

เรซินกำจัดโลหะหนักดัดแปลงจากยางธรรมชาติ

เพลินพิศ บุชาธรรม¹ และ ประวีณา ทิระ²

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

บทคัดย่อ

การนำยางธรรมชาติมาใช้ในการกำจัดโลหะหนัก สามารถทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุลให้มีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ ยางที่มีโครงสร้างโมเลกุลที่ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันแลกเปลี่ยนไอออนนี้เรียกว่า “ยางเรซิน” ชนิดของยางเรซินที่เตรียมได้มี 2 ชนิด คือ ยางเรซินชนิด A และยางเรซินชนิด B การหาประสิทธิภาพของยางเรซินทั้งสองชนิดนี้ ได้ทดลองใช้กับโลหะหนักชนิดต่างๆ ได้แก่ ทองแดง สังกะสี โครเมียม เหล็ก และนิกเกิล โดยเตรียมสารละลายมาตรฐานที่มีปริมาณโลหะหนักตามต้องการคือ 20, 50, 80 และ 100 mg/l ตามลำดับ ที่ pH 5 และวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักเหล่านี้ก่อนและหลังการใช้ยางเรซิน โดยใช้เครื่อง Atomic Absorption Spectroscopy (AAS) จากการศึกษาพบว่ายางเรซินชนิด A และยางเรซินชนิด B จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดได้มากกว่ากัน ต่างกันตรงที่ยางเรซินชนิด A จะสามารถกำจัดเหล็กและทองแดงได้มากกว่ายางเรซินชนิด B ส่วนยางเรซินชนิด B กำจัดโครเมียมได้มากกว่ายางเรซินชนิด A เพียงเล็กน้อย ค่าประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดโลหะหนักของยางเรซินทั้งสองชนิดพบว่าอยู่ในช่วง $0.9 \sim 2.3 \text{ l}^{-1}$ และค่าร้อยละของการกำจัดได้สูงสุดมีค่าถึงร้อยละ 52 ซึ่งประสิทธิภาพและค่าร้อยละของการกำจัดจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่อไปนี้เป็นคือ ชนิดของโลหะหนักความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะหนักมาตรฐานและปริมาณของยางเรซินที่ใช้

¹ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาเคมี

² นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ภาควิชาเคมี

Resins for, Removal of Heavy Metals Modified from Natural Rubber

Pleonpit Boochathum ¹ and Praweena Tira ²

King Mongkut's Institute of Technology Thonburi

Abstract

Application of natural rubber to remove heavy metals was carried out using chemical addition reaction of ion exchange functional group to the rubber molecules. Modified natural rubber having ion exchange functional group was called, herewith, "Rubber Resin". Two types of Rubber Resins were prepared, Rubber Resin, type A and type B. The efficiency of these Rubber Resins to remove metal ions from water was investigated using various kinds of heavy metals, including Cu, Zn, Cr, Fe and Ni. The standard metal solutions with concentrations of 20, 50, 80 and 100 ppm were prepared at pH 5. The amounts of heavy metals in solution before and after treatment with Rubber Resin were determined using Atomic Absorption Spectroscopy (AAS). It was found that the efficiency of removal of heavy metals from water of Rubber Resin type A and Rubber Resin type B was not different with the exception of Fe, Cu and Cr. Fe and Cu could be better removed by type A Rubber Resin. On the other hand, Cr could be slightly better removed by type B Rubber Resin at the studied concentrations. The maximum efficiency (q_{max}) of removal of heavy metals for both type A and B Rubber Resins were found to be in the range of $0.9-2.3l^{-1}$, depending on the types of metals removed. The percentage of removal of heavy metals obtained could reach 52% depending on the following factors; metal type, initial concentration of standard metal solution and the amount of Rubber Resin used.

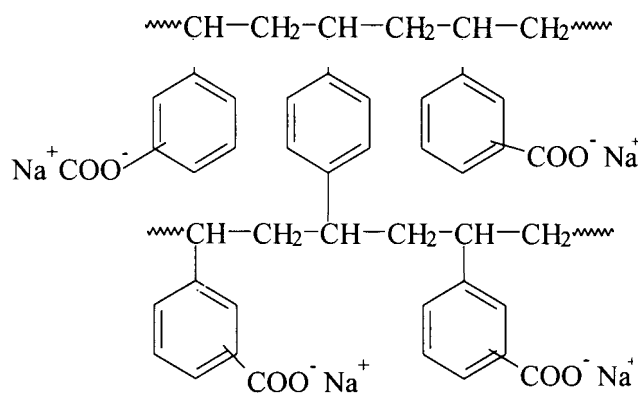
¹ Assistant Professor, Department of Chemistry

² Graduate Student, Department of Chemistry

บทนำ

ในการกำจัดโลหะหนักที่มีความเข้มข้นต่ำนั้นทำได้ยาก การใช้สารเรซินแลกเปลี่ยนไอออนเป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพดี แต่เนื่องจากสารเรซินแลกเปลี่ยนไอออนสังเคราะห์ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีราคาแพง จึงได้มีการคิดค้นที่จะนำวัสดุจากธรรมชาติมาใช้เป็นสารเรซินแลกเปลี่ยนไอออน [2-4, 6-7] ตัวอย่างของวัสดุจากธรรมชาติที่นำมาใช้ เช่น เปลือกถั่วลิสง ถ่านไม้ ผักตบชวา ขี้เลื่อยและแกลบ มาใช้ในการกำจัดโลหะหนัก แต่วัสดุจากธรรมชาติเหล่านี้มีข้อจำกัดที่เป็นอุปสรรคต่อการนำไปใช้งาน เช่น ทำให้เกิดสี กลิ่น และทำให้ค่า BOD ของน้ำเพิ่มขึ้น เป็นต้น

