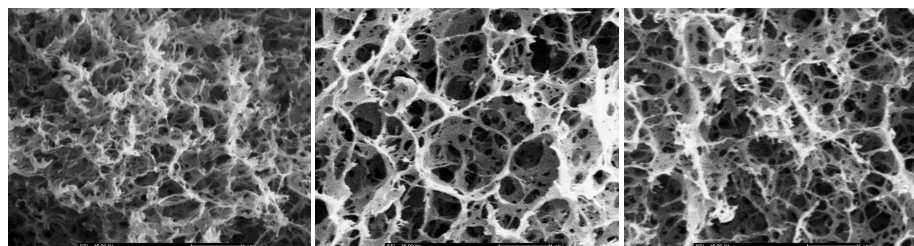
Ngah *et al.* (2002) อธิบายไว้ว่า การดูดซับเกิดขึ้นจากแรงดึงดูดทางกายภาพที่สามารถผันกลับได้ การดูดซับสูงสุดที่เกิดขึ้นแบบชั้นเดียว ผลการคำนวณปัจจัยของการแยก เมื่อใช้สมการแลงเมียร์ พบว่า มีค่าอยู่ในช่วง $0 < R_L < 1$ แสดงให้เห็นว่า ทั้ง CH ECH และ ECH-NC เกิดการดูดซับไอออนตะกั่ว และสังกะสีในสารละลาย สามารถอธิบายขั้นตอนการดูดซับที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องเป็นลำดับ ได้ดังนี้

- 1) การเคลื่อนที่ของไอออนโลหะจากสารละลายไปที่ผิวของโคโคซานบีดส์
- 2) การแพร่ของไอออนโลหะผ่านชั้นของเหลวไปสู่ผิวภายนอกของโคโคซานบีดส์

3) ไอออนโลหะแพร่เข้าภายในรูพรุนของโคโตซานบีดส์

ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนของตะกั่ว และสังกะสี เท่ากับ 1707.0 706.7 และ 1650.2 ไมโครกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และ 713.2 204.7 และ 1679.5 ไมโครกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ดังนั้นจากผลการทดลองครั้งนี้ ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนของตะกั่ว และสังกะสีสูงสุดด้วย CH ECH และ ECH-NC ซึ่งสอดคล้องกับสมการแลงเมียร์ แสดงว่า การดูดซับจะเกิดบนพื้นผิวที่มีพื้นที่ในการดูดซับที่แน่นอน และพื้นที่ผิวนั้นๆ สามารถดูดซับไอออนได้เพียงชั้นเดียว ไม่ได้เกิดการดูดซับภายในรูพรุนเนื่องจากโครงสร้างแหดข่ายพื้นผิวภายนอกของ ECH และ ECH-NC มีขนาดใหญ่กว่า ($4\ \mu\text{m}$) hydrated ion radii ของไอออนตะกั่ว และสังกะสี ($r(\text{Pb}^{2+}) = 0.401\ \text{nm}$ และ $r(\text{Zn}^{2+}) = 0.430\ \text{nm}$) ดังนั้น ไอออนทั้งสองชนิดจึงไม่สามารถแพร่ผ่านเข้าไปในรูพรุนของโคโตซานบีดส์ทั้งสามชนิดได้ ดังภาพถ่ายพื้นผิวภายนอกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) หลังการดูดซับไอออนของตะกั่ว และสังกะสีของ ECH และ ECH-NC (ภาพที่ 14) เนื่องจาก CH ละลายในกรดไม่สามารถนำไปใช้ในน้ำเสียได้จึงไม่ได้นำไปถ่ายพื้นผิว





14 (ง)

14 (ง1) ตะกั่ว

14 (ง2) สังกะสี

ภาพที่ 14 ภาพถ่ายพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ก่อน และหลังการดูดซับ (ก) ภายนอกก่อนการดูดซับ (ก1) ภายนอกหลังการดูดซับ ไอออนตะกั่ว และ(ก2) ภายนอกหลังการดูดซับ ไอออนสังกะสี กำลังขยาย 2000 เท่า (ข) ภายในก่อนการดูดซับ (ข1) ภายในหลังการดูดซับ ไอออนตะกั่ว และ(ข2) ภายในหลังการดูดซับ ไอออนสังกะสี กำลังขยาย 10000 เท่า ของ ECH (ค) ภายนอกก่อนการดูดซับ (ค1) ภายนอกหลังการดูดซับ ไอออนตะกั่ว และ(ค2) ภายนอกหลังการดูดซับ ไอออนสังกะสี กำลังขยาย 2000 เท่า (ง) ภายในก่อนการดูดซับ (ง1) ภายในหลังการดูดซับ ไอออนตะกั่ว และ(ง2) ภายในหลังการดูดซับ กำลังขยาย 10000 เท่า ของ ECH-NC

2.5 จลนศาสตร์การดูดซับไอออนของตะกั่ว และสังกะสีด้วย CH ECH และ ECH-NC

จากการทดลองการดูดซับไอออนของตะกั่ว และสังกะสีด้วย CH ECH และ ECH-NC สอดคล้องกับแบบจำลองอันดับสองเทียม และค่าคงที่ (k_2) ของการดูดซับ ไอออนตะกั่ว เท่ากับ 3.1304×10^{-5} 3.1767×10^{-5} และ 3.600×10^{-4} ตามลำดับ แสดงว่าการดูดซับไอออนตะกั่วจะไม่มีการดูดซับที่ผิวภายนอกหรือการดูดซับเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด แต่การดูดซับจะค่อยๆ เกิดขึ้นและเข้าสู่สมดุล ในขณะที่การดูดซับไอออนสังกะสี ค่าคงที่ (k_2) เท่ากับ 3.5000×10^{-4} 3.1114×10^{-3} และ 1.1850×10^{-4} ตามลำดับ จึงมีการดูดซับที่ผิวภายนอก เกิดขึ้นเร็วมาก และเข้าสู่สมดุล (Wu *et al.*, 1999) แสดงให้เห็นว่าจลนศาสตร์การดูดซับไอออนสังกะสีของไคโตซานบีดส์ทั้งสามชนิดเร็วกว่า ไอออนตะกั่ว และจลนศาสตร์การดูดซับไอออนของตะกั่ว และสังกะสีด้วยไคโตซานบีดส์ทั้งสามชนิดสอดคล้องกับแบบจำลองอันดับสองเทียม ซึ่ง Ho and McKay. (1999) เสนอไว้ว่าแบบจำลองอันดับสองเทียมอาจเป็นการดูดซับแบบ chemical adsorption และขั้นตอนในการ sharing หรือการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ เป็นขั้นตอนการกำหนดอัตรา (rate of limiting step)