สารเรซินแลกเปลี่ยนไอออนเป็นสารอินทรีย์พอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างทางเคมีประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนที่ไม่มีประจุไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วย ไฮโดรคาร์บอนชนิดเดียวกันต่อเป็นสายโซ่ยาว เช่น สไตรีน และมีไฮโดรคาร์บอนอีกชนิดหนึ่งเป็นตัวประสาน เช่น ไดไวนิลเบนซีน ส่วนที่มีประจุไฟฟ้าซึ่งมักประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันดังต่อไปนี้ SO_3^- , COO^- , $\text{N}(\text{CH}_3)_2\text{H}^+\text{OH}^-$, $(\text{CH}_3)_3\text{CH}_2\text{N}^+$ จับตัวกันเป็นส่วนประกอบที่ถาวรของเรซิน โดยมีไอออนอิสระที่มีประจุตรงกันข้ามมาทำให้เรซินเป็นกลาง เช่น H^+ , Na^+ , Cl^- , OH^- สามารถเขียนโครงสร้างเคมีของเรซินได้ดังนี้



จากการที่โลหะหนักเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในอุตสาหกรรมหลายๆ ประเภท เช่น อุตสาหกรรมติบูก อุตสาหกรรมชุบโลหะ เป็นต้น จึงทำให้น้ำทิ้งที่ปล่อยออกมามีปริมาณของโลหะหนักปนเปื้อนอยู่ด้วย

ตารางที่ 1 แสดงปริมาณน้ำทิ้งและคุณภาพของน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะ
ในเขตกรุงเทพมหานคร มะนิลา และสหรัฐอเมริกาเปรียบเทียบกัน

คุณภาพน้ำ	กรุงเทพฯ	มะนิลา	สหรัฐอเมริกา
ปริมาณน้ำทิ้ง (cm ³ /day)	5.1	4.0	27.0
ค่าความเป็นกรด-ด่าง	6.4	6.6	8.0 ~ 9.0
ปริมาณโครเมียม (mg/l)	52.5	8.9	0.02 ~ 1.8
ปริมาณนิกเกิล (mg/l)	62.0	9.0	2.0 ~ 4.5
ปริมาณสังกะสี (mg/l)	145.0	44.8	1.0 ~ 125
ปริมาณทองแดง (mg/l)	42.0	23.5	0.1 ~ 20

จากตารางจะเห็นว่าปริมาณโลหะหนักในน้ำทิ้งในเขตกรุงเทพมหานครนั้นสูงกว่ามะนิลา และสหรัฐอเมริกามาก โดยเฉพาะหากปล่อยน้ำทิ้งนี้ลงสู่มแม่น้ำลำคลองอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งมีชีวิตอื่นๆ ได้ การจำกัดปริมาณของโลหะหนักในน้ำทิ้งก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมภายนอกจึงเป็นสิ่งจำเป็นมาก ซึ่งน้ำทิ้งควรมีปริมาณโลหะหนักไม่เกินค่าที่กระทรวงอุตสาหกรรมกำหนดไว้ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม กำหนดโดยกรมโรงงานอุตสาหกรรม
กระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 12 พ.ศ. 2525

โลหะหนัก	เกณฑ์อนุโลมสูงสุด (mg/l)
นิกเกิล	0.20
สังกะสี	5.00
แคดเมียม	0.03
ทองแดง	1.00
ตะกั่ว	0.20
โครเมียม	0.50

การศึกษานี้เป็นการนำน้ำยางธรรมชาติมาใช้เป็นสารเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งสาเหตุที่มีแนวคิดในการนำน้ำยางธรรมชาติมาดัดแปลง เพื่อใช้เป็นสารแทนเรซินแลกเปลี่ยนไอออนสังเคราะห์ เพราะ

- 1 ในประเทศไทยมีการปลูกยางพารามาก จึงทำให้น้ำยางธรรมชาติหาได้ง่ายและมีราคาไม่แพงนัก
- 2 เพื่อเป็นการนำน้ำยางธรรมชาติมาใช้ประโยชน์ได้กว้างขึ้น ซึ่งจะเป็นการเพิ่มมูลค่าของน้ำยางธรรมชาติ
- 3 ไม่ทำให้เกิดสีและกลิ่น
- 4 ไม่จำเป็นต้องทำการรีเจนเนอเรท กำจัดง่ายโดยการนำไปฝังดินและยางยังเป็นอาหารของแบคทีเรียในดิน

น้ำยางธรรมชาติที่นำมาใช้จะได้รับการดัดแปลงให้มีหมู่ที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้โดยกลไกของปฏิกิริยาเคมี 2 แบบ ผลลัพท์ที่ได้เรียกว่าเป็นยางเรซินชนิด A และชนิด B ซึ่งยางเรซินทั้งสองชนิดนี้จะมีหมู่ฟังก์ชันที่แตกต่างกันเล็กน้อย หลังจากนั้นจึงนำไปทดสอบหาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักจากสารละลายมาตรฐานที่เตรียมไว้เพื่อเปรียบเทียบกัน

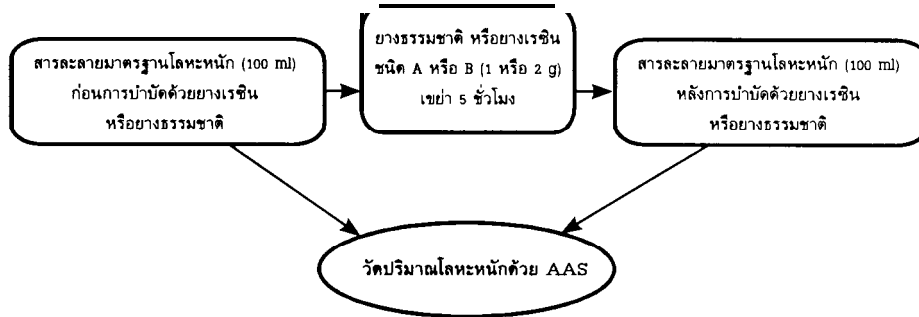
วิธีการทดลอง

1. การเตรียมยางเรซินชนิด A และชนิด B

การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของยางธรรมชาติกระทำได้โดยผ่านกระบวนการอิพอกซิเดชัน [5] โดยใช้น้ำยาง (60% dry rubber content, DRC) ปริมาณ 10.00 ml แล้วจึงเจือจางด้วยน้ำกลั่นปริมาณ 50 ml เติมร้อยละ 10 ของ (w/v) เทอริก 16 A ซึ่งเป็นตัวที่ทำให้น้ำยางเสถียรลงไป 10 ml เพื่อทำให้น้ำยางมีความเข้มข้นลดลงเหลือประมาณร้อยละ 10 ของ DRC ค่อยๆ หยดสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในกรดอะซิติกลงในน้ำยางจนหมด ความเป็นเวลา 5 ชั่วโมง ตามด้วยการเพิ่มหมู่ที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนเข้าไปที่ตำแหน่งของหมู่อิพอกซิโดยใช้ ClCH_2COOH ที่อุณหภูมิห้อง และใช้ ClCH_2COOH ร่วมกับ $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$ ในสภาวะที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ความเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เติม NaOH ในปริมาณเท่ากับสองเท่าของปริมาณหมู่อิพอกซิที่เกิดขึ้น พร้อมกับความเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นน้ำยางเรซินที่เตรียมได้มาตกตะกอนในเมธานอล ล้างด้วยน้ำกลั่น 3-5 ครั้ง ริดให้เป็นแผ่นบางมีความหนาประมาณ 0.5 mm ตัดเป็นชิ้นเล็กๆ ให้มีขนาดเท่าๆ กัน ทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง กลไกการเกิดปฏิกิริยาการดัดแปลงโครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติ แสดงไว้ในรูปที่ 1

ปริมาณหมู่อิพอกซิที่เตรียมได้หาได้โดยการ สุ่มตัวอย่างน้ำยางที่ผ่านการทำปฏิกิริยาอิพอกซิเดชันในช่วงเวลาที่ต้องการมาปริมาณ 5 ml ทำให้แห้ง นำมาละลายในโทลูอีน ไทเทรตสารละลายยางด้วย $\text{HBr}/\text{CH}_3\text{COOH}$ ที่มีความเข้มข้น 0.2 mol/l [1] คำนวณหาปริมาณหมู่อิพอกซิที่เกิดขึ้น

ขั้นตอนการบำบัดสารละลายโลหะหนักโดยใช้ยางเรซินที่เตรียมได้ และการหาปริมาณโลหะหนักก่อนและหลังการบำบัดด้วย AAS โดยสังเขป แสดงดังรูปที่ 2

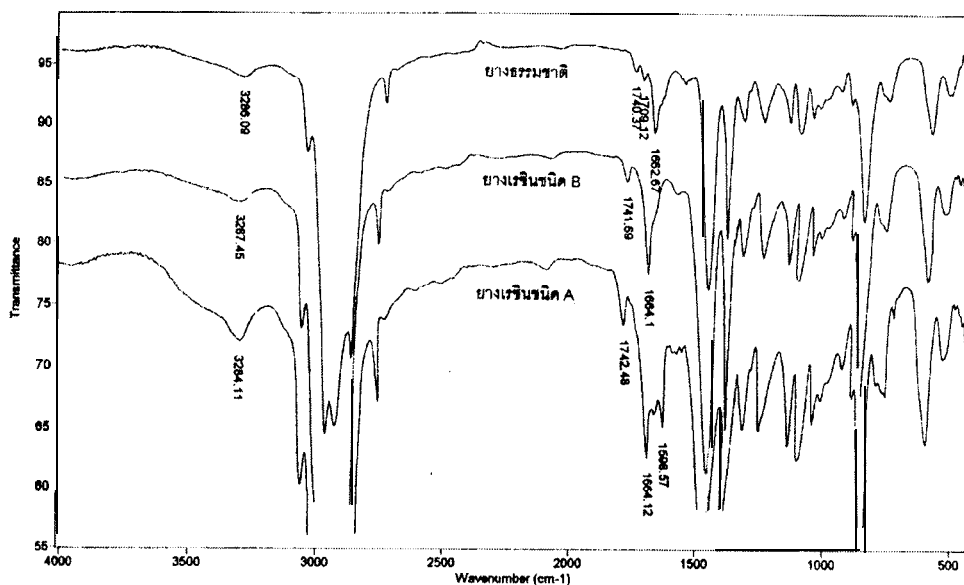


รูปที่ 2 แสดงขั้นตอนการบำบัดสารละลายโลหะหนักโดยใช้ยางเรซินที่เตรียมได้ และการหาปริมาณโลหะหนักก่อนและหลังการบำบัดด้วย AAS