Wu *et al.* (1999) อธิบายผลการทดลองจากการเขียนกราฟได้ว่า หนึ่งเส้นของการทดลองมีความชันหลายค่า แสดงให้เห็นว่าการดูดซับเกิดขึ้นหลายขั้นตอนต่อเนื่องกัน ดังนี้ ความชันในส่วนแรกอธิบายถึงการดูดซับที่ผิวภายนอกหรือการดูดซับเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด ความชันในส่วนที่สองอธิบายถึงการดูดซับค่อยๆ เกิดขึ้นเป็นบริเวณที่การแพร่ภายในอนุภาค เป็นตัวควบคุมกระบวนการดูดซับ และความชันในส่วนที่สามอธิบายถึงสมดุลของการดูดซับเป็นบริเวณที่การแพร่ภายในอนุภาคเริ่มที่จะช้าลง

3. ผลการดูดซับไอออนของตะกั่ว และสังกะสีในสารละลายแบบผสม

ผลการทดลองการดูดซับไอออนตะกั่ว และ ไอออนสังกะสีในสารละลายแบบผสมด้วย CH ECH และ ECH-NC พบว่า ไคโตซานบีดส์ทั้งสามชนิดมีประสิทธิภาพการดูดซับ ไอออนตะกั่ว สูงกว่าประสิทธิภาพการดูดซับ ไอออนสังกะสี

อาจอธิบายผ่านค่า electric charge hydrated ion radii hydration energy และ metal electronegativity ได้ดังนี้ electric charge ของ Pb^{2+} และ Zn^{2+} เท่ากัน แต่ค่า hydrated ion radii ต่างกัน โดย $r(Pb^{2+}) = 0.401 \text{ nm}$ น้อยกว่า $r(Zn^{2+}) = 0.430 \text{ nm}$ ส่วน hydration energy ของ $E_h(Pb^{2+}) = -1481 \text{ kJ mol}^{-1}$ มากกว่า $E_h(Zn^{2+}) = -2046 \text{ kJ mol}^{-1}$ นั้นหมายถึงว่าไอออนตะกั่วสามารถหลุดออกจากสารละลายเพื่อเกิดการดูดซับได้ง่ายกว่าไอออนสังกะสี นอกจากนี้ metal electronegativity 1.9 (Pb^{2+}) มากกว่า 1.6 (Zn^{2+}) มีแนวโน้มทำให้การดูดซับไอออนตะกั่วดีกว่า จึงส่งผลให้ไคโตซานบีดส์ทั้งสามชนิดดูดซับไอออนตะกั่วได้สูงกว่าไอออนสังกะสี ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Marija *et al.* (2013) ที่ทำการทดลองการดูดซับไอออน Pb^{2+} Cd^{2+} และ Zn^{2+} ด้วยซีโอไลต์ พบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนด้วยซีโอไลต์ได้สูงสุด คือ ไอออนตะกั่ว รองลงมา คือ แคดเมียม และประสิทธิภาพการดูดซับต่ำสุด คือ สังกะสี

4. ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนของตะกั่ว และสังกะสีของ ECH และ ECH-NC ในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะโดยทำการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง

จากผลการทดลองประสิทธิภาพการดูดซับไอออนของตะกั่ว และสังกะสีด้วย ECH และ ECH-NC ในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะแห่งหนึ่ง พบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนตะกั่ว ด้วยไคโตซานบีดส์เชื่อมโยงทั้งสองชนิดสามารถดูดซับตะกั่วได้ทั้งหมด คือ 190 ไมโครกรัมต่อ

กรัม เนื่องจากความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำเสียต่ำ และประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนสังกะสีด้วย ECH และ ECH-NC เท่ากับ 996.58 ± 41.30 และ 1364.58 ± 15.62 ไมโครกรัมต่อกรัม ตามลำดับ แต่ไคโตซานบีดส์เชื่อมโยงทั้งสองชนิดไม่สามารถดูดซับไอออนสังกะสีได้ทั้งหมด เพราะความเข้มข้นของไอออนสังกะสีในน้ำเสียสูงมาก

ประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนผสมในน้ำเสียด้วย ECH มีค่าสูงกว่าในสารละลาย เนื่องจากในสารละลายน้ำเสียที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 3 คาดว่ามีกรดอินทรีย์สูง อาจทำให้โครงสร้างของ ECH มีการยืดหยุ่นแล้วหันด้าน $-NH_2$ ในสายไคโตซานออกมาจับกับไอออนสังกะสีได้มากขึ้นสอดคล้องกับตารางที่ 29 ค่าประสิทธิภาพการดูดซับไอออนสังกะสีที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 3 สูงกว่าค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 5 ส่วนประสิทธิภาพของ ECH-NC ต่อสังกะสีมีค่าใกล้เคียงกับในสารละลาย

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. ลักษณะของโคโคซานบีดส์ทั้งสามชนิดที่เตรียมได้ คือ เม็ดโคโคซานมีสีใส และเม็ดโคโคซานเชื่อมโยงทั้งสองชนิด สีขุ่น โคโคซานบีดส์ทั้งสามชนิดมีลักษณะทรงกลม ขนาด 0.20 เซนติเมตร

2. ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับไอออนของตะกั่ว และสังกะสีในสารละลายด้วย CH ECH และ ECH-NC พบว่า ปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด คือ น้ำหนักโคโคซาน เท่ากับ 0.50 กรัม ความเข้มข้นของของสารละลายไอออน เท่ากับ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 5 มิลลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 5 และเวลาในการดูดซับ 4 ชั่วโมง

3. ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วสูงสุดด้วย CH มีค่ามากกว่า ECH และใกล้เคียงกับ ECH-NC เท่ากับ 1553.68 ± 5.24 649.70 ± 7.90 และ 1452.00 ± 29.21 ไมโครกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และประสิทธิภาพการดูดซับไอออนสังกะสีมีลักษณะเช่นเดียวกัน คือ 1213.44 ± 33.13 180.25 ± 36.47 และ 1431.40 ± 17.38 ไมโครกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

4. ความสามารถในการดูดซับไอออนของตะกั่ว และสังกะสีด้วย CH ECH และ ECH-NC เหมาะสมกับไอโซเทอมการดูดซับผิวแบบแลงเมียร์ ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วสูงสุด เท่ากับ 1707.0 706.7 และ 1650.2 ไมโครกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และประสิทธิภาพการดูดซับไอออนสังกะสีสูงสุด เท่ากับ 713.2 204.7 และ 1679.5 ไมโครกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

5. จลนศาสตร์การดูดซับไอออนของตะกั่ว และสังกะสีด้วย CH ECH และ ECH-NC เหมาะสมกับสมการอันดับสองเทียม ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่ว เท่ากับ 1666.7 769.2 และ 1666.7 ไมโครกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และประสิทธิภาพการดูดซับไอออนสังกะสี เท่ากับ 1428.6 270.3 และ 1250.0 ไมโครกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

6. ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนของตะกั่ว และสังกะสีแบบผสมด้วย CH ECH และ ECH-NC สามารถดูดซับไอออนตะกั่วได้สูงกว่าไอออนสังกะสี ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วด้วย CH ECH และ ECH-NC เท่ากับ 612.87 ± 43.29 115.36 ± 25.08 และ 558.24 ± 8.91 ไมโครกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และประสิทธิภาพการดูดซับไอออนสังกะสีด้วย CH ECH และ ECH-NC เท่ากับ 215.63 ± 40.14 68.26 ± 26.12 และ 352.60 ± 49.21 ไมโครกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

7. ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนของตะกั่ว และสังกะสีด้วย ECH และ ECH-NC ในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะแห่งหนึ่ง พบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนตะกั่วด้วยไคโตซานปิดส์เชื่อมโยงทั้งสองชนิดสามารถดูดซับตะกั่วได้ทั้งหมด คือ 190 ไมโครกรัมต่อกรัม เนื่องจากความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำเสียต่ำ และประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนสังกะสีด้วย ECH และ ECH-NC เท่ากับ 996.58 ± 41.30 และ 1364.58 ± 15.62 ไมโครกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำเม็ดไคโตซานให้มีขนาดเล็กกว่านี้ เพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดซับไอออนโลหะหนัก
2. ควรมีการศึกษาการใช้ไคโตซานในการดูดซับไอออนโลหะหนักในน้ำเสีย ในระบบแบบต่อเนื่อง เพื่อนำไปใช้จริงในการดูดซับไอออนโลหะหนักในระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมต่อไป หากนำไปใช้ในระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมควรบำบัดในขั้นที่สองของขั้นตอนการบำบัดน้ำเสีย
3. ควรมีการศึกษาการฟื้นฟูสภาพ (regenerate) ไคโตซานแบบเม็ด เพื่อนำไคโตซานและไอออนโลหะหนักกลับมาใช้ใหม่

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กระทรวงอุตสาหกรรม. กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2545. ตำราระบบบำบัดน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่

1. กรุงเทพฯ: สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.

โกวิทย์ ปิยะมังกลา, จารุวรรณ ตาพวัฒน์, ปิยะวัฒน์ โพธิมงคลกุล และ รัชฎรศ คงสมภักดิ์. 2551
จลนศาสตร์การดูดซับโครเมียม (VI) จากโรงงานชุบโลหะโดยใช้ไคโตซานเรซิน. วารสาร
วิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 18(1): 68-79.

ขวัญเรือน รัตนภักดิ์ และ ปิยนุช อุทกโยธะ. 2547. การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ
โลหะหนักด้วยไคโตซานที่สกัดจากเปลือกกุ้งกุลาดำและเปลือกกุ้งก้ามกราม. วิทยานิพนธ์
ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

จารุวรรณ ตาพวัฒน์ และ โกวิทย์ ปิยะมังกลา. 2550. การบำบัดน้ำเสียโลหะหนักโครเมียมจาก
โรงงานอุตสาหกรรมชุบโลหะโดยการดูดซับบนไคโตซานเรซิน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,
มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

เจริญศรี ยิ้มพระ. 2549. การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมไอออนด้วยไคโตซานที่ปรับ
โครงสร้างด้วยกรดอะมิโน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยนเรศวร.

ฐิติมา มณีกุล. 2545. ศึกษาการเตรียมบีดไคโตซานเพื่อใช้เป็นตัวดูดซับ. วิทยานิพนธ์
ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ทิพย์วิมล เกิดอิม. 2547. การขจัดไอออนทองแดงและแคดเมียมจากน้ำเสียโดยการดูดซับบนไคโต
ซานรูปแบบต่าง ๆ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ปราโมทย์ ศรีสุวรรณ และ รินทวัฒน์ สมบัติศิริ. ม.ป.ป. ตะกั่วและพิษของตะกั่ว. กลุ่มวิเทศ
สัมพันธ์สิ่งแวดล้อม สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน. แหล่งที่มา;
http://www.diw.go.th/diw_web/html/.../ตะกั่วและพิษของตะกั่ว.pdf, 16 พฤษภาคม 2557.