ผลการทดลองและวิจารณ์

1. การยืนยันโครงสร้างของยางเรซินที่สังเคราะห์ได้โดยใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FT-IR)

ยางเรซินที่เตรียมได้มีลักษณะเป็นชิ้นบางขนาดเล็กมาก มีความกว้างและยาวประมาณ 2 mm หนา 0.5 mm จากการใช้เทคนิค FT-IR ในการตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีของยางเรซินที่สังเคราะห์ได้ หมู่ฟังก์ชันที่ตรวจพบที่เลขคลื่นต่างๆ นั้น ได้สรุปไว้ในตารางที่ 3 เปรียบเทียบกับยางธรรมชาติที่ไม่ได้ผ่านการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุล รูปที่ 3 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของยางเรซินชนิด A และยางเรซินชนิด B เปรียบเทียบกับยางธรรมชาติที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุล



รูปที่ 3. แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ ยางเรซินชนิด A และยางเรซินชนิด B เปรียบเทียบกัน

จากการใช้เทคนิค FT-IR ในการยืนยันโครงสร้างของยางเรซินที่สังเคราะห์ได้พบว่า สเปกตรัมของยางเรซินสังเคราะห์จะมีพีคที่แตกต่างไปจากพีคที่ปรากฏในสเปกตรัมของยางธรรมชาติ นั่นคือ จะพบพีคของหมู่คาร์บอนิลของเอสเทอร์ที่เลขคลื่น 1742.5 cm^{-1} และ 1741.6 cm^{-1} ในสเปกตรัมของทั้งยางเรซินชนิด A และชนิด B ตามลำดับ ส่วนยางเรซินชนิด B จะพบพีคที่เลขคลื่น 3287.5 cm^{-1} ซึ่งตรงกับเลขคลื่นที่เป็นของหมู่เอมีนที่เติมเข้ามาด้วย นอกจากนี้ในสเปกตรัมของยางเรซินชนิด A จะพบพีคของหมู่ไฮดรอกซิลที่เลขคลื่น 3284.1 cm^{-1} ซึ่งอาจเกิดจากการที่ NaOH ที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติทำปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์ ส่วนปริมาณของหมู่ฟังก์ชันแลกเปลี่ยนไอออนของยางเรซินที่เตรียมได้ทั้งชนิด A และชนิด B คาดว่าน่าจะมีปริมาณเป็นสองเท่าของหมู่ไอพอกซีที่เตรียมได้จากปฏิกิริยาไอพอกซีเดชันเป็นเวลา 5 ชั่วโมง โดยหาได้จากวิธีการไทเทรตดังกล่าว พบว่ามีหมู่ไอพอกซีที่เกิดขึ้นประมาณร้อยละ 20 ของโมล

ตารางที่ 3 แสดงเลขคลื่นและหมู่ฟังก์ชันที่อาจเป็นไปได้ของโครงสร้างโมเลกุลของยางเรซินชนิด A และของยางเรซินชนิด B เปรียบเทียบกับของยางธรรมชาติ

หมู่ฟังก์ชันที่อาจเป็นไปได้	เลขคลื่น (cm^{-1})		
	ยางธรรมชาติ	ยางเรซินชนิด A	ยางเรซินชนิด B
=C-H	3035.8	3035.8	3036.0
C-H, CH_2 , CH_3	2961.8	2960.1	2961.3
C=C	1663.7	1664.1	1664.1
O-H	3286.1*	3284.1	-
C=O ของอัลดีไฮด์	1709.4	-	-
C=O ของเอสเทอร์	1740.6**	1742.5	1741.6
C=O ของเกลือคาร์บอกซิเลต	-	1598.6	-
secondary amine	-	-	3287.5

* เป็น O-H ที่มาจากความชื้นในน้ำยางธรรมชาติ

** เป็น C=O ของกรดไขมัน หรือ กรดไขมันเอสเทอร์ ซึ่งเป็นส่วนที่ไม่ใช่ยางที่มีมากับน้ำยางธรรมชาติ

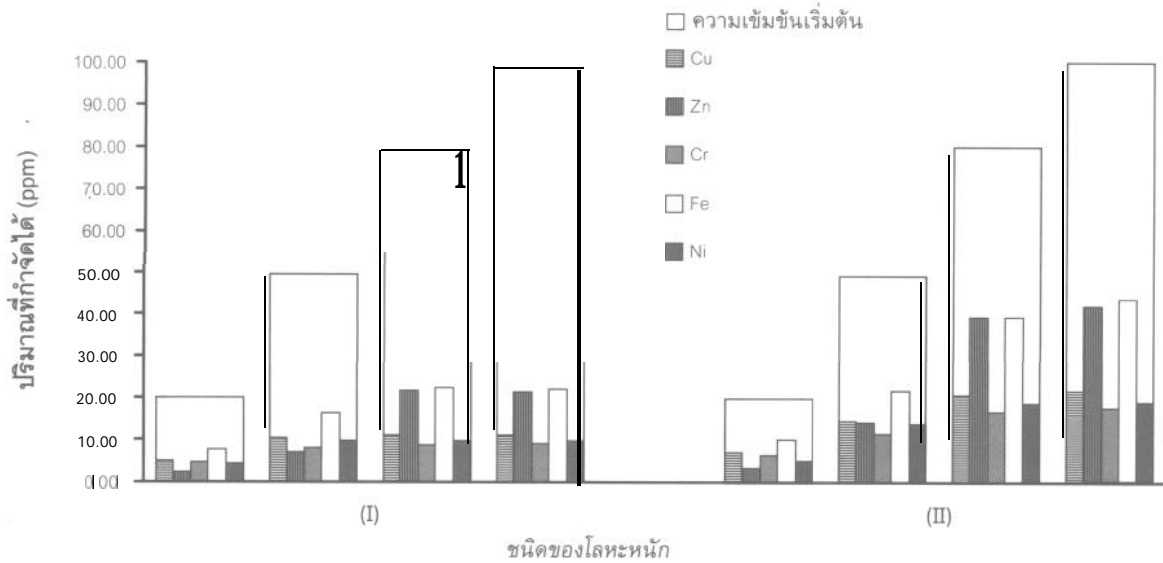
2. ศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานของยางเรซิน

2.1 ชนิดและปริมาณของโลหะหนักที่ยางเรซินชนิด A และชนิด B กำจัดได้

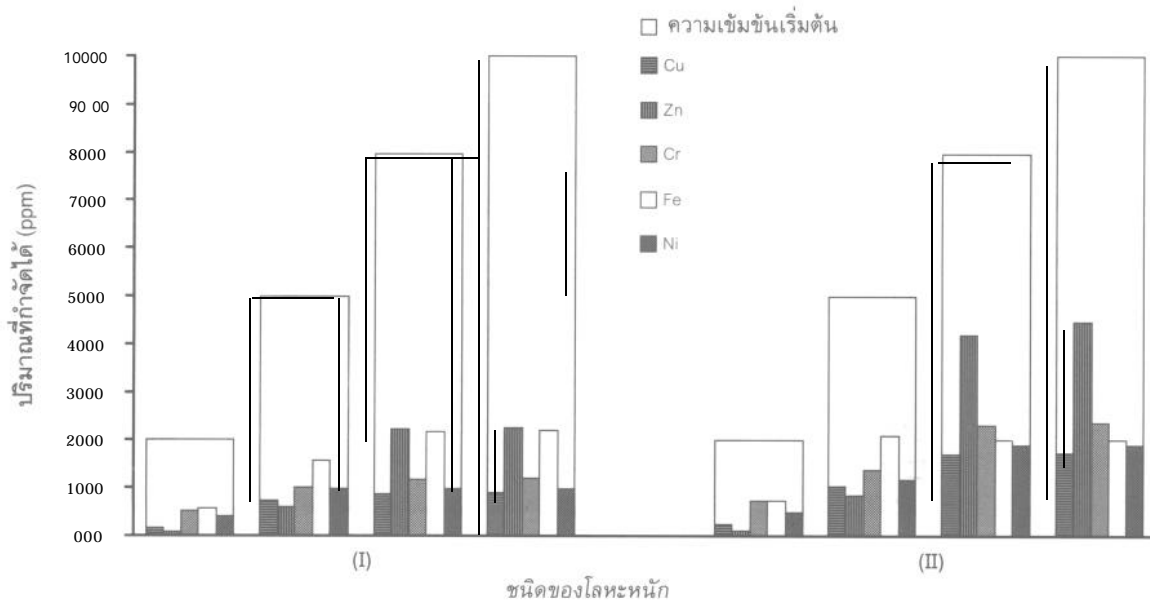
จากการใช้ยางเรซินชนิด A และยางเรซินชนิด B ปริมาณ 1 และ 2 g ในการกำจัดทองแดง สังกะสี โครเมียม เหล็ก และนิกเกิลในสารละลายปริมาณ 100 ml ที่มีค่าความเข้มข้นต่างๆ ตั้งแต่ 20~100 mg/l จะได้ว่า ยางเรซินทั้งชนิด A และ B มีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะได้ใกล้เคียงกัน โดยพบว่าประสิทธิภาพจะขึ้นกับปัจจัยต่อไปนี้คือ

- ชนิดของโลหะหนัก
- ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายมาตรฐานโลหะหนัก
- ปริมาณของยางเรซินที่ใช้

เป็นที่น่าสังเกตว่า ยางเรซินชนิด A สามารถกำจัดเหล็กและทองแดงได้ดีกว่ายางเรซินชนิด B ส่วนยางเรซินชนิด B สามารถกำจัดโครเมียมได้ดีกว่ายางเรซินชนิด A เพียงเล็กน้อยที่ทุกๆ ความเข้มข้น (ดังรูปที่ 4 และ 5)