- ภาวดี เมระคานนท์, อศิรา เพ็องฟูชาติ และ ก้องเกียรติ คงสุวรรณ. 2544. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไคติน-ไคโตซาน No.1. ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ. โรงงาน. แหล่งที่มา; <http://www.mtec.or.th/index.php/component/search/?searchword>, 16 พฤษภาคม 2557.
- _____. 2544. การผลิตไคติน-ไคโตซาน No2. ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ. โรงงาน. แหล่งที่มา; <http://www.mtec.or.th/index.php/component/search/?searchword>, 16 พฤษภาคม 2557.
- _____. 2544. การประยุกต์ใช้สารไคติน-ไคโตซาน No3. ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ. โรงงาน. แหล่งที่มา; <http://www.mtec.or.th/index.php/component/search/?searchword>, 16 พฤษภาคม 2557.
- เริงณรงค์ วิเวกวินัย, ศศิพันธุ์ ณ สงขลา, สุรพงษ์ พิมพ์จันทร์ และ สมพร จองคำ. 2544. การวิเคราะห์ธาตุโครเมียมโดยการอาบนิวตรอนเพื่อการประเมินความเสี่ยงจากการสัมผัสฝุ่นโครเมียมแขวนลอยขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยบูรพา.
- วลัยรัตน์ จันทรวงศ์. 2549. การบำบัดน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะ. การบำบัดน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะ. แหล่งที่มา: http://202.28.17.1/article/atc_42/atc00244.htm, 1 ธันวาคม 2554.
- ศราวุธ แสงอุไร. 2549. การสกัดแยกพอลิเมอร์ชีวภาพจากคริสต์เตียน การเตรียมอนุพันธ์และการใช้ดูดซับสารเคมีบางชนิด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- สมเนตร จันทวิชชประภา. 2553. การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะโดยซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษขานอ้อยแบบเม็ด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สิริก อนนต์. 2550. การวิเคราะห์โลหะหนักในหญ้าแฝกที่ปลูกในดินหมืองแร่สังกะสีโดยเทคนิคทางนิวเคลียร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สุภาพร ห้วยหงษ์ทอง. 2548. การเตรียมเรซินไคโตซานสำหรับการจัดไอออนโลหะหนักในน้ำเสีย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อนุชา รักสันติ. 2549. การดูดซับไอออนของโลหะบนผงไคโตซานและไคโตซานดัดแปรด้วยกลูตารัลดีไฮด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

An, N.T., Thien, D.T., Dong, N.T. and Dung, P.L. 2009. Water-soluble N-carboxymethylchitosan derivatives : preparation, characteristics and its application. **Carbohydrate Polymer** 75: 489-497.

Ashoka, G. and Fereidoon, S. 2007. Use of chitosan for the removal of metal ion contaminants and proteins from water. **Food Chemistry** 104: 989-996.

Bassi, R. and Prasher, P. 1997. Remediation of metal-contaminated leachate using chitosan flakes. **Environmental Technology** 20: 1177-1182.

Chen, A.-H., Liu, S.-C., Chen, C.-Y. and Chen, C.-Y. 2008. Comparative adsorption of Cu(II), Zn(II) and Pb(II) ions in aqueous solution on the crosslinked chitosan with epichlorohydrin. **Journal of Hazardous Materials** 154: 184-191.

Chen, C.-Y., Yang, C.-Y. and Chen, A.-H. 2011. Biosorption of Cu(II), Zn(II), Ni(II) and Pb(II) ions by cross-linked metal-imprinted chitosan with epichlorohydrin. **Environmental Management** 92: 796-802.

Dabrowski, A. 2001. Adsorption from theory to practice. **Advance in Colloid and Interface Science** 93: 135-224.

Feng, C. W., Ru, L. T., and Ruey, S. T. 2000. Comparative adsorption of metal and dye on flake and bead types of chitosan prepared from fishery waste. **Journal of Hazardous Material** 73: 63-75.

- Graciela, R., Jamine, F., Angelia, R., Martha, L. and Holger, M. 2005. Adsorption of chromium onto cross-linked chitosan. **Separation Purification Technology** 44: 31-36.
- Hirano, S. 1996. Chitin Biotechnology Application. **Biotechnology Annual Review** 2: 237-258.
- Ho, Y.S. and McKay, G. 1999. Pseudo-second order model for sorption processes. **Process Biochemistry** 34: 451-465.
- Jayakuma, R., Prabakaran, M., Nair, S.V., Tokura, S. Tamur, H. and Selvamurugan, N. 2010. Novel carboxymethyl derivatives of chitin and chitosan materials and their biomedical applications. **Progress in Materials Science** 55: 675-709.
- Kannamba, B., Reddy, L. and AppaRao, B.V. 2010. Removal of Cu(II) from aqueous solutions using chemically modified chitosan. **Journal of Hazardous Materials** 175: 939-948.
- Kawamura, H., and Rorrer, L. 1999. Heterogeneous cross-linking of chitosan gel beads: kinetic modeling and influence on cadmium ion adsorption capacity. **Industrial & Engineering Chemistry Research** 36: 3631-3638.
- Mihajlovic, M.T., Lazarevic, S.S., Jankovic-Castvan, I.M., Jokic, B.M., Janackovic, D.T. and Petrovic, R.D. 2013. **A comparative study of the removal of lead, cadmium and zinc ions from aqueous solutions by natural and Fe(III)-modified zeolite.** Available Source: <http://www.doiserbia.nb.rs/img/doi/1451-9372/2014%20OnLine-First/1451-93721300010M.pdf>, May 16, 2014.
- Ngah, W.S.W, Endud, C.S. and Maynar, R. 2002. Removal of copper(II) ions from aqueous solution onto chitosan and cross-linked chitosan beads. **Reactive & Functional Polymers** 50: 181-190.

- Negai, T., and Sawayanagi, Y. 1991. **Application of chitin and chitosan to pharmaceutical preparation, chitosan and relate enzymes.** . Available Source:
<http://www.sciencedirect.com/science/book/9780127809502>, May 16, 2014.
- Piero, M.A. nd. **Adsorption.** Available Source: <http://cpe.Njit.Edu/dinotes/CHE685/CIs11-1.pdf>, April 10, 2014.
- Rinaudo, M. 2006. Chitin and chitosan: Properties and Application. **Prog. Polym. Sci** 31: 603-632.
- Schmuhl, R., Krieg, H. M., and Keizer, K. 2001. **Adsorption of Cu (II) and Cr (VI) ions by chitosan : kinetics and equilibrium studies.** Available Source:
<http://www.ajol.info/index.php/wsa/article/download/5002/12441>, May 16, 2014.
- Sun-Ok, F.-Kim. 1991. **Physicochemical and functional properties of crawfish chitosan as affected by different processing processing protocols.** Available Source:
http://etd.Isu.edu/docs/available/etd-11102004.../Fernandez-Kim_thesis.pdf, May 16, 2014.
- Sun, S. and Wang, A. 2006. Adsorption kinetics of Cu (II) ions using N,O-carboxymethyl-chitosan. **Journal of Hazardous Materials** B131: 103-111.
- _____, Wang, L. and Wang, A. 2006. Adsorption properties of crosslinked carboxymethyl-chitosan resin with Pb(II) as template ions. **Journal of Hazardous Materials** B136: 930-937.
- Tan, t., Masaki, M., and Hiroaki, T. 1993. Adsorption of metal ion on polyaminated highly porous chitosan chelating resin. **Industrial & Engineering Chemistry Research** 32: 386-391.

Tariq, R.A.S., Magdy, Y.A. and Mohamad, S.I.M. 2011. Chemical modification of chitosan for metal ion removal. **Arabian Journal of Chemistry**, doi:10.1016/j.arabjc.2010.12.011.

Virtual Amrita Laboratories Universalizing Education. 1956. **Adsorption Isotherm**. Available Source: <http://amarita.vlab.Co.in/?sub=2&brch=190&sim=606&cnt=1>, April 10, 2014.

Wu, F-C., Tseng, R-L. and Juang, R-S. 1999. Role of pH in metal adsorption from aqueous solution containing chelating agents on chitosan. **Industrial & Engineering Chemistry Research** 38: 270-275.

Yan, H., Dai, J., Yang, H. and Cheng, R. 2011. Enhanced and selective adsorption of copper(II) ions on surface carboxymethylated chitosan hydrogel beads. **Chemical Engineering Journal** 174: 586-594.