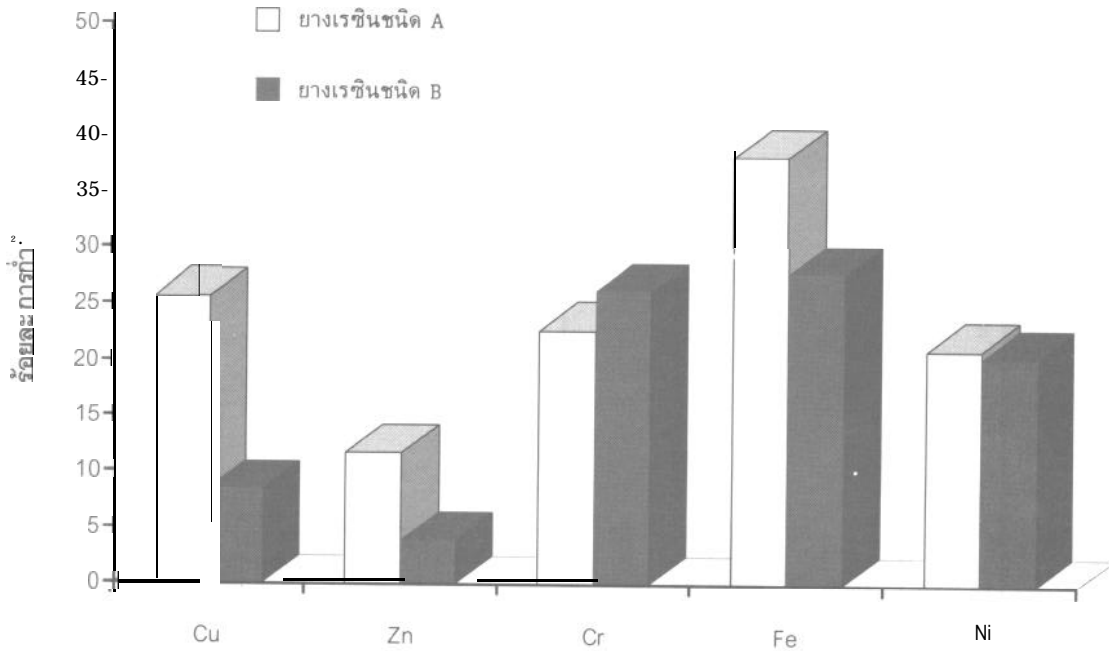


รูปที่ 4 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักของยางเรซินชนิด A (I) ปริมาณ 1 g (II) ปริมาณ 2 g ในสารละลายโลหะหนักมาตรฐาน 100 ml

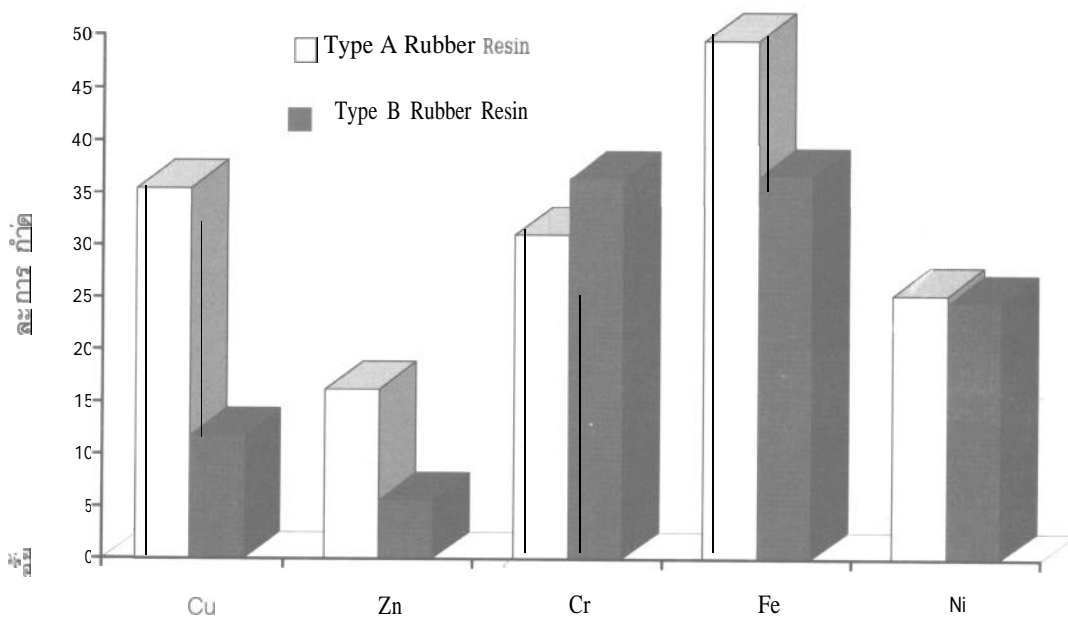


รูปที่ 5 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดปริมาณ จัดโลหะหนักของยางเรซินชนิด B (I) 1 g (II) ปริมาณ 2 g ในสารละลายโลหะหนักมาตรฐาน 100 ml

จากการเปรียบเทียบร้อยละการกำจัดได้ของยางเรซินชนิด A และชนิด B จะได้ว่าร้อยละการกำจัดของยางเรซินทั้งสองมีค่าสูงที่สุดถึงร้อยละ 52 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยดังกล่าวข้างต้น ดังแสดงไว้ในรูปที่ 6 และ 7 ซึ่งเป็นตัวอย่างแสดงค่าร้อยละการกำจัดได้ของยางเรซินชนิด A และ B โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักมาตรฐานเริ่มต้น 20 mg/l



รูปที่ 6 แสดงร้อยละการกำจัดโลหะหนักโดยยางเรซินชนิด A และชนิด B ปริมาณ 1 g สารละลายโลหะหนักความเข้มข้นเริ่มต้น 20 mg/l



รูปที่ 7 แสดงร้อยละการกำจัดโลหะหนักโดยยางเรซินชนิด A และชนิด B ปริมาณ 2 g สารละลายโลหะหนักความเข้มข้นเริ่มต้น 20 mg/l

2.2 การศึกษาประสิทธิภาพและประสิทธิภาพสูงสุดของยางเรซินชนิด A และชนิด B ในการกำจัดโลหะหนัก