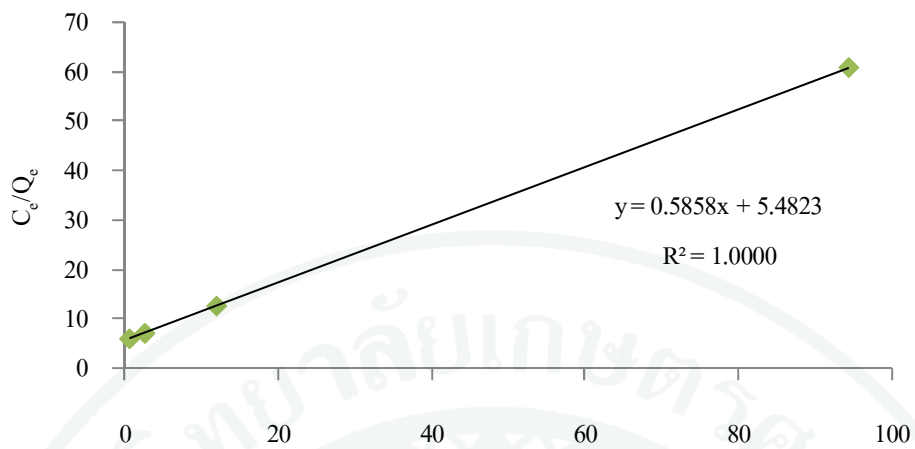


ภาคผนวก

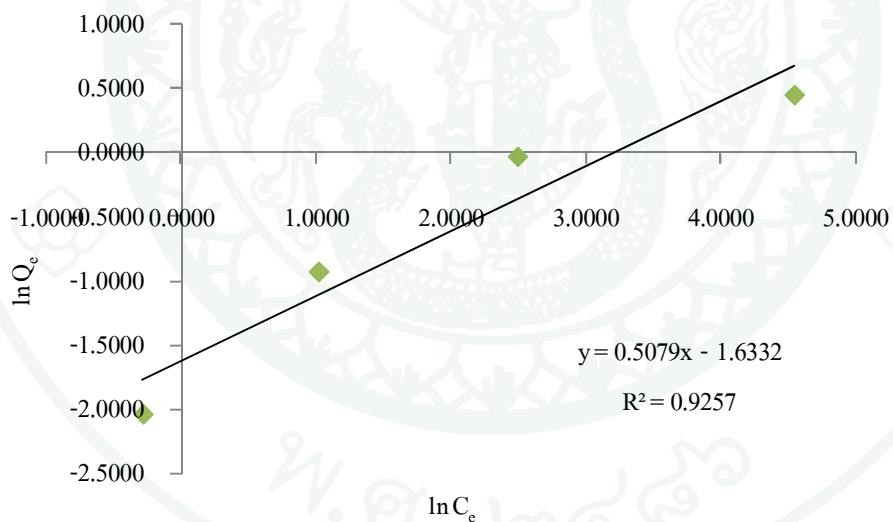


ภาคผนวก

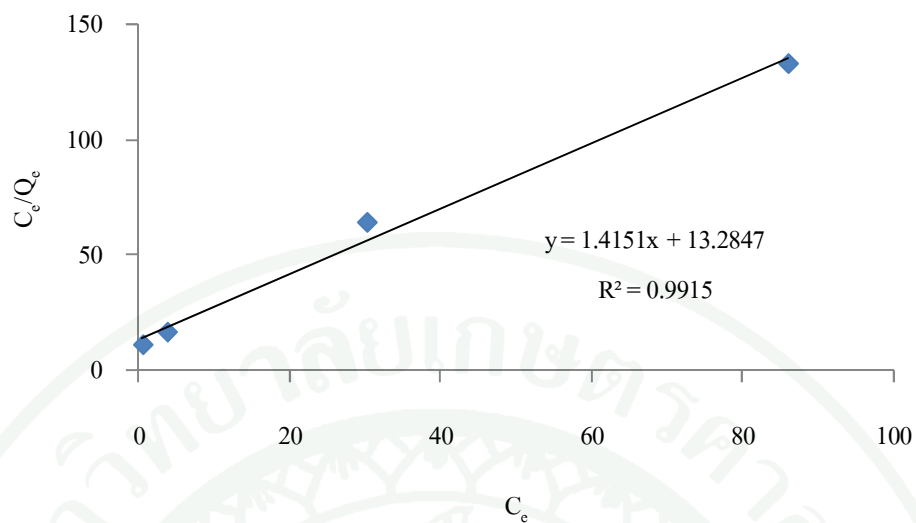
ภาพประสิทธิภาพในการดูดติดไอออนของตะกั่ว และสังกะสีของ CH ECH และ ECH-NC
ตามแบบจำลองไอโซเทอมการดูดติดผิวของแลงเมียร์ และฟรุนดลิช



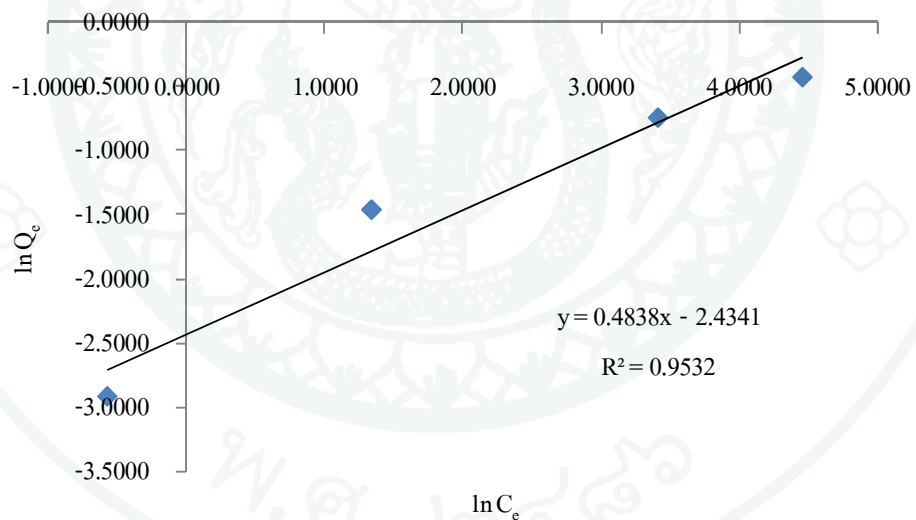
ภาพผนวกที่ 1 ไอโซเทอมการดูดติดผิวตะกั่วแบบแลงเมียร์ของ CH



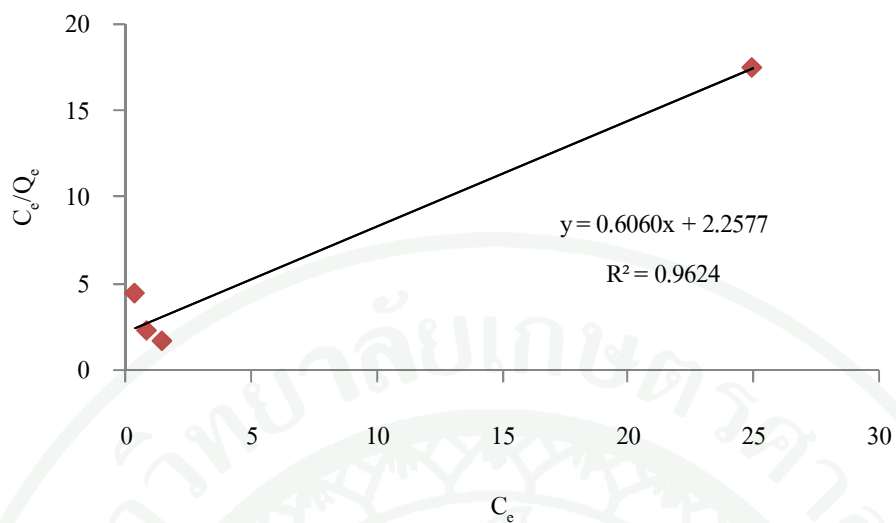
ภาพผนวกที่ 2 ไอโซเทอมการดูดติดผิวตะกั่วแบบฟรุนดิชของ CH