ประสิทธิภาพ (q) และประสิทธิภาพสูงสุด (q_{max}) ในการกำจัดโลหะหนักที่มีปนอยู่ในน้ำนั้น หาได้จากผลต่างระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้น กับความเข้มข้นของโลหะหนักหลังการบำบัดด้วยยางเรซินชนิด A และ B ต่อปริมาณยางเรซินที่ใช้ 1 g ดังสมการ

$$q = (C_{in} - C_{out}) / W \quad (1)$$

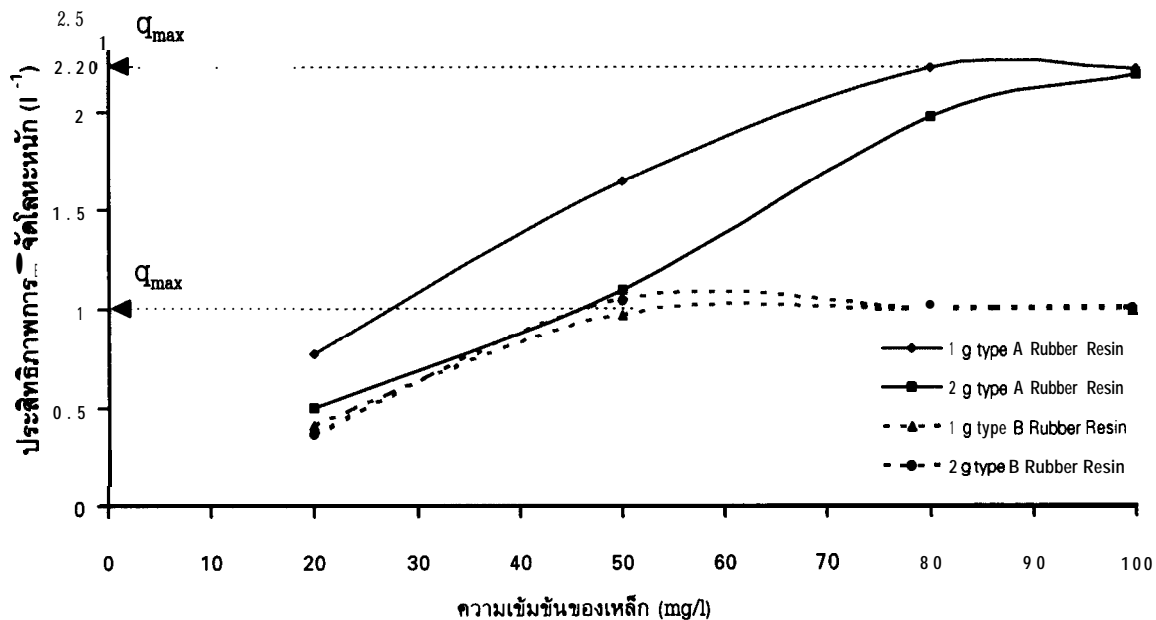
โดย q : ประสิทธิภาพ (l^{-1})

C_{in} : ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะหนัก มาตรฐาน (mg/l)

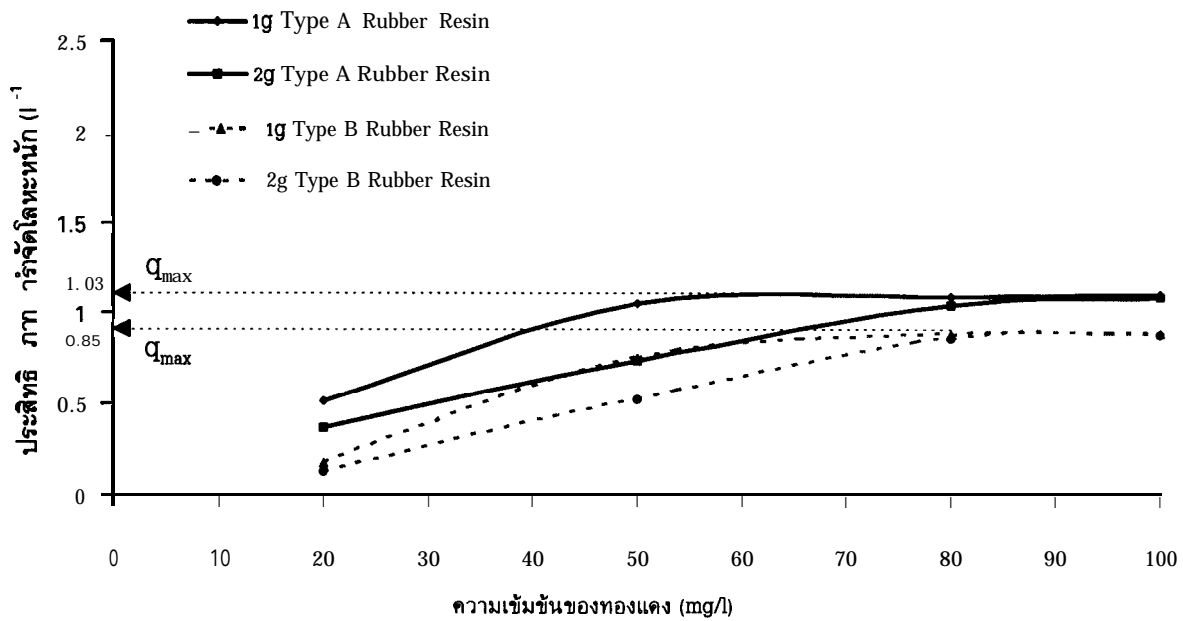
C_{out} : ความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักมาตรฐานหลังการบำบัดด้วยเรซิน (mg/l)

W : น้ำหนักของยางเรซินที่ใช้ (g)