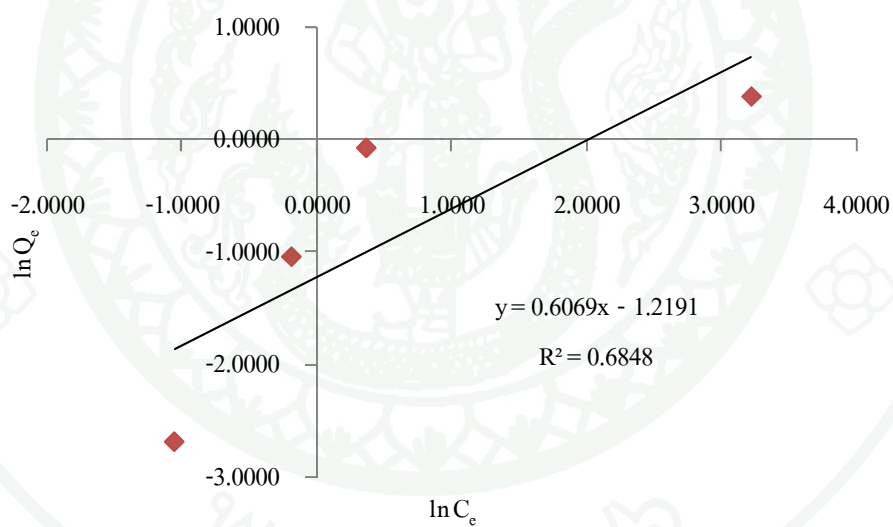
ภาพผนวกที่ 3 ไอโซเทอมการดูดติดผิวตะกั่วแบบแลงเมียร์ของ ECH



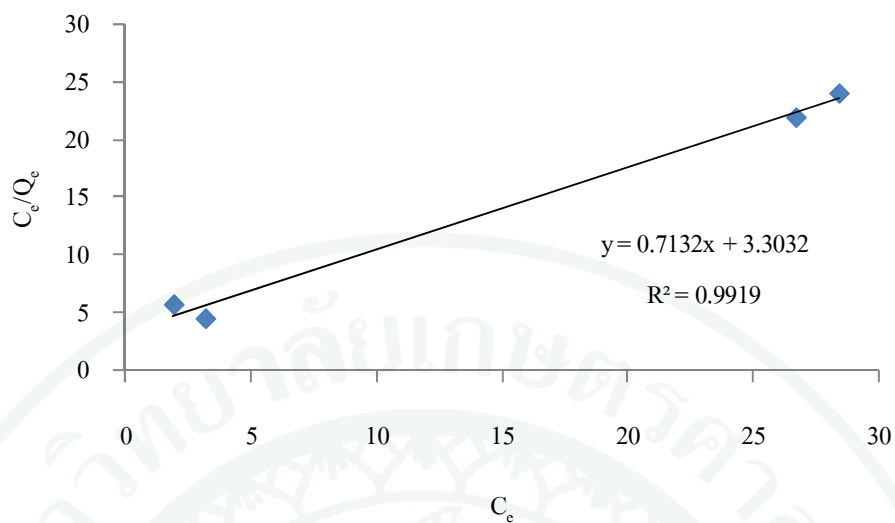
ภาพผนวกที่ 4 ไอโซเทอมการดูดติดผิวตะกั่วแบบฟรุนดิชของ ECH



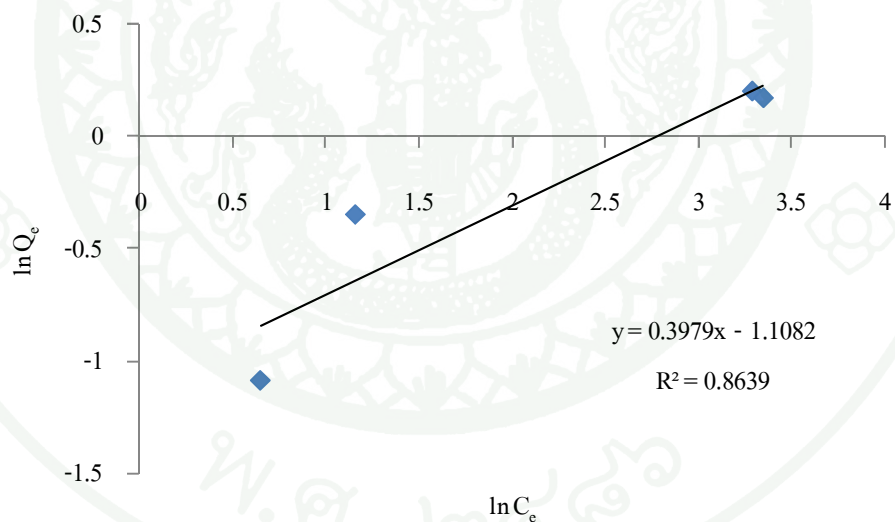
ภาพผนวกที่ 5 ไอโซเทอมการดูดติดผิวตะกั่วแบบแลงเมียร์ของ ECH-NC



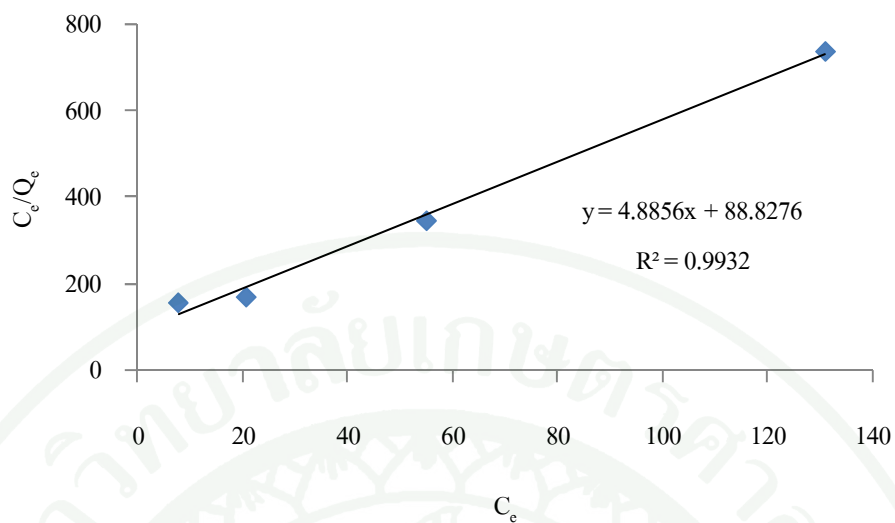
ภาพผนวกที่ 6 ไอโซเทอมการดูดติดผิวตะกั่วแบบฟรุนดิชของ ECH-NC



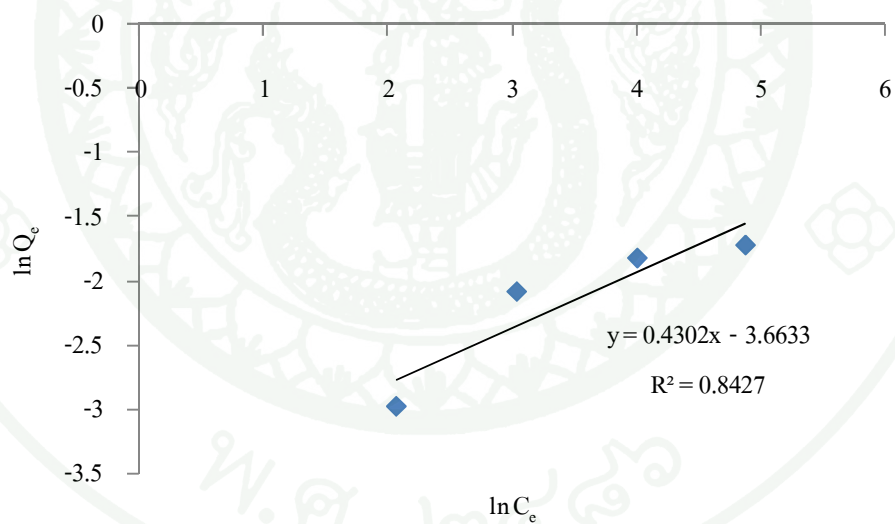
ภาพผนวกที่ 7 ไอโซเทอมการดูดติดผิวสั้งกะสีแบบแลงเมียร์ของ CH



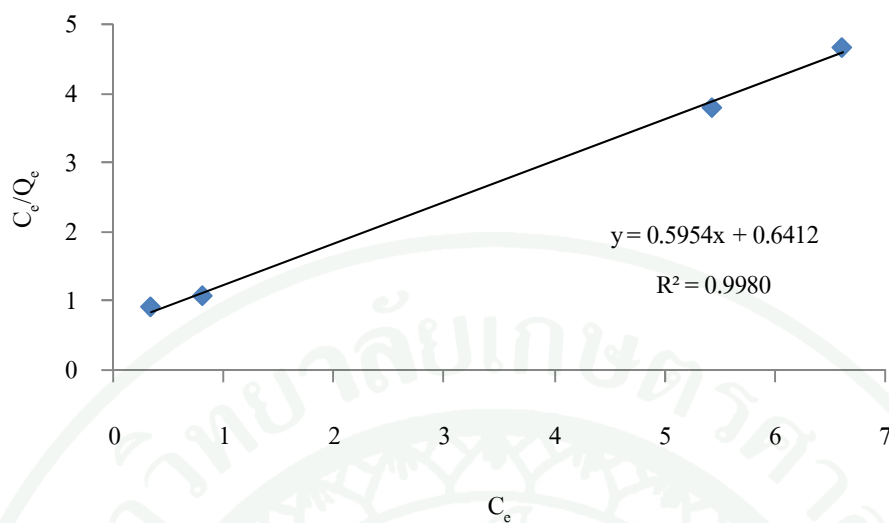
ภาพผนวกที่ 8 ไอโซเทอมการดูดติดผิวสั้งกะสีแบบฟรุนดิชของ CH



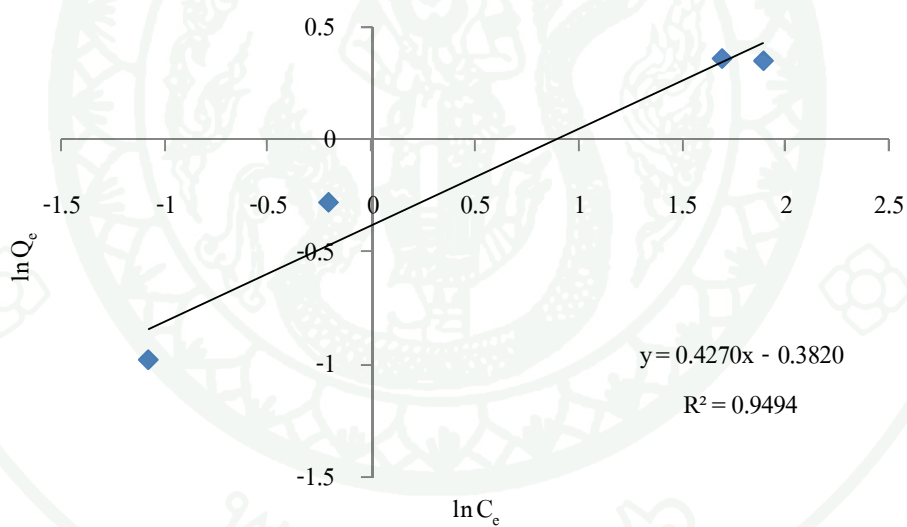
ภาพผนวกที่ 9 ไอโซเทอมการดูดติดผิวสั้งกะสีแบบแลงเมียร์ของ ECH



ภาพผนวกที่ 10 ไอโซเทอมการดูดติดผิวสั้งกะสีแบบฟรุนดิชของ ECH



ภาพผนวกที่ 11 ไอโซเทอมการดูดติดผิวสั้งกะสีแบบแลงเมียร์ของ ECH-NC



ภาพผนวกที่ 12 ไอโซเทอมการดูดติดผิวสั้งกะสีแบบฟรุนดลิชของ ECH-NC

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ – นามสกุล	นางสาวณิชา อารุณโรจน์
วัน เดือน ปี เกิด	5 พฤศจิกายน 2530
สถานที่เกิด	อำเภอหลังสวน จังหวัดชุมพร
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (เคมี) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนผู้ช่วยสอนจากโครงการวิชาบูรณาการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