โดยค่า q_{max} สามารถหาได้จากจุดสูงสุดของกราฟแสดงค่าประสิทธิภาพดังแสดงในรูปที่ 8 และ 9 ซึ่งเป็นตัวอย่างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพกับความเข้มข้น (mg/l) ของโลหะหนักที่เป็นเหล็กและทองแดง



รูปที่ 8 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักเหล็กโดยยางเรซินชนิด A และชนิด B ที่ปริมาณ 1 g และ 2 g



รูปที่ 9 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักของทองแดงโดยยางเรซินชนิด A และชนิด B ที่ปริมาณ 1 g และ 2 g

ตารางที่ 4 สรุปค่าประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดโลหะหนักของยางเรซินชนิด A และชนิด B

ชนิดของโลหะหนัก	q_{max} (l^{-1})	
	ยางเรซินชนิด A	ยางเรซินชนิด B
ทองแดง	1.03	0.85
สังกะสี	2.16	2.19
โครเมียม	0.75	1.15
เหล็ก	2.25	1.00
นิกเกิล	0.94	0.96

ค่าประสิทธิภาพในการกำจัดจะเพิ่มขึ้นและในที่สุดคงที่ เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะหนักมาตรฐานเพิ่มขึ้นในช่วง 20~100 mg/l ทั้งนี้ไม่ว่าจะใช้ปริมาณยางเรซิน 1 g หรือ 2 g ได้ผลที่มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน นอกจากนี้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดของทั้งยางเรซิน A และ B นั้นพบว่าอยู่ในช่วง 0.9~2.3 l^{-1} ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะหนักที่ถูกบำบัด ค่าประสิทธิภาพในการกำจัดสูงสุดของยางเรซินชนิด A ที่ใช้ในปริมาณ 1 หรือ 2 g หรือแม้แต่ของชนิด B ที่ใช้ในปริมาณ 1 หรือ 2 g เป็นค่าเดียวกัน ดังนั้นค่าประสิทธิภาพสูงสุดจึงไม่ขึ้นอยู่กับปริมาณของยางเรซินดังกล่าว แต่อย่างไรก็ตามปริมาณยางเรซินที่ใช้ 1 g มีประสิทธิภาพในการกำจัดดีกว่ายางเรซิน 2 g เนื่องจากค่าประสิทธิภาพนี้คิดต่อปริมาณยางเรซิน 1 g ส่วนของโมเลกุลที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างนั้นมีมากกว่าคือประมาณร้อยละ 80 ของโมล การเพิ่มปริมาณยางเรซินนั้นสัดส่วนปริมาณของโมเลกุลยางที่ไม่มี

หมู่ฟังก์ชันจึงถูกเพิ่มมากกว่าสัดส่วนของโมเลกุลที่มีหมู่ฟังก์ชันแลกเปลี่ยนอออน และส่วนของโมเลกุลที่ไม่มีหมู่ฟังก์ชันนี้อาจจะบดบังอออนที่จะเข้ามาแลกเปลี่ยนกับหมู่ฟังก์ชัน จึงทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดต่ำลง แม้ว่าปริมาณโลหะหนักที่กำจัดได้จะมีมากกว่า (ดูรูปที่ 4 และ 5)

สรุปผลการทดลอง

1. จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างโดยใช้เทคนิค FT-IR พบว่า ยางเรซินที่ได้มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นไปตามกลไกปฏิกิริยาเคมี และไม่มีปฏิกิริยาแทรกซ้อนในการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของน้ำยางธรรมชาติ เนื่องจากไม่มีพีคอื่นนอกเหนือจากพีคที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีดังกล่าวปรากฏอยู่เลย
2. วิธีการเตรียมยางเรซินไม่ยุ่งยาก เนื่องจากสามารถเตรียมได้โดยตรงจากน้ำยางธรรมชาติ
3. การศึกษาประสิทธิภาพของการบำบัดนั้นได้ศึกษาจากโมเลกุลของยางเรซินที่มีหมู่ฟังก์ชันสำหรับแลกเปลี่ยนอออนร้อยละ 20 ของโมล

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษานี้ได้รับการสนับสนุนจากกองทุนพระจอมเกล้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

เอกสารอ้างอิง

1. Durbetaki. A. J., 1956, "Direct Titration of Oxirane Oxygen with Hydrogen Bromide in Acetic Acid", *Analytical Chemistry*, **Vo1.28, No.12**, pp.2000-2001.
2. Hao, O. J., et. al., 1987. "The Removal of Heavy Metals and Ammonium By Natural Glauconite". *Environmental International*, **Vo1.13**, pp.203-212.
3. Huang, C.. et. al., 1996, "Adsorption of Cu (II) and Ni (II) by Pelletized Biopolymer". *Journal of Hazardous Material*, **Vo1.45**, pp.265-277.
4. Lin, C. F., et. al., 1995. "Resource Recovery of Waste Fly Ash: Synthesis of Zeolite-like Materials", *Environmental Science & Technology*, **Vo1.29**, pp.1109-1117.
5. Roberts, A. D.. 1990. "Chemical Modification of Natural Rubber", *Natural Rubber Science and Technology*, Oxford University Press, pp.359-456.
6. Singer, A., et. al., 1995. 'Cation Exchange Properties of Hydrothermally Treated Coal Fly Ash', *Environmental Science & Technology*, **Vo1.29**. pp.1748-1773.
7. Yoshida. K.. et. al., 1994. "Purification of Waste Waters Containing Low Concentrations of Heavy Metals", *Journal of Hazardous Material*, **Vo1.37**, pp.69-76.